**ICS 75.180.20**

**J74**

团 体 标 准

**T/CPI xxx—2025**

加氢站风险评估方法（征求意见稿）

**Method of risk assessment for hydrogen fueling stations**

2023-xx-xx发布 2024-xx-xx实施

中国石油和石油化工设备工业协会 发布

**目 次**

[前 言 1](#_Toc207741874)

[加氢站风险评估方法 2](#_Toc207741875)

[1 范围 2](#_Toc207741876)

[2 规范性引用文件 2](#_Toc207741877)

[3 术语和定义及缩略语 2](#_Toc207741878)

[4 总体要求 6](#_Toc207741879)

[5 加氢站QRA分析 9](#_Toc207741880)

[5.1 通则 9](#_Toc207741881)

[5.2 分析步骤 9](#_Toc207741882)

[5.3 主要步骤及基本要求 10](#_Toc207741883)

[5.4 加氢站QRA分析示例 12](#_Toc207741884)

[6 加氢站HAZOP分析 12](#_Toc207741885)

[6.1 通则 12](#_Toc207741886)

[6.2 分析流程 12](#_Toc207741887)

[6.3 主要步骤及基本要求 13](#_Toc207741888)

[6.4分析结果示例 16](#_Toc207741889)

[7 加氢站LOPA分析 16](#_Toc207741890)

[7.1 通则 16](#_Toc207741891)

[7.2 分析流程 17](#_Toc207741892)

[7.3 主要步骤及基本要求 17](#_Toc207741893)

[7.4 分析结果示例 19](#_Toc207741894)

[8 储氢容器RBD评估 19](#_Toc207741895)

[8.1 通则 19](#_Toc207741896)

[8.2 评估流程 19](#_Toc207741897)

[8.3 失效模式识别 19](#_Toc207741898)

[8.4 风险控制措施 20](#_Toc207741899)

[8.5 评估报告 20](#_Toc207741900)

[9 储氢容器RBI评估 20](#_Toc207741901)

[9.1 通则 20](#_Toc207741902)

[9.2 评估流程 21](#_Toc207741903)

[9.3 前期准备 21](#_Toc207741904)

[9.4 数据收集 22](#_Toc207741905)

[9.5 缺陷识别 22](#_Toc207741906)

[9.6 失效可能性计算 22](#_Toc207741907)

[9.7 失效后果计算 23](#_Toc207741908)

[9.8 风险分级 23](#_Toc207741909)

[9.9 风险管控措施 24](#_Toc207741910)

[9.10 记录和报告 24](#_Toc207741911)

[10 氢气压缩机FMECA分析 24](#_Toc207741912)

[10.1 通则 24](#_Toc207741913)

[10.2 分析流程 25](#_Toc207741914)

[10.3 分析步骤与基本要求 25](#_Toc207741915)

[10.4 评估报告 27](#_Toc207741916)

[11 安全仪表系统SIL评估 28](#_Toc207741917)

[11.1 通则 28](#_Toc207741918)

[11.2 SIL定级 28](#_Toc207741919)

[11.3 SIL验证 29](#_Toc207741920)

[12 管路风险评估 33](#_Toc207741921)

[12.1 通则 33](#_Toc207741922)

[12.2 失效可能性评估 33](#_Toc207741923)

[12.3 失效后果评估 34](#_Toc207741924)

[12.4 风险等级划分 34](#_Toc207741925)

[附录 A](#_Toc207741926)[（资料性）](#_Toc207741927)[加氢站QRA基础数据和算法 35](#_Toc207741928)

[附录 B](#_Toc207741929)[（资料性）](#_Toc207741930)[加氢站HAZOP分析结果示例 50](#_Toc207741931)

[附录 C](#_Toc207741932)[（资料性）](#_Toc207741933)[加氢站LOPA分析基础数据及示例 53](#_Toc207741934)

[附录 D](#_Toc207741935)[（资料性）](#_Toc207741936)[储氢容器失效模式 59](#_Toc207741937)

[附录 E](#_Toc207741938)[（资料性）](#_Toc207741939)[储氢容器缺陷识别 64](#_Toc207741940)

[附录 F](#_Toc207741941)[（资料性）](#_Toc207741942)[储氢容器失效可能性与失效后果计算 69](#_Toc207741943)

[附录 G](#_Toc207741944)[（资料性）](#_Toc207741945)[压缩机FMECA分析基础数据 80](#_Toc207741946)

[附录 H](#_Toc207741947)[（资料性）](#_Toc207741948)[管路失效可能性与后果评估计算 87](#_Toc207741949)

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国石油和石油化工设备工业协会提出并归口。

本文件起草单位：/。

本文件主要起草人：/

加氢站风险评估方法

# 1 范围

**1.1** 本文件规定了加氢站风险评估的总体要求及常用方法的评估流程、评估步骤与基本要求、评估模型算法等，常用方法包括定量风险评估（QRA）、工艺危害与可操作分析（HAZOP）、保护层分析（LOPA）、储氢设备RBD、储氢设备RBI、氢气压缩机FMECA、安全防护系统SIL评估、管路阀门系统风险评估，对部分方法给出了评估示例。

**1.2** 本文件适用于按GB 50516建造的高压储氢加氢站及按GB 50156新建、改建和扩建的高压储氢加油加氢合建站、加气加氢合建站、加油加气加氢合建站的风险评估。

# 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1.1标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则

GB/T 4732.1 压力容器分析设计 第1部分：通用要求

GB/T 7826 系统可靠性分析技术 失效模式和影响分析（FMEA）程序

GB/T 20438（所有部分） 电气/电子/可编程电子安全相关系统的功能安全

GB/T 21109（所有部分） 过程工业领域安全仪表系统的功能安全

GB/T 26610（所有部分） [承压设备系统基于风险的检验实施导则](javascript:void(0))

GB/T 32857 保护层分析(LOPA）应用指南

GB/T 35320 危险与可操作性分析（HAZOP分析）

GB 36894 危险化学品生产装置和储存设施风险基准

GB/T 37243 危险化学品生产装置和储存设施外部安全防护距离确定方法

GB/T 44457 加氢站用储氢压力容器

GB/T 45111 保护层分析(LOPA）、安全完整性等级(SIL）定级和验证质量控制导则

GB 50516 加氢站技术规范

GB 50156 汽车加油加气加氢站技术标准

AQ/T 3046  [化工企业定量风险评价导则](https://www.baidu.com/link?url=9Ca38jmkrKJzD5GF1s64tGfol_tVau6OIj-A23ttTmnr96R-D_FZjGAvmarzlQwrZ73P9eCBAkR0Wv8zGk73-K&wd=&eqid=ae906479001ac1e4000000026816d967)

AQ/T 3054 保护层分析（LOPA）方法应用导则

T/CPI 64001 石油化工设备以可靠性为中心的维修（RCM）应用指南

T/CPI 65001 炼化企业安全仪表系统 安全完整性等级（SIL）评估技术规范

TSG 21 固定式压力容器安全技术规程

ISO 14224 石油、石化产品和天然气工业.设备可靠性和维修数据的采集与交换

# 3 术语和定义及缩略语

**3.1 术语和定义**

下列术语和定义适用于本文件

**3.1.1**

加氢站 **hydrogen fuelling station**

为氢燃料电池汽车或氢气内燃机汽车或氢气天然气混合燃料汽车等的储氢瓶充装氢燃料的专门场所。

注：目前加氢站的类别主要包括加油加氢合建站、加气加氢合建站、加油加气加氢合建站等类别。

**3.1.2**

风险 **risk**

特定危害事件发生的概率和后果的乘积。

**3.1.3**

风险等级 **risk grade**

基于可能性和后果的计算结果根据一定的规则确定的风险的等级。

**3.1.4**

可接受风险**acceptable risk**

在法律法规框架下，责任主体可以接受的风险值。

注：风险接受度取决于风险标准，可接受风险是指风险水平已足够低，风险值符合法律法规的要求，无需进一步采取措施，可直接接受。

**3.1.5**

可容忍风险 **tolerable risk**

根据当前社会发展水平、法律法规及责任主体自身承受能力，在给定的范围内能够接受的风险。

注：可容忍风险的风险水平暂时被允许存在，但需持续监控并尽可能降低；风险超出理想范围，但受技术、成本或时间限制无法立即解决。

**3.1.6**

**不可接受风险 unacceptable risk**

风险等级的最高允许限值。

注：不可接受风险的风险等级超过法律法规、行业标准或组织内部规定的最高允许限值（可容忍风险），可能导致人员伤亡、财产损失、环境破坏或社会动荡，现有技术或管理手段无法将风险降低至可接受或可容忍水平，必须彻底消除风险源或停止相关活动。

**3.1.7**

**风险准则 risk criteria**

评价风险是否可接受以及风险等级的依据。

**3.1.8**

**残余风险 residual risk**

采取降险措施后仍然存在的风险。

**3.1.9**

损伤 **damage**

设备的局部或整体发生的物理、化学结构的破坏。

注：损伤是材料发生的不可逆的物理或化学变化，损伤一般都是不可逆的，维修后设备不能恢复至原有的形貌、状态，承压设备的损伤模式主要包括腐蚀减薄、环境开裂、机械损伤、材质劣化等类别。

**3.1.10**

故障 **fault**

设备或其组件、子系统发生的执行要求功能的能力降低或丧失的现象。

注：故障可分为可修故障、不可修故障，可修故障一般可以维修后排除，排除后设备可以恢复至原有的状态。

**3.1.11**

失效 **failure**

设备发生的执行某一要求功能的能力丧失的现象。

**3.1.12**

事故 **accident**

事故是指在进行生产、生活活动过程中突然发生的、违背人们意志的意外事件，

注：通常会导致人员伤害、死亡、职业病或停工停产、设备设施破坏、环境破坏等‌。这些事件具有突发性和不可预测性，往往由多种因素引起，包括人为错误和偶然因素。‌

**3.1.13**

缺陷 **defect**

设备存在的不满足规定要求的情况。

注：规定要求通常指法规标准、设计、管理体系等方面的要求，损伤，故障、失效、事故可视为是不同类别、不同程度的缺陷。

**3.1.14**

异常 **abnormity**

设备管理过程中发生的不正常情况。

注：异常主要是指违反法律、法规、标准、企业管理制度、操作规程等相关的规定，或者会对设备运行、人员安全造成重大影响的各种突发事件和危机情况，如人为因素、操作不当、管理不善。

**3.1.15**

变更**change**

设备相关的情况发生了变化、从而与原来状态有差异的情况。

注：变更包括工艺、设备、仪表、电气、公用工程、备件、材料、介质、环境条件、生产组织方式和人员、组织机构等方面进行的改变。

**3.1.16**

**危险源 hazard source**

危害的根源。

注：危害发生的根源、来源，主要包括危险的物质、能量。

**3.1.17**

危险 **hazard**

危害可能发生的潜在状态。

注：危险是种潜在的状态，危险出现时，危害尚未发生，但危害发生的概率及其严重程度的乘积已经超出了可接受水平。

**3.1.18**

危险状况 **hazardous situation**

人、财产或环境暴露于一个或多个危险源环境的情况。

**3.1.19**

危险事件 **hazardous event**

人、财产或环境处于危险中，可能导致危害的事件。

**3.1.20**

危害 **harm**

因受损害导致破坏，包括人员伤亡、财产损失、环境破坏或负面社会影响。

注：广义上的危害也可指各类不期望事件的发生。

**3.1.21**

危害事件 **harmful event**

发生了人员伤亡、财产损失、坏境破坏或负面社会影响的事件。

**3.1.22**

危害因素 **harmful factors**

可能造成人员伤亡、财产损失、环境破坏或负面社会影响的因素。

注：包括人的因素、物的因素、管理因素、环境因素。

**3.1.23**

风险评估 **risk assessment**

对潜在危害及其可能性（概率）与后果进行识别、分析、评价、控制的全过程。

注：对工程、系统中存在的危害因素进行识别与分析，分析判断发生危害的可能性与严重程度与是否可容忍，提出相应的对策措施与建议。风险评估既可针对一个特定的对象，如某台设备或其零部件，也可针对某一特定的区域范围，如整个加氢站或加氢站内的某个子区域，还可以针对某一活动过程。

**3.1.24**

风险识别 risk identification

对潜在危害发现、确认、定义、描述的过程。

**3.1.25**

风险分析 risk analysis

分析风险发生的可能性（概率）和后果严重性的过程。

**3.1.26**

风险评价 risk evaluation

将风险分析结果与预设风险标准（如可接受风险等级）对比并确定采取何种防控措施的过程。

**3.1.27**

风险控制 risk control

根据风险评价的结果及加氢站生产运营的实际情况等，采取工程、技术、管理等方面措施，将风险控制在可以接受范围之内的活动。

**3.1.28**

要求时危险失效概率 probability of dangerous failure on demand（PFD）

当受保护设备或受保护设备控制系统发出要求时, 执行规定安全功能的独立保护层的安全不可用性。

**3.1.29**

初始事件 initial event

使事故序列开始扩展所需的失效或错误的最小组合。

注：一般由一个单独的初始原因、多个原因或有使能条件的初始原因组成。有些情况下初始事件也可能是由同一时间发生的两种不同初始原因构成的。

**3.1.30**

独立保护层 independent protection layer（IPL）

能有效地防止场景向不期望的后果发展且与场景的初始事件或其他保护层的行动无关的一种设备、 系统或行动。

注:独立保护层的有效性和独立性可以被审查。独立性表示保护层的执行能力不会受到初始事件或其他保护层失效的影响。

**3.1.31**

风险减少因子 Risk Reduction Factor（RRF）

独立保护层将特定场景原始风险降低的倍数，即原始风险与该保护层单独作用时残余风险之比。

**3.1.32**

尽可能合理降低原则 as low as reasonably practice（ALARP）

在当前的技术条件与合理的费用下，对风险的控制要做到在合理可行的原则下“尽可能的低”。

**3.2 缩略语**

下列缩略语适用于本文件。

ALARP：最低合理可行（As Low As Reasonably Practicable）

BPCS：基本过程控制系统(Basic Process Control System）

DC：诊断覆盖率（diagnostic coverage）

FFS：合于使用评价（Fitness for Service）

FMECA：[故障模式](https://baike.baidu.com/item/%E6%95%85%E9%9A%9C%E6%A8%A1%E5%BC%8F/5316132?fromModule=lemma_inlink)、影响和危害性分析（Failure Mode, Effects and Criticality Analysis）

ETA：事件树分析法（Event Tree Analysis）

FTA：故障树分析（Fault Tree Analysis）

FAT：工厂验收测试（factory acceptance testing）

HFT：硬件故障裕度（hardware fault tolerance）

HAZOP：危险和可操作性分析（Hazard and Operability Analysis）

IOWs：完整性操作窗口（Integrity Operate Windows）

LOPA：保护层分析（Layer of Protection Analysis）

MOC：变更管理（management of change）

MTTR：平均恢复时间（mean time to restoration）

PFD：要求时的失效概率（probability of dangerous failure on demand）

PFH：每小时危险失效概率（probability of a dangerous failure per hour）

PHA：工艺危害分析（Process Hazard Analysis）

QRA：定量风险评价（Quantitative Risk Analysis）

RBD：基于风险的设计（Risk-based Design）

RBI：基于风险的检验（Risk-based Inspection）

RCA：根本原因分析（Root Cause Analysis）

RCM：以可靠性为中心的维修（Reliability-centered Maintenance）

SAT：现场验收测试（site acceptance test）

SFF：安全失效分数（safe failure faction）

SIF：安全仪表功能（Safety Instrument Function）

SIL：安全完整性等级评估（Safety Integrity Level）

# 4 总体要求

**4.1** 加氢站风险评估贯穿其全生命周期，在加氢站的立项、建造、运营及设备的设计、制造、安装、修理、改造等各阶段、各环节，应根据实际需要开展风险评估。

**4.2** 加氢站风险评估应符合国家相关法律、法规、安全技术规范、强制性标准的规定。

**4.3** 加氢站风险评估应该根据评估环节、评估对象、评估目的等选用适用的方法，以下是不同时机开展风险评估的基本要求：

a）在加氢站立项选址阶段，需要针对加氢站整体进行风险评估，通过风险评估确定外部安全距离等，一般采用QRA方法；

b）在加氢站工艺设计阶段宜开展风险评估，识别评估工艺流程、设备参数、操作条件中的危险，提出优化改进措施，确保风险被降低至可接受水平，可采用HAZOP、LOPA相结合的方法；

c）针对储氢设备，在设计阶段应开展RBD分析，识别设备失效模式，并提出相应的防范措施；在使用阶段宜定期开展RBI分析，优化检维修策略；在设计阶段亦可开展RBI分析，提出检维修策略，为编制使用说明书提供依据；

d）针对压缩机，在设计阶段宜开展风险评估，可采用FMECA方法，识别潜在的故障模式，评估其影响及危害性，并提出优化改进措施，可采用HAZOP方法，识别工艺与操作中的危害，优化安全防护系统设计；在使用阶段，宜定期开展FMECA分析，优化预防性维修策略；

e）针对安全防护系统，宜开展功能安全评估，确保其具有足够的安全功能和安全完整性等级，保证加氢站系统或设备在发生故障、失效等事件时仍能维持安全状态。可采用HAZOP、LOPA相结合的方法，确定安全防护系统的各级防护层所需的降险等级。在设计制造阶段，可采用SIL评估方法，对仪表联锁保护系统进行SIL定级、验证，在使用阶段，定期对仪表联锁保护系统进行SIL再评估，确保仪表联锁保护系统在全生命周期中满足要求。

f）对管路系统，宜通过风险评估对不同阀门、不同管段进行风险等级划分，然后根据风险等级采取相应的工程、技术、管理措施；

**4.4** 加氢站使用过程中宜至少每三年开展一次全面的风险评估，评估内容包括：

a）加氢站整体的HAZOP和LOPA分析；

b）储氢设备的RBI分析；

c）氢气压缩机的FMECA分析；

d）安全防护系统的功能安全评估；

e）对管路系统风险分级。

**4.5** 在运行过程中发生以下变更情况，导致加氢站的风险特征发生改变时，应按要求对加氢站重新开展风险评估；

a）对加氢站进行改建或扩建时，宜按照第4.2小节的要求开展一次全面的风险评估；

b）工艺或设备变更时。如更换储氢设备、压缩机、阀门等关键设备，或调整加注压力、流量等工艺参数，应重新开展风险评估，重点评估新设备兼容性，操作参数变化是否引发泄漏或爆炸等风险；

e）加氢站发生事故或设备发生故障后。如发生氢气泄漏、火灾、爆炸或设备故障，应重新评估风险，分析事故原因，改进应急预案和防护措施；

f）法律法规或标准更新。新发布的法规标准可能要求加氢站调整现有设施或操作流程，需重新评估合规性；

g）周边环境变化。如加氢站附近新建学校、居民区、商场等人员密集场所，应重新开展风险评估，重点评估安全距离、应急疏散方案等；

h）极端天气或自然灾害。如发生地震、洪水、台风等，可能破坏设备或管道，应评估抗灾能力，制定加固和应急响应措施；

i）安全检查中发现重大隐患。如发现储氢罐焊缝开裂、安全阀失效、气体探测器故障等，应重新开展风险评估，重点评估风险等级并制定整改方案；

j）应急演练后发现问题。如演练中暴露预案漏洞，需通过风险评估优化应急流程；

k）新技术或新材料应用。如引入采用新的加注技术，新的数字化监控系统，应重新评估其潜在风险及与传统系统的兼容性。

**4.6** 风险评估的要素包括风险识别、风险分析、风险评价、风险控制。

a）风险识别。风险识别是通过系统性方法，揭示潜在风险的本质来源、触发条件及其与目标的关联性，具体操作时，一般是将加氢站拆解为多个子系统，然后逐层识别出危害、危险、危险源、危害因素。加氢站的风险识别应聚焦于氢气的易燃、易爆、高压的特性，面向卸载、压缩、储存、加注作业、设备维护等关键工艺环节，主要方法有ETA，FTA、RCA等。

b）风险分析。风险分析是对风险发生的可能性（概率）和后果严重性进行分析计算的过程，分为定性分析、定量分析、半定量分析，定性分析是通过主观判断和非数值化分析风险的方法，是基于专家经验、历史数据和逻辑推理分析风险的概率和后果。定量风险分析是通过数学模型、统计方法和数据工具对风险的发生概率及潜在影响进行量化评估的方法。半定量方法是介于定性方法和定量方法之间的方法。

c）风险评价。风险评价是在风险识别与分析的基础上，对风险进行分类、分级，并判定风险的可接受性、可容忍性与优先级，目标是确定哪些风险需要处理、哪些可以接受，为制定应对策略提供依据，并指导资源分配。风险评价的基本原理是将风险分析的结果与风险准则进行对比。

d）风险控制。风险控制是在风险识别、分析和评价的基础上，采取针对性措施降低风险发生概率或减轻其负面影响的过程。其目标是确保风险处于组织可接受范围内，保障目标顺利实现。风险控制的具体措施包括工程技术措施、本质安全设计、失效防控措施（如泄漏防控措施、爆炸防控措施等）、管理措施、操作规范、人员培训、应急准备。

**4.7**  风险评估应符合以下准则：

4.7.1 加氢站在进行量化风险评估前，应确定风险可接受标准值。确定风险可接受标准时应遵循如下原则：

a）风险可接受标准应具有一定的社会认同基础，能够被政府和公众所接受；

b） 重大危害对员工个人或公众成员造成的风险不应显著增加人们日常生活中已经存在的风险；

c） 风险可接受标准应和社会经济发展水平相适应，并适时更新；

d） 应考虑企业内部和企业外部个体风险的差异。

4.7.2 风险可接受标准值

加氢站属于危化品储存设施，其风险可接受标准应满足GB 36894的要求，风险应考虑个人风险和社会风险。

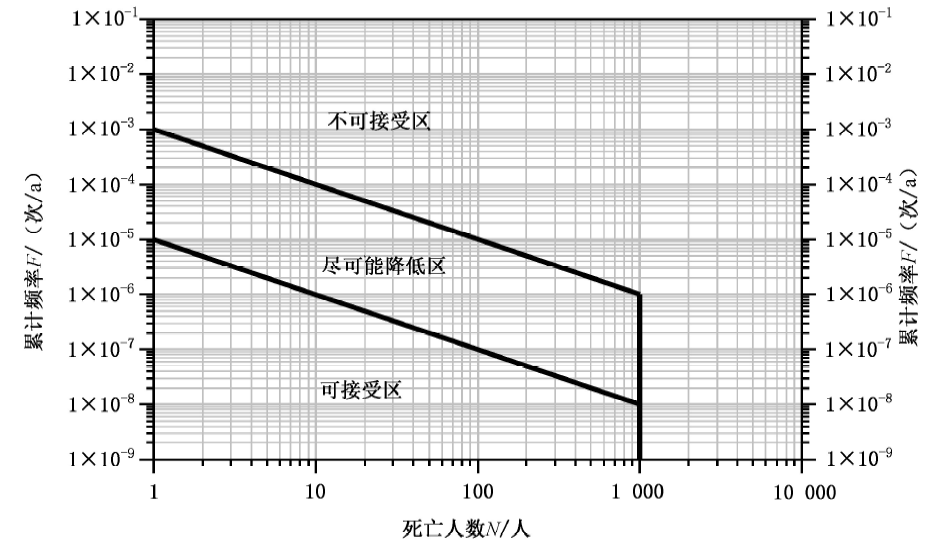
a）个人风险是假设人员长期处于某一场所且无保护,由于发生危险化学品事故而导致的死亡频率,单位为次每年。个人风险应在标准比例尺地理图上以等值线的形式给出，可接受的风险标准值如表4.1所示。

表4.1 我国个人可接受风险标准值

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 防护目标 | 个人可接受风险标准（概率值） | |
| 新建装置（每年）≤ | 在役装置（每年）≤ |
| 低密度人员场所(人数<30人):单个或少量暴露人员。 | 1×10-5 | 3×10-5 |
| 居住类高密度场所(30 人≤人数<100 人):居民区、宾馆、变假村等。  公众聚集类高密度场所(30 人s人数<100 人):办公场所、商场、饭店、娱乐场所等。 | 3×10-6 | 1×10-5 |
| 高敏感场所:学校、医院、幼儿园、养老院、监狱等。重要目标:军事禁区、军事管理区、文物保护单位等。特殊高密度场所(人数≥00人):大型体育场、交通枢纽、露天市场、居住区、宾馆、度假村、办公场所、商场、饭店、娱乐场所。 | 3×10-7 | 3×10-6 |

注：引自GB 36894

b）社会风险是群体(包括周边企业员工和公众)在危险区域承受某种程度伤害的频发程度,通常表示为大于或等于N人死亡的事故累计频率(F),以累计频率和死亡人数之间关系的曲线图(F-N曲线)来表示。社会风险应绘制F-N曲线，可接受的风险标准值如图4.1所示。



注：引自GB 36894

图4.1 社会风险可接受标准值

# 5 加氢站QRA分析

## 5.1 通则

**5.1.1** 定量风险评价（QRA）是采用定量化的概率风险值（如个人风险和社会风险）对系统的危险性进行描述的风险评价方法。在加氢站设计、运营阶段，可用QRA方法分析和确定氢气泄漏引起的火灾、爆炸等安全问题。

**5.1.2** 定量风险评价的目标是判断系统当前的安全状态，确定加氢站与周边防护目标之间的最小安全间距，然后再通过采取降低风险的措施，将风险控制到可接受水平，确保个人风险和社会风险符合国家标准（GB 36894）的可接受基准。

**5.1.3** 加氢站QRA分析的内容一般包括：

a）个人风险。一般考虑以下三方面：

* 加氢站内部员工面临的风险，也称为职业风险；
* 加氢的顾客如司机和乘客等面临的风险；
* 加氢站周边道路行人或居民等面临的风险，也称为站外风险。

b）社会风险。社会风险是对个人风险的补充，指在个人风险确定的基础上，考虑到危险源周边区域的人口密度，以免发生群死群伤事故的概率超过社会公众的可接受范围。通常用F-N曲线表示。

**5.1.4** 加氢站QRA分析应符合GB/T 37243、AQ/T 3046标准的基本要求。

## 5.2 分析步骤

加氢站QRA分析应按图5-1所示的步骤。



图5-1 加氢站定量风险评价（QRA）流程图

## 5.3 主要步骤及基本要求

**5.3.1资料数据收集**

a）基础数据收集。应根据评价的目标和深度确定所搜集的资料数据，包括但不限于：

* 危害信息；
* 设计和运行数据；
* 减缓控制系统；
* 管理系统；
* 自然条件；
* 历史数据；
* 人口数据等。

b）人口数据统计。人口数据的收集应根据加氢站事故状态下可能影响的最大范围，确定人口统计的地域边界。

c）点火源数据统计。应对加氢站的工艺条件、装置设施，平面布置等进行分析，并结合现场调研，根据事故状态下可能影响的最大范围辨识潜在点火源，统计点火源的名称、种类、方位、数目以及出现的概率等要素。

**5.3.2 危险识别和泄漏场景识别**

a）按照GB/T 37243第6.4小节的规定对加氢站进行系统的危险源辨识，识别可能对人造成急性伤亡或对物造成突发性损坏的危险，确定其存在的部位、方式及发生作用的途径和变化规律。危险源辨识可采用HAZOP、LOPA、FTA、ETA等系统化方法。

b）对泄漏场景的设定应同时满足以下两个条件：

* 泄漏发生概率≥10-8次/年；
* 至少导致1%的致死概率。

c）泄漏场景根据泄漏孔径大小可分为完全破裂、孔泄漏两大类，各泄漏孔径的取值范围和代表值可按照附录A.1选取。

**5.3.3事故概率分析**

a）泄漏频率可按照附录A中表A-3~A-7的规定选取，同时应考虑以下事项：

* 使用工业失效数据库时，应确保泄漏场景与失效数据场景的基本假设相一致；
* 使用加氢站历史数据时，应保证该历史数据充足并具有统计意义；
* 应谨慎使用供应商提供的数据。

b）点火概率按以下原则选取：

* 立即点火概率：数据选取可以参照附录A中表A-8确定。
* 延迟点火概率：结合点火源类型及存在概率确定，可根据式(5.2)计算：

(5.2)

式中：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *P*(*t*) | — | 0~*t* 时间内发生点火的概率； |
| *P*present | — | 点火源存在的概率； |
| *ω* | — | 点火源的点火概率，与点火源的特性有关，s-1。*ω*可根据点火源在某一时间内的点火概率计算得出，对加氢站常见点火源在1min内的点火概率见附录A中表A-9； |
| *t* | — | 时间，s |

c）事故链概率，可以通过事件树分析（ETA）、故障树分析（FTA）、动态贝叶斯网络(Bow-tie)等评估事故发展的可能性。

**5.3.4 事故后果分析**

**5.3.4.1** 氢气泄漏

氢气泄漏计算在选择源项和气云扩散模型时，应考虑泄漏氢的物态、温度、压力等特性。氢气泄漏的具体计算方法参见附录A.2.1和A.2.2节。

**5.3.4.2** 氢气扩散

计算氢气的扩散，应至少考虑射流和大气扩散两种情况。建筑物内或撬装设备壳体内的容器、换热器、压缩机和管道等设备泄漏，应考虑建筑物、撬装外壳对扩散的影响。计算扩散时，天气条件宜考虑不同的大气稳定度和风速。当使用Pasquill-Gifford扩散模型时时，大气状况可以根据六种不同的稳定度等级进行分类，其中对于白天或夜晚多云的情况以及日落前或日出后数小时的任何天气状况，无论风速多大，都应使用中性稳定等级D。氢气扩散的具体计算方法见附录A.2.3节。

**5.3.4.5** 火灾和爆炸

对于氢泄漏（释放）应考虑发生火球、喷射火、蒸气云爆炸及闪火等火灾、爆炸场景。具体场景与氢的特性、储存参数、泄漏类型、点火类型等有关，可采用事件树方法确定氢释放后，各种事件发生的类型及概率。氢释放后的事件树参见GB/T 37243附录F中的图F.1~图F.4。氢泄漏后立即点火的概率参见附录表A-8；延迟点火的点火概率按照附录表A-9规定计算；喷射火的计算方法参见附录A.2.4；氢气云爆炸产生的冲击波超压，计算方法参见附录C.2.5。

**5.3.4.6** 暴露影响

暴露在氢气泄漏造成的热辐射和超压的事故场景下，死亡概率的计算按照GB/T 37243中6.6.7节规定执行。

**5.3.5 定量风险计算**

定量风险计算包括个人风险和社会风险两方面。个人风险可用绘制在标准比例尺地理图上的个人风险等值线表示，个人风险等值线对应的死亡概率不宜小于10-8次/年。社会风险可用F-N曲线(frequency-number curve)（图4.1）表示。个人风险和社会风险的计算方法按照附录A.2.7节规定执行。

## 5.4 加氢站QRA分析示例

加氢站QRA分析示例见附录A.3。

# 6 加氢站HAZOP分析

## 6.1 通则

**6.1.1** 采用HAZOP方法，可以分析发现加氢站系统中的漏洞，找出可能引起危险（包括泄漏、爆炸、火灾等）和操作异常（设备故障、失效等）的潜在问题，提出改进措施，为改进工艺流程、设备设计或控制系统与完善安全防护系统的安全功能提供指导和依据。

**6.1.2** HAZOP分析的原理是：先将工艺系统按一定的规则划分为若干子系统（节点），然后由分析团队通过召开会议进行“头脑风暴”式讨论，借助引导词+相关参数，对每一节点进行“遍历”，找出偏离设计意图的事故剧情。

**6.1.3** 在新建加氢站完成第1版的P&ID图纸时，宜开展HAZOP分析,通过HAZOP分析优化工艺流程和安全防护系统的设计。在加氢站投入运行后，在初期阶段6-12个月内，由于可能发生较多的变更，宜开展1次HAZOP分析，后面当工艺系统发生变更后，宜对变更的部分进行HAZOP分析。

**6.1.4** 加氢站HAZOP分析应满足GB/T 35320、AQ/T 3049的基本要求。

## 6.2 分析流程

HAZOP分析可按如图6-1所示的流程实施。



图6-1 HAZOP分析流程

## 6.3 主要步骤及基本要求

**6.3.1 组建分析团队**

HAZOP应组建分析团队（分析小组），分析团队（分析小组）的知识、经验和协作是HAZOP的关键所在，团队的专业性、协作性和系统性直接影响分析结果的全面性和可靠性。HAZOP分析团队应由业主与服务商（包括建造、运营、设计等方面）的人员组成，一般应包括以下成员：

a）分析组长；

b）记录员；

c）设计工程师；

d）工艺工程师；

e）设备工程师，包括动、静、电、仪方面的专家；

f）设备操作维护专家/代表；

g）用户（建设单位或运营单位的人员）；

h）其它（根据需要参与）。

**6.3.2 分析前准备**

HAZOP分析应做好准备工作，准备工作的内容主要包括：

a）制定分析计划和进度。具体内容包括：

* 分析目标和范围；
* 分析成员名单；
* 详细的技术资料与参考资料的清单；
* 会务安排（含会议日期、次数和地点等）；
* 要求的记录格式；
* 分析中可能适用的模板。

b）收集分析需要的技术资料，包括但不限于：

* 加氢站建设地自然条件；
* 氢气的危险化学品安全技术说明书数据；
* 工艺设计资料。主要包括：

——工艺流程图(PFD）；

——管道及仪表流程图(P&ID）；

——工艺流程说明；

——操作规程；

——界区条件表；

——平面布置图；

——爆炸危险区域划分图；

——控制系统联锁逻辑图及说明文件；

——消防系统的设计依据及说明；

——公用工程系统的设计依据及说明；

——工艺参数的安全操作范围；

——对设计所依据的各项标准或引用资料的说明；

——加氢站事故案例；

——其他相关的工艺技术信息资料。

* 设备设计资料。包括：

——设备和管道数据表；

——安全阀等安全附件的规格书和相关文件；

——自控系统的联锁配置资料或相关的说明文件；

——安全设施设计资料；

——其他相关资料；

* 操作运行及检验检测资料。包括：

——相关分析评价的报告；

——相关的技改、技措等变更记录和检维修记录；

——加氢站事故记录及事故调查报告；

——加氢站现行操作规程和规章制度；

——其他的资料。

**6.3.3 开展分析**

HAZOP按以下步骤进行分析：

a）确定引导词和偏离

对引导词应建立清单，引导词应完整、适宜，不能太具体，也不能太笼统，太具体和专业可能限制思路和讨论，但过于笼统则可能无法精确聚焦分析要点。HAZOP分享你常用的引导词和偏离见表6-1。

表6-1 HAZOP分析常用引导词和偏离

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 偏离类型 | 否定 | 数量改变 | 性质改变 | 替代 | 时间 | 顺序或步序 |
| 引导词 | 负  无 | 多  少 | 伴随  部分 | 反向  异常 | 早  晚 | 前  后 |

b）划分节点

通过节点划分，对复杂或高危险的系统划分成较小的节点，对简单或低危险的系统分成较大的节点，可以提高分析效率，减少分析漏洞。节点划分的范围要适度，不能太大，也不能太小。对于连续的工艺操作过程，可按工艺单元进行节点划分；对于间歇性的操作过程，可按操作步骤进行节点划分。加氢站可按以下两种方式进行节点划分：

* 可以按照管线和设备进行划分，即把每一根管线作为节点，把每一个设备也作为节点，这样划分的优点是得出的HAZOP 分析结果非常详细，缺点是可能导致节点较多，从而使得HAZOP 报告的可读性较差，原因、后果、措施、建议等问题的讨论经常在节点外。
* 可按照装置的工艺功能进行划分，即以潜在危险源的类别为主划分节点，将具有共同危险性及有害因素的装置划分为同一个单元节点。根据加氢站的构成及流程，一般可以将其划分为氢气卸车系统、氢气增压系统、氢气储存系统、氢气加注系统。

c）设计意图描述

对分析的系统和节点的设计意图进行准确、全面、完整、充分的描述，是开展HAZOP分析的先决条件，设计意图可以通过要素和参数来描述，要素体现节点的基本特性，包括处理的介质、开展的活动、所使用的设备等，参数是要素定量或定性的性质。加氢站主要子系统的设计意图描述示例如下：

* 氢气卸车系统。设计意图是：将氢气运输车辆卸载的氢气输送到氢气压缩系统，输送的流量、出口压力不得超过压缩机的允许值，氢气不得反向流动；
* 氢气增压系统。设计意图是：将卸气柱输送来的氢气进行压缩，进出口压力、温度、流量不得超过允许值；
* 氢气储存系统。设计意图是：将压缩机增压后的氢气储存起来，储存压力不得超过允许值，需要时输送至加注系统；
* 氢气加注系统。设计意图是：将氢气储存系统的氢气向氢燃料电池汽车加注，加注的压力、温度、流量不得超出允许值。

d）偏离分析

针对划分的节点，将其要素/参数与引导词组合起来，形成矩阵，综合分析各种可能的事故剧情。参数和要素应覆盖设计意图所有相关方面，引导词应能引导出所有的偏离，以便系统、全面的识别出各种异常工况。

e）后果识别

分析确定了所有的偏离后，下一步是对每一偏离造成的后果进行分析，可能的后果包括爆炸、火灾、设备损坏、停车、负面社会影响等。后果分析应忽略现有的安全措施，即假设任何已有的安全防护措施以及管理措施都失效，从而保证能分析出的是偏离所导致的最终不利后果，而非中间后果，例如不宜将“安全阀动作”、“压缩机停机”作为后果。后果应是对人员伤亡、财产损失、环境影响等影响的详细描述。

f）原因分析

对偏离产生的原因进行分析，可根据实际情况及实际需要分析直接原因、根原因、起作用的原因、初始原因。

g）现有安全措施分析

针对某一事故剧情，分析其设计已经确定采用或已经实际投用或执行的措施。

h）风险等级评估

评估风险等级是HAZOP分析的重要内容，HAZOP分析需要判断一个危险剧情的现有安全措施是否将风险降低到可接受水平，如果风险处于可接受的范围，则HAZOP对该危险剧情的分析终止，如果风险超出可接受范围，需要提出新的建议措施。HAZOP的风险评估一般是定性的判断，量化的判断通常需要后续的LOPA分析得出。

i）提出建议措施

对于某一危险剧情的风险不可接受的，分析团队应提出建议措施，建议措施可以是改进设计、操作规程、增加或减少安全防护措施，或进一步进行分析研究，建议措施应是有效的、可度量的、可以接受的。

**6.3.4 分析记录和报告**

HAZOP过程应文档化和过程可追溯，HAZOP分析组长负责确保为每一个会议生成合适的记录，记录员宜具备在被分析领域的技术知识和语言能力，以准确领会被关注的要点细节，对分析结果应形成报告。

a）记录

记录员负责对每一次会议进行记录，对分析讨论过程提炼出恰当的结果，记录所有重要信息。记录通常采用表格形式，表格格式应在会前由分析组长提出。

b）报告

HAZOP分析报告一般包括以下部分：

* 封面。包括编制人、编制日期、版次等；
* 目录；
* 正文。至少包括以下内容：

——工艺描述；

——项目概述；

——HAZOP分析程序；

——HAZOP分析团队人员信息；

——分析范围；

——分析目标和节点划分；

——风险可接受标准；

——总体性建议；

——建议措施说明。

* 附件。至少包括：带有节点划分的P&ID、建议措施汇总表、技术资料清单、分析记录表。

## 6.4分析结果示例

附录B给出了某加氢站HAZOP分析结果示例。

# 7 加氢站LOPA分析

## 7.1 通则

**7.1.1** LOPA分析是在定性危害分析的基础上，进一步评估保护层的有效性，并进行风险决策，LOPA一般都和HAZOP配合使用，是在HAZOP分析之后进行补充分析。

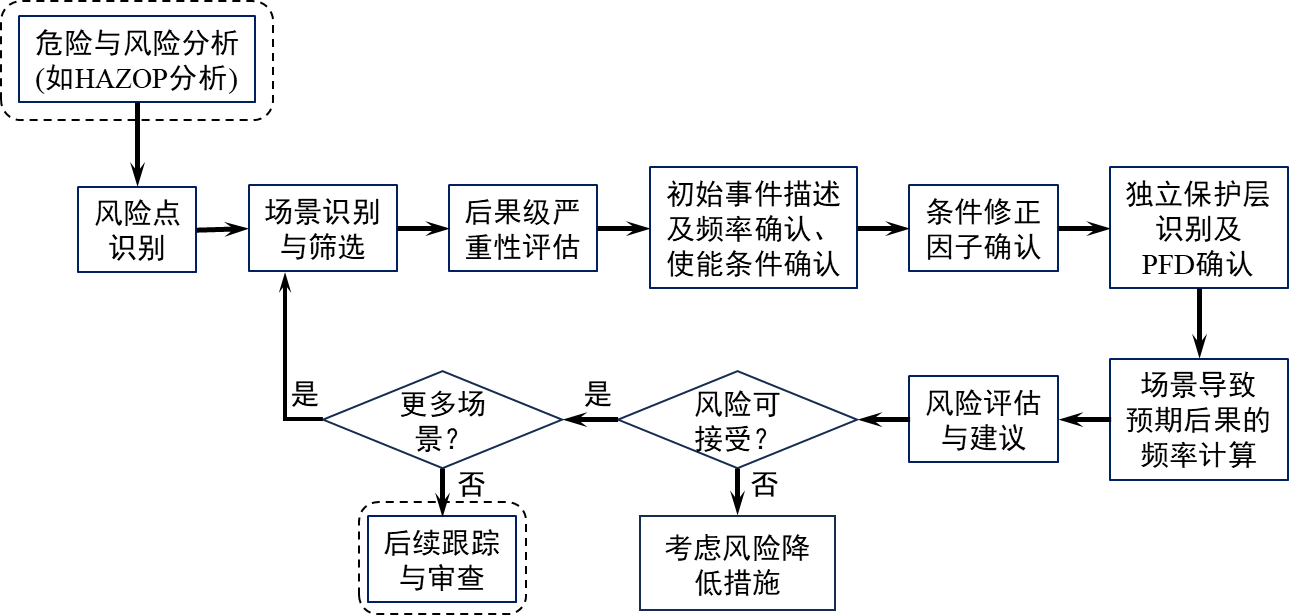
**7.1.2** LOPA分析的目标是对危险场景（事故剧情）做进一步的准确表述，识别出独立保护层，确定危险场景的频率和后果严重度，评估现有的保护层是否足够将风险降低到可接受的水平，如果不能，确定需要增加的的保护层及保护层的SIL等级（针对安全仪表系统），评估增加新的保护层后风险可以降低到什么水平，从而最终达到优化安全措施，提升系统安全性、可靠性水平的目的。LOPA分析还可以识别过程中安全关键设备及操作人员关键安全行为和关键安全响应，为分级分类管理提供依据。

**7.1.3** LOPA分析可以利用HAZOP分析结果以及采用AQ/T 3034中的工艺危害分析方法进行危害分析的结果、事故分析结果、工艺变更分析、其他危害分析结果等，这种情况下开展LOPA分析，应首先对定性危害分析的结果进行审核。

**7.1.4** 加氢站 LOPA分析应符合GB/T 32857、GB/T 45111、AQ/T 3054等标准的基本要求。

## 7.2 分析流程

LOPA分析可按如图7.1所示的流程实施。



注：图中虚线框所含内容不在本节文件范围内

图7.1 LOPA工分析流程

## 7.3 主要步骤及基本要求

**7.3.1 组建分析团队**

LOPA分析团队（分析小组）可与HAZOP分析共用一个团队。也可重新组建团队开展LOPA分析，分析团队由分析组长、分析秘书和分析成员组成，小组成员宜为6人~9人，其中运行单位和设计单位宜4人~6人，分析单位宜2人~3人，对人员的专业、从业经验、资质要求参照GB/T 45111的规定。

**7.3.2 分析前准备**

LOPA分析主要是通过会议讨论的方式开展工作，需要做好的准备工作主要包括做好会议计划、收集相关资料、制定风险评价准则等。

a）资料收集

需要收集的资料主要包括：

* 危险与风险分析报告(如HAZOP报告）；
* 工艺流程图(PFD）、P&.ID；
* 设计/工艺说明；
* 安全联锁功能列表或功能说明；
* 安全联锁逻辑因果图；
* 管道及材料数据表（压力等级等相关参数）；
* 设备数据表（储氢容器、压缩机、加氢机、安全阀等的基础数据，包括设计参数）；
* 设备结构图；
* 设备布置图；
* 操作规程；
* 检维修规程；
* 加氢站事故分析报告；
* 工艺变更评估报告；
* 其它需要的资料。

b）制定风险评价准则

LOPA分析需要评估确定危险场景的频率和后果严重度，并评价其是否可接受（或容忍），需要制定相应的评价准则，可接受风险评价准则由企业根据其实际需要和情况制定，但应保证不低于国家相关法规文件或标准，个人风险和社会风险基准执行GB 36894。加氢站LOPA分析可参照附录C.1进行严重度等级和确定可接受频率。

**7.3.3开展分析**

a）风险点识别确认

风险点是指在系统、工艺、设备或操作过程中可能引发风险（即潜在危害或不良后果）的具体位置、环节、活动或因素，是危险剧情中的关键因素，例如，储氢容器的氢脆、疲劳失效，隔膜压缩机的隔膜破裂，连接接头的泄漏等是加氢站的风险点。可根据HAZOP分析结果，并结合P&.ID、工艺说明及设计人员经验，识别需要关注的高风险点和重要控制点，高风险点和重要控制点是HAZOP分析中引起偏离的原因中的可能引起高风险的原因。风险点的分析是LOPA下一步进行危险场景识别和筛选的基础。

b）危险场景识别和筛选

危险场景与风险点相对应，是由初始事件触发，经过中间事件，最终导致后果的某一特定事件，场景具有独立性、完整性、可追溯性,危险场景识别和筛选可以参考GB/T 45111中6.2.3.7节，危险场景描述的的要素包括导致场景发生的初始事件、该事件继续发展过程中的中间事件、该场景所导致的最终后果、使能事件或使能条件、防护措施失效及其它可能的修正因子。加氢站初始事件的主要类别参见附录C.2表C-5，中间事件的类别参见附录C.2表C-6，使能条件的主要类别参见附录C.2表C-7。

c）保护层识别确认

针对每一危险场景，为了将其风险降低到可接受范围内，其所需要的安全措施通常都是多层次的。安全保护层由一组设备和/或管理措施组成，每个保护层都有一定的降险能力，其中的一层失效，其余层仍可防止事故发生和降低事故影响。保护层分为独立保护层、非独立保护层。LOPA分析的根本目的在于判断系统的保护层是否足够，是否需要增加保护层。保护层的识别确认可以参考GB/T 45111中6.2.3.8节-6.2.3.11节，典型的保护层的描述及相关说明见附录C表C-8。

d）风险评估

风险评估可以参考GB/T 45111中6.2.3.12和6.2.3.13节，内容包括危害场景后果及严重度评估、危害场景发生频率计算，场景发生频率在确定了初始时间的发生频率、保护层PFD（要求时的失效概率）及条件修正因子基础上按计算得到。加氢站风险评估可参照附录C表C-9确定典型独立保护层的PFD（要求时的失效概率）值（引自T/CPI 65001）。

e）评估结果及处理措施

对计算得到的选定场景的频率，与企业制定的风险评价准则中的相关事件的可接受频率进行比较，或采用式（7-2）计算计算风险减少因子（Risk Reduction Factor，RRF）。

 (7-1）

式中：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | — | 后果发生频率； |
|  | — | 可容忍风险频率。 |

若*RRF*<1，对该场景的LOPA分析结束，继续下一场景的LOPA分析。

若*RRF*≥1，应提出满足可容许风险标准所需采取的措施，并确定拟采取措施的PFD，以将风险隆低到可容许风险之下

**f）记录和报告**

LOPA应文档化，完整、准确地记录场景评估过程中获得的信息并形成报告。记录和报告可以参考GB/T 45111中6.2.4节。

## 7.4 分析结果示例

附录C.3给出了加氢站LOPA分析示例。

# 8 储氢容器RBD评估

## 8.1 通则

**8.1.1** 储氢容器设计时，设计单位应进行风险评估，出具风险评估报告，并作为设计文件的必要组成部分向设计委托方提供。

**8.1.2** 设计阶段开展RBD的目标是识别设备在全生命周期各种工况条件下可能产生的失效模式，在材料选择、结构设计、制造检验、使用管理等方面提出安全措施，预防可能发生的失效，并提供给制造单位和使用单位，作为制定风险防控措施及事故应急预案的依据。

**8.1.3** 储氢容器RBD应满足TSG 21、GB/T 4732.1、相应产品标准（如GB/T 44457）及用户或设计委托方提供的设计条件的要求。

## 8.2 评估流程

RBD按以下程序实施：

a）根据用户设计条件和其他设计输入信息，确定设备的各种使用工况；

b）根据各使用工况的介质、操作条件、环境因素进行危害识别，确定设备的失效模式及可能发生的危害与后果；

c）针对所有的失效模式及其相应的危害，提出应采取的安全保障措施和依据；

d）对于可能发生的失效模式，给出制定事故应急预案所需要的信息；

e）形成完整的风险评估报告。

## 8.3 失效模式识别

**8.3.1** 储氢容器RBD考虑的失效模式应全面，除了应覆盖GB/T 44457等标准规定的失效模式外，还应考虑设备在运行过程中可能出现的其他失效模式。

**8.3.2** 失效模式识别的内容一般包括对失效现象、失效机理、失效原因、失效后果（影响）等基本要素的识别，必要时还应包括对失效概率、失效检测方法等的识别,。

**8.3.3** 储氢容器的失效模式包括但不限于塑性垮塌、脆性断裂、局部过度应变、疲劳断裂、接头泄漏、腐蚀失效、环境致裂,各类模式的现象、机理、原因、后果参见附录D。

## 8.4 风险控制措施

识别出失效模式后，对可能的失效模式，应从设计、制造、使用管理、检验检测、维护保养等多角度考虑，提出相应的风险防控措施。塑性垮塌、脆性断裂、疲劳断裂、接头泄漏、腐蚀失效、环境致裂失效模式的常用风险防控措施参见附录D。

## 8.5 评估报告

风险评估报告应至少包括:

a）储氢容器的基本设计参数：压力、温度、材料、介质性质和外载荷等;

b）操作工况条件的描述；

c）所有操作、设计条件下可能发生的危害，如爆炸、泄漏、破损、变形等；

d）对于标准已经有规定的失效模式，说明采用标准的条款；

e）对于标准没有规定的失效模式，说明设计中载荷、安全系数和相应计算方法的选取依据；

f）对介质少量泄漏、大量涌出和爆炸状况下如何处置的措施；

g）根据周围人员的可能伤及情况，规定合适的人员防护设备和措施；

h）风险评估报告应具有与设计图纸一致的签署。

# 9 储氢容器RBI评估

## 9.1 通则

**9.1.1** RBI的原理是通过对设备进行失效可能性和后果计算，然后根据失效可能性和失效后果的乘积情况划分设备风险等级。在加氢站建设、运营阶段宜开展RBI评估， 不同阶段的目标如下：

a）建设阶段：

* 识别设备损伤机理，指导设备选材；
* 优化工艺及安全状态监测位置、内容等。

b）运营阶段：

* 分析损伤机理，识别设备风险，明确重点关注部位、部件；
* 优化设备检验策略，包括检验项目、检验方法、检验周期等；
* 确定与优化维护保养策略。

**9.1.2** 本文件是在参照GB/T 26610基础上，考虑了加氢站储氢容器的具体特点建立的RBI评估方法，例如考虑了储氢容器的常温高压氢脆及瓶式储氢容器的鼓包、凹陷等损伤对失效可能性的影响。

**9.1.3** 加氢站储氢容器风险以相对风险确定等级， 风险可以用式（9.1）的数学形式表达：

*R*risk=*F*×*C* （9.1）

式中:

*R*risk——风险；

*F*——失效可能性；

*C*——失效后果，采用面积后果或经济后果进行表征。

**9.1.4** 运行阶段，RBI评估的时间间隔根据设备完整性管理的实际需要确定，RBI应是动态的，既可对目前的风险进行评估，也可对未来的风险进行评估。风险评估应采用最新的检验检测数据、工艺与维护信息来进行持续更新、动态管理。

**9.1.5** 本章只针对储氢容器本体的风险评估，管路及安全附件的风险评估方法见本文件第11章。

## 9.2 评估流程

RBI评估按图9-1所示的流程实施。

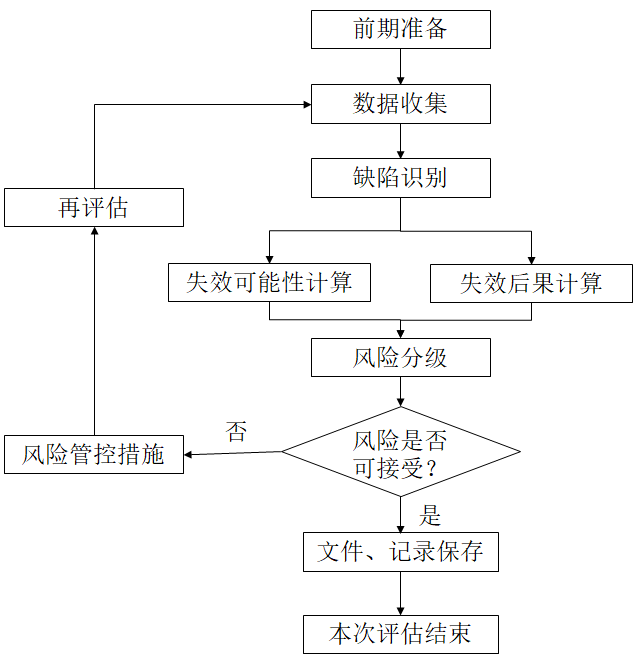


图9-1 RBI评估流程

## 9.3 前期准备

**9.3.1** RBI评估前，应制定评估方案，评估方案应至少应包括以下内容：

a） 评估目的；

b） 评估流程；

c） 评估需要的知识与技能；

d） 评估小组的组成；e） 小组成员的分工与职责；

f） 评估对象定义；

g） 评估使用的数据及其收集方法；

h） 评估拟使用的工具软件；

i） 评估结果的应用。

**9.3.2** 加氢站使用单位应制定风险可接受准则，风险可接受水平根据企业自身情况确定，同时应满足国家相关法律法规的规定，风险可接受水平可以随着使用单位管理水平的变化进行适当调整。

**9.3.3** 评估小组与加氢站管理者应就风险评估的目的与目标进行协商并达成共识，一般应包括如下内容：

a） 风险可接受准则；

b） 风险管理方法；

c） 对设备有必要通过风险优化和风险管理，保证其在安全生产条件下尽可能长周期运行，降低运行成本；

d） 为符合安全与环境管理要求，建立并实施的有效检测程序；

e） 选择的除检验以外的其他降低风险的措施；

f） 建立设备完整性管理的风险基础数据库并实施风险管理常态化。

## 9.4 数据收集

**9.4.1** RBI评估需要的数据应包括但不限于：

a） 设备类型；

b） 材料；

c） 检测、修理、改造记录；

d） 介质总量及成分；

e） 运行历史；

f） 安全防护系统；

g）监测系统；

h）发生损伤的模式、速率和严重程度；

i）气候环境。

**9.4.2** 数据可从以下来源收集：

a）设计、制造、安装记录与竣工图；

b）质量控制记录、监督检验记录；

c）检测、监测记录；

d）运行、操作记录；

e）异常与缺陷（故障、失效、事故等）记录；

f）气候、环境、人口、地理位置等。

**9.4.3**应确保评估所用数据真实可靠。

## 9.5 缺陷识别

加氢站储氢容器常用类别为钢质无缝瓶式储氢容器、钢带错绕式储氢容器两类，两类设备的潜在的缺陷形式、机理、原因及处置措施参见附录E。

## 9.6 失效可能性计算

**9.6.1** 失效可能性计算应考虑的因素主要包括：

a）材料机械性能退化：

b）地震及极端气候条件；

c）误操作；

d）设计缺陷：

e）制造缺陷；

f）使用维护不当；

g）管理缺陷；

h）人为破坏。

**9.6.2** 失效可能性计算是在同类设备失效频率*F*G（也称通用失效频率）基础上，考虑设备服役现状和企业管理水平的影响进行修正，即采用式（9.2）进行计算。

*F* = *F*G×*F*E×*F*M （9.2）

式中：

*F*——设备失效可能性；

*F*G——同类设备失效频率*F*G，可按附录F.1.1计算；

*F*E——设备修正系数，可按附录F.1.2取值；

*F*M——管理系数，可按附录F.1.3取值；

## 9.7 失效后果计算

加氢站储氢容器失效后果采用面积后果来表征，失效后果可按附录F.2进行计算。

## 9.8 风险分级

**9.8.1** 失效可能性分级

设备失效可能性根据实际评价目标不同，可从失效可能性系数或设备修正系数，选择不同的分级依据，可分五个等级，依次为1—低，2—中等，3—中高，4—高，5—超高，表9-1是标准的分级结果。在实际评估过程中，评估人员可与与加氢站企业共同商定，并确定并调整分级策略。

表9-1 失效可能性等级划分

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 失效可能性系数 | 设备修正系数 | 失效可能性等级 |
| 0.0～0.00001 | <1 | 1 |
| 0.00001～0.0001 | 1～10 | 2 |
| 0.0001～0.001 | 10～100 | 3 |
| 0.001～0.01 | 100～1000 | 4 |
| 0.01～1.0 | >1000 | 5 |

**9.8.2** 失效后果分级

根据失效后果严重程度从轻到重划分五个等级，依次为A—低后果等级，B—中等后果等级，C—中高后果等级，D—高等后果等级，E—超高后果等级，如表9-2所示：

表9-2 失效后果等级划定

|  |  |
| --- | --- |
| 失效后果数值 | 后果等级 |
| <5000 | A |
| 5000~20000 | B |
| 20000~35000 | C |
| 35000~50000 | D |
| >50000 | E |

**9.8.3 风险分级**

将失效可能性和失效后果的5个级别组合即可得到5行5列的风险矩阵，见图F-3。在风险矩阵中，风险水平沿左下方到右上方对角线逐渐升高，分4个等级依次为：低风险、中风险、中高风险和高风险。图9-2中红色为高风险，橙色为中高风险，黄色为中风险，绿色为低风险。

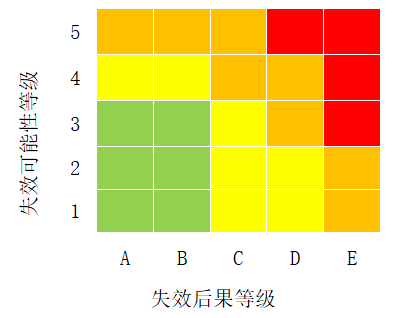


图9-2 加氢站承压设备风险评估风险矩阵图

风险由泄漏失效可能性和泄漏失效后果两部分组成，按风险可接受准则，对加氢站承压设备划分出不同等级的风险。

## 9.9 风险管控措施

风险评估结果为风险不可接受的，应进行风险因素分析，查找出原因，采取风险减缓措施，并进行检验检测，然后进行风险再评估。具体的风险处置措施参见附录E。

## 9.10 记录和报告

应记录风险评估的全部数据，至少应包括以下内容：

a） 评估对象；

b） 实施评估的人员；

c） 评估的进度安排；

d） 基础数据的来源；

e） 评估过程中做出的假设；

f） 风险评估的结果（包括失效可能性、失效后果及其分级结果）。

# 10 氢气压缩机FMECA分析

## 10.1 通则

**10.1.1** ‌在氢气压缩机设计阶段宜开展FMECA分析，主要目的是在产品设计的早期阶段识别潜在的失效模式及其影响，从而采取相应的措施来提高产品的可靠性和安全性‌‌。设计阶段的FMECA一般由压缩机制造单位的设计部门完成，使用单位在采购压缩机时，宜在订货技术条件中明确FMECA的要求，FMECA报告应作为压缩机出厂资料的一部分。  
**10.1.2** 在氢气压缩机使用阶段开展FMECA分析，目的是识别压缩机所有潜在的故障模式及其影响，按每个故障模式产生影响的危害程度进行分类和排序，为设备维护维修策略的制定和优化提供依据。使用阶段的风险评估一般由使用单位的专业技术人员或委托第三方技术机构实施。

**10.1.3** 氢气压缩机FMECA分析应满足GB/T 7826及中国石油和石油化工设备工业协会团体标准T/CPI 64001的基本要求。

## 10.2 分析流程

氢气压缩机FMECA分析按以下流程实施：

a）确定分析范围和对象；

b）故障模式识别与机理分析；

c）数据收集及统计分析；

d）评价准则制定；

e）关键性分析；

f）故障影响和危害分析；

g）分析结果汇总；

h）出具评估报告。

## 10.3 分析步骤与基本要求

**10.3.1 确定分析范围和对象**

对氢气压缩机进行边界划分，明确分析范围，并对其依次进行子系统、组件、零部件的逐层拆解，直至拆分至最小可维修或最小可更换部件为止，将拆分得到的所有可维修部件作为FMECA的分析对象。拆解的层级应考虑设备使用管理的实际需要及维修的实际情况。结构拆解的主要依据是设备的技术文件，同时应结合专家意见。附录G.1给出了两类压缩机的结构拆解示例。

**10.3.2 故障模式识别与机理分析**

故障模式识别和机理分析的目的是对拆分得到的可维修部件逐一进行故障模式的识别，列出可维修部件的所有可能的潜在故障，故障模式、机理的分类可参照ISO 14224、T/CPI 64001，附录G.2给出了氢气压缩机故障模式、故障机理的主要类别。

**10.3.3 数据收集和统计分析**

**10.3.3.1** 对设备可靠性相关的数据进行收集，并根据收集的数据，统计分析故障部件、故障模式、故障原因及故障频次等，应尽可能收集齐全以下数据：

a）基础信息。包括压缩机型号、制造商、生产日期、序列号、安装位置、用途、使用年限、累计运行时间（小时/年）、设计参数（压力、温度、流量、功率等）；

b）组成清单及关键组件或零部件数据。如气阀的泄漏率测试数据、阀片/弹簧更换记录，活塞/气缸的磨损量测量数据、密封件老化情况，轴承的振动监测数据、润滑状态、磨损痕迹报告，电机的绝缘等级、电流/电压波动记录、过热报警次数，冷却系统的冷却效率、换热器结垢/堵塞记录，控制系统的传感器/PLC故障记录、误动作事件；

c）运行数据。包括运行模式（连续/间歇运行）、平均负载率（%）、启停次数与频率、运行环境数据（温度、湿度、粉尘、腐蚀性气体等）、历史运行日志（异常工况记录、超负荷运行事件）；

d）维护和维修数据。包括预防性维护计划（润滑、清洁、部件更换周期）、历史维修记录（维修日期、更换部件、故障描述）、维修耗时（MTTR，平均修复时间）、备件更换清单（品牌、型号、更换频率）、润滑剂类型及更换周期；

e）故障数据。包括故障模式、故障发生时间、频率（MTBF，平均故障间隔时间）、故障影响（停机时间、生产损失、安全风险）、故障根本原因分析（如磨损、腐蚀、设计缺陷、误操作）、故障部件定位；

f）监检侧与评价数据。设备运行过程中通过检查、测试、检测、评价分析产生的数据等，包括振动分析报告（频谱、趋势数据）、温度监测数据（轴承温度、排气温度）、压力/流量监测数据（异常波动记录）、润滑油分析报告（金属颗粒含量、粘度变化）、无损检测结果（如超声波探伤、裂纹检测）；

g）设计与可靠性参考数据。包括制造商提供的可靠性指标（如设计寿命、故障率）、同类压缩机行业平均故障率、历史FMEA/FMECA报告（如有）、安全标准与合规性文件；

h）管理数据。包括操作人员培训记录与技能水平、操作规范符合性（如是否超负荷运行）、供应链数据（备件供应商可靠性、交付周期）等；

i）经济数据。设备全生命周期发生的费用数据，包括采购费用、维护费用、故障修理费用、大修理费用、备品备件采购费用等。

**10.3.3.2** 对数据收集工作应进行质量管控，确保数据完整性和准确性，缺失数据需标注并补充采集计划，按部件、故障模式、时间维度建立结构化数据库，建立持续数据收集机制，对数据进行动态更新。

**10.3.4 评价准则制定**

**10.3.4.1** FMECA分析需要制定相应的评价准则，作为风险评估分级的依据，评价准则包括故障频率评价准则、故障后果评价准则以及风险等级划分准则（风险矩阵），故障后果应考虑安全影响后果、环境影响后果、生产损失影响后果、维修成本后果等方面。

**10.3.4.2** 加氢站故障评价准则的确定，应根据加氢站建设所执行的安全、环境相关的法规标准，并综合考虑使用单位的实际情况以及加氢站设备运行情况、管理现状等方面因素。加氢站的故障评价准则可参考附录G.3确定。

**10.3.5 关键性分析**

**10.3.5.1** 关键性分析是对压缩机的可维修部件进行筛选分类，识别出其中的高关键性部件、中关键性部件、非关键性部件，然后对关键性部件做主要故障模式的分析。对于识别出的中关键性和高关键性组件，在使用管理上应采取纠正措施，制定新的维修措施，以降低故障概率或减轻故障后果。

**10.3.5.2** 关键性分析的主要依据是设备主要功能、设备常见故障、设备已发生故障、同类型设备故障情况，具体可按照图10-4的规则实施。对识别出的关键性组件，应进行主要故障模式的识别分析，重点分析已出现过的故障模式、相同或相似设备部件上已出现过的故障模式、尚未发生过但认为确有可能发生的故障模式、可能性很小但后果非常严重的故障模式、其他明确需要分析的故障模式。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 高可能性：≧可接受故障频率 | 中等关键性  优化维修策略，重点是减轻后果 | 高关键性  优化维护维修策略，以降低失效概率、减轻后果 |
| 低可能性（可忽略）：<可接受故障频率 | 非关键  无需采取纠正措施，保持现有维护维修策略 | 中等关键性  优化维护维修策略，重点是减轻后果 |
| 故障可能性  故障后果 | 低故障后果（可忽略） | 高故障后果（不可接受） |

图10-4 关键性分析筛选矩阵

**10.3.6 故障影响和危害分析**

故障影响和危害分析的主要内容和步骤如下：

a）故障频率及等级分析。对收集得到的数据进行数理统计分析，估计故障模式发生概率，然后根据表附录G表G-5确定严重程度等级。主要参考数据包括：

* 通过寿命试验获得的数据；
* 从可用的失效率数据库获取的数据，如AQ/T 3054-2015中给出了常用设备或部件、系统的失效频率，国际知名数据库OREDA给出了压缩机的失效模式与概率分布。
* 现场使用获取的失效数据，例如通过收集某一时间内发生的故障的部件、次数、时间间隔等信息，即可分析得到故障频率；
* 相似产品或元器件的失效数据，部分通用设备元器件的失效率数据可从相关手册、资料中获取。

附录G.4给出了常用设备或部件、系统的失效频率，可供加氢站氢气压缩机FMECA分析参考。

b）故障后果及等级分析。分析故障发生后产生的影响，然后根据附录G表G-6分析确定后果的等级，分析的内容主要包括人身或财产安全问题、对生产和操作环境的影响、由该设备完成的生产任务停止、维修或修复故障设备的成本。其中安全性和环境性后果会引起人员伤亡或导致违反行业、地方和国家的法规、规章、标准，此类故障后果，是应该避免或应尽一切努力将其风险降到可接受的水平。

c）风险等级划分。危害性通过风险来定量表征，风险采用式“风险=故障频率×故障后果”计算，根据计算得到的故障频率与等级、故障后果与等级，再结合附录G图G-3中的风险矩阵即可进行某类失效模式的安全影响、环境影响、生产损失、维修成本风险等级的划分，四种风险类型中最高风险为该失效模式的风险等级，根据各失效模式风险大小可以进行风险的排序并确定主要失效模式，某组件各失效模式中的最高风险为该组件的风险等级。

**10.3.7 分析结果汇总**

对FMECA分析过程和结果，可采用表的格式进行记录，附录G.5给出了加氢站氢压缩机FMECA分析结果汇总表格的示例。

## 10.4 评估报告

FMECA分析应出具报告，报告的主要内容包括：

a）分析目标；

b）分析对象；

c）分析方法概述；

d）系统层级拆解；

e）故障模式分析；

f）影响与危害性评估；

g）改进措施；

h）验证与跟踪；

i）结论与建议；

j）分析数据表；

k）危害性矩阵图、压缩机结构示意图等。

# 11 安全仪表系统SIL评估

## 11.1 通则

**11.1.1** 对加氢站采用的安全仪表系统应进行功能安全管理，执行GB/T 20438（所有部分）的规定。

**11.1.2** 安全仪表系统功能安全管理的内容包括对每一个安全仪表功能的安全完整性等级进行评估，包括SIL定级和SIL验证。

a）SIL定级是指通过风险分析确定独立保护层的SIL等级，定级结果是安全仪表系统工程设计的依据，SIL等级分为SIL1、SIL2、SIL3、SIL4四个等级，定级准则见表11-1。

b）SIL验证是确认安全仪表系统是否满足SIL定级（目标安全完整性等级）要求的过程。它通过定量与定性分析，评估系统在硬件、软件及全生命周期管理中的可靠性，确保其能够在规定条件下正确执行安全功能，并将风险降低至可接受水平。SIL验证是功能安全生命周期的关键环节，贯穿系统设计、开发、测试和维护的各阶段。

表11-1 安全完整性等级定级准则

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 安全完整性等级 | 低要求操作模式 | | | 高要求操作模式 | 连续运行模式 |
| 在要求时执行其设计功能要求的平均失效概率（PFDavg） | 安全有效性（Safety avaibility） | 目标风险降低（RRF） | 危险失效平均频率  （PFH，h-1） | 危险失效平均频率  （PFH，h-1） |
| SIL 4 | [10-5,10-4） | 99.99-99.999 | 10000-100000 | [10-9,10-8） | [10-9,10-8） |
| SIL 3 | [10-4,10-3） | 99.9-99.99 | 1000-10000 | [10-8,10-7） | [10-8,10-7） |
| SIL 2 | [10-3,10-2） | 99-99.9 | 100-1000 | [10-7,10-6） | [10-7,10-6） |
| SIL 1 | [10-2,10-1） | 90-99 | 10-100 | [10-6,10-5） | [10-6,10-5） |
| 注：  ①安全相关系统的操作模式分为三类：  ——低要求模式：仅在需求时执行SIF的操作模式，以便将过程转换到指定的安全状态，并且每年的要求频率不超过1次；  ——高要求模式：SIF只在需求时执行，以便将过程转换到指定的安全状态，以及要求频率大于每年一次的操作模式；  ——连续模式：SIF将操作模式作为正常操作的一部分保持在安全状态；  ②安全相关系统在一个给定的时间周期内执行规定安全功能时的危险失效平均频率。 | | | | | |

**11.1.3** 新建、改建和扩建的加氢站均应开展安全仪表系统评估，确定所需要的SIF及其安全完整性等级。安全仪表系统设备选型确定后，应对每一个安全仪表功能进行SIL验证，不能满足要求的安全仪表功能应进行整改。

**11.1.4** SIL评估应组成评估小组，评估小组应包含工艺、仪表、设备、安全、电气等专业人员，SIL评估主持人应具有流程工艺、仪控、安全相关的设计、咨询或运行经验，具有功能安全工程师或相关专业工程师资格证书

**11.1.5** 加氢站安全仪表系统SIL定级和验证具体可参照GB/T 20438、GB/T 21109、GB/T 45111、T/CPI 65001等标准。

## 11.2 SIL定级

**11.2.1** SIL定级步骤

SIL定级宜采用LOPA方法，定级过程包含以下步骤：

a）组建SIL定级评估小组；

b）确定风险可接受准则；

c）场景识别与筛选；

d）初始事件确认；

e）独立保护层辨识；

f）场景频率计算；

g）评估SIL等级。

上述a）-e）步骤参见本文件第7章。

**11.2.2** SIL等级确定

**11.2.2.1** 根据式（11.1）计算危险场景所需安全仪表功能的*PFD*。

 （11.1）

式中：

*PFD*SIF—安全仪表功能要求时的失效概率；

*F* —风险可接受频率，具体根据本文件第7.3.3小节规定的场景后果严重性评估结果查阅风险可接受准则进行确定；

—初始事件i造成后果C的频率，单位为次/年；

**11.2.2.2** 根据*PFD*SIF计算结果查阅表11-1，确定单一场景安全仪表功能需要达到的SIL等级。

**11.2.2.3** 同一初始事件导致多个事故场景的，逐个场景进行分析，该安全仪表功能SIL等级取场景需要达到SIL等级的最高值；多个初始事件导致同一事故后果的，场景频率计算时宜考虑进行叠加。

**11.2.2.4** 安全仪表功能定级结果达到SIL3以上时，应增加独立保护层或修改工程设计方案，降低对该安全仪表功能的SIL等级要求。

**11.2.3 SIL定级报告**

安全仪表系统SIL定级应出具报告，报告内容应包括：

a）封皮、签字页、目录；

b）正文。包括项目概述、工作范围、定级方法概述、风险可接受标准、 条件修正假设、工艺描述、 SIL定级小组组成、SIL定级进程、 SIL定级结果（含定级结果汇总表、统计分析表）、改进建议（含改进建议措施汇总表）等；

c）附件。包括SIL分析定量数据、SIL定级分析会议签到表、SIL定级记录表。

## 11.3 SIL验证

**11.3.1 一般要求**

**11.3.1.1** 对所有等级为SIL1以上的安全仪表功能，都需要进行SIL验证,对未达到定级要求的安全仪表功能需要进行整改。

**11.3.1.2** SIL验证包括硬件安全完整性验证、系统性安全完整性验证。硬件安全完整性验证可通过分析和定量计算的方式,系统性安全完整性验证可通过定性分析的方式。

注①：硬件安全完整性是安全相关系统安全完整性中与危险失效模式下的随机硬件失效有关的部分；

注②：系统性安全完整性是安全相关系统安全完整性中,与危险失效模式下的系统性失效有关的部分。系统性安全完整性通常不能量化(与通常可量化的硬件安全完整性明显不同)。

注③：危险失效是对执行安全功能有影响的组件和/或子系统和/或系统的失效,其在要求时阻止安全功能的执行(要求模式),或导致安全功能失效(连续模式)以致受控设备进入危险或潜在危险的状态，或降低在要求时安全功能正确执行的概率。

注④：安全失效是对执行安全功能有影响的组件和/或子系统和/或系统的失效,其导致安全功能的误动作从而使EUC(或其一部分)进入或保持安全状态;或增加安全功能的误动作从而使EUC(或其一部分)进入或保持安全状态的概率。

注⑤：系统性失效是原因确定的失效,只有对设计或制造过程、操作规程、文档或其他相关因素进行修改后,才有可能消除的失效。

**11.3.1.3** SIL验证可采用可靠性框图法、马尔可夫模型、故障树法等方法。

**11.3.1.4** SIL验证按以下步骤：

a）组成验证小组；

b）信息收集；

c）SIF回路分析；

d）硬件安全完整性分析；

e）系统性安全完整性分析；

f）验证结果；

g）SIL验证报告。

**11.3.2** 信息收集

可通过资料收集和现场调研等方式，全面收集安全仪表系统的相关信息，主要包括：

a）SIL定级报告(需明确SIL等级和PFD/RRF值）；

b）运行模式说明；

c）P&ID图；

c）SRS报告；

d）安全联锁功能列表、功能描述、设定点、回路结构；

e）安全联锁逻辑图或因果表；

f）SIF组成仪表设备的厂家、型号、仪表类型/原理、投用时间、量程、运行条件、表决机制、诊断设置共用性情况等数据等信息，包括传感器、逻辑运算器、执行器、安全栅、继电器等；

h）经过认证的仪表设备需提供合规的 SIL证书、评估报告及安全手册等认证材料；

i）检维修规程；

j）功能性测试报告;

k）以前的设备故障记录(提供审阅后收回）;其他所需资料。

**11.3.3** 回路分析

对安全仪表系统的回路进行分析，明确参与SIF的仪表设备、安全关键动作及其逻辑/冗余关系，包括回路执行到哪一步即可进入安全状态，安全状态的定义只针对当前SIF所保护场景的降险需求，出于维护或装置再启动等相关安全或便捷考虑的执行动作不宜纳入SIL验证计算。

**11.3.4** 硬件安全完整性分析

**11.3.4.1**硬件的安全完整性分析内容包括架构约束SIL等级要求的判定、随机失效SIL等级要求的计算。

**11.3.4.2** 架构约束SIL等级要求的判定

安全仪表系统的硬件架构需满足特定的条件，主要涉及硬件故障裕度（HFT）和子系统类型（A型/B型）的划分。

**a）**架构约束SIL等级的基本要求

架构约束SIL等级应满足以下要求：

* 应满足表11-2对应最小硬件故障裕度（HFT）要求；
* 全可变或有限可变语言可编程设备的诊断覆盖率应不小于60%；
* 失效量计算中使用的可靠性数据应由不小于70%的统计置信区间上限确定。
* ‌A型子系统的所有部件失效模式可完全定义，故障行为可确定，且有充分现场数据支撑。B型子系统‌至少1个部件失效模式不可定义，或故障行为不确定，或缺乏可信失效数据。 ‌

注①：故障裕度（HFT）指安全仪表系统在不发生整体故障的情况下可承受的硬件失效数量。例如HFT=1表示允许一个组件失效仍能维持安全功能，HFT=2表示允许2个组件失效仍能维持安全功能。故障裕度表征在出现故障或错误的情况下,功能单元继续执行一个要求功能的能力。

注②：诊断覆盖率（DC，也称危险失效分数）是通过自动在线诊断测试检测到的危险失效分数，是由检测到的危险失效率除以总危险失效率计算得出。

注③：全可变语言是计算机编程者易于理解,并能提供实现各种各样功能和应用的能力的一种语言。有限可变语言是用于商业或工业可编程电子控制器的编程语言,其能力仅限于在相关安全手册中定义的应用，这种语言的记法可能是文本或图形或二者皆有。

b）架构约束SIL等级判定

对安全仪表功能中包含的测量仪表、逻辑控制器、最终执行元件等元器件，根据其相关的规格型号、冗余结构等信息，分别确定HFT，然后根据表11-2要求确定安全仪表子系统的架构约束SIL等级，安全仪表功能架构约束SIL等级取决于各子系统架构约束SIL等级的最小值。

表11-2不同SIL对应的最小HFT要求

|  |  |
| --- | --- |
| SIL等级 | 要求的最小HFT |
| 1（任何模式） | 0 |
| 2（低要求模式） | 0 |
| 2（高要求/连续模式） | 1 |
| 3（任何模式） | 1 |
| 4（任何模式） | 2 |
| 注：未使用全可变或有限可变语言可编程设备的SIS或SIS子系统，若采用本表规定的最小HFT将导致额外故障并导致整体过程安全降级，其HFT要求参照GB/T21109.1标准要求确定。 | |

**11.3.4.3** 随机失效SIL等级的计算

随机失效SIL按以下步骤计算：

a）对安全仪表功能中包含的测量仪表、逻辑控制器、最终执行元件等元器件，根据其相关的规格型号、冗余结构、检验测试计划及规程等信息，结合可信数据库，分别确定各元器件可检测到的危险失效率（*λ*DD）、未检测到的危险失效率（*λ*DU）、可检测到的安全失效率（*λ*SD）、未检测到的安全失效率（*λ*SU），以及共因失效因子*β*(β的选取可根据工程经验或参考表11-3确定）、平均恢复时间、检验测试间隔、检验测试覆盖率等参数，所采用的仪表设备可靠性数据宜采用以往使用数据、SIL认证报告、公开发行的工业数据库或安全手册中的失效数据等。

表11-3典型仪表设备β参考值

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 所属单元 | 元件 | *β*值 |
| 传感单元 | 开关 | 0.05 |
| 变送器 | 0.04 |
| 执行单元 | 切断阀 | 0.03 |
| 电磁阀 | 0.1 |
| 控制阀 | 0.03 |
| 泄压阀 | 0.05 |
| 继电器 | 0.03 |
| 注：以上*β*值应根据现场实际情况进行修正 | | |

b）根据可靠性理论进行建模计算安全仪表功能各子系统的要求时的平均失效概率*PFD*avg，具体包括：测量仪表子系统要求时的平均失效概率*PFDavg-S* 、逻辑控制器子系统要求时的平均失效概率*PFDavg-L*、最终执行元件子系统要求时的平均失效概率*PFDavg-FE* ；

c）根据安全仪表功能各子系统的要求时的平均失效概率，按式（11.2）计算安全仪表功能的*PFD*avg-SIF。

*PFDavg-SIF* = *PFDavg-S* + *PFDavg-L*  + *PFDavg-FE*  （11.2）

式中：

*PFDavg-SIF—*安全仪表功能要求时的平均失效概率；

*PFDavg-S* —测量仪表子系统要求时的平均失效概率；

*PFDavg-L* —逻辑控制器子系统要求时的平均失效概率；

*PFDavg-FE* —最终执行元件子系统要求时的平均失效概率。

d**）**根据*PFD*avg-SIF计算结果查表11-1，确定安全仪表功能的随机失效SIL等级。

**11.3.5** 系统性安全完整性分析

**11.3.5.1** 设备系统性能力（SC）通过定性的方法进行分析，级别应满足相应的安全仪表功能要求的SIL等级要求，可采信生产厂商提供的SIL认证报告。

注①：设备系统性能力（SC）是衡量设备在全生命周期实现安全完整性的能力，分为4个级别SC1-SC4，设备的系统性能力达到SC *N*（*N* =1,2,3）即可认为安全完整性等级达到SIL N（*N* =1,2,3）。

**11.3.5.2** 系统性分析主要内容和基本要求如下：

a）对控制系统性故障的分析，按照GB/T 20438.2-2017第7.4.7小节的要求执行；

b）应用程序的符合性分析，按照GB/T 21109.1-2022第12章的要求执行；

c）对设计和集成过程中可能存在的失效分析，按照GB/T 20438.2-2017第7.4.6小节的要求执行；

d）检测到故障时的系统行为分析，依据GB/T20438,2-2017中的7.4.8,GB/T 21109.1-2022中的 11.3)。

**11.3.5.3** 系统性能力的判定应满足以下要求：

a）对于某具有系统性能力SC *N*(*N* =1,2,3)的组件，若该组件的系统性故障并不会使指定安全功能失效，而仅在另一个具有系统性能力SC *N* 的组件同时发生系统故障时才会使指定功能失效，则在两个组件之间足够独立的前提下其组合的系统性能力可视为SC (*N* +1)。足够独立性的判定见GB/T20438.2第7.4.3.4条。

b**）**多个系统性能力为SC N 的组件组合后可声明的最高系统性能力为SC(N +1)。每个SC N组件在这种方式下仅能使用一次，不允许继续增加SC *N* 组件达到或超过SC (*N* +2)。

**11.3.6 验证结果与建议**

**11.3.6.1** 安全仪表功能SIL等级的验证结果取架构约束SIL等级和随机失效SIL等级两者中的较小值，同时应满足系统性能力SC符合SIL等级要求。

**11.3.6.2** 安全仪表功能验证达到的SIL等级不得低于SIL定级要求时。

**11.3.6.3** 安全仪表功能验证达到的SIL等级低于SIL定级要求时，应进一步分析其冗余结构以及测量仪表、逻辑控制器和最终执行元件的PFD分布情况，提出整改措施，可考虑的整改措施包括：

a）增加独立保护层；

b）增设冗余结构；

c）更换危险失效率更低的元器件或提高设备诊断覆盖率；

d）设置部分行程测试；

e）调整安全仪表功能检验测试周期及检验测试覆盖率等。

**11.3.7 SIL验证报告**

安全仪表系统SIL验证应出具报告，报告内容应包括：

a）封皮、签字页、目录；

b）正文。包括项目概述、工作范围、验证方法概述、验证假设说明、需验证回路统计、 验证结果汇总、改进方案建议；

c）附件。包括验证工作表（包括测量仪表、逻辑控制器、最终执行元件三个部分的PFDavg、MTTF、架构约束SIL等级等计算结果）、验证数据（包括测量仪表、逻辑控制器、最终执行元件等设备的厂家型号以及对应的失效数据，如λDD、λDU、λSD、λSU等）。

# 12 管路风险评估

## 12.1 通则

**12.1.1** ‌管路风险评估的主要目的是为了支撑分级管理，本文件给出了管线（管子与管接头及管法兰）、工艺阀门以及安全阀的评估方法。  
**12.1.2** 管路风险评估采用打分法，根据管路布置图，先对每条管线、工艺阀门、安全阀的的失效可能性、失效后果进行打分，然后根据打分结果判断失效可能性等级、失效后果严重程度，再根据风险矩阵图，判定最后的风险等级。

## 12.2 失效可能性评估

**12.2.1 管线失效可能性评估**

管线失效可能性评估应考虑设计选材、应力分析、连接方式、振动、泄漏、腐蚀减薄等影响因素，先对每个因素进行评价打分，然后将各分项分数相加得到可能性评价的总分，再根据总分的分值范围确定失效可能性等级。管线失效可能性可参照附录H.1表H-1进行打分，失效可能性等级参照附录H.1表H-2进行划分。

**12.2.2 工艺阀门失效可能性评估**

加氢站管路中的工艺阀门主要包括的针阀、球阀、止回阀、调节阀与截止阀，失效可能性评估应考虑设计选材、阀门类型、质量证明文件、日常维护等影响因素，先对每个因素进行评价打分，然后将各分项分数相加得到可能性评价的总分，再根据总分的分值范围确定失效可能性等级。艺阀门失效可能性可参照附录H.2表H=4进行打分，失效可能性等级可参照附录H.2表H-4进行划分。

**12.2.3安全阀失效可能性评估**

加氢站管安全阀失效可能性评估应考虑设计选材、质量证明文件、定期校验、开启失效、泄漏等影响因素，先对每个因素进行评价打分，然后将各分项分数相加得到可能性评价的总分，再根据总分的分值范围确定失效可能性等级。安全阀失效可能性可参照附录H.3表H-5进行打分，失效可能性等级可参照附录H.3表H-6进行划分。

## 12.3 失效后果评估

**12.3.1 管线失效后果评估**

加氢站管线失效后果评估应考虑操作压力、介质、管径尺寸、泄漏监测、控制措施等影响因素，先对每个因素进行评价打分，然后将各分项分数相加得到可能性评价的总分，再根据总分的分值范围确定失效后果严重程度等级。管线失效后果可参照附录H.4表H-7进行打分，失效后果等级可参照附录H.4表H-8进行划分。

**12.3.2 工艺阀门失效后果评估**

加氢站工艺阀门失效后果评估应考虑操作压力、介质、阀门公称直径、泄漏监测、控制措施等影响因素，先对每个因素进行评价打分，然后将各分项分数相加得到可能性评价的总分，再根据总分的分值范围确定失效后果严重程度等级。工艺阀门失效后果可参照附录H.5表H-9进行打分，失效后果等级可参照附录H.5表H-10进行划分。

**12.3.3安全阀门失效后果评估**

加氢站安全阀失效后果应考虑操作压力、介质、保护设备风险等级等影响因素，先对每个因素进行评价打分，然后将各分项分数相加得到可能性评价的总分，再根据总分的分值范围确定失效后果严重程度等级，安全阀失效后果可参照附录H.6表H-11进行打分，失效后果等级可参照附录H.6表H-12进行划分。

## 12.4 风险等级划分

本文件采用如图12-1所示的风险矩阵，其中Ⅰ级为低风险，Ⅱ为中风险，Ⅲ级为高风险。

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 失  效  可  能  性 | 5 | Ⅱ | Ⅱ | Ⅲ | Ⅲ | Ⅲ |
| 4 | **Ⅰ** | Ⅱ | Ⅱ | Ⅲ | Ⅲ |
| 3 | **Ⅰ** | **Ⅰ** | Ⅱ | Ⅱ | Ⅲ |
| 2 | **Ⅰ** | **Ⅰ** | **Ⅰ** | Ⅱ | Ⅱ |
| 1 | **Ⅰ** | **Ⅰ** | **Ⅰ** | **Ⅰ** | Ⅱ |
| 风险矩阵 | | A | B | C | D | E |
| 失效后果严重程度 | | | | |

图12-1 风险矩阵图

# 附录 A

# （资料性）

# 加氢站QRA基础数据和算法

**A.1 加氢站典型事故场景和事故频率值**

各泄漏孔径的取值范围和代表值参见表A-1。当设备直径小于150mm时，取小于设备直径的孔泄漏场景以及完全破裂场景。

表A-1 泄漏孔径取值 （mm）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 泄漏场景 | 范围 | 代表值 |
| 小孔泄漏 | 0~5 | 5 |
| 中孔泄漏 | 5~50 | 25 |
| 大孔泄漏 | 50~150 | 100 |
| 完全破裂 | >150 | (1) 设备（设施）完全破裂或泄漏孔径>150mm  (2) 全部存量瞬时释放 |

泄漏场景的选择应该考虑加氢站的工艺条件、历史事故和实际运行环境，宜采用表A-2定义的典型泄漏场景。

表A-2 加氢站典型泄漏场景

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **序号** | **设备(设施)种类** | **泄漏事件** |
| 1 | 管道 | (1)管道泄漏场景的泄漏孔径取值参见表A.1，如果泄漏的位置严重影响泄漏量或泄漏后果，应至少分别考虑以下三个位置的完全破裂：管道上游、管道中游和管道下游；  (2)对于长管线，应沿管线选择一系列泄漏点，泄漏点的初始间距可取为50m，泄漏点数应确保当增加泄漏点数量时，风险曲线不会显著变化。 |
| 2 | 氢气罐/储氢气瓶 | (1)单层结构气罐/气瓶：小孔泄漏、中孔泄漏、大孔泄漏、完全破裂  (2)多层结构气罐/气瓶：完全破裂 |
| 3 | 泵和压缩机 | 泵和压缩机的泄漏场景取吸入管道的泄漏场景；当泵和压缩机的吸入管道直径小于150mm时，取小于吸入管道直径的孔泄漏场景以及完全破裂场景。 |
| 4 | 换热器 | 加氢站中，由于氢气的压力比较高，氢气通常走管程，壳程的设计压力一般小于氢气的压力，此时考虑的泄漏场景为：  a)场景1：一条管道中孔泄漏  b)场景2：一条管道破裂  c)场景3：十条管道破裂 |
| 5 | 压力泄放装置 | 若压力释放装置的排放气直接排入大气环境中，应考虑压力释放装置的泄漏风险，其泄漏场景可取压力释放装置以最大释放速率进行排放。 |
| 6 | 氢气长管拖车/管束式集装箱 | 氢气长管拖车/管束式集装箱的泄漏场景应考虑自身失效引起的泄漏、装卸活动导致的泄漏和外部影响导致的泄漏，主要的泄漏场景为：  a)场景1：孔泄漏，孔直径等于长管拖车或管束最大接管直径  b)场景2：氢气长管拖车/管束式集装箱破裂  c)场景3：装卸软管中孔泄漏  d)场景4：装卸软管完全破裂  e)场景5：氢气长管拖车/管束式集装箱下发生火灾，存储氢气瞬时释放 |

加氢站设备典型泄漏场景的泄漏频率值参见表A-3~A-7。

表A-3 加氢站管道泄漏频率值

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 管道直径  mm | 泄漏频率 （每米每年） | | | |
| 小孔泄漏 | 中孔泄漏 | 大孔泄漏 | 完全破裂 |
| 20 | 3×10-5 | — | — | 1×10-6 |
| 25 | 2×10-5 | — | — | 2×10-6 |
| 50 | 1×10-5 | — | — | 2×10-6 |
| 100 | 3×10-6 | 2×10-6 | — | 2×10-7 |

表A-4 氢气罐/储氢气瓶、泵和压缩机泄漏频率值 （每年）

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **设备类型** | **小孔泄漏** | **中孔泄漏** | **大孔泄漏** | **完全破裂** |
| 单层结构气罐/气瓶 | 4×10-5 | 1×10-4 | 3×10-5 | 2×10-5 |
| 多层结构气罐/气瓶 | — | — | — | 1.2×10-8 |
| 单密封离心泵 | 6×10-2 | 5×10-4 | 1×10-4 | — |
| 双密封离心泵 | 6×10-3 | 5×10-4 | 1×10-4 | — |
| 氢气压缩机 | — | 6×10-3 | 6×10-4 | — |

表A-5 加氢站换热器的泄漏频率值 （每年）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **场景1** | **场景2** | **场景3** |
| **1×10-2** | **1×10-3** | **1×10-5** |

表A-6 加氢站压力泄放装置泄漏频率值 （每年）

|  |  |
| --- | --- |
| 设备类型 | 泄漏频率 |
| 压力泄放装置 | 2×10-5 |

表A-7 氢气长管拖车/管束式集装箱泄漏频率值 （每年）

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **设备** | **氢气长管拖车/管束式集装箱** | | **装卸软管** | |
| **场景1** | **场景2** | **场景3** | **场景4** |
| 氢气长管拖车/管束式集装箱 | 5×10-7 | 5×10-7 | 4×10-5 | 4×10-6 |
| **注**：场景3、4应结合实际装卸作业的年时长，折算场景对应的年频率。氢气长管拖车/管束式集装箱下部的连接部分泄漏后被点燃形成的火灾，对应频率值通常取1×10-5。氢气长管拖车/管束式集装周边的火灾通常发生在周边氢气罐/储氢气瓶发生泄漏后被点燃，对应的频率值应结合周边泄漏事故发生进行确定。 | | | | |

氢泄漏后立即点火的概率见表A-8；延迟点火的点火概率按照表A-9规定计算。

表A-8 氢气泄漏后立即点火概率

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 设备/装置类型 | 连续释放 | 瞬时释放 | 立即点火概率 |
| 固定装置 | <10 kg/s | <1000 kg | 0.2 |
| 10 kg/s ~ 100 kg/s | 1000 kg ~ 10000 kg | 0.5 |
| > 100 kg/s | > 10000 kg | 0.7 |
| 槽车泄漏 | 泄漏场景 | | 立即点火概率 |
| 连续释放 | | 0.1 |
| 瞬时释放 | | 0.4 |

表A-9 点火源在1min内的点火概率

|  |  |
| --- | --- |
| **点火源** | **1min内的点火概率** |
| 机动车辆 | 0.4 |
| 火焰 | 1.0 |
| 输电线路 | 0.2/100 m |
| 人员 | 0.01/人 |

**A.2 加氢站氢气泄漏、扩散、燃烧、爆炸后果计算**

**A.2.1 氢气经小孔泄漏**

利用式(A.1)定义的压比判断泄漏流动类型：

 (A.1)

对音速流动的氢气泄漏质量流率可按式(A.2)计算：

 (A.2)

对亚音速流动的氢气泄漏质量流率可按式(A.3)计算：

 (A.3)

式中：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *p*0 | — | 环境压力，Pa； |
| *p* | — | 容器/管道内氢气压力，Pa； |
| *γ* | — | 绝热指数，*γ=cp/cv*，对氢气一般可取1.41； |
| *Q* | — | 氢气泄漏质量流率，kg/s； |
| *Cd* | — | 气体泄漏系数，与泄漏孔形状有关，泄漏孔形状为圆形时取1.00，三角形时取0.95，长方形孔时取0.90； |
| *A* | — | 泄漏孔面积，m2； |
| *M* | — | 泄漏氢气的相对分子质量，对氢气可以取2.0； |
| *Rg* | — | 理想气体常数，8.314 J/(mol∙K)； |
| *T* | — | 氢气温度，K； |
| *Y* | — | 流出系数，按式(C.4)计算。 |

 (A.4)

**A.2.2 氢气经断裂管道泄漏**

对于长管或沿管程有较大压差，氢气流速在大部分情况下接近声速，涉及塞流绝热流动情况。已知管长*L*、管内径*d*、上游压力*p*1和温度*T*1，经管道泄漏的氢气质量通量*G*可按下面步骤计算：

a) 根据式（A.5）确定Fanning摩擦系数*f* 。假设是高雷诺数的发展完全的湍流：

 (A.5)

b) 马赫数*Ma*和气体膨胀系数*Y*1可按式(A.6)和(A.7)计算

 (A.6)

 (A.7)

c)氢气泄漏质量流率可按式(A.8)计算：

 (A.8)

式中：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *Ma* | — | 马赫数，无量纲； |
| *L* | — | 管道长度，m； |
| *d* | — | 管道内径，m； |
| *Y*1 | — | 气体膨胀系数，无量纲； |
| *G* | — | 氢气泄漏质量通量，kg/(m2∙s)； |
| *p*1 | — | 上游气体压力，Pa； |
| *pchoked* | — | 下移气体压力，Pa； |
| *T*1 | — | 上游气体温度，K； |
| *T*choked | — | 下游气体温度，K。 |

**A.2.3 氢气扩散计算**

采用Pasquill-Gifford扩散模型的大气稳定度等级及日照等级划分方法按表A-10、A-11。

表A-10 Pasquill-Gifford扩散模型的大气稳定度等级

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 地面风速  m/s | 白天日照 | | | 夜间条件 | |
| 强 | 中等 | 弱 | 阴天且云层薄，或低空云量为4/8 | 天空云量为3/8 |
| <2 | A | A-B | B | F | F |
| 2~3 | A-B | B | C | E | F |
| 3~4 | B | B-C | C | D | E |
| 4~6 | C | C-D | D | D | D |
| >6 | C | D | D | D | D |
| **注**：稳定度等级A—强不稳定；B—中度不稳定；C—弱不稳定；D—中度稳定；E—较稳定；F—稳定。 | | | | | |

表A-11 日照强度确定

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 天空云层情况 | 60 o <日照角 | 35o<日照角<60o | 15o<日照角<35o |
| 天空云量为4/8，或高空有薄云 | 强 | 中等 | 弱 |
| 天空云量为5/8~7/8，云层高度为2 134m~4 877m | 中等 | 弱 | 弱 |
| 天空云量为5/8~7/8，云层高度<2 134m | 弱 | 弱 | 弱 |

a) 基于Pasquill-Gifford模型，位于地面*H*高处的连续稳态泄漏源的烟羽在给定地点(*x, y, z*)的氢气浓度可按式(A.9)计算：

（A.9）

b) 位于地面*H*高处的瞬时点源的烟团，地面上的坐标系随烟团移动，坐标系的中心位于烟团的中心(*x*=*ut*)，在给定地点(*x, y, z*)的氢气浓度可按式(A.10)计算：

（A.10）

式中：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 〈*C*〉(*x, y, z*) | — | 连续泄漏时，形成稳定的流场后，给定地点(*x, y, z*)的氢气浓度，kg/m3； |
| 〈*C*〉(*x, y, z, t*) | — | 瞬时泄漏时，给定地点(*x, y, z*)的氢气浓度，kg/m3； |
| *Q* | — | 连续泄漏的氢气质量流量，kg/s； |
| *Q\** | — | 瞬时泄漏氢气的质量，kg； |
| *u* | — | 风速，m/s； |
| *σx*, *σy*, *σz* | — | 下风向、侧风向和垂直风向的扩散系数，m； |
| *x* | — | 下风向距离，m； |
| *y* | — | 侧风向距离，m； |
| *z* | — | 垂直风向距离，m。 |

方程中参数，烟羽扩散Pasquill-Gifford模型扩散系数方程按表A-12计算，烟团扩散Pasquill-Gifford模型扩散系数方程按表A-13计算。

表A-12 烟羽扩散Pasquill-Gifford模型扩散系数方程（下风向距离*x*的单位为m）

| **Pasquill–gifford 稳定度等级** | | **σ*y*(m)** | **σ*z*(m)** |
| --- | --- | --- | --- |
| 农村条件 | A | 0.22*x*(1 + 0.0001*x*)–1/2 | 0.20*x* |
| B | 0.16*x*(1 + 0.0001*x*)–1/2 | 0.12*x* |
| C | 0.11*x*(1 + 0.0001*x*)–1/2 | 0.08*x*(1 + 0.0002*x*)–1/2 |
| D | 0.08*x*(1 + 0.0001*x*)–1/2 | 0.06*x*(1 + 0.0015*x*)–1/2 |
| E | 0.06*x*(1 + 0.0001*x*)–1/2 | 0.03*x*(1 + 0.0003*x*)–1 |
| F | 0.04*x*(1 + 0.0001*x*)–1/2 | 0.016*x*(1 + 0.0003*x*)–1 |
| 城市条件 | A–B | 0.32*x*(1 + 0.0004*x*)–1/2 | 0.24*x*(1 + 0.001*x*)+1/2 |
| C | 0.22*x*(1 + 0.0004*x*)–1/2 | 0.20*x* |
| D | 0.16*x*(1 + 0.0004*x*)–1/2 | 0.14*x*(1 + 0.0003*x*)–1/2 |
| E–F | 0.11*x*(1 + 0.0004*x*)–1/2 | 0.08*x*(1 + 0.0015*x*)–1/2 |

表A-13 烟团扩散Pasquill-Gifford模型扩散系数方程（下风向距离*x*的单位为m）

| **Pasquill–gifford稳定度等级** | ***σy*(m) 或 *σx* (m)** | ***σz*(m)** |
| --- | --- | --- |
| A | 0.18*x*0.92 | 0.60*x*0.75 |
| B | 0.14*x*0.92 | 0.53*x*0.73 |
| C | 0.10*x*0.92 | 0.34*x*0.71 |
| D | 0.06*x*0.92 | 0.15*x*0.70 |
| E | 0.04*x*0.92 | 0.10*x*0.65 |
| F | 0.02*x*0.89 | 0.05*x*0.61 |

**A.2.4 氢气泄漏引起的火灾后果的计算**

A.2.4.1 氢气泄漏事件树

氢气瞬时释放的事件树按图A-1。氢气连续释放事件树见图A-2。



图A-1 氢气瞬时释放事件树



图A-2 氢气连续释放事件树

**A.2.4.2** 氢喷射火焰长度计算

氢气喷射火，绝大部分属于超音速射流燃烧。氢喷射火焰长度的理论预测采用Delichatsios提出的基于无量纲Froude数的火焰长度计算方法，具体步骤如下：

a) 根据公式(A.11)计算无量纲Fr数，

 (A.11)

式中：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *Frj* | — | 无量纲Froude数； |
| *ue* | — | 喷射口速度，m/s； |
| *fs* | — | 当量比下氢气的质量分数； |
| *ρe* | — | 喷射氢气的密度，kg/m3； |
| *ρ∞* | — | 周围环境气体密度，kg/m3； |
| *dj* | — | 喷射口直径，m； |
| Δ*Tf* | — | 火焰最高温度与周围环境温度的插值，K； |
| *T∞* | — | 环境温度，K； |
| *g* | — | 重力加速度，9.81m/s2。 |

当*Frf*<5时，喷射火焰是浮力驱动；当*Frf* >5时，火焰是动量驱动。

b) 计算喷射火焰长度

无量纲的火焰长度*L*\*可根据式(A.12)计算：

 (A.12)

在浮力驱动条件下(*Frf*<5)，*L*\*按式(A.13计算)：

 (A.13)

在动量驱动条件下(*Frf* >5)，*L*\*按式(A.14计算)：

*L*\*=23 (A.14)

式中：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *L\** | — | 无量纲火焰长度； |
| *Lf* | — | 可见火焰长度，m； |
| *d\** | — | 喷射动力直径，m。 |

**A.2.4.3** 氢气喷射火焰的热辐射计算

a) 火焰驻留时间，可按式(A.15)计算：

 (A.15)

式中：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *τf* | — | 火焰驻留时间，s； |
| *Wf* | — | 火焰宽度，可取值为0.17*Lf*，m； |
| *ρf* | — | 火焰密度，对于在大气环境下的氢火焰可取值0.1489 kg/m3。 |

b) 氢喷射火辐射分数

氢喷射火辐射分数可按式(A.16)计算：

 (A.16)

c) 氢喷射火焰辐射热计算

距离火焰点源*X*(m)处接收到的热辐射通量可按式(A.17)计算：

 (A.17)

式中：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *q* | — | 热辐射通量，kW/m2； |
| *m* | — | 质量流速，kg/s； |
| Δ*Hc* | — | 氢气的燃烧热，285.8 kJ/mol（25°C、101 kPa条件下）； |
| *X* | — | 与火焰点源的距离，m。 |

**A.2.5 氢气云爆炸计算（TNO多能法）**

**A.2.5.1** TNO方法计算步骤

a) 使用扩散模型（参见A.2.3节）计算氢气云范围；

b) 进行区域检查，确定受限/拥挤的区域；

c) 在氢气云（燃烧爆炸上下限范围内）覆盖的区域，确定引起强烈爆炸的潜在源，包括：

* 受限/拥挤的空间和建筑物（如工艺设备、堆叠的物品、平台和管架等）；
* 延展的平行平面之间的空间（如汽车底部与地面之间，开放的多层建筑）；
* 管状结构的内部空间（如走廊、排污管道等）
* 高压氢气泄放喷射形成的剧烈扰动的氢气-空气混合物

d) 通过以下步骤，估算区域内当量氢气与空气混合物所释放的能量：

* 假设每个爆炸源是相互分离独立的；
* 假设氢气云中被识别为爆炸源区域(部分受限/拥挤区域及喷射气流区)中的所有氢气与空气混合物都对爆炸产生贡献；
* 估算存在于每个爆炸源区域内的氢气与空气混合物的体积(估算是基于整个区域的大小，应注意氢气云可能没有充满全部爆炸源区域，同时还要注意考虑设备本身的体积，这部分体积可能占了整个区域体积相当大的比例)；
* 根据式(A.18)计算爆炸的燃烧能：

 (A.18)

式中：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *E* | — | 爆炸源内氢气-空气混合物的燃烧能，J； |
| *Vs* | — | 爆炸源内氢气-空气混合物的体积，m3。 |

e) 估算爆炸源的强度，取值范围为1~10，如

* 对氢气云中未受约束或未受阻碍的部分，取1；
* 对喷射时强扰动的气云部分，取3；
* 典型加氢站工艺单元，取7~9；
* 最大爆炸源强度取10。

f) 计算Sachs比例距离，可按式(A.19)计算：

 (A.19)

式中：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | — | 爆炸源的Sachs比例距离，无量纲； |
| *R* | — | 距离爆炸源中心的距离，m； |
| *p0* | — | 环境大气压，Pa。 |

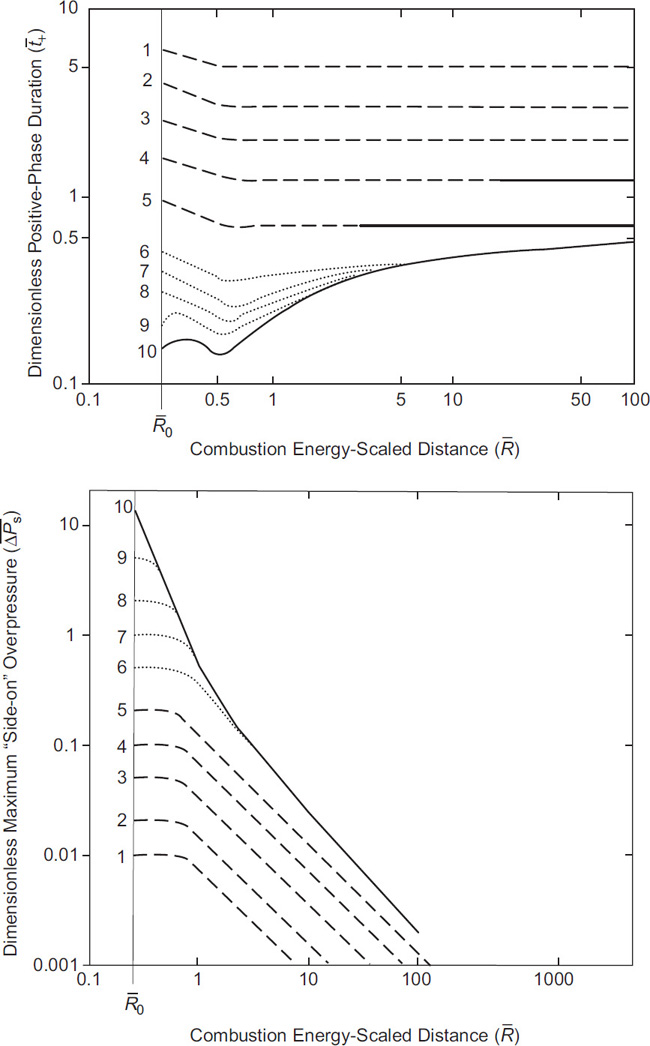
g) 计算爆炸超压

根据Sachs比例距离查图A-3 得到Sachs比例爆炸超压，爆炸超压可以按式(A.20)计算：

 (A.20)

式中：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *ps* | — | 爆炸超压，Pa; |
|  | — | Sachs比例超压，无量纲。 |



图A-3 TNO模型的Sachs比例超压

h) 如果不同的爆炸源之间靠得很近，则它们几乎同时被引爆，各自的爆炸应叠加在一起。对于该问题最为保守的方法是假设爆炸强度为最大源强等级10，并将相邻爆炸源所产生的燃烧能相加。

**A.2.5.2** 爆炸源强度选择可采用Kinsella方法，参见表A-14。

表A-14 定性判断法确定爆炸强度

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 点火能 | | 受阻碍程度 | | | 受约束程度 | | 强度  等级 |
| 强 | 弱 | 强 | 弱 | 不存在阻碍 | 不存在约束 | 存在约束 |
|  | X | X |  |  | X |  | 7~10 |
|  | X | X |  |  |  | X | 7~10 |
| X |  | X |  |  | X |  | 5~7 |
|  | X |  | X |  | X |  | 5~7 |
|  | X |  | X |  |  | X | 4~6 |
|  | X |  |  | X | X |  | 4~6 |
| X |  | X |  |  |  | X | 4~5 |
|  | X |  |  | X |  | X | 4~5 |
| X |  |  | X |  | X |  | 3~5 |
| X |  |  | X |  |  | X | 2~3 |
| X |  |  |  | X | X |  | 1~2 |
| X |  |  |  | X |  | X | 1 |
| 注：X表示选中该场景 | | | | | | | |

**A.2.6 热辐射和超压暴露影响计算**

**A.2.6.1** 热辐射和超压影响阈值

不同热辐射造成是伤害和损坏见表A-15，不同超压对建筑物造成的影响和损坏见表A-16。

表A-15 不同热辐射强度造成的伤害和损坏

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **热辐射强度 kW/m2** | **对设备的损坏** | **对人的伤害** |
| 37.5 | 操作设备损坏 | 1%死亡（10s）  100%死亡（1min） |
| 25.0 | 在无火焰、长时间辐射下木材燃烧的最小能量 | 重大烧伤（10s）  100%死亡（1min） |
| 12.5 | 有火焰时，木材燃烧及塑料熔化的最低能量 | 1度烧伤（10s）  1%死亡（1min） |
| 6.3 |  | 在8s内裸露皮肤有痛感；无热辐射屏蔽设施时，操作人员穿上防护服可停留1min |
| 4.7 |  | 暴露16s，裸露皮肤有痛感；无热辐射屏蔽设施时，操作人员穿上防护服可停留几分钟 |
| 1.58 |  | 长时间暴露无不适感 |

表A-16 不同超压对建筑物造成的影响和损坏

|  |  |
| --- | --- |
| **超压 kPa** | **破坏程度** |
| 0.14 | 令人厌恶的噪声(137 dB，或低频10Hz~15 Hz) |
| 0.21 | 已经处于疲劳状态下的大玻璃偶尔破碎 |
| 0.28 | 产生大的噪声(143dB)、声爆、玻璃破裂 |
| 0.69 | 处于压力应变状态的小玻璃破裂 |
| 1.03 | 玻璃破裂的典型压力 |
| 2.07 | “安全距离”(低于该值，不造成严重损坏的概率为0.95)；抛射物限值；屋顶出现某些破坏；10%的窗户玻璃被打碎 |
| 2.76 | 有限的较小结构破坏 |
| 3.4~6.9 | 大窗户和小窗户通常破碎；窗户框架偶尔遭到破坏 |
| 4.8 | 房屋建筑物受到较小的破坏 |
| 6.9 | 房屋部分破坏，不能居住 |
| 6.9~13.8 | 石棉板粉碎；钢板或铝板起皱，紧固失效；木板固定失效、吹落 |
| 9.0 | 钢结构的建筑物轻微变形 |
| 13.8 | 房屋的墙和屋顶局部坍塌 |
| 13.8~20.7 | 没有加固的混凝土墙毁坏 |
| 15.8 | 严重结构破坏的低限值 |
| 17.2 | 房屋砌砖50%破坏 |
| 20.7 | 钢结构建筑变形，并离开基础 |
| 20.7~27.6 | 自成构架的钢面板建筑破坏；油储罐破裂 |
| 27.6 | 轻工业建筑物的覆层破裂 |
| 34.5 | 木制的支撑柱折断 |
| 34.5~48.2 | 房屋几乎完全破坏 |
| 48.2~55.1 | 未加固的203.2mm~304.8mm厚的砖板因剪切或弯曲导致失效 |
| 68.9 | 建筑物可能全部遭到破坏 |
| 2068 | 形成爆炸坑 |

a) 死亡概率计算

热辐射和超压的影响阈值参见表A-15和A-16。

给定暴露场景下，人员的死亡概率可采用概率函数法计算，死亡概率*Pd*与相应的概率值*P*r函数关系见式(A.21）和式(A.22），*Pd*和*P*r的对应关系参见表A-16。

(A.20）

(A.22）

式中：

*t*——暴露时间，s。

表A-16 *Pd*和*P*r的对应关系

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ***Pd***  **%** | **0** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** |
| 0 |  | 2.67 | 2.95 | 3.12 | 3.25 | 3.36 | 3.45 | 3.52 | 3.59 | 3.66 |
| 10 | 3.72 | 3.77 | 3.82 | 3.87 | 3.92 | 3.96 | 4.01 | 4.05 | 4.08 | 4.12 |
| 20 | 4.16 | 4.19 | 4.23 | 4.26 | 4.29 | 4.33 | 4.36 | 4.39 | 4.42 | 4.45 |
| 30 | 4.48 | 4.50 | 4.53 | 4.56 | 4.59 | 4.61 | 4.64 | 4.67 | 4.69 | 4.72 |
| 40 | 4.75 | 4.77 | 4.80 | 4.82 | 4.85 | 4.87 | 4.90 | 4.92 | 4.95 | 4.97 |
| 50 | 5.00 | 5.03 | 5.05 | 5.08 | 5.10 | 5.13 | 5.15 | 5.18 | 5.20 | 5.23 |
| 60 | 5.25 | 5.28 | 5.31 | 5.33 | 5.36 | 5.39 | 5.41 | 5.44 | 5.47 | 5.50 |
| 70 | 5.52 | 5.55 | 5.58 | 5.61 | 5.64 | 5.67 | 5.71 | 5.74 | 5.77 | 5.81 |
| 80 | 5.84 | 5.88 | 5.92 | 5.95 | 5.99 | 6.04 | 6.08 | 6.13 | 6.18 | 6.23 |
| 90 | 6.28 | 6.34 | 6.41 | 6.48 | 6.55 | 6.64 | 6.75 | 6.88 | 7.05 | 7.33 |
| 99 | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 |
| 7.33 | 7.37 | 7.41 | 7.46 | 7.51 | 7.58 | 7.58 | 7.65 | 7.88 | 8.09 |

b）热辐射危害

火球、喷射火的死亡概率值可按式(A.23）计算：

(A.23）

式中：

*P*rH——热辐射暴露下的死亡概率值；

*Q*——热辐射强度，W/m2；

*t*——暴露时间，s，最大值为20s。

在计算热辐射暴露死亡概率时，处于火球、喷射火火场中或热辐射强度不小于37.5kW/m2时，人员的死亡概率为100%。

c）闪火和爆炸

闪火的火焰区域等于点燃时氢云团浓度超过燃烧下限的范围。闪火火焰区域内，人员的死亡概率为100%；闪火火焰区域外，人员的死亡概率为0。

对于蒸气云爆炸，在超过0.03MPa超压影响的区域内，人员的死亡概率为100%；在0.01MPa超压影响区域外，人员的死亡概率为0。

**A.2.7 定量风险计算**

**A.2.7.1** 当人员处于室外和室内两种情况下时，社会风险可按式(A.24）进行修正：

(A.24）

式中：

*P*SR——社会风险计算时的人口死亡百分比；

*β*SR——社会风险计算时的人口死亡百分比修正因子，取值建表A-17；

*P*d——人员的死亡概率。

表A-17 修正因子*β*SR取值

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 危害场景 | | *β*SR | |
| 室外 | 室内 |
| 爆炸 | 爆炸超压≥0.03 MPa | 1 | 1 |
| 0.01 MPa<爆炸超压<0.03MPa | 注① | |
|  | 0 | 0 |
| 闪火范围内 | | 1 | 1 |
| 闪火范围外 | | 0 | 0 |
| 热辐射强度  <37.5 kW/m2 | 火球 | 0.14② | 0 |
| 喷射火 | 0.14② | 0 |
| 热辐射强度  ≥37.5 kW/m2 | 火球 | 1 | 1 |
| 喷射火 | 1 | 1 |
| 注：  ①爆炸超压0.01MPa~0.03MPa半径区域的室外人员的死亡概率为0；在计算社会风险时，室内人员需考虑建筑物破坏的影响，死亡百分比为2.5%。  ②当计算社会风险时，通常认为在衣服着火以前，室外人员因受到衣服的保护而减弱了热辐射的影响，与没有衣服保护相比，其死亡百分比减小至14%，因此修正因子为0.14。 | | | |

**A.2.7.2** 个人风险计算流程见图A-4，包括以下步骤：

a）选择一个泄漏场景(Loss of Containment, LOC），确定LOC的发生频率*fs*。

b）选择一种天气等级*M*和该天气等级下的一种风向*φ*，给出天气等级*M*和风向*φ*同时出现的联合概率*PM*×*Pφ*。

c）对于氢气释放，选择一个点火事件*i*并确定点火概率*Pi*。

d）计算在特定的LOC、天气等级*M*、风向*φ*及点火事件*i*条件下网格单元上的死亡概率*Pd*，计算中参考高度取1m。

e）计算(LOC、*M*、*φ*、*i*）条件下对网格单元个体风险(Individual Risk, IR）的贡献，按式(A.25）计算。

(A.25）

f）对所有的LOC(*fs*）、*M*、*φ*及*i,*重复a）~e）步的计算；则网格单元处的个人风险按式(A.26）计算。



图A-4 网格单元的个人风险计算程序

**A.2.7.3** 社会风险的计算流程见图A-5，包括以下步骤：

a）首先确定以下条件：

* 确定LOC及其发生频率*fs*；
* 选择天气等级*M*，频率为*PM*；
* 选择*M*天气等级下的一种风向*φ*，频率为*Pφ*；
* 选择条件概率为*Pi*的点火事件*i*。

b）选择一个网格单元*j*，确定网格单元内的人数*N*cell。

c）计算特定的(LOC、*M*、*φ*、*i*）条件下，网格单元*j*内的人口死亡百分比*P*SRj，计算中参考高度取1m。

d）按式(A.27）计算在特定的(LOC、*M*、*φ*、*i*）下的网格单元*j*的死亡人数。

(A.27）

e）对所有网格单元，重复b）~d）步的计算，按式(A.28）计算在特定的(LOC、*M*、*φ*、*i*）条件下的死亡总人数 *NS,M*,*φ*,*i,j*。

f）按式(A.29）计算(LOC、*M*、*φ*、*i*）条件下的联合频率*fS,M*,*φ*,*i*。

(A.29）

g）对所有的LOC(fs）、M、φ及i,重复a）~f）步的计算，按式(A.30）用累积死亡总人数≥N的所有事故发生的频率构造*F-N*曲线。



图A-5 网格单元的社会风险计算流程

**A.3 某加氢站QRA分析结果示例**

**(1)** 案例**背景**：某加氢站设计参数：

* 储氢罐：2个储罐，单罐容量45 kg，压力35 MPa；
* 压缩机：最大工作压力45 MPa；
* 加氢机：4台，单机加注速率2 kg/min；
* 环境参数：风速2 m/s(平均)，F类大气稳定度(夜间)，周围500米内有居民区。

**目标：**确定加氢站安全距离，确保个人风险和社会风险符合可接受标准（个人风险≤1×10⁻⁶/年，社会风险FN曲线低于1×10⁻³/年）。

**(2) QRA 数据与步骤**

① 危害识别

主要风险场景：

* 储氢罐泄漏（小孔、中孔、大孔）；
* 压缩机泄漏引发射流火；
* 管道破裂引发闪火或爆炸；
* 加氢机泄漏导致局部火灾。

②频率分析

见表A-15

表A-18 加氢站事故频率和数据来源

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 设备/场景 | 泄漏频率(次/年) | 数据来源 |
| 储氢罐小孔泄漏 | 1×10⁻³ | 工艺设备失效数据库 |
| 储氢罐大孔破裂 | 1×10⁻⁵ | 工艺设备失效数据库 |
| 压缩机泄漏 | 5×10⁻³ | 工艺设备失效数据库 |
| 加氢机泄漏 | 2×10⁻² | 工艺设备失效数据库 |

③ 后果分析

计算氢气泄漏后果（以储氢罐大孔破裂为例）：

* 泄漏参数：孔径50 mm，压力35 MPa，泄漏时间60秒；
* 点火概率：氢气扩散后遇点火源概率为30%（保守假设）；
* 后果类型：爆炸（爆燃超压）、射流火热辐射。

结果见表A-19。

表A-19 储罐大孔破裂氢气泄漏后果和影响范围

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 后果类型 | 影响阈值 | 影响距离（m） |
| 热辐射（4kW/m2） | 50%致死率(保守值) | 25 |
| 爆炸超压（30kPa） | 建筑物严重损坏 | 50 |
| 可燃云团范围（LFL） | 氢气浓度≥4% | 120 |

④ 风险计算

**个人风险：**计算某一点因所有场景导致的死亡概率总和。例如，距离储氢罐30米处的个人风险（包括储氢罐大孔破裂和压缩机泄漏两个场景）：

*IR*=(1×10-5×0.3×0.5)+（5×10-3×0.3×0.1）=1.65×10-6/年

超过可接受标准（1×10-6/年），需调整布局。

**社会风险：**绘制FN曲线（累积频率-死亡人数），评估群体风险。

假设爆炸导致50米内最多3人死亡，100米内1人受伤，社会风险为：

*F*(*N*)=1×10-5×0.3=3×10-6/年（*N*=3），满足社会风险要求。

# 附录 B

# （资料性）

# 加氢站HAZOP分析结果示例

本示例选自公开发表的学位论文，旨在介绍HAZOP分析方法在加氢站中的应用。

**B.1 加氢站节点划分**

某35MPa加氢站，主要由卸氢柱、压缩机、[储氢](https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/hydrogen-storage)瓶组、顺序控制面板、[冷水机组](https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/chiller)、[换热器](https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/heat-exchanger)、加氢机等设备和氢气管道组成，根据氢气的来源，加氢站可分为外部加氢站和内部加氢站。

遵循功能独立性和风险同质性的原则，将整个加氢流程划分为卸氢单元、压缩单元、储氢单元和加氢单元四个主要节点。其中，卸氢单元包括长管拖车至卸气柱的输送系统；压缩单元和储氢单元包括压缩机、冷却系统和分级储氢瓶组（低压、中压、高压）；加注单元由加氢机、预冷装置及连接管路构成；辅助系统包含氮气吹扫、安全泄放，包含于各分单元中。

**B.2 加氢站的HAZOP分析结果**

以6.2和6.3节提出的HAZOP分析流程和步骤，针对某加氢站关键风险因素分析记录表如表B.1和B.2，严重性（S）和发生概率（L）是用来评估风险的重要参数，参考HAZOPkit中专家数据库作为风险参数的设定依据。

表B.1 加氢站HAZOP分析结果示例（卸氢单元节点）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 分析项目：xxxx加氢站HAZOP分析 | | | | | | | | 表页：1/2 | |
| 图纸编号 | | 版本号： | | | | | | 日期： | |
| 小组成员： | | 成员A、成员B、成员C、成员D、成员F、成员G | | | | | | 会议日期： | |
| 节点： | | 氢气卸车系统 | | | | | |  | |
| 设计意图： | | 将氢气运输车辆卸载的氢气输送到氢气压缩系统，输送的流量、出口压缩不得超过压缩机的允许值，氢气不能反向流动。 | | | | | | | |
| 序号 | 引导词 | 参数 | 偏离 | 可能的原因 | 后果 | 安全措施 | 备注 | 建议措施 | 责任人 |
| 1 | 过小/无 | 流量 | 流量低/无流量 | 人员操作或长管拖车移动导致卸氢软管脱落（卸氢区域） | 氢气从软管脱落处泄漏，高压氢气快速泄漏摩擦产生静电，形成喷射火，大量氢气泄漏至大气，与空气混合形成爆炸性气体，发生爆炸，导致1-2人伤亡 | 可燃气体探测仪 | 风险高 | 长管拖车区域设有可燃气体探测仪，远传报警；长管拖车设置有轮挡，防止长管拖车滑动；长管拖车氢气输送管道上设置有压力变送器，当压力达到设定值（3MPa），远传报警；有软管预防性维修计划，要求对螺纹连接的软管接头定期检查 | 成员A |
| 2 | 过小/无 | 流量 | 流量低/无流量 | 进气相关阀门故障卡涩（压缩区域） | 严重时导致氢气管道破裂，氢气释放，形成爆炸性混合气体，遇着火源爆照造成伤亡 | 可燃气体探测仪 | 风险中 | 压缩机区域设有氢气检测器；定期对阀门进行检修 | 成员A |
| 3 | 过大 | 流量 | 流量高 | 长管拖车卸氢时充装过快使压缩机输出高压氢气流量过大（压缩区域） | 输送管道流量升高，严重时氢气管道破裂，氢气泄漏，喷射火，引起火灾爆炸，造成1-2人死亡 | 流量监测 | 风险中 | 设置有流量显示及流量联锁控制系统报警 | 成员B |

表B.2 加氢站HAZOP分析结果示例（压缩单元节点）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 分析项目：xxxx加氢站HAZOP分析 | | | | | | | | 表页：1/2 | |
| 图纸编号 | | 版本号： | | | | | | 日期： | |
| 小组成员： | | 成员A、成员B、成员C、成员D、成员F | | | | | | 会议日期： | |
| 节点： | | 氢气压缩系统 | | | | | |  | |
| 设计意图： | | 将卸氢单元输送的低压或中压氢气压缩至高压，以满足储氢系统和加氢系统的需求。该节点包含高压气体压缩、温度控制、压力调节及安全保护系统等装置。 | | | | | | | |
| 序号 | 引导词 | 参数 | 偏离 | 可能的  原因 | 后果 | 安全措施 | 备注 | 建议措施 | 责任人 |
| 1 | 过小/无 | 压力 | 压力过小 | 1.安全阀由于安装不良问题打开；  2.氢气大量泄漏；  3.压力显示器故障 | 氢气泄漏，高压氢气快速泄漏摩擦产生静电，形成喷射火，大量氢气泄漏至大气，与空气混合形成爆炸性气体，发生爆炸，导致1-2人伤亡 | 可燃气体探测仪 | 风险高 | 添加由流量显示器触发的低压紧急停车装置；若压力过低，安装在中压缓冲罐尾部的切断阀应保持关闭。  应设置通风管道以避免可燃气体被点燃对人员和设备造成损害。  安装流量指示控制器 | 成员A |
| 2 | 过大 | 压力 | 压力过大 | 1.中压缓冲罐压力显示器故障；  2.缓冲罐泄压阀封死；  3.安装问题造成安全阀故障打不开  4.下段截止阀堵塞5.管道由于杂质被堵塞 | 超出设备可承受最大压力，设备损坏，缓冲罐超压、泄漏、爆炸；  因为有安全阀的存在，不会造成严重后果。 | 超压报警  超压安全泄放装置 | 风险中 | 定期检查压力显示器的工作状态；  定期检查泄压阀工作状态；  测试安全阀、爆破片等安全附件定期检查过滤装置；  安装超压报警及连锁装置 | 成员A |
| 3 | 过大 | 流量 | 流量高 | 1.进口的压力增加；  2.系统控制失效；  3.阀门失效 | 设备损坏 | 流量监测 | 风险中 | 设置有流量显示及流量联锁控制系统报警 | 成员B |
| 4 | 过小 | 流量 | 流量低 | 1.氢气进料管堵塞或破裂；  2.中压缓冲罐破裂；  3.管道接头损坏；  4.设备失效。 | 产出氢气减少 | 流量监测 | 风险中 | 在系统进行任何修改时需进行氮气压力测试；  添加由流量显示器触发的低压停车装置；  安装物料泄漏报警装置；  安装流量指示控制器。 | 成员B |

# 附录 C

# （资料性）

# 加氢站LOPA分析基础数据及示例

**C.1** **危害事件严重度等级划分及可接受频率**

安全相关风险严重等级划分及可接受频率见表C-1，环境相关风险严重等级划分及可接受频率见表C-2，财产相关风险严重等级划分及可接受频率见表C-3，非财务性影响与社会影响相关风险严重等级划分及可接受频率见表C-4。

表C-1 安全相关风险严重等级划分及可接受频率

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 严重程度 | 安全相关风险 | 可接受频率（/y） |
| 5级 | 造成10人以上死亡，或者50人以上重伤 | 1×10-7 |
| 4级 | 造成3人以上10人以下死亡，或者10人以上50人以下重伤 | 1×10-6 |
| 3级 | 造成3人以下死亡，或者3人以上10人以下重伤，或者10人以上轻伤 | 1×10-5 |
| 2级 | 造成3人以下重伤，或者3人以上10人以下轻伤 | 1×10-3 |
| 1级 | 造成3人以下轻伤 | 1×10-1 |

表C-2 环境相关风险严重等级划分及可接受频率

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 严重程度 | 环境相关风险 | 可接受频率（/y） |
| 5级 | 重大泄漏，给工作场所外带来严重的环境影响，且会导致直接或潜在的健康危害 | 1×10-6 |
| 4级 | 重大泄漏，给工作场所外带来严重影响 | 1×10-5 |
| 3级 | 释放事件受到管理部门的通报或违反允许条件 | 1×10-4 |
| 2级 | 事件不会受到管理部门的通报或违反允许条件 | 1×10-2 |
| 1级 | 危险物质泄漏，不影响现场以外区域，微损，可很快清除 | 1×10-1 |

表C-3 财产相关风险严重等级划分及可接受频率

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 严重程度 | 财产相关风险 | 可接受频率（/y） |
| 5级 | 造成5000万元以上直接经济损失 | 1×10-6 |
| 4级 | 造成1000万元以上5000万元以下直接经济损失 | 1×10-5 |
| 3级 | 造成100万元以上1000万元以下直接经济损失 | 1×10-4 |
| 2级 | 造成10万元以上100万元以下直接经济损失 | 1×10-2 |
| 1级 | 造成1000元以上10万元以下直接经济损失 | 1×10-1 |

表C-4 非财务性影响与社会影响相关风险严重等级划分及可接受频率

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 严重程度 | 非财务性影响与社会影响相关风险 | 可接受频率（/y） |
| 5级 | 1.引起了国家相关部门采取强制性措施；  2.在全国范围内造成严重的社会影响；  3.引起国内国际媒体重点跟踪报道或系列报道。 | 1×10-6 |
| 4级 | 1.引起国内或国际媒体长期负面关注；  2.造成省级范围内的不利社会影响；对省级公共设施的日常运行造成严重干扰；  3.引起了省级政府相关部门采取强制性措施；  4.导致失去当地市场的生产、经营和销售许可证。 | 1×10-5 |
| 3级 | 1.引起地方政府相关监管部门采取强制性措施；  2.引起国内或国际媒体的短期负面报道。 | 1×10-4 |
| 2级 | 1.存在合规性问题，不会造成严重的安全后果或不会导致地方政府相关监管部门采取强制性措施；  2.当地媒体的长期报道；  3.在当地造成不利的社会影响,对当地公共设施的日常运行造成严重干扰。 | 1×10-2 |
| 1级 | 1.当地媒体的短期报道；  2.对当地公共设施的日常运行造成干扰（如:导致某道路在24小时内无法正常通行） | 1×10-1 |

**C.2** **加氢站危险场景主要类别**

表C-5为初始事件的主要类别，表C-6为中间事件的主要类别，表C-7为使能条件的主要类别。

表C-5 加氢站危险场景初始事件的主要类别

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **类别** | **外部事件** | **设备故障（失效）** | **人因失效** |
| 分类 | 1）地震、海啸、龙卷风、飓风、洪水、泥石流和滑坡等自然灾害；  2）空难；  3）临近站区的重大事故、破坏或恐怖活动；  4）雷击和外部火灾；  5）其他外部事件 | a）控制系统失效：包括硬件失效，软件失效；  b）仪表设备故障；  c）通讯设备故障；  d）电气设备故障；  e）机械设备故障；  f）辅助系统故障；  g）其他故障 | a）对给出的条件或其他提示未能正确观察或响应；  c）未按操作规程进行操作；  d）未按维护规程进行操作；  e）未按管理规定作业；  f）其他行为失误； |

表C-6 加氢站危险场景中间事件的主要类别

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **类别** | **物理状态变化** | **设备功能失效** | **人员干预失效** | **环境条件恶化** |
| 示例 | 压力/温度/流量超出安全范围 | 压缩机未启动/联锁系统未触发。 | 操作员未及时响应报警/应急程序执行错误 | 泄漏物质扩散至受限空间/通风系统故障。 |

表C-7 加氢站使能条件的主要类别

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **类别** | **环境条件** | **设备运行状态** | **人员暴露状态** | **外部事件叠加** | **工艺状态异常** |
| 示例 | 通风不良  高温环境 | 备用系统未投入使用 | 人员处于危险区域 | 存在点火源 | 氢气纯度不足 |

**C.3 加氢站****典型保护层及其要求时的失效概率**

加氢站的典型独立保护层见表C-8。

表C-8 加氢站典型的保护层

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **保护层** | **描述** | **说明** | **实列** | **作为IPL的要求** |
| 本质安全设计 | 从根本上消除或减少工艺系统存在的危害。 | 可根据具体场景需要，确定是否将其作为IPL。 | 储氢容器、管道基于失效模式的设计 | 1）当本质安全设计用来消除某些场景时，不应作为IPL；  2）当考虑本质安全设计在运行和维护过程中的失效时，在某些场景中，可将其作为一种IPL。 |
| 基本过程控制  系统(BPCS） | 执行持续监测和控制加氢站日常生产，加氢站采用的一般是DCS、PLC | 可提供三种不同类型的安全功能作为IPL：  1）连续控制行动：保持过程参数维持在规定的正常范围以内，防止IE发生；  2）报警行动：识别超出正常范围的过程偏差，并向操作人员提供报警信息，促使操作人员采取行动(控制过程或停车）；  3）逻辑行动：行动将导致停车或采取动作使过程处于安全状态 | 加氢站DCS、压缩机PLC、加氢机控制系统等 | 控制回路的正常操作满足以下要求：  a）与SIF在物理上分离，包括传感器、逻辑解算器和最终元件；  b）正常运行时能避免特定危险事件的发生；  c）故障不会作为起因引起特定危险事件的发生。 |
| 关键报警和人员响应 | 操作人员或其它工作人员对报警响应，或在系统常规检查后，采取的防止不良后果的行动。 | 通常认为人员响应的可靠性较低，应慎重考虑人员行动作为独立保护层的有效性。 | 储氢容器、压缩机压力、温度高报警和人员响应。 | 1）操作人能得到采取行动的指示或报警；  2）操作人员训练有素，能完成特定报警所要求的操作任务；  3）任务具有单一性和可操作性，不宜要求操作人员执行IPL要求的行动时同时执行其它任务；  4）操作人员有足够的响应时间；  5）操作人员身体条件合适等 |
| 安全仪表功能  (SIF） | 针对特定危险事件通过检测超限等异常条件，控制过程进入功能安全状态。 | 一个安全仪表功能由传感器、逻辑控制器和最终执行元件组成，具有一定的SIL SIF在功能上独立于BPCS。 | 目前加氢站尚未采用具有SIL等级的SIS | 1）功能上独立于BPCS；  2）规格、设计、调试、检验、维护和测试应按GB/T 20438的有关规定执行。  3）SIF的风险削减性能由其PFD所确定，每个SIF的PFD基于传感器、逻辑解算器和最终元件的数量和类型；以及系统元件定期功能测试的时间间隔。 |
| 物理保护 | 提供超压保护，防止容器、管道的灾难性破裂 | 加氢站采用了安全阀、放空阀 | 1）安全阀；  4）放空阀。 | 1）独立于场景中的其他保护层；  2）在确定安全阀的PFD时，应考虑其实际运行环境中可能出现的污染、堵塞、腐蚀、不恰当维护等因素对PFD进行修正；  3）当物理保护作为IPL时，应考虑物理保护起作用后可能造成的其他危害，并重新假设LOPA场景进行评估。 |
| 释放后保护设施 | 危险物质释放后，用来降低事故后果的保护设施（如防止大面积泄漏扩散、降低受保护设备和建筑物的冲击波破坏、防止容器或管道火灾暴露失效、防止火焰或爆轰波穿过管道系统等）的保护设施。 | 站区的应急响应(人工喷水系统、站区撤离等措施）通常不作为独立保护层，因为它们是在初始释放后被激活，并且有太多因素影响了它们在减缓场景方面的整体有效性。当考虑它作为独立保护层时，应提供足够证据证明其有效性 | 1）可燃气体检测报警系统、泄漏或火灾后紧急切断系统、火灾报警系统等；  2）防火堤及收集系统等；  3）耐火涂层、防火门、阻火器、消防系统(水幕、自动灭火系统等  4）防爆墙或防爆舱、隔爆器、泄压板、水雾系统、减爆剂、惰化系统等；  6）电视监视系统。 | 1）独立于场景中的其他保护层  2）在确定阻火器、隔爆器等设备的PFD时，应考虑其实际运行环境中可能出现的污染、堵塞、腐蚀、不恰当维护等因素对 PFD 进行修正。 |
| 工厂和社区应急响应 | 在初始释放之后被激活，其整体有效性受多种因素影响。 |  | 消防队、加氢站撤离、社区撤离、避难所和应急预案等。 | 应确认其有效性。 |

典型独立保护层要求时的失效概率见表C-9。

表C-9 典型独立保护层要求时的失效概率

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| IPL | | PFD（推荐值） | 选取推荐值具体要求（假设具有完善的设计基础、充足的检测和维护程序，良好的培训） |
| 本质安全设计 | | 1×10-2～1×10-4 | 从根本上消除或减少工艺系统存在的危害，考虑本质安全设计在运行和维护过程中的失效时，在某些事故场景中，可将其作为一种IPL。 |
| BPCS | | 1×10-1 | 1. BPCS作为独立保护层应与初始事件无关； 2. BPCS取值小于10-1时应满足GB/T 21109.1相关要求。 |
| 关键报警和人员响应 | | 1×10-1 | a）操作人员应能够得到采取行动的指示或报警；  b）操作人员应训练有素，能够完成特定报警所要求的操作任务；  c）任务应具有单一性和可操作性，不宜要求操作人员执行IPL要求的行动时同时执行其它任务；  d）操作人员应有足够的响应时间；  e）操作人员身体条件合适等。 |
| 安全仪表功能 | 安全仪表功能SIL1 | 1×10-1或SIL评估PFD值 | 满足GB/T 21109要求 |
| 安全仪表功能SIL2 | 1×10-2或SIL评估PFD值 | 满足GB/T 21109要求 |
| 安全仪表功能SIL3 | 1×10-3或SIL评估PFD值 | 满足GB/T 21109要求 |
| 物理保护 | 安全阀 | 1×10-1～1×10-2 | 应考虑其实际运行环境中可能出现的污染、堵塞、腐蚀等因素确定PFD |
| 爆破片 | 1×10-1～1×10-2 |
| 释放后保护措施 | 防火堤 | 1×10-2 | 降低由于储罐溢流、断裂、泄漏等造成严重后果（大面积扩散）的频率，一般应用于环境相关风险场景 |
| 地下排污系统 | 1×10-2 | 降低由于储罐溢流、断裂、泄漏等造成严重后果（大面积扩散）的频率，一般应用于环境相关风险场景 |
| 开式通风口 | 1×10-2 | 防止超压 |
| 防爆墙/舱 | 1×10-2 | 限制冲击波，保护设备/建筑物等，降低爆炸重大后果的频率 |
| 阻火器或防爆器 | 1×10-2 | 防止通过管道系统或进入容器或储罐内的潜在回火事故后果 |

**C.3 加氢站LOPA分析示例**

仍以B.2的加氢站为例，经过HAZOP分析得出的风险较大的事故场景、偏差产生的原因及其发生概率，是LOPA的分析的基础；分析中提出的现有保护措施，是LOPA分析独立保护层有效性的前提。基于HAZOP分析结果说明加氢软管疲劳破裂是加氢站氢气泄漏关键致因因素，需进行进一步的LOPA分析。

a）场景定义与后果分析：

* 危险场景：在加氢作业过程中或待机保压状态下，加氢软管因材料疲劳、频繁弯曲、压力循环冲击等原因发生破裂。
* 初始事件：加氢软管疲劳破裂引发氢气持续泄漏
* 后果：高压氢气瞬间喷射泄漏
* 后果严重度等级：高压氢气喷射泄漏极易形成可爆气云，遇点火源（如静电、车辆电器、明火等）会发生剧烈爆炸和火灾。可能导致人员严重伤亡、重大财产损失、加氢站完全损毁及严重的环境和社会影响。事故后果等级定义为高（可能造成人员死亡和重大财产损失）

b) 确定初始事件频率：根据行业数据、制造商提供的平均无故障时间（MTTF）或基于应力分析的计算，此类高质量软管在规范操作下发生意外破裂的频率约为0.01次/年。氢气发生连续泄漏后的立即点火概率为0.1次/年。

c）识别独立保护层（IPL）及评估其失效概率（PFD）

依据IPL有效性标准（独立性、可审查性、可靠性），现有保护层如下：

表C-10 独立保护层评估

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **保护层** | **是否IPL** | **PFD** | **依据** |
| 软管破裂检测系统 | 是 | 0.1 | 压力骤降联锁停泵，但传感器可能失效 |
| 操作员手动急停 | 否 | - | 依赖人员响应速度（>30秒），不满足独立性 |
| 安全泄放装置 | 否 | - | 针对超压设计，对软管破裂无效 |
| 氢气泄漏探测器 | 是 | 0.01 | 高灵敏度（ppm级），联锁关闭阀门 |
| 加氢区防爆墙 | 是 | 0.01 | 物理隔离，阻隔爆炸冲击波 |
| SIS联锁系统（SIL2） | 是 | 0.01 | 独立于BPCS，触发紧急切断 |

d）剩余风险计算：

事故场景发生概率可根据式(C.1)计算：

 (C.1)

式中：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | — | 当前分析风险点产生后果C的频率，次/年； |
|  | — | 场景*n*的初始事件发生频率，0.01次/年； |
|  | — | 场景*n*的使能事件或使能条件发生的概率，氢气泄漏发生立即点火的概率取0.1次/年 |
|  | — | 场景*n*的初始事件的条件修正因子，假如没有任何条件修正，则取1； |
|  | — | 引发场景*n*的初始事件中第*j*个独立保护层要求时危险失效概率(PFD），根据表E.6选取； |
| *J* | — | 本场景中使用到的独立保护层数量。 |

 次/年。

e）可接受标准

* 个人风险：低于10-6/年（GB/T 32857）
* 社会风险：

假设发生事故时计算网格内人数*Ncell*=3人，超压爆炸致死率*PSRj*=90%，根据式(C.27)可以得到总死亡人数是*N*=3×0.9=2.7≈3人。

算事故频率为10-10 次/年，参考图4.1，在FN曲线可接受区。

f）结论

在现有的四个独立保护层的共同作用下，将该危险场景的风险频率10-10 次/年降低到了10-10 次/年。这个风险水平可接受的范围。

因此，现有的保护层足以显著地将风险降低到可接受的水平。

# 附录 D

# （资料性）

# 储氢容器失效模式

**D.1 塑料垮塌**

塑性垮塌是设备在逐渐增大的载荷作用下最后因发生垮塌而丧失承载能力的失效模式。

a）失效现象。压力容器塑性垮塌表现为容器出现整体鼓胀、局部凹陷或屈曲、法兰变形等现象。塑性垮塌引起断裂的断口呈韧性撕裂状，边缘粗糙且伴有明显颈缩（与脆性断裂的光滑断面形成对比），断口附近可见剪切唇，破裂方向通常沿环向或纵向的最大主应力方向开裂，微观组织变化可能出现晶粒畸变与滑移带。

b）失效机理。塑性垮塌的失效过程分为以下四个阶段：

* 第一阶段：弹性阶段。当载荷较小时，整个结构都处于弹性状态，即各点的应力值随应变值成正比例增大关系。当载荷增大到弹性极限 （也称初屈服载荷） 时，最大应力点处进入塑性，弹性阶段即告结束；
* 第二阶段：局部塑性变形阶段。弹性阶段结束后，局部将进入塑性阶段，随着载荷增加，局部塑性区不断扩大。此时结构处于可控的整体弹性－局部塑性变形状态，此时结构无明显变形；
* 第三阶段：总体塑性变形阶段。当载荷继续增大到某一值后，结构的所有点都将进入塑性阶段，结构的整体弹性变形状态丧失，出现显著的总体塑性变形；
* 第四阶段：垮塌阶段。当载荷继续增大，达到最大承载能力时，结构发生巨大的流动变形而垮塌，此时的载荷是垮塌载荷。

c）失效原因。引起储氢设备塑性垮塌的原因主要有：

* 强度不足。选材不当、选材错误、结构设计不合理等导致承载能力不足；
* 超压运行。工艺异常、操作失误、安全阀失效等导致内压超过设计极限；
* 局部应力集中。结构不连续处（如接管、支座）因设计不合理或制造缺陷引发局部屈服。

d）失效后果。储氢容器发生塑性垮塌时，可能会造成以下后果：

* 设备或其部件因发生塑性变形而损坏，造成财产损失和生产中断；
* 塑性垮塌引起的变形如不能及时被发现，变形积累后可能快速失效，造成爆炸或碎片飞溅；
* 氢气泄漏导致燃爆。

e）防控措施。宜包括但不限于：

* 按GB/T 44457第6.2小节的要求对塑性垮塌进行失效评定，评定压力容器的壁厚及其它几何尺寸能否保证其可能承受的最大载荷不超过其垮塌载荷，同时要留有足够的安全裕量；
* 加装爆破片或安全阀，防止超压导致塑性变形：
* 按标准的要求选用材料，临氢材料应选用与氢气具有良好相容性的材料；
* 储氢设备充氢前进行空气置换；
* 使用过程中进行氢气置换，使用过程中对设备进行巡检，检测设备是否有异常变形；
* 通过耐压试验验证设备的强度。

**D.2 脆性断裂**

脆性断裂是设备发生没有明显变形的断裂的失效模式。

a）失效现象。脆性断裂可以是局部的断裂，也可能是整体的爆破。发生脆性断裂时，断面的名义应力远小于材料的屈服强度，通常事前没有征兆，设备内压力没有达到甚至可能远低于最高允许工作压力，断裂前设备也无明显的形状变化，没有直径的增大及壁厚的减薄，整体爆破后一般都会产生碎片。脆性断裂的断口平齐，呈放射状或人字纹，无明显颈缩。

b）失效机理。脆性断裂的失效过程可分为两个阶段：

* 第一阶段：裂纹形成。材料内部因缺陷（如夹杂物、空位、晶界等）或应力集中形成微裂纹；
* 第二阶段：裂纹扩展。当应力超过临界值时，第一阶段形成的微裂纹尖端应力集中导致裂纹快速扩展，直至贯穿整个材料。

c）失效原因。引起储氢设备脆性断裂的原因主要有：

* 材料的脆性。目前储氢设备常用的材料S316、4130X都具有良好的韧性，材料脆性高的情况可能有：使用温度超过设计温度允许值，导致整体材料变脆；热处理不均匀导致设备局部材料变硬、变脆；焊接接头存在残余应力导致变硬、变脆；氢脆导致材料变脆。
* 重大缺陷。可能存在的重大缺陷包括：焊接缺陷，疲劳裂纹，氢脆引起裂纹。
* 冲击。化学爆炸或激波冲击可能导致脆性断裂。

d）失效后果。脆性断裂会引起爆炸，断裂瞬间释放大量能量，碎片飞溅造成二次伤害，另外，还会引起氢气急速外泄，造成燃爆。

e）防控措施。宜包括但不限于：

* 按标准的要求选材，材料应能适用使用地的环境温度，并与氢气具有良好的相容性；
* 按GB/T 44457第6.5.4 中疲劳裂纹扩展分析法对脆性断裂失效进行评定；
* 对焊缝进行冲击试验；
* 进行无损检测，有焊缝的要进行焊缝的探伤；
* 采用尽可能圆滑的结构；
* 通过水压爆破试验验证断裂形式及断裂时的变形量；
* 对热处理后的硬度上限值进行控制；
* 限定设备的使用环境温度。

**D.3 局部过度应变**

局部过度应变失效是设备特定区域（如开孔、焊缝、几何突变处）的应变远超材料承受能力而发生塑性变形或裂开的失效模式。

a）失效现象。在设备的局部，材料发生颈缩、鼓胀等不可逆的塑性变形，或出现开裂或快速破裂。

b）失效机理。局部过度应变的失效过程分为以下三个阶段:

* 第一阶段：塑性变形。在设备局部，应力超过了材料的屈服强度时，导致不可逆的塑性变形。在单向拉伸状态下，局部薄弱区域存在应变集中，会引起截面收缩，形成颈缩；在复杂应力状态会加速颈缩，降低材料的有效延展性。
* 第二阶段：损伤累积与微观破坏。材料中的夹杂物或第二相粒子与基体界面因高应变分离，形成微米级空洞。空洞在塑性应变作用下长大、连接，形成微观裂纹。剪切带内的裂纹沿晶界或穿晶扩展，最终贯通。
* 第三阶段：宏观失效。薄壁区域在内压或外压作用下，因局部屈服发生鼓包或塌陷，裂纹优先沿最大主应变方向延伸。平面应变状态下，易发生低延性断裂；平面应力状态则表现为韧性撕裂。

c）失效原因。引起局部过度应变的原因主要有：

* 设计原因。结构不连续或壁厚不足导致应力集中。载荷工况考虑不全面或未考虑多种载荷的耦合作用。
* 材料原因。材料延展性不足或存在夹杂物、气孔等微观缺陷。
* 制造与工艺原因。存在焊接缺陷；冷加工导致材料塑性下降。装配存在偏差。

d）失效后果。储氢容器发生局部过度变形会引起以下后果：

* 局部因出现鼓包、凹陷、颈缩或发生裂纹、穿孔、撕裂而破坏，造成财产损失和生产中断。
* 氢气发生泄漏，并可能进而引起燃爆。

e）防控措施。宜包括但不限于：

* 按GB/T 44457第6.3小节的要求进行局部过度应变失效评定；
* 优化几何过渡，减小应力集中；
* 按标准的要求选用材料，保证材料的塑性、韧性指标达标；
* 安装应变片监测高风险区域实时变形。

**D.4 疲劳断裂**

疲劳是设备在交变载荷作用下，经一定循环次数后产生裂纹并瞬时发生断裂失效的失效模式。

a）失效现象。设备发生疲劳断裂时，无明显的整体屈服变形，断裂的位置不固定，但总是在应力集中部位首先开始，一般只是裂开一道较小的缝后泄放出介质，不会裂成碎片。

b）失效机理。疲劳失效有三种不同的机理：疲劳应力较低时（在弹性范围内），失效时经历的循环次数较多，一般称为高周疲劳（弹性疲劳）；疲劳应力较高时，失效时经历的循环次数较少，一般称为低周疲劳（弹-塑性疲劳）；当疲劳应力很高，超出材料屈服极限的2倍时，结构处于不安定状态，经过很少的循环次数就会发生疲劳断裂，一般称为塑性疲劳。储氢设备疲劳属于高周疲劳，疲劳失效的过程是：

* 第一阶段：初始化阶段。在加载开始时，材料中存在微小的缺陷，如微裂纹、夹杂物或晶界缺陷。这些缺陷可能是由材料制造过程中引入的，或者是由于外界环境的影响而发展的。
* 第二阶段：裂纹扩展阶段。在循环加载下，应力作用于材料中的缺陷，导致裂纹从缺陷处开始扩展。
* 第三阶段：慢速扩展阶段。在裂纹扩展过程中，当裂纹长度增加到一定程度时，裂纹的扩展速率会减缓。
* 第四阶段：加速扩展阶段。当裂纹继续扩展并达到一定长度时，裂纹的扩展速率会加速增长。
* 第五阶段：破坏阶段。在裂纹加速扩展到一定程度时，裂纹的长度达到临界值，材料无法承受继续加载而发生破坏。

c）失效原因。疲劳断裂的具体原因有结构不良造成了应力集中，存在制造缺陷、冲击、振动等。

d）失效后果。储氢容器疲劳失效会导致氢气泄漏并进而引起燃爆，同时伴随异常声响，引起社会恐慌。

e）防控措施。宜包括但不限于：

* 按GB/T 44457第6.5小节的要求对疲劳失效进行评定；
* 设备结构要尽可能圆滑；
* 记录压力波动范围和次数，并确保压力循环总次数不超过设计循环次数且使用年限不超过设计使用年限。

**D.5 接头泄漏**

接头泄漏是指在法兰连接接头、螺纹连接接头、焊接接头、卡套连接接头等部位发生介质外泄的失效模式。

a）失效现象。在法兰连接接头、螺纹连接接头、焊接接头、卡套接头等部位发生介质外漏，可能同时伴有异常声响。

b）失效机理。接头泄漏的失效机理主要有：

* 密封失效。包括：密封面发生变形或腐蚀、磨损等损伤引起密封失效；密封材料发生老化、硬化、蠕变松弛等引起密封失效
* 连接结构失效。包括：螺纹连接松动、松弛、装配不当，焊接接头存在裂纹、残余应力、几何缺陷等，法兰存在预紧力不足、变形，卡套出现松动等。
* 氢渗透。氢分子通过密封材料微观孔隙渗透逸出。

c）失效原因。法兰连接接头的泄漏可能是由法兰过度变形、密封圈失效等引起，螺纹连接接头泄漏可能是由螺纹过度变形、开裂、松动以及螺纹密封脂失效等引起，卡套连接接头泄漏可能是由卡套连接松动、开裂等引起。

d）失效后果。氢气泄漏会引起燃爆。

e）防控措施。宜包括但不限于：

* 对于法兰连接结构按相关标准对其完整性、密封性进行核算评价；
* 对螺纹连接接头的螺纹连接强度进行校核；
* 对密封材料提出要求；
* 对上阀扭矩进行规定；
* 对泄漏进行定期检查和监测；
* 定期检查更换密封件；
* 加装泄漏监测仪；
* 通过气密性试验对接头的致密性进行验证。

**D.6 腐蚀失效**

腐蚀失效是因为材料腐蚀引起的失效模式。

a）失效现象。腐蚀的形态分为均匀腐蚀（全面腐蚀）和局部腐蚀，局部腐蚀又分为电偶腐蚀、点蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀、剥蚀、选择性腐蚀、丝状腐蚀等。腐蚀要么导致承载截面积的减小，要么导致承载截面结构连续性的破坏，最终引起材料的断裂。腐蚀失效多数都伴随着生锈、结垢等表面可见痕迹，也有一些腐蚀表面看不到任何痕迹，如晶间腐蚀。腐蚀所引起的断裂一般有明显的塑性变形，具有延性断裂的特征。

b）失效机理。储氢设备腐蚀的机理主要有大气腐蚀、微生物腐蚀。大气腐蚀是设备在大气环境中，因与空气、水分、污染物等发生化学或电化学反应而导致的腐蚀现象。微生物腐蚀是设备材料表面在微生物作用下发生化学或电化学反应而导致的腐蚀。

c）失效原因。大气腐蚀是由于设备未涂敷防腐层或防腐层发生了破损。微生物腐蚀是设备外部的潮湿区域、有污垢堆积的区域、缝隙和死角，材料受到微生物作用而发生腐蚀。

d）失效后果。腐蚀失效的直接后果是设备的结构完整性受到破坏，设备承载能力降低。间接后果是由于承载能力能力下降而发生断裂乃至爆破。

e）防控措施。宜包括但不限于：

* 刷防腐涂层；
* 壁厚计算时考虑腐蚀裕量；
* 通过定期检验检测发现腐蚀情况。

**D.7 环境致裂**

储氢设备的环境致裂主要是氢脆引起的开裂。

a）失效现象。氢脆引起开裂的断口从微观上看韧性断裂区范围减小，从宏观上看有些材料可能会产生脆断面，但多数情况下并不明显，强度较高的钢中氢脆裂纹一般是沿晶扩展。

b）失效机理。储氢设备的氢脆引起的开裂是高压氢环境下氢原子扩散进入钢中引起的，氢脆会导致材料塑性、韧性等多方面的性能下降，最后在残余应力及外部载荷的作用下发生裂纹破坏。高压氢环境下氢进入金属并在金属中的传输过程，一般认为大致可分为4个阶段：

* 第一阶段：环境中的氢分子迁移至金属表面并与金属表面发生碰撞从而被吸附（物理吸附）；
* 第二阶段：被吸附的氢分子分解为吸着在外表面的原子氢（化学吸附）；
* 第三阶段：被外表面吸附的原子氢溶解进入材料内表面，并在去吸附后成为金属内部的溶解氢；
* 第四阶段：溶解的氢原子一部分位于晶格中，另一部分位于位错、碳化物以及晶界等氢陷阱中，在应力诱导等作用下发生扩散和偏聚，当氢浓度达到一定程度时将使材料性能劣化。

c）失效原因。氢脆开裂是由于选用材料与高压氢介质不相容导致的。具体的原因可能是：材料强度过高，材料的P、S、Si、Mn 等元素含量过高，材料中未回火马氏体和珠光体含量过高，材料存在疲劳裂纹等缺陷。

d）失效后果。氢脆开裂会引起介质泄漏，严重时导致设备爆破。

f）防控措施。宜包括但不限于：

* 采用耐氢脆材料；
* 对材料的抗拉强度上限值、屈强比、断后伸长率提出特殊要求；
* 对材料的杂质及合金元素含量提出特殊要求；
* 通过氢脆试验对材料的抗氢脆能力进行验证；
* 通过热处理消除残余应力。

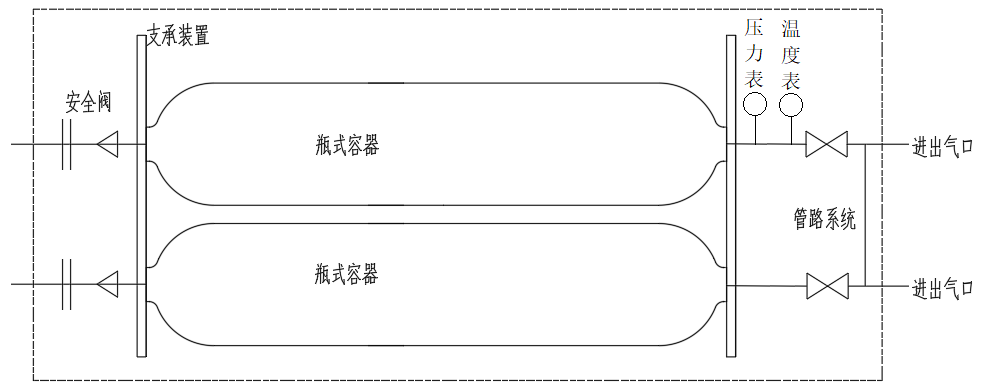
# 附录 E

# （资料性）

# 储氢容器缺陷识别

E.1 钢质无缝瓶式储氢容器

钢质无缝瓶式氢气储罐的的组成如图所示，由瓶式容器、管路系统、安全阀、压力表、温度计、支承装置组成，其中瓶式容器是主体，每台瓶式储氢容器含有多只瓶式容器。瓶式储氢容器的缺陷见表E-1.



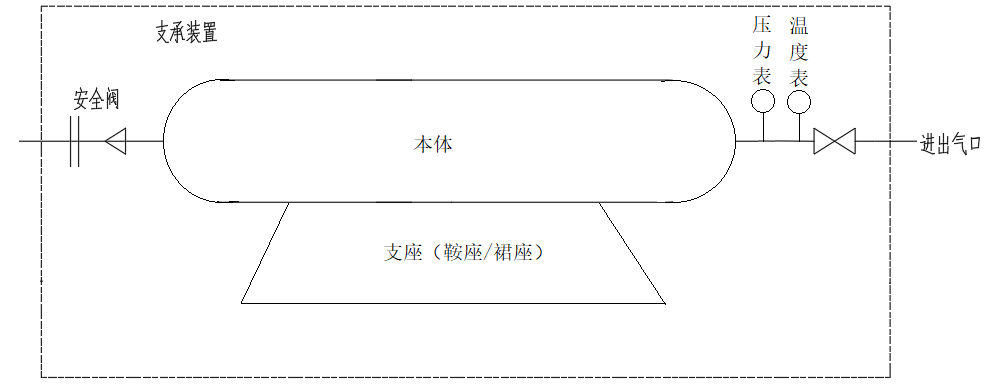
图E-1 瓶式储氢容器结构组成

表E-1 钢质无缝瓶式储氢容器的缺陷

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 缺陷  部位 | 缺陷形式 | 缺陷  机理 | 缺陷根原因 | 处置措施① |
| 瓶体 | 开裂 | 机械疲劳 | 结构不合理（局部应力集中过高） | 全面检验→裂纹打磨②→安全评价→继续使用/监控使用/更换瓶式容器 |
| 用材不当（材料抗疲劳性能不满足要求） | 全面检验→裂纹打磨，材质分析→安全评价→监控使用/更换瓶式容器· |
| 寿命到期（压力循环次数超过设计允许值） | 报废，更新 |
| 氢脆 | 用材不当（材料抗氢脆性能差） | 个别更换瓶式容器/整体报废更新 |
| 制造缺陷 | 淬火裂纹/收口工艺不当（瓶颈折叠、瓶肩褶皱） | 全面检验→打磨/机加工消除→安全评价→继续使用/监控使用/更换瓶式容器 |
| 减薄 | 大气腐蚀 | 防腐层破损 | 全面检验→安全评价→继续使用+防腐层修复/监控使用+防腐层修复/更换瓶式容器 |
| 微生物腐蚀 | 维护不到位（外表面局部结垢、积水、积泥，导致微生物聚集） | 全面检验→清洁清扫，测厚→安全评价→继续使用+定期维护保养/监控使用+定期维护保养/更换瓶式容器 |
| 机械损伤 | 外部机械载荷导致的划伤、刮伤、磕伤等 | 全面检验→打磨，测厚→安全评价→继续使用/监控使用/更换瓶式容器 |
| 鼓包 | 制造缺陷 | 热处理工艺不当引起局部强度过低 | 全面检验→硬度检测，壁厚检测，尺寸测量→安全评价→继续使用/监控使用/更换瓶式容器 |
| 过载 | 超压 | 全面检验→安全评价→继续使用/监控使用/更换瓶式容器 |
| 凹陷 | 制造缺陷 | 制造工艺不当 | 全面检验→安全评价→继续使用/监控使用/更换瓶式容器 |
| 机械损伤 | 外部载荷（钝状物冲击或挤压） | 全面检验→安全评价→继续使用/监控使用/更换瓶式容器 |
| 瓶口螺纹损坏 | 机械损伤 | 端塞安装或拆卸野蛮施工，导致瓶口内螺纹受损 | 全面检验→安全评价→维修（螺纹加工） |
| 爆破 | 低温脆断 | 用材不当 | 报废，更新 |
| 运行环境温度变化 | 报废，更新 |
| 过载 | 超参数运行 | 报废，更新 |
| 误操作（过充、氢氧混装、吹扫不当和余压不足导致外部空气倒吸） | 报废，更新 |
| 氢脆 | 用材不当（材料抗氢脆性能差） | 报废，更新 |
| 瓶口 | 泄漏 | 密封面间隙过大 | 安全紧固力过小（未按规程安装/安装规程不正确） | 重新紧固，按规程安装/重新制定规程并按规程安装 |
| 密封面结构尺寸不合理（设计不合理/结构不合理） | 设计改进，密封面改造 |
| 密封面加工施工质量差（未按规程加工/加工规程不正确） | 维修（密封面加工），按规程加工/重新制定规程 |
| 密封件损坏 | 预紧力过大导致密封件压溃或压断（未按规程安装/安装规程不正确） | 更换密封件，按规程安装/重新制定规程并按规程安装 |
| 密封件选材或选型不当 | 重新选材/选型 |
| 氢渗透 | 选材不当 | 重新选材，更换密封件 |
| 端塞 | 开裂 | 制造缺陷 | 锻造缺陷-端塞锻件锻造过程中产生缺陷 | 更换端塞 |
| 螺纹加工质量差 | 更换端塞 |
| 螺纹损坏 | 机械损伤 | 安装野蛮施工，导致瓶口内螺纹损坏 | 尺寸测量，维修/更换 |
| 减薄 | 大气腐蚀 | 防腐层破损 | 防腐层修复/腐蚀严重的更换 |
| 微生物腐蚀 | 维护不到位（外表面局部结垢、积水、积泥，导致微生物聚集） | 清洁，定期维护保养/腐蚀严重的更换 |
| 注;  ①——处置措施所提到的全面检验，是指当使用单位在日常检查、月度检查、年度检查中发现缺陷时，需要委托有资质的机构进行全面检验  ②——不能打磨消除的，不得继续使用  ③—— “/”表示根据安全评价的结果选择具体的措施 | | | | |

E.2 钢带错绕式储氢容器失效机理识别

钢带错绕式储氢容器的结构如图B-2所示，其缺陷见表E-2.



图E-2 钢带错绕式储氢容器结构组成

表E-2 钢带错绕是储氢容器的缺陷识别

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 缺陷  部位 | 缺陷形式 | 缺陷  机理 | 缺陷根原因 | 处置措施① |
| 内筒/内层封头 | 泄漏 | 机械疲劳 | 结构不合理 | 报废，更新 |
| 用材不当（材料抗疲劳性能不满足要求） | 报废，更新 |
| 寿命到期（压力循环次数超过设计允许值） | 报废，更新 |
| 焊接缺陷 | 报废，更新 |
| 氢脆 | 用材不当（材料抗氢脆性能差） | 报废，更新 |
| 焊接缺陷 | 用材不当 | 报废，更新 |
| 施工质量差（焊接工艺有误/未按规程施工） | 报废，更新 |
| 检测不到位 | 报废，更新 |
| 外层封头/加强箍 | `开裂 | 机械疲劳 | 结构不合理 | 全面检验→裂纹打磨②→凹坑尺寸测量评价→补焊/应力分析→继续使用/报废 |
| 用材不当（材料抗疲劳性能不满足要求） | 报废，更新 |
| 寿命到期（压力循环次数超过设计允许值） | 报废，更新 |
| 焊接缺陷④ | 报废，更新 |
| 焊接缺陷④ | 用材不当 | 报废，更新 |
| 施工质量差（焊接工艺有误/未按规程施工） | 报废，更新 |
| 检测不到位 | 报废，更新 |
| 减薄 | 大气腐蚀 | 防腐层破损 | 全面检验→安全评价→继续使用+防腐层修复/监控使用+防护层修复/报废 |
| 微生物腐蚀 | 维护不到位（外表面局部结垢、积水、积泥，导致微生物聚集） | 全面检验→安全评价→继续使用+定期维护保养/监控使用+定期维护保养/报废 |
| 机械损伤 | 外部机械载荷导致的划伤、刮伤、磕伤等 | 全面检验→安全评价→继续使用/监控使用/报废 |
| 绕带层 | 断裂 | 机械疲劳 | 结构不合理 | 报废，更新 |
| 用材不当（材料抗疲劳性能不满足要求） | 报废，更新 |
| 寿命到期（压力循环次数超过设计允许值） | 报废，更新 |
| 焊接缺陷 | 报废，更新 |
| 焊接缺陷 | 用材不当 | 报废，更新 |
| 施工质量差（焊接工艺有误/未按规程施工） | 报废，更新 |
| 检测不到位 | 报废，更新 |
| 保护壳 | 减薄 | 大气腐蚀 | 防腐层破损 | 测厚，防腐层修复 |
| 微生物腐蚀 | 维护不到位（外表面局部结垢、积水、积泥，导致微生物聚集） | 清洁清扫，测厚，安全评价，定期维护保养 |
| 机械损伤 | 外部机械载荷导致的划伤、刮伤、磕伤等 | 打磨，测厚，安全评价 |
| 接口座 | 泄漏 | 密封面间隙过大 | 安全紧固力过小（未按规程安装/安装规程不正确） | 重新紧固，重新制定规程/按规程安装 |
| 密封面结构尺寸不合理（设计不合理/结构不合理） | 设计改进，密封面修理 |
| 密封面加工施工质量差（未按规程加工/加工规程不正确） | 维修（密封面加工），按规程加工/重新制定规程 |
| 密封件损坏 | 预紧力过大导致密封件压溃或压断（未按规程安装/安装规程不正确） | 更换密封件 |
| 密封件选材或选型不当 | 重新选材/选型 |
| 氢渗透 | 选材不当 | 重新选材，更换密封件 |
| 开裂 | 机械疲劳 | 结构不合理 | 全面检验→裂纹打磨②→凹坑尺寸测量评价→补焊/应力分析→继续使用/报废 |
| 用材不当（材料抗疲劳性能不满足要求） | 报废/修理 |
| 寿命到期（压力循环次数超过设计允许值） | 报废，更新 |
| 焊接缺陷⑤ | 报废/修理 |
| 焊接缺陷⑤ | 用材不当 | 报废/修理 |
| 施工质量差（焊接工艺有误/未按规程施工） | 报废/修理 |
| 检测不到位 | 报废/修理 |
| 氢脆 | 用材不当（材料抗氢脆性能差） | 报废/修理 |
| 其它结构性缺陷 | 焊接缺陷⑤ | 制造缺陷（咬边、错变量等） | 全面检验→继续使用/监控使用/报废/修理 |
| 爆破 | 过载 | 超参数运行 | 报废，更新 |
| 误操作（过充、氢氧混装、吹扫不当和余压不足）导致外部空气倒吸） | 报废，更新 |
| 氢脆 | 用材不当（材料抗氢脆性能差） | 报废，更新 |
| 焊接缺陷 | 用材不当/施工质量差/检测不到位 | 报废，更新 |
| 注;  ①——处置措施所提到的全面检验，是指当使用单位在日常检查、月度检查、年度检查中发现缺陷时，需要委托有资质的机构进行全面检验  ②——不能打磨消除的，不得继续使用  ③—— “/”表示根据安全评价的结果选择具体的措施  ④——指与绕带层之间焊接接头的焊接缺陷  ⑤——指接管座与球性封头之间的焊接接头的焊接缺陷 | | | | |

# 附录 F

# （资料性）

# 储氢容器失效可能性与失效后果计算

**F.1 失效可能性计算**

**F.1.1 同类设备失效频率*F*G的取值**

同类设备失效频率*F*G的取值需结合行业标准、历史数据及设备实际工况进行综合考量，可采用概率统计方法，从同类设备的失效案例中提取频率分布，表F-1为常用两类储氢容器的通用失效频率的的参考值。

表F-1 加氢站储氢设备及其附件通用失效频率参考值

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 部件名称 | 通用失效频率 | |
| 符号 | FG值 |
| 钢质无缝瓶式储氢容器 | FG\_Cylinder | 3.2×10-4 |
| 钢带错绕式储氢容器 | FG\_Tank | 1.8×10-4 |

**F.1.2 设备修正系数*****F*E的计算**

设备修正系数***F*E**是在计算可能性时，在通用失效频率基础上，考虑设备的实际状态进行的量化修正，具体考虑的因素包括材料性能、损伤情况、检验检测情况、操作条件等。

**F.1.2.1** 钢质无缝瓶式储氢容器*F*E的计算

钢质无缝瓶式储氢容器取瓶体、瓶口、端塞三部分的设备修正系数中的最大值，即采用式（F.1）计算*F*E。

*F*E = Max{DF\_Bottle，DF\_BottleNeck，DF\_Plug} （F.1）

a）瓶体设备修正系数DF\_Bottle的计算

瓶体的缺陷考虑腐蚀减薄、氢脆开裂、疲劳失效、鼓包、凹陷、过载，DF\_Bottle计算时，先分别计算各类缺陷的失效影响次因子，然后相加得到DF\_Bottle，即DF\_Bottle采用式(F.2)来计算。式中各符号的含义及取值按表F-2规定。

DF\_Bottle=DF\_Thinning+DF\_HE+DF\_Fatigue+DF\_Swelling+DF\_Depressed+DF\_Blast （F.2）

表F-2 钢质无缝瓶式储氢容器设备修正次因子取值

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 符号 | 含义 | 取值方法 |
| DF\_Thinning | 腐蚀减薄损伤次因子 | 腐蚀减薄损伤次因子DF\_Thinning的确定涉及腐蚀速率r、壁厚t、服役时间a、检测有效性、检测频率等，先计算ar/t值，然后查表F-3确定DF\_Thinning。 |
| DF\_HE | 氢脆开裂次因子 | 确定DF\_ HE时，首先应进行所选用材料的氢脆敏感性判定，根据不同的材料可分为高敏感性、中敏感性、低敏感性、无敏感性四类。316L不锈钢是目前公认的具有良好抗氢脆性能的材料，其氢脆敏感性可评为无敏感性。对所选用的低合金钢、碳钢、其它合金钢材料等材料，当设备在35MPa以下压力使用时，氢脆敏感性均可评为无敏感性。当在35MPa以上压力使用时，如果设备生产厂家能够提供材料具有良好抗氢脆性能的证据，包括有效的氢脆实验报告或实用证明材料，则材料的氢脆敏感性可评为无敏感性，如果设备生产厂家不能提供材料具有良好抗氢脆性能的证据，对低合金钢材料、碳钢材料评为高敏感性，对不锈钢材料评为中敏感性（如304不锈钢）。确定了材料的氢脆敏感性后，再按表F-4确定氢脆敏感性指数，然后即可依据表F-5确定DF\_ HE。根据储氢容器在长期运行过程中是否发生过氢脆方面的数据，可用修正系数SF对氢脆损伤次因子进行修正，对于发生过氢脆的，SF通常取3，即对通过表F-5确定的DF\_ HE乘以系数3作为氢脆开裂次因子的值，未发生过氢脆的，SF取1。 |
| DF\_Fatigue | 疲劳失效次因子 | 疲劳失效次因子是因为设备经历过一定的压力循环，发生疲劳失效的可能增大，从而需要对失效可能性进行的修正，主要考虑介质充装导致的疲劳失效，根据充装次数、检验次数和检验有效性方面的数据查表F-6确定。 |
| DF\_Swelling | 瓶体鼓包损伤失效次因子 | 瓶体鼓包损伤失效次因子是因钢质无缝瓶式储氢容器瓶体可能发生鼓包损伤导致失效的可能性增大，从而需要对失效可能性进行的修正。主要考虑热处理工艺系数和超压使用情况，可按表F-7确定，罐式储氢容器不考虑DF\_Swelling。 |
| DF\_Depressed | 瓶体凹陷损伤失效次因子 | 瓶体凹陷损伤失效次因子是因钢质无缝瓶式储氢容器可能发生凹陷损伤导致失效可能性增大，从而需要对失效可能性进行的修正，按式：DF\_Depressed =SF31 + SF32 + SF33 + SF34 + SF35+ SF36计算，其中SF31为制造单位资质系数，按表F-8确定；SF32为瓶体成型工艺系数，按表F-9确定；SF33为热处理工艺系数，按表F-10确定；SF34为瓶体力学性能系数，按表F-11确定；SF35为瓶体型式试验系数，按表F-12确定；SF36为瓶体外部机械损伤系数，按表F-13确定。 |
| DF\_Blast | 爆破缺陷次因子 | 储氢容器爆破缺陷次因子是因瓶体材料存在不完整导致失效可能性增大，从而需要对失效可能性进行的修正，其由储氢容器的材质系数SF1和充装次数系数SF2决定，即采用式DF\_Blast = SF1 + SF2计算。材质系数按式：SF1=SF11+SF12+SF13计算，其中SF11原材料制造单位资质系数，SF12为原材料类别系数，SF13为原材料成分系数。SF11、SF12、SF13、SF2分别可按表F-14、F-15、F-16、F-17确定。 |

表F-3 钢质无缝瓶式储氢容器减薄损伤次因子DF\_Thinning值

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ar/t | 检验次数 | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 1 | | | | 2 | | | | 3 | | | |
|  | 检验有效性 | | | | 检验有效性 | | | | 检验有效性 | | | |
| N | P | F | U | H | P | F | U | H | P | F | U | H |
| 0.02 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0.04 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0.06 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0.08 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0.1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0.12 | 6 | 5 | 3 | 2 | 1 | 4 | 2 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| 0.14 | 20 | 17 | 10 | 6 | 1 | 13 | 6 | 1 | 1 | 10 | 3 | 1 | 1 |
| 0.16 | 90 | 70 | 50 | 20 | 3 | 50 | 20 | 4 | 1 | 40 | 10 | 1 | 1 |
| 0.18 | 300 | 220 | 140 | 70 | 7 | 170 | 70 | 10 | 1 | 130 | 35 | 3 | 1 |
| 0.2 | 565 | 410 | 265 | 110 | 15 | 290 | 120 | 17 | 1 | 240 | 60 | 5 | 1 |
| 0.22 | 640 | 460 | 290 | 120 | 16 | 310 | 130 | 20 | 1 | 250 | 70 | 5 | 1 |
| 0.24 | 645 | 465 | 300 | 130 | 18 | 330 | 145 | 30 | 2 | 260 | 80 | 6 | 1 |
| 0.26 | 650 | 470 | 305 | 150 | 20 | 350 | 160 | 33 | 2 | 280 | 90 | 7 | 1 |
| 0.28 | 660 | 485 | 315 | 180 | 25 | 370 | 180 | 36 | 3 | 300 | 100 | 8 | 1 |
| 0.3 | 700 | 520 | 340 | 200 | 30 | 400 | 200 | 40 | 4 | 320 | 110 | 9 | 2 |
| 0.32 | 800 | 600 | 400 | 250 | 50 | 450 | 240 | 60 | 6 | 340 | 150 | 10 | 2 |
| 0.34 | 980 | 765 | 540 | 300 | 60 | 600 | 290 | 80 | 8 | 460 | 200 | 20 | 3 |
| 0.36 | 1250 | 1000 | 730 | 350 | 100 | 800 | 415 | 100 | 16 | 645 | 240 | 30 | 8 |
| 0.38 | 1560 | 1280 | 950 | 470 | 150 | 1050 | 560 | 140 | 30 | 850 | 330 | 50 | 18 |
| 0.4 | 1800 | 1500 | 1120 | 580 | 200 | 1235 | 680 | 190 | 60 | 1020 | 420 | 80 | 45 |
| 0.42 | 1950 | 1632 | 1240 | 660 | 280 | 1360 | 780 | 250 | 110 | 1140 | 500 | 140 | 100 |
| 0.44 | 2060 | 1750 | 1350 | 780 | 390 | 1480 | 900 | 360 | 220 | 1250 | 620 | 250 | 200 |
| 0.46 | 2210 | 1900 | 1530 | 970 | 590 | 1650 | 1080 | 560 | 430 | 1430 | 800 | 450 | 410 |
| 0.48 | 2460 | 2180 | 1820 | 1290 | 930 | 1930 | 1400 | 900 | 780 | 1725 | 1140 | 800 | 770 |
| 0.5 | 2850 | 2600 | 2300 | 1800 | 1500 | 2400 | 1900 | 1500 | 1400 | 2200 | 1700 | 1400 | 1300 |
| 注：N—无检测，P—检测有效性差，F—检测有效性一般，U—通常有效检测，H—高度有效检测。 | | | | | | | | | | | | | |

表F-4 氢脆敏感指数确定表

|  |  |
| --- | --- |
| 敏感性 | 敏感度 |
| 高敏感性 | 100 |
| 中敏感性 | 50 |
| 低敏感性 | 10 |
| 无敏感性 | 1 |

表F-5 氢脆开裂损伤次因子DF\_HE

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 敏感指数 | 检验次数 | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 1 | | | | 2 | | | | 3 | | | |
|  | 检验有效性 | | | | 检验有效性 | | | | 检验有效性 | | | |
|  | P | F | U | H | P | F | U | H | P | F | U | H |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 10 | 10 | 9 | 7 | 4 | 2 | 7 | 4 | 2 | 2 | 6 | 3 | 2 | 2 |
| 50 | 50 | 40 | 18 | 11 | 6 | 30 | 10 | 6 | 5 | 16 | 8 | 5 | 5 |
| 100 | 100 | 90 | 70 | 40 | 25 | 70 | 45 | 25 | 20 | 60 | 30 | 22 | 20 |
| 注：P-无效；F-低度有效；U-一般有效；H-高度有效 | | | | | | | | | | | | | |

表F-6 疲劳失效因子DF\_Fatigue值

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 充装次数 | 检验次数 | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 1 | | | | 2 | | | | 3 | | | |
| N | P | F | U | H | P | F | U | H | P | F | U | H |
| 1000 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2000 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 3000 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 4000 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 5000 | 6 | 5 | 4 | 2 | 1 | 4 | 2 | 1 | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 |
| 6000 | 10 | 8 | 6 | 3 | 2 | 6 | 4 | 2 | 1 | 5 | 2 | 1 | 1 |
| 7000 | 15 | 12 | 9 | 4 | 2 | 9 | 5 | 2 | 1 | 8 | 3 | 1 | 1 |
| 8000 | 25 | 20 | 15 | 9 | 5 | 16 | 10 | 5 | 4 | 13 | 7 | 4 | 4 |
| 9000 | 35 | 30 | 20 | 15 | 9 | 23 | 15 | 9 | 7 | 19 | 11 | 7 | 7 |
| 10000 | 40 | 35 | 30 | 20 | 10 | 30 | 20 | 11 | 9 | 25 | 15 | 10 | 9 |
| 15000 | 110 | 100 | 80 | 55 | 40 | 85 | 60 | 40 | 35 | 75 | 50 | 35 | 30 |
| 20000 | 210 | 190 | 150 | 110 | 85 | 165 | 120 | 85 | 75 | 150 | 100 | 80 | 70 |
| 30000 | 500 | 440 | 370 | 290 | 230 | 390 | 300 | 230 | 210 | 350 | 260 | 210 | 200 |
| 40000 | 800 | 720 | 630 | 500 | 425 | 650 | 525 | 425 | 400 | 600 | 470 | 400 | 390 |
| 注：P-无效；F-低度有效；U-一般有效；H-高度有效 | | | | | | | | | | | | | |

表F-7 瓶体鼓包损伤失效次因子DF\_Swelling值

|  |  |
| --- | --- |
| 因素 | DF\_Swelling取值 |
| 采用整体调质热处理工艺，且未超压使用 | 0 |
| 采用整体调质热处理工艺，超压使用 | 5 |
| 未采用整体调质热处理工艺，未超压使用 | 3 |
| 未采用整体调质热处理工艺，且超压使用 | 10 |
| 注：适用于钢质无缝瓶式储氢容器。 | |

表F-8 制造单位资质系数SF31

|  |  |
| --- | --- |
| 因素 | SF31取值 |
| 制造单位满足C2资质要求 | 0 |
| 制造单位不满足C2资质要求 | 3 |

表F-9 瓶体成型工艺系数SF32

|  |  |
| --- | --- |
| 因素 | SF32取值 |
| 采用旋压工艺，成型形状和尺寸满足要求 | 0 |
| 采用旋压工艺，成型后表面质量一般 | 1.5 |

表F-10 热处理工艺系数SF33

|  |  |
| --- | --- |
| 因素 | SF33取值 |
| 采用整体调质热处理工艺 | 0 |
| 热处理炉每半年进行一次定期检验 | 0 |
| 热处理炉温自动控制、自动记录温度曲线 | 0 |
| 热处理后瓶体材料金相组织为回火索氏体 | 0 |
| 热处理温度控制略有偏差 | 3 |

表F-11 瓶体力学性能系数SF34

|  |  |
| --- | --- |
| 因素 | SF34取值 |
| 材料经热处理后，力学性能应满足相关法规、规范、标准以及设计时确定的材料强度保证值的要求（表3-17）。 | 0 |
| 瓶体材料的抗拉强度（Rm）≤880MPa、屈强比（ReL/R m）≤0.85、断后伸长率（A）≥20% | 0 |
| 材料性能指标略有偏差 | 2 |

表F-12 瓶体型式试验系数SF35

|  |  |
| --- | --- |
| 因素 | 取值 |
| 瓶体制造通过型式试验 | 0 |
| 基本满足型式试验要求 | 1.5 |

表F-13 瓶体外部机械损伤系数SF36

|  |  |
| --- | --- |
| 因素 | 取值 |
| 未发现瓶体凹陷 | 0 |
| 瓶体有明显摩擦痕迹 | 3 |
| 瓶体有明显凹陷 | 10 |

表F-14 原材料制造单位资质系数

|  |  |
| --- | --- |
| 因素 | 取值 |
| 储氢容器用无缝钢管满足A1资质要求 | 0 |
| 储氢容器用无缝钢管不满足A1资质要求 | 3 |

表F-15 原材料类别系数

|  |  |
| --- | --- |
| 因素 | 取值 |
| 制造无缝钢管的材料是电炉或氧气转炉冶炼的无时效性镇静钢 | 0 |
| 制造无缝钢管的材料是非镇静钢 | 3 |

表F-16 原材料成分系数

|  |  |
| --- | --- |
| 因素 | 取值 |
| 无缝钢管的化学成分C≤0.35%，P≤0.020%，S≤0.010% | 0 |
| 无缝钢管的化学成分C≮0.35%或P≮0.020%或S≮0.010%，稍微超出规定值。 | 2 |

表F-17 充装次数系数SF2

|  |  |
| --- | --- |
| 因素 | 取值 |
| 充装次数小于设计寿命50% | 0 |
| 充装次数小于设计寿命50~75% | 5 |
| 充装次数小于设计寿命75~100% | 10 |
| 充装次数大于设计寿命 | 20 |

b）瓶口设备修正系数DF\_BottleNeck的计算

瓶口设备修正系数DF\_BottleNeck按式(F.3)计算，其中SF3为瓶口螺纹损坏次因子、SF4为瓶口泄漏次因子，可分别按表F-18、表F-19确定。

DF\_BottleNeck= SF3 + SF4 （F.3）

表F-18 瓶口螺纹损坏次因子SF3

| 因素 | 取值 |
| --- | --- |
| 瓶口锥形内螺纹存在机械损伤，但有效螺纹长度大于规定值 | 2 |
| 瓶口锥形内螺纹存在机械损伤导致有效螺纹长度小于规定值 | 5 |
| 瓶口内部直螺纹存在机械损伤，但有效啮合螺纹数大于 6 个 | 2 |
| 瓶口内部直螺纹存在机械损伤导致有效啮合螺纹数小于 6 个 | 5 |

表F-19 瓶口泄漏次因子SF4

| 因素 | 取值 |
| --- | --- |
| 瓶口未检测出泄漏情况 | 2 |
| 瓶口检测出泄漏情况 | 5 |

c）端塞设备修正系数DF\_Plug的计算。

端塞设备修正系数DF\_Plug按式(F.4)，其中SF5为端塞制造次因子、SF6为端塞螺纹损坏次因子、SF7为腐蚀次因子，可分别按表F-20、F-21、F-22确定。

DF\_ Plug = SF5 + SF6 + SF7 （F.4）

表F-20 端塞制造次因子SF5

|  |  |
| --- | --- |
| 因素 | 取值 |
| 制造单位满足C2资质要求 | 0 |
| 制造单位不满足C2资质要求 | 3 |

表F-21 端塞螺纹损坏次因子SF6

| 因素 | 取值 |
| --- | --- |
| 端塞螺纹存在机械损伤，但有效啮合螺纹数大于 6 个 | 2 |
| 端塞螺纹存在机械损伤导致有效啮合螺纹数小于 6 个 | 5 |

表F-22 腐蚀次因子SF7

| 因素 | 取值 |
| --- | --- |
| 端塞防腐层未发现腐蚀 | 0 |
| 端塞防腐层发现腐蚀 | 5 |

**F.1.2.2** 钢带错绕式储氢容器 *F*E的计算。

钢带错绕式储氢容器*F*E的计算主要考虑罐体的情况，即取罐体的设备修正系数DF\_Tank。罐体的设备修正系数DF\_Tank的确定，应考虑减薄、氢脆开裂、疲劳失效等失效机理，并根据容器超标缺陷情况进行修正，可用式（F.5）计算，式中各参数的含义及取值方法按表F-23。

DF\_Tank=（α×DF\_Thinning +*β*×DF\_HE +γ×DF\_Fatigue）× FL （F.5）

表F-23 钢带错绕式储氢容器设备修正次因子取值

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 参数 | 含义 | 取值方法 |
| α | 减薄权重系数 | 取值一般为0.2 |
| *β* | 氢脆权重系数 | 取值一般为0.7 |
| γ | 疲劳权重系数 | 取值一般为0.1，且满足α+*β*+γ=1 |
| DF\_Thinning | 腐蚀减薄损伤次因子 | 钢带错绕式储氢容器的腐蚀减薄损伤次因子确定方法同钢质无缝瓶式储氢容器腐蚀损伤次因子，即按表9-4确定。 |
| DF\_HIC | 氢脆开裂次因子 | 钢带错绕式储氢容器的氢脆开裂次因子的计算，除了考虑内筒材料的氢脆敏感性、检验有效性、实际使用情况外，还应考虑焊接质量因素。确定DF\_HIC时，先根据所用材料及检验情况，判定氢脆敏感性，确定氢脆敏感指数，方法同钢质无缝瓶式储氢容器，然后按表F-5查相应的DF\_HE值,再根据实际使用中是否发生过氢脆对DF\_HE进行修正。焊接质量因素通过按表F-24确定的SF进行修正，钢带错绕式储氢容器的焊接工艺应严格执行相关标准的规定，如ASME BPVC、GB/T 150、NB/T 47014 等，确保焊接材料、焊接参数（电流、电压、焊接速度、保护气体成分等）满足要求。 |
| DF\_Fatigue | 疲劳失效次因子 | 钢带错绕式储氢容器的DF\_ Fatigue计算方法同钢质无缝瓶式储氢容器，即按照表F-6进行计算。 |
| *F*L | 超标缺陷修正系数 | 制造超标缺陷修正系数*F*L是考虑了设备的原始制造质量，根据其继续服役的实际工况条件，分析可能的超标缺陷，结合合于使用评价，计算设备修正系数。设备中不存在缺陷时，取*F*L =1。设备中存在缺陷时，当缺陷不满足设计规范，但在在用设备检验规程允许范围内时，取*F*L =1。对严重超标缺陷，应进行结构完整性评估，评估结构为合格的，取*F*L = 2；评估结果为不合格的，取*F*L =500。当服役条件存在与时间相关退化机理时要综合考虑退化机理与缺陷的双重影响进行剩余寿命评估，根据可能存在的缺陷机理、拟服役时间Tn和剩余寿命TSL的比值B，确定*F*L值，具体按表F-25 确定*F*L的值。 |

表F-24 焊接质量因素对氢脆损伤次因子修正系数SF

|  |  |
| --- | --- |
| 因素 | SF取值 |
| 依据国际、国家标准工艺进行焊接 | 1 |
| 依据行业标准工艺进行焊接 | 2 |
| 没有依据标准工艺 | 5 |

表9-25 钢带错绕式储氢容器超标缺陷修正系数*F*L

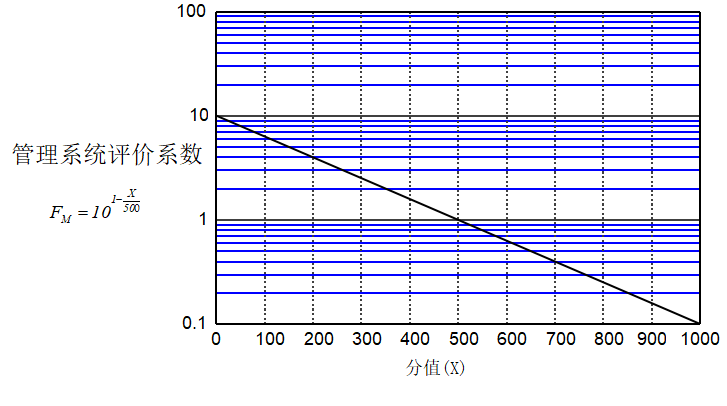
|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 失效机理 | B | FL |
| 结构不合理  机械疲劳  泄漏 | ≤0.5 | 1 |
| 0.5＜B≤0.8 | 5 |
| 0.8＜B≤1 | 10 |
| ＞1 | 50 |
| 焊接缺陷  长期超载使用 | ≤0.5 | 1 |
| 0.5＜B≤0.8 | 5 |
| 0.8＜B≤1 | 50 |
| ＞1 | 500 |
| 腐蚀减薄  氢脆 | ≤0.5 | 1 |
| 0.5＜B≤0.8 | 5 |
| 0.8＜B≤1 | 20 |
| ＞1 | 100 |
| 注：B=Tn/TSL，其中Tn——拟服役时间Tn；TSL——剩余寿命 | | |

**F.1.3** *F*M的取值

*F*M是根据设备使用单位管理情况对失效可能性进行的修正，通过衡量企业安全管理体系的有效性，来调整基础风险值（如失效概率或后果严重性），以反映实际管理措施对设备安全性的影响。*F*M的含义是：当*F*M=1时，表示设备使用单位的管理水平与全国平均的管理水平相当，当*F*M=0.1，表示设备使用单位比全国平均的管理水平低一个数量级，当*F*M＝10表示设备使用管理单位的管理水平比全国平均的管理水平高一个数量级。计算*F*M时，首先根据表F-26，针对对加氢站，分别从组织机构、人员资质、使用登记、技术档案、安全作业、安全管理制度、应急措施等七个方面进行打分（X），满分为100分，然后再根据打分结果查图F-1，得到*F*M。

表F-26 安全管理评分表

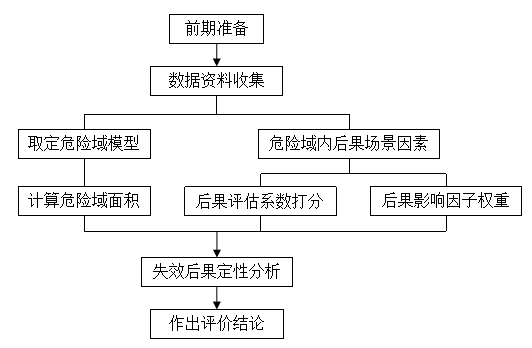
| 问题大类 | 分值 | 问题小类 | 分值 |
| --- | --- | --- | --- |
| 组织机构 | 8 | 安全管理领导机构是否健全 | 2 |
| 是否建立三级安全管理体系 | 3 |
| 机构运行状况 | 3 |
| 人员资质 | 10 | 安全管理负责人资格证 | 2 |
| 安全管理员资格证 | 3 |
| 操作人员的资格证 | 3 |
| 操作人员培训 | 2 |
| 使用登记 | 12 | 取证管理 | 4 |
| 变更情况 | 4 |
| 安全状况 | 4 |
| 技术档案 | 18 | 技术档案是否完整（出厂资料、改造、重大维修资料、使用登记表（含气瓶、长管拖车） | 2 |
| 日常维护保养和定期安全检查记录、年度检查报告、定期检验报告、安全附件校验（检定） | 2 |
| 维修和更换记录、有关事故记录资料和处理报告 | 2 |
| 运行及交接班记录 | 2 |
| 操作规程（工作压力、工作温度、充装速度、卸载速度、车辆允许行驶速度、进站停车操作要求、加气前检查要求、加气操作要求、加气后检查要求、启动离站操作要求、驾驶操作要求、卸气前检查要求、卸气操作要求、卸气后检查要求、） | 10 |
| 安全作业 | 20 | 作业人员管理 | 4 |
| 充装作业管理 | 8 |
| 道路行驶管理 | 8 |
| 安全管理制度 | 16 | 安全管理制度建立 | 4 |
| 安全管理制度执行 | 4 |
| 安全教育和培训 | 4 |
| 安全管理会议 | 4 |
| 应急措施 | 16 | 应急预案 | 5 |
| 应急演练 | 5 |
| 应急装备 | 6 |



图F-1 管理系统评价系数

**F.2 失效后果计算**

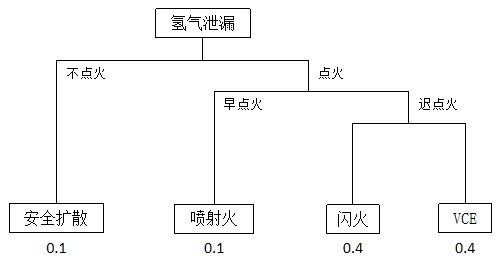
加氢站储氢容器失效后果采用面积后果来表征，发生泄漏事故的失效后果可采用如图F-2所示的流程。



图F-2 失效后果计算流程

a）氢气泄漏扩散事故树

氢气泄漏危险域划分为窒息域、燃烧域和爆炸域，其事故树分析内容如图F-3所示。



图F-3 氢气泄漏失效事故树

b）危险域计算模型

加氢站泄漏后果计算采用式（F.6）所示的计算模型。

 （9.6）

式中：

*A*——后果域面积，m2；

*x*——环境风速，m/s；

*y*——泄漏口径，mm；

*z0，A01，B01，B02，B03，A1，A2，A3，B1，B2 ——*模型系数，在不同场景下系数不同。

氢气泄露扩散不同场景模型系数，各参数的取值见表F-27.

根据介质属性，以氢气在空气中50%浓度为阈值，划定流场窒息域、燃烧域和爆炸域，在开放环境下分布规律和计算方法。

表F-27 加氢站泄漏扩散在不同场景曲面拟合

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 模型系数 | 窒息域 | 燃烧域 | 爆炸域 |
| *z0* | 5.20E+04 | 96610.27062 | 1.34E+08 |
| *A01* | -2.87E+03 | -4766.39768 | -1.49E+07 |
| *A1* | 2.02E+03 | 3264.16521 | 71874.33404 |
| *A2* | -8.20E+01 | -80.61847 | -30.51458 |
| *A3* | 0.72575 | -3.17872 | -204.7808 |
| *B01* | -7.04E+03 | -11460.48766 | -1.73E+07 |
| *B02* | 6.02E+02 | 749.48673 | 943079.226 |
| *B03* | 0.94324 | 0.32034 | 1269.24699 |
| *B1* | -1.47919 | 8.91314 | 28.24899 |
| *B2* | -0.16868 | -0.28637 | 4.47199 |

c）加氢站后果面积计算

在综合考虑不同泄漏后的事故场景，最终的加氢站后果面积计算，采用各种事故场景的可能性值加权计算后果面积，即采用式F.7计算面积后果。

*A* = 0.1×*A*窒息域 + 0.5×*A*燃烧域 + 0.4×*A*爆炸域 （F.7）

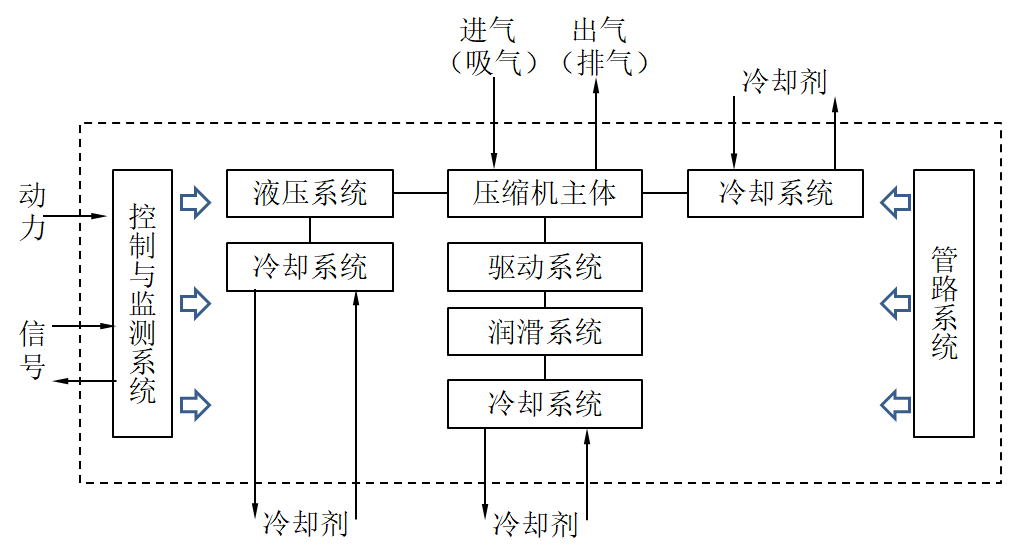
# 附录 G

# （资料性）

# 压缩机FMECA分析基础数据

**G.1 压缩机结构拆解示例**

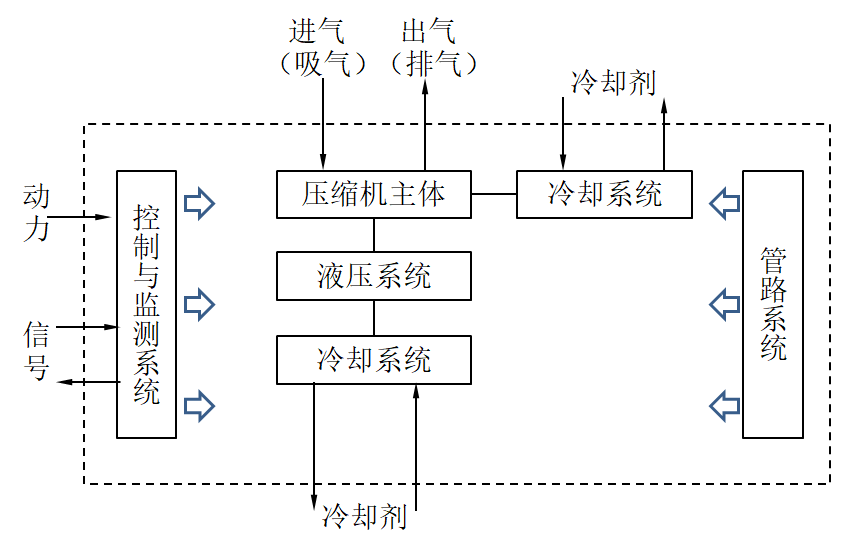
图G-1、表G-1分别为隔膜式压缩机的边界划分示例和结构拆分示例，图G-2、表G-2为液驱活塞式压缩机的边界划分示例和结构拆分示例。



图G-1 隔膜压缩机边界划分示例

表G-1 隔膜压缩机结构拆解示例

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 设备类 | 隔膜压缩机 | | | | | | |
| 子系统 | 压缩机主体 | 驱动系统 | 液压系统 | 润滑系统 | 冷却系统 | 控制与监测系统 | 管路系统 |
| 可维修部件 | 气缸；  气缸连接件；  三层隔膜组件；  隔膜密封结构；  配油盘；  吸气阀；  排气阀 | 启停系统；  动力机；  曲轴；  连杆；  十字头；  轴承 | 油缸；  液压油；  活塞；  活塞密封结构；  柱塞泵；  稳压阀；  过滤器；  单向阀；  截止阀 | 油箱；  润滑油；  齿轮油泵；  油冷却器；  油加热系统；  滤清器；  截止阀 | 冷却水套；  水箱；  水泵；  冷水机 | 传感器；  逻辑运算器；  执行器 | 管子；  管件；  阀门；  管接头；  管托；  过滤器 |



图G-2 液驱活塞压缩机边界划分示例

表G-2 液驱活塞式压缩机结构拆解示例

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 设备类 | 隔膜压缩机 | | | | |
| 子系统 | 压缩机主体 | 液压系统 | 冷却系统 | 控制与监测系统 | 管路系统 |
| 可维修部件 | 气缸；  气缸连接件；  吸气阀；  排气阀；  活塞组件；  气缸密封结构 | 油箱；  液压油；  过滤器；  液压缸；  液压泵；  液压阀；  冷却器；  蓄能器 | 冷却水套；  水箱；  水泵；  冷水机 | 传感器；  逻辑运算器；  执行器 | 管子；  管件；  阀门；  管接头；  管托；  过滤器 |

**G.2 压缩机故障模式与故障机理的主要类别**

表G-3、表G-4分别为过程设备故障模式、故障机理的主要类别，其中打“√”部分适用于氢气压缩机.

表G-3 故障模式主要类别

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 故障模式 | 描述 | 备注 |
| 1 | 内漏 | 介质内部泄漏 | √ |
| 2 | 高风险外漏 | 介质有毒、有害、易燃、易爆、高温、高压 | √ |
| 3 | 低风险外漏 | 介质无毒、无害 |  |
| 4 | 逸散性泄漏 | 挥发性泄漏，靠专用设备检测，如LDAR |  |
| 5 | 振动/噪音/异响 | 超过允许值的振动和噪声 | √ |
| 6 | 过热 | 过高的温度 | √ |
| 7 | 结构性缺陷或损坏 | 严重损坏（卡住、断裂、爆炸等）包括支撑、组件、零件、设备的变形、开裂等 | √ |
| 8 | 不能启动或开启 | 需求时无法完成其功能、 | √ |
| 9 | 不能停止或关闭 | 不需求其功能时出现意外动作 | √ |
| 10 | 突停 | 运行时突然停止，无法完成其功能 | √ |
| 11 | 突启 | 不需求其功能时出现意外启动 | √ |
| 12 | 流量超高限 | 规范以上的输出压力/流量 | √ |
| 13 | 温度超高限 | 温度超出设计允许的最高值 | √ |
| 14 | 压力超高限 | 压力超出设计允许的最高值 | √ |
| 15 | 流量超低限 | 规范以下的输出压力/流量 | √ |
| 16 | 温度超低限 | 温度超出设计允许的最低值 | √ |
| 17 | 压力超低限 | 温度超出设计允许的最低值 | √ |
| 18 | 功能不稳定（波动） | 波动或不稳定的压力/流量 | √ |
| 19 | 误报警 | 错误报警、故障读数 | √ |
| 20 | 有输入无输出 | 如传动、仪表等 | √ |
| 注：其中打“√”为氢气压缩机可能存在的故障模式。 | | | |

表G-4 故障机理主要类别

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **序号** | **机理大类** | **机理子类** | **备注** | **序号** | **机理大类** | **机理子类** | **备注** |
| 1 | 机械 | 失衡(动不平衡、偏流、电流不平衡） | √ | 37 | 电气 | 校准/调整(调校不当） | √ |
| 2 | 调整不当/预紧力不符合要求 | √ | 38 | 电子电路故障 |
| 3 | 间隙不当 | √ | 39 | 控制信号故障/指示器/报警器故障 |
| 4 | 对中不当 | √ | 40 | 接地故障 |
| 5 | 定时不当(不同步等）/定序不当 | √ | 41 | 开路 |
| 6 | 松动/松弛 | √ | 42 | 过热 |
| 7 | 卡涩/粘连 | √ | 43 | 短路 |
| 8 | 变形/弯曲 | √ | 44 | 软件故障/错误 |
| 9 | 划伤/刮伤/磨伤 | √ | 45 | 绝缘故障 |
| 10 | 磨损 | √ | 46 | 连接松动 |
| 11 | 润滑不良 | √ | 47 | 连接错误 |
| 12 | 断裂 | √ | 48 | 电源故障 |
| 13 | 共振 | √ | 49 | 仪表 | 校准/调整(调校不当） | √ |
| 14 | 脱落 | √ | 50 | 电子电路故障 |
| 15 | 材料 | 内部腐蚀 |  | 51 | 控制信号/指示器/警报器故障 |
| 16 | 过热/烧损 |  | 52 | 接地故障/屏蔽接口故障 |
| 17 | 蠕变 |  | 53 | 开路 |
| 18 | 硬化 |  | 54 | 过热损坏 |
| 19 | 软化 |  | 55 | 电压波动 |
| 20 | 老化/腐烂/腐坏/粉化 | √ | 56 | 短路 |
| 21 | 疲劳开裂/疲劳断裂 | √ | 57 | 软件故障/错误 |
| 22 | 粘结 | √ | 58 | 绝缘故障 |
| 23 | 起泡 |  | 59 | 连接松动 |
| 24 | 脆化 | √ | 60 | 连接错误 |
| 61 | 供应不足(气源、电源、液压油） |
| 25 | 渗碳 |  | 62 | 外部 | 积垢/结焦 |  |
| 26 | 冲刷腐蚀 |  | 63 | 污染/变质 | √ |
| 27 | 熔融 |  | 64 | 堵住/堵塞 |  |
| 28 | 热裂纹 |  | 65 | 沉降 | √ |
| 29 | 微振磨损 | √ | 66 | 供应量不足(低于最低供应标准） | √ |
| 30 | 应力开裂 |  | 77 | 异物侵入 | √ |
| 31 | 脆性断裂 | √ | 68 | 其它 | 规格不当/配置错误 | √ |
| 32 | 韧性断裂 | √ | 69 | 停止运行不能工作/旁路/关闭 | √ |
| 33 | 穿孔 | √ |  |  |  |  |
| 34 | 焊接缺陷 | √ |  |  |  |  |
| 35 | 理化性能不满足要求 | √ |  |  |  |  |
| 36 | 化学成分不合标准 | √ |  |  |  |  |
| 注：其中打“√”为氢气压缩机可能存在故障机理。 | | | | | | | |

**G.3 故障评价准则**

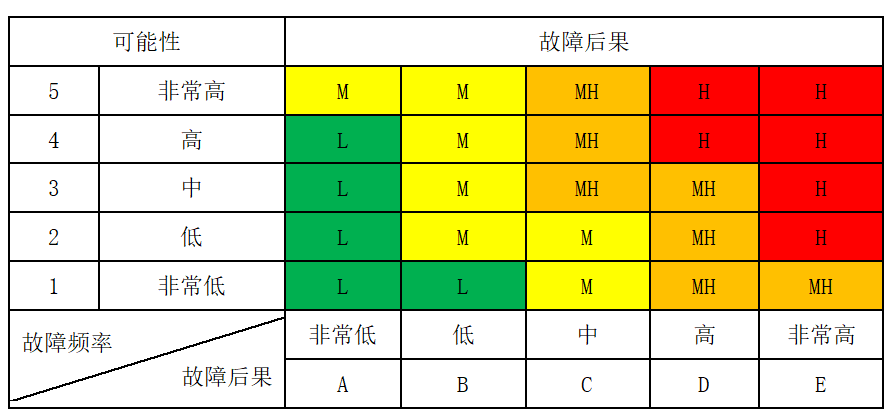
表G-5、表G-6所示为炼油与化工行业广泛采用的故障频率等级划分准则、故障后果等级划分准则，图G-3为风险矩阵图，可供氢压缩机FMECA分析参考。

表G-5 故障频率等级划分（示例）

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 等级 | 严重程度 | 发生频率 X |
| 1 | 非常低 | X＜0.25次/年 |
| 2 | 低 | 0.25≤X＜0.5次/年 |
| 3 | 中 | 0.5≤X＜1次/年 |
| 4 | 高 | 1≤X＜2次/年 |
| 5 | 非常高 | X≥ 2次/年 |

表G-6 故障影响后果等级划分（示例）

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 等级 | 严重  程度 | 影响分类 | | | |
| 安全影响 | 环境影响 | 生产损失 | 维修成本 |
| A | 非常低 | 无影响 | 事件影响未超过工厂界区 | <1h的短时生产波动 | ＜0.5万元 |
| B | 低 | 医疗处理，但不需住院；短暂身体不适 | 事件不会受到管理部门的通报或违反许可条件 | 1(含）-4h  的生产波动 | 0.5(含）-  1万元 |
| C | 中 | 工作受限制；  轻伤 | 泄漏事件受到政府主管部门的通报或违反许可条件 | 降量生产 | 1(含）-5万元 |
| D | 高 | 严重伤害；  职业相关疾病 | 重大泄漏，给工作场所外带来严重影响 | 局部单元  短时停工 | 5(含）-  10万元 |
| E | 非常高 | 1-2人死亡或丧失劳动能力；3-9人重伤 | 重大泄漏，给工作场所外带来严重的环境影响，且会导致直接或潜在的监控危险 | 装置停工  （切断进料） | ≥ 10万元 |



注：L-低风险，表示可忽略的风险；M-中风险，表示可接受的风险；MH-中高风险，表示不期望的风险；H-高风险，表示不可接受的风险。

图G-3 风险矩阵图（示例）

**G.4** **常用设备及元器件失效频率**

表G-7 所示为炼油与化工常用典型设备/系统/部件常见故障的频率，表G-8所示为部分通用设备元器件失效率。

表G-8 典型设备/系统/部件常见故障的频率

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 分类 | 故障模式 | 频率（/y） | 分类 | 故障模式 | 频率（/y） |
| 阀  门 | 1）单向阀完全失效 | 1 | 公  用  工  程 | 1）冷却水失效 | 1×10-1 |
| 2）单向阀卡涩 | 1×10-2 | 2）断电 | 1 |
| 3）单向阀内漏（严重） | 1×10-5 | 3）仪表风失效 | 1×10-1 |
| 4）垫圈或填料泄漏 | 1×10-2 | 4）氮气（惰性气体）系统失效 | 1×10-1 |
| 5）安全阀误开或严重泄漏 | 1×10-2 | 管  道  和  软  管 | 1）泄漏（法兰或泵密封泄漏） | 1 |
| 6）调节器失效 | 1×10-1 | 2）弯曲软管微小泄漏（小口径） | 1 |
| 7）电动或气动阀门误动作 | 1×10-1 | 3）弯曲软管大量泄漏（小口径） | 1×10-1 |
| 容  器  和  储  罐 | 1）压力容器灾难性失效 | 1×10-6 | 4）加载或卸载软管失效（大口径） | 1×10-1 |
| 2）常压储罐失效 | 1×10-3 | 5）中口径（≤150mm）管道大量泄漏 | 1×10-5 |
| 3）过程容器沸腾液体扩展蒸汽云爆炸（BLEVE） | 1×10-6 |  |  |  |
| 4）球罐沸腾液体扩展蒸汽云爆炸（BLEVE） | 1×10-4 |  |  |  |
| 5）容器小孔（≤50 mm）泄漏 | 1×10-3 |  |  |  |

表G-8 通用设备元器件失效率数据

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 元器件 | | 失效率*λ*G(%/kh） | 元器件 | | 失效率*λ*G(%/kh） |
| 向心球轴承 | 低速轻载 | 0.003 ~0.17 | 蜜封元器件 | 0形环式 | 0.002 ~0.006 |
| 高速轻载 | 0.05 ~0.35 | 酚醛塑料 | 0. 005 ~0.25 |
| 高速中载 | 0.2~2 | 橡胶 | 0. 002 ~0. 10 |
| 高速重载 | 1 ~8 | 联轴器 | 挠性 | 0.1 ~1 |
| 滚子轴承 | | 0.2~2.5 | 刚性 | 10~60 |
| 齿轮 | 轻载 | 0.01 ~0.1 | 齿轮箱体 | 仪表用 | 0.0005 ~0. 004 |
| 普通载荷 | 0.01 ~0.3 | 普通用 | 0.0025 ~0.02 |
| 重载 | 0.1~0.5 | 凸轮 | 轻载 | 0.0002 ~0. 01 |
| 普通轴 | | 0.01 ~0.05 | 有载推动 | 1 ~2 |
| 轮毂销钉或键 | | 0.0005 ~0.05 | 拉簧、压簧 | | 0.5~7 |
| 螺钉、螺栓 | | 0.0005 ~0.012 |  |  |  |
| 注：本表数据为实验室数据，应用到其它场合需进行修正，修正因子*K*F对包括压缩机在内的在地面上使用固定设备，取5-20 | | | | | |

**G.5 FMECA分析结果示例**

见表G-9。

表G-9 FMECA分析结果记录表（示例）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 加氢站名称 | 设备名称 | 子系统 | 关键部件 | 故障模式 | 故障机理 | 故障频率 | 故障频率等级 | 故障影响 | | | | 安全风险等级 | 环境风险等级 | 生产损失风险等级 | 维修风险等级 | 总体风险等级 | 设备风险等级 |
| 安全影响 | 环境影响 | 生产损失 | 维修成本 |
| 示例 | xx加氢站 | 氢气压缩机 | 压缩机本体 | 气缸 | 高风险外漏 | 变形 | 0.5 | 3 | A | A | B | A | M | L | L | L | M | M |
| 过热 | 润滑不良 | 0.1 | 1 | A | A | B | A | L | L | L | L |
| 三层隔膜组件 | 泄漏 | 划伤 | 0.4 | 2 | E | B | B | B | H | M | M | M | H | M |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

# 附录 H

# （资料性）

# 管路失效可能性与后果评估计算

H.1 管线失效可能性评估

管线失效可能性可表H-1进行打分，失效可能性等级按表H-2进行划分。

表H-1 管线失效可能性打分表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 影响因素 | 判定内容 | 打分 |
| 1 | 设计选材  10分 | 满足相关标准要求 | 0 |
| 其他情况 | 10 |
| 2 | 应力分析  10分 | 该管线经过应力与柔性分析计算，满足安全要求 | 0 |
| 其他情况 | 10 |
| 3 | 连接方式  10分 | 30MPa以上压力，采用卡套管接头连接 | 10 |
| 焊接连接 | 8 |
| 法兰连接 | 5 |
| 管接头连接 | 2 |
| 4 | 振动  10分 | 存在振动工况 | 10 |
| 不存在振动工况 | 0 |
| 5 | 泄漏  10分 | 该管线曾发生介质泄漏 | 10 |
| 该管线未曾发生介质泄漏 | 0 |
| 6 | 腐蚀减薄  10分 | 管线表面有锈蚀，或检测发现管道壁厚减薄 | 10 |
| 带有保温层，且保温层发生破损 | 10 |
| 位于沿海地区，可能发生盐雾腐蚀 | 5 |
| 管线穿过墙面等分界面，可能发生电化学腐蚀 | 5 |
| 其他情况 | 0 |
| 7 | 机械损伤等影响管道完整性的缺陷  10分 | 存在变形、裂纹等缺陷 | 10 |
| 存在表面划痕等缺陷 | 5 |
| 无机械损伤缺陷 | 0 |
| 8 | 静电接地  10分 | 满足相关标准要求 | 0 |
| 其他情况 | 10 |
| 9 | 日常维护  10分 | 每日巡检，按规定进行维护保养 | 0 |
| 其他情况 | 10 |
| 10 | 质量证明文件  10分 | 齐全完整 | 0 |
| 部分齐全完整 | 5 |
| 无质量证明文件 | 10 |

**表H-2 失效可能性等级划分**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 分值范围 | ≤30 | 30～50 | 50～70 | 70～80 | ＞80 |
| 可能性级别 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

**H.2**工艺阀门失效可能性评估

艺阀门失效可能性按表H-3，失效可能性等级按表H-4进行划分。

表H-3 工艺阀门失效可能性打分表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 影响因素 | 判定标准 | 打分 |
| 1 | 设计选材  10分 | 满足相关标准要求 | 0 |
| 其他情况 | 10 |
| 2 | 阀门类型  10分 | 针阀，调节阀，截止阀 | 5 |
| 止回阀，球阀 | 10 |
| 3 | 质量证明文件  10分 | 齐全完整 | 0 |
| 部分齐全完整 | 5 |
| 无质量证明文件 | 10 |
| 4 | 日常维护  10分 | 每日巡检，按规定进行维护保养 | 0 |
| 其他情况 | 10 |
| 5 | 振动工况  10分 | 存在 | 10 |
| 不存在 | 0 |
| 6 | 动作频次  20分 | ≤0.05 | 5 |
| 0.05-0.10 | 10 |
| ≥0.10 | 20 |
| 7 | 泄漏  20分 | 曾经发生过泄漏 | 20 |
| 无泄漏 | 0 |
| 8 | 机械损伤等影响阀门完整性的缺陷 10分 | 有 | 10 |
| 无 | 0 |
| 注：动作频次计算方法为：日动作频次×使用天数/动作寿命）  1.止回阀：日动作频次按20次计算，动作寿命按10万次计算（依据GB42177 10万次氢循环试验条件）  2.球阀与气控阀：日动作频次按0.5次计算，动作寿命按5千次计算（依据为气控阀弹簧一般为5K次使用寿命，球阀频发动作后密封性差）  3.其他阀门：日动作频次按1次计算，动作寿命按10万次计算（依据GB42177 10万次氢循环试验条件，调研显示针阀无设计寿命，手阀寿命一般为200万次） | | | |

表H-4 失效可能性等级划分

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 分值范围 | ≤30 | 30～50 | 50～70 | 70～80 | ＞80 |
| 可能性级别 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

**H.3** 安全阀失效可能性评估

安全阀失效可能性按表H-5进行打分，失效可能性等级按表H-6进行划分。

表 H-5 安全阀失效可能性打分表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 影响因素 | 判定内容 | 打分 |
| 1 | 设计选材  10分 | 满足相关标准要求 | 0 |
| 其他情况 | 10 |
| 2 | 质量证明文件  10分 | 齐全完整 | 0 |
| 部分齐全完整 | 5 |
| 无质量证明文件 | 10 |
| 3 | 定期校验  20分 | 按规定进行校验，安全阀铅封完好 | 0 |
| 其他情况 | 20 |
| 4 | 开启失效30分 | 开启失效可能性等级1 | 6 |
| 开启失效可能性等级2 | 12 |
| 开启失效可能性等级3 | 18 |
| 开启失效可能性等级4 | 24 |
| 开启失效可能性等级5 | 30 |
| 5 | 泄漏  30分 | 泄漏可能性等级1 | 6 |
| 泄漏可能性等级2 | 12 |
| 泄漏可能性等级3 | 18 |
| 泄漏可能性等级4 | 24 |
| 泄漏可能性等级5 | 30 |
| 注：   1. 开启失效可能性计算参照GB/T 26610.4中的 K3.1。 2. 泄漏可能性计算参照GB/T 26610.4中的 K3.2。 | | | |

表H-6 失效可能性等级划分

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 分值范围 | ≤30 | 30～50 | 50～70 | 70～80 | ＞80 |
| 可能性级别 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

**H.4 管线失效后果评估**

管线失效后果按表H-7进行打分，失效后果等级按表H-8进行划分。

表H-7 管线失效后果打分表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 影响因素 | 判定内容 | 打分 |
| 1 | 操作压力  20分 | ≤20MPa | 10 |
| 20-35MPa | 15 |
| ≥35MPa | 20 |
| 2 | 介质  20分 | 接触氢气 | 20 |
| 不接触氢气 | 5 |
| 3 | 管径尺寸  20分 | ≤DN10 | 10 |
| DN10—DN50 | 15 |
| ≥DN50 | 20 |
| 4 | 泄漏监测  20分 | 配置泄漏监测仪器设备 | 5 |
| 无泄漏监测仪器设备 | 20 |
| 5 | 控制措施  20分 | 建立完善的异常报警、工艺控制与应急响应措施 | 5 |
| 其他情况 | 20 |

表H-8 管线失效后果严重程度等级划分

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 分值范围 | ≤30 | 30～50 | 50～60 | 60～70 | ＞70 |
| 后果级别 | A | B | C | D | E |

**H.5工艺阀门失效后果评估**

阀门失效后果按表H-9进行打分，失效后果等级按表H-10进行划分。

表H-9 工艺阀门失效后果严重程度打分表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 影响因素 | 判定内容 | 打分 |
| 1 | 操作压力  20分 | ≤35MPa | 10 |
| ≥35MPa | 20 |
| 2 | 介质  20分 | 接触氢气 | 20 |
| 不接触氢气 | 5 |
| 3 | 阀门公称直径  20分 | ≤DN10 | 10 |
| DN10—DN50 | 15 |
| ≥DN50 | 20 |
| 4 | 泄漏监测  20分 | 配置泄漏监测仪器设备 | 5 |
| 无泄漏监测仪器设备 | 20 |
| 5 | 控制措施  20分 | 建立完善的异常报警、工艺控制与应急响应措施 | 5 |
| 其他情况 | 20 |

表H-10 工艺阀门失效后果严重程度等级划分

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 分值范围 | ≤30 | 30～50 | 50～60 | 60～70 | ＞70 |
| 后果级别 | A | B | C | D | E |

**H.6安全阀门失效后果评估**

安全阀失效后果按H-11进行打分，失效后果等级按表H-12进行划分。

表H-11 安全阀失效后果打分表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 影响因素 | 判定内容 | 打分 |
| 1 | 操作压力  20分 | ≤35MPa | 10 |
| ≥35MPa | 20 |
| 2 | 介质  20分 | 接触氢气 | 20 |
| 不接触氢气 | 10 |
| 3 | 保护设备风险等级  60分 | 低风险 | 10 |
| 中风险 | 40 |
| 高风险 | 60 |

表H-12 安全阀失效后果严重程度等级划分

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 分值范围 | ≤30 | 30～50 | 50～60 | 60～70 | ＞70 |
| 后果级别 | A | B | C | D | E |