



团 体 标 准

T/CWAN 0132—2025

钢的弧焊接头 开裂失效分析方法

Arc-welded joints in steel -- analysis method for cracking failure

2025-03-19 发布

2025-04-01 实施

中国焊接协会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 一般要求	2
5 失效调查	2
6 取样和样品保管	3
7 检测及分析	3
8 工艺评定	6
9 失效分析报告	6
附录 A（资料性）开裂焊缝失效调查记录表	8
附录 B（资料性）失效分析报告主体内容概括示例	9
参考文献	10

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。

本文件由中国焊接协会提出并归口。

本文件起草单位：江苏徐工工程机械研究有限公司、中国机械总院集团哈尔滨焊接研究有限公司、洛阳船舶材料研究所（中国船舶集团有限公司第七二五研究所）、南昌航空大学、天津市特种设备监督检验技术研究院、北部湾大学、重庆科技大学、合肥工业大学、重庆三峡学院。

本文件主要起草人：纪昂、马国、李天旭、武鹏博、陈玉华、马青军、韦晨、黄瑞生、廖志谦、曹浩、吴妍、尹立孟、冯伟、高福洋、李爱民、马照伟、符学成、邹吉鹏、刘大双、方乃文。

钢的弧焊接头 开裂失效分析方法

1 范围

本文件规定了钢的弧焊接头开裂失效分析的一般流程和规定，包括一般要求、失效调查、取样和样品保管、检测及分析、工艺评定及失效分析报告。

本文件适用于钢的弧焊接头在使用过程中出现的接头开裂失效分析，制造商内部检验环节发现的接头开裂失效分析可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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 228.1 金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法
- GB/T 2650 金属材料焊缝破坏性试验 冲击试验
- GB/T 2651 金属材料焊缝的破坏性试验 横向拉伸试验
- GB/T 2653 焊接接头弯曲试验方法
- GB/T 2654 焊接接头硬度试验方法
- GB/T 2975 钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备
- GB/T 13298 金属显微组织检验方法
- GB/T 17359 微束分析 能谱法定量分析
- GB/T 19418 钢的弧焊接头 缺陷质量分级指南
- GB/T 19869.1 钢、镍及镍合金的焊接工艺评定试验
- GB/T 32259 焊缝无损检测 熔焊接头目视检测
- JY/T 0584 扫描电子显微镜分析方法通则

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

焊接冷裂纹 weld cold crack

焊后冷至较低温度时，在拘束应力、淬硬组织和扩散氢共同作用下产生的焊接裂纹，包括延迟裂纹、淬硬脆化裂纹和低塑性脆化裂纹。

3.2

焊接热裂纹 weld hot crack

在高温下产生的焊接裂纹，微观特征一般是沿晶开裂，包括结晶裂纹、多边化裂纹、液化裂纹和再热裂纹。

3.3

焊接疲劳裂纹 weld fatigue crack

焊接接头在长期受到交变或重复载荷作用后由于疲劳所致的裂纹。

3.4

应力腐蚀裂纹 stress corrosion crack

焊接接头在一定温度下受腐蚀介质和拉伸应力共同作用而产生的裂纹。

4 一般要求

4.1 在获得焊缝发生开裂的消息后，制造商应尽快决定是否针对开裂焊缝进行失效分析，并与用户及时协商焊缝和设备的处理方式，一旦确定开展失效分析，则应及时通知用户做好开裂焊缝的保护工作。

4.2 在对开裂焊缝进行任何处理之前，应根据本文件要求调查开裂焊缝的相关信息。

4.3 接头开裂失效分析前，制造商应根据开裂情况和具体分析需求制定接头开裂失效分析方案，并给出具体的焊缝取样操作指导说明书。

4.4 焊缝取样操作指导说明书中应说明焊缝取样的切割方法、切割位置、切割长度、切割数量以及切割顺序等信息，取样位置应包括开裂区域、裂纹的两端（切割长度应覆盖开裂区和未开裂区）以及未开裂区域，焊缝的未开裂区取样宜依据无损检测结果来确定。

4.5 接头开裂失效分析流程宜包括失效调查、现场取样、检测及分析、工艺评定、失效分析报告等环节。

5 失效调查**5.1 调查要求**

5.1.1 失效调查人员应选择接受过本文件培训的专业技术人员，不应让现场的工人、操作工等代为进行调查。

5.1.2 在专业技术人员完成失效调查前，现场应该妥善保管，不可以随意破坏、修复开裂的焊缝。

5.1.3 可采用拍照、录像、现场测量、访谈、文字描述的方式进行失效调查，调查范围包括 5.2 和 5.3 的内容；

5.1.4 失效调查人员应对接头开裂相关的信息进行整理，其内容格式可参照附表 A.1。

5.2 设备信息收集

5.2.1 应调查并记录设备的型号、产品编号、制造日期、工作时长等信息。

5.2.2 应调查并记录设备长期工作的环境状况、地点等信息。

5.3 焊缝信息收集

5.3.1 应拍照、调查并记录开裂焊缝在设备结构件中的具体位置。

5.3.2 应拍照、测量并记录开裂焊缝的尺寸、断口错开位移、宏观形貌、污染情况、腐蚀情况、裂纹扩展方向、变形情况等信息。

5.3.3 宜依据现场获取的产品编号调查、获取并记录开裂焊缝的设计图纸编号、焊接方法、焊接工艺参数、母材型号、母材材质证明书、焊接材料型号、焊接材料材质证明书、焊接设备以及焊接环境等信息。

5.3.4 如果接头开裂位置及周边区域存在前期开裂且已修补的情况，应详细记录修补区域和当前开裂区域的位置关系。

6 取样和样品保管

6.1 取样

6.1.1 在取样之前，宜对接头开裂区域周边的未开裂位置进行无损检测，如果发现存在缺陷，则应在对应位置进行取样。

6.1.2 操作人员应依据焊缝取样操作指导说明书以及现场无损检测结果进行焊缝取样。

6.1.3 操作人员应在取样前应对取样区域进行标记，包括焊缝编号、试块编号等，在实施切割前后，均应对切割区域进行拍照记录。

6.1.4 宜采用机械切割、火焰切割的方式进行取样，如果采用火焰切割，则切割位置与开裂焊缝焊趾之间的距离宜大于 20 cm。

6.2 样品保护

6.2.1 样品切割完成并冷却至室温后，应对焊缝的开裂位置以及断口进行有效保护。

6.2.2 如果接头开裂位置未受污染，则可使用软布、吸油纸等先覆盖断口，然后添加干燥剂，最后使用保鲜膜进行包裹。

6.2.3 如果接头开裂位置受到油污或者其它污物的污染，应使用无水乙醇进行冲洗，自然风干后再使用软布、吸油纸等覆盖断口，并在添加干燥剂后使用保鲜膜进行包裹。

6.3 样品转运

样品转运过程中，应将样品妥善固定、打包，确保焊缝的开裂位置和断口不会受潮，或发生磕碰。

6.4 样品保管

6.4.1 所有样品及后续的分割试样均应进行标记移植，并妥善保管，避免出现标识混乱、丢失的问题。

6.4.2 所有样品及后续的分割试样的保存环境应保持干燥，保存期限应不低于 6 个月。

7 检测及分析

7.1 宏观检测

7.1.1 焊缝外观

7.1.1.1 应对开裂焊缝进行外观检测，检测的条件和设备应符合 GB/T 32259 的要求。

7.1.1.2 应使用焊缝检验尺测量并记录开裂及周边未开裂区域焊缝的外观尺寸，包括焊缝宽度、余高、焊脚尺寸等，确认是否符合设计要求，并依据 GB/T 19418 进行缺陷等级判定。

7.1.1.3 应检查并记录开裂焊缝全部长度范围内的焊接缺陷，包括咬边、焊瘤、表面气孔等，并依据 GB/T 19418 进行缺陷等级判定。

7.1.2 焊缝断口外观

7.1.2.1 应检查断口表面是否存在焊接缺陷，包括未焊透、侧壁未熔合、层间未熔合、夹渣、夹杂、气孔等，宜使用放大镜或体式显微镜观察断口的形貌、颜色和裂纹扩展方向，并初步确定开裂源位置以及开裂类型，包括焊接冷裂纹、焊接热裂纹、焊接疲劳裂纹以及应力腐蚀裂纹等，必要时应进行拍照。

7.1.2.2 可用于确定裂纹源的方法包括：

- a) 根据裂纹走向特点确定裂纹源；
- b) 根据结构件变形程度确定裂纹源；
- c) 根据腐蚀、生锈程度来确定裂纹源；
- d) 从焊件的最薄弱处确定裂纹源。

7.2 理化检测

7.2.1 化学成分检测

应根据实际情况选择合适的测试方法检测母材和焊缝中心区域的化学成分，并与母材和焊材的材质证明书进行比对，判定母材和焊缝的化学成分是否满足材质证明书中相关技术标准的要求。

7.2.2 金相分析

7.2.2.1 应参照 GB/T 13298 进行金相试样的制备，制备的金相试样应包括：

- a) 在 7.1.2.1 中初步确定的开裂源位置制备金相试样；
- b) 如果在 6.1.1 节中通过无损检测发现了缺陷，则应在缺陷位置制备金相试样；
- c) 无缺陷异常的未开裂区域应至少选择一处制备金相试样。

7.2.2.2 应使用低倍显微镜观察金相试样的宏观金相并拍照记录，针对 7.2.2.1 中三种金相试样类型，分别判定开裂源位置/路径所处的焊缝区域（打底、填充及盖面焊的焊缝和/或热影响区）、焊缝内部存在的缺陷以及焊缝与母材的熔合情况，同时通过三种金相试样来综合判定开裂源位置是否存在修补情况。

7.2.2.3 应使用高倍显微镜对接头开裂源位置的显微组织特征进行观察，同一位置应采用高低不同倍数进行观察并保存照片，分析母材、不同位置焊缝、熔合线和热影响区组织的类型、晶粒大小和微缺陷，明确各区域组织有无异常，同时判定裂纹的扩展方式（穿晶或沿晶）。

7.2.3 拉伸试验

7.2.3.1 样品条件允许且必要时，应对母材和焊缝分别执行拉伸试验。

7.2.3.2 母材拉伸试样的取样应参照 GB/T 2975 标准要求，拉伸试验应参照 GB/T 228.1 标准进行。

7.2.3.3 焊缝拉伸试样的取样及试验应参照 GB/T 2651 标准进行。

7.2.3.4 条件允许时，母材试样和焊缝试样均应测定屈服强度、抗拉强度、以及断后伸长率，对于焊缝试样，则应确定断裂位置。

7.2.3.5 应判定母材的抗拉性能是否满足材质证明书中相关技术标准的要求。

7.2.3.6 应判定未开裂焊缝区域焊缝试样的拉伸试验结果是否满足 GB/T 19869.1 的要求，并分析焊缝金属与母材的强度匹配关系。

7.2.4 冲击试验

7.2.4.1 样品条件允许且必要时，应对焊缝及热影响区执行冲击试验。

7.2.4.2 冲击试样的样品制备和试验应参照 GB/T 2650 和 GB/T 19869.1 标准要求。

7.2.4.3 应判定未开裂焊缝区域焊缝试样的冲击试验结果是否满足 GB/T 19869.1 的要求。

7.2.5 硬度试验

7.2.4.1 在完成金相试样的显微组织分析后，应对所有金相试样执行硬度试验。

7.2.4.2 硬度试验应参照 GB/T 2654 标准要求。

7.2.4.3 应判定开裂区和未开裂区域焊缝试样的硬度试验结果是否满足 GB/T 19869.1 的要求。

7.2.6 弯曲试验

7.2.6.1 样品条件允许且必要时，应对焊缝执行弯曲试验。

7.2.6.2 弯曲试验的试样制备和试验应参照 GB/T 2653 和 GB/T 19869.1 标准要求。

7.2.6.3 应判定未开裂区域焊缝试样的弯曲试验结果是否满足 GB/T 19869.1 的要求。

7.3 断口微观检测与分析

7.3.1 检验内容

样品条件允许且必要时，可在宏观断口及缺陷处分析的基础上，利用扫描电镜、能谱仪等设备对开裂焊缝的断口进行微观检测与分析。包括但不限于以下内容：

- 1) 开裂焊缝的断口及缺陷处的具体形貌分析；
- 2) 开裂焊缝的断口及缺陷处微区夹杂物成分分析；
- 3) 开裂焊缝的断口类型分析。

7.3.2 微观断口试样制备

应基于断口宏观观察与分析结果，在开裂样品中截取微观断口试样，并满足以下要求：

- 1) 应在裂纹源及扩展区域各制备一个微观断口试样，试样应避开严重锈蚀或严重污染区，试样的长宽尺寸宜取 10 mm，厚度方向尺寸应小于 15 mm；
- 2) 应使用机械切割的方式进行微观断口试样的制备，不应使用热加工方式；
- 3) 试样制备时应对断口表面进行保护，断口部位可用干净光滑的软布或纸包裹住，再用胶纸将断口周围粘牢，确保切割过程中锯屑或其它污物不会遗留在断口表面上；
- 4) 如果断口表面存在油污，则截取后的试样可采用无水乙醇进行超声清洗，并使用吹风机吹干，否则不宜对试样进行随意清洗；
- 5) 截取的微观断口试样应与原样品块放置在一起后拍照，同时对微观断口试样进行标识。

7.3.3 微观断口形貌检验

基于宏观断口的分析结果，可依据 JY/T 0584 规范进行扫描电镜检测，观察断裂面的微观形貌和特

征，从而确定裂纹的起始点、扩展路径和断裂模式。

7.3.4 微观断口夹杂物检验

7.3.4.1 样品条件允许且必要时，可依据 GB/T 17359 标准要求，通过扫描电子显微镜及能谱仪对断口附着物、析出物、非金属夹杂物等进行成分分析，明确其类型及特征。

7.3.4.2 必要时可对夹杂物的尺寸、分布及形貌进行观察，分析夹杂物与裂纹的产生和扩展之间的关系，确定夹杂物对裂纹形成和扩展过程的具体影响。

7.3.5 微观断口类型分析

7.3.5.1 条件允许时，应分析断口是否存在解理断裂的形貌特征，包括解理台阶和河流花样等，如果存在，则应通过分析河流花样的走向来判断裂纹源的位置和裂纹扩展的方向。

7.3.5.2 条件允许时，应分析断口是否存在准解理断裂的形貌特征，包括存在不同比例的韧窝花样和平坦的小平面，同时小平面上有明显塑性变形的撕裂棱。

7.3.5.3 条件允许时，应分析断口是否存在韧窝特征，如果存在则需要重点关注韧窝的形状、大小和深浅，并判断韧窝的类型，包括等轴韧窝、剪切韧窝及撕裂韧窝，同时需要判断韧窝断裂的类型，包括纯剪切型断裂和微孔聚集型断裂。

7.3.5.4 条件允许时，应分析断口是否存在疲劳条纹特征或者轮胎压痕状花纹，如果存在，则应结合开裂焊缝服役工况进行综合确定是否属于疲劳失效，并分别确定疲劳源、疲劳裂纹扩展区和瞬时断裂区。

7.3.5.5 条件允许时，应分析断口是否存在泥状花样的腐蚀产物，如果存在，则应结合开裂焊缝的残余应力测量结果以及服役工况中腐蚀介质的存在情况来确定是否属于应力腐蚀开裂。

7.3.6 断口微观检测记录

应详细记录开裂焊缝断口及缺陷位置的微观形貌、夹杂物和断口类型分析结果。

8 工艺评定

8.1 当接头开裂失效分析结果表明焊接工艺可能存在问题时，可针对工艺操作指导书以及现场参数检查记录文件中的焊接参数进行确定性工艺评定，工艺评定试板焊接操作的各个环节应与相关材料记录的情况尽可能保持一致，包括选取相同材质，相同厚度的母材，相同规格、型号的焊材等。

8.2 工艺评定试板的长宽尺寸应尽量与实际工件的尺寸接近，如果实际工件较大，则试板的长宽尺寸宜为 500×300 mm。

8.3 工艺评定试板的焊接环境应与实际工件生产环境保持基本一致，必要时可以采用保温保湿箱进行板材预处理。

8.4 试板应由有资质的、技能水平一般的工人进行焊接，不应选择高水平焊接人员进行焊接。

8.5 焊接完成后，应参照标准 GB/T 19869.1 进行工艺评定试验。

9 失效分析报告

9.1 应综合汇总各个环节的调查、检测分析结果，包括失效调查、宏观分析、微观分析、化学成分分析、

力学性能测试及焊接工艺评定，确定接头开裂的主要原因并给出明确的结论。

9.2 完成失效分析后，应形成完整的失效分析报告，报告可参考附表 B.1，具体内容宜包括：

- 1) 失效分析报告名称；
- 2) 接头开裂概况；
- 3) 现场失效调查总结；
- 4) 无损检测结果；
- 5) 取样位置及数量说明；
- 6) 失效分析流程说明；
- 7) 参照的标准规范；
- 8) 宏观检测内容及结果；
- 9) 理化检测内容及结果；
- 10) 断口微观检测内容及结果；
- 11) 工艺参数校核及工艺评定；
- 12) 开裂失效原因分析；
- 13) 结论及经验总结。

附录 A
(资料性)

开裂焊缝失效调查记录表

开裂焊缝失效调查清单见表A.1。

表 A.1 开裂焊缝失效调查记录表

调查员		调查日期		联系方式	
产品信息					
产品型号	产品编号	制造日期	工作时长	工作环境	工作地点
焊缝断口信息					
开裂焊缝尺寸	断口错开位移	断口宏观形貌	断口污染情况	断口腐蚀情况	裂纹扩展方向
焊缝相关信息					
设计图纸编号	焊接方法	焊接工艺参数	母材型号	母材材质证明书	焊材型号
焊材材质证明书	焊接设备	焊接时间	焊接环境	焊缝修补情况	修补与当前开裂区域的位置关系
与设备操作人员 交流重点内容					
调查员补充信息					
编制		审核		批准	
日期		日期		日期	

附录B
(资料性)
失效分析报告主体内容概括示例

失效分析报告中宜包含的内容可参考表 B.1。

表 B.1 失效分析报告主体内容概括示例

关于_____的开裂失效分析报告					
接头开裂概况					
现场失效调查总结					
无损检测					
取样位置及数量说明					
失效分析流程说明					
参照的标准规范					
宏观检测内容及结果					
理化检测内容及结果					
断口微观检测内容及结果					
工艺评定结果					
开裂失效原因					
结论及经验总结					
编制		审核		批准	
日期		日期		日期	

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 20231936-T-469 油气输送管道环焊缝失效分析技术方法.
- [3] 中国机械工程学会焊接学会.焊接手册. 第3卷, 焊接结构[M].机械工业出版社, 2015.
- [4] 李亚江.焊接缺陷分析与对策[M].化学工业出版社, 2011.
- [5] AWS D1.1 Structural Welding Code – Steel.
-