

ICS 13.020.40
CCS Z05

T/SSSC

中国土壤学会团体标准

T/SSSC 0 —2026

化工场地复合污染绿色修复管控技术规 程增溶/曝气强化多相抽提

Technical Code of Practice for Green Remediation and Management of
Combined Contamination at Chemical Sites—Solubilization and Aeration
Enhanced Multiphase Extraction

（征求意见稿）

2026-XX-XX 发布

2026-XX-XX 实施

中国土壤学会 发布

目 次

前 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 总体原则	3
5 工作程序	4
6 技术适用性分析	5
7 工艺设计	6
8 主要工艺设备与材料	11
9 工程施工及运维	14
10 监测与过程控制	23
附录 A（资料性） 典型工程案例	25
附录 B（资料性） 抽提/曝气/注入成井记录单	27
附录 C（资料性） 增溶曝气强化多相抽提系统构造	28
附录 D（资料性） 抽提、注入/曝气井设计	29
附录 E（资料性） 多相抽提系统工程调试方法	30

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。

请注意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。

本文件由中国土壤学会提出并归口。

本文件起草单位：江苏省生态环境技术研究院有限公司、上海大学、上海市环境科学研究院。

本文件主要起草人：曲常胜、王超、马迅、王栋、丁亮、夏威夷、周俊、李辉、相明辉、杨洁、朱清禾、孙玉超、王贺、张柔嘉、刁文钦、王雯冉。

化工场地复合污染绿色修复管控技术规程

增溶/曝气强化多相抽提

1 范围

本文件确立了化工场地增溶/曝气强化多相抽提修复技术的工作程序、工艺设计、工艺设备与材料、工程施工及运维、监测与过程控制等相关要点。

本文件适用于化工场地增溶/曝气强化多相抽提修复工程的设计、施工、运维及监测。

本文件不适用于渗透系数 $K < 1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 致密黏土、完整坚硬基岩含水层，场地无空间无法布设井网的地块。渗透性 $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 黏性土层，采用本技术必须开展现场小试可行性论证。

本标准中涉及的多相抽提、非水相液体（NAPL）、高密度非水相液体（DNAPL）、低密度非水相液体（LNAPL）术语参见 HJ 682-2019 《建设用地土壤污染风险管控和修复术语》。

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 8978-1996 污水综合排放标准

GB 12523-2011 建筑施工场界环境噪声排放标准

GB 13271-2014 锅炉大气污染物排放标准

GB 16297-1996 大气污染物综合排放标准

GB 36600-2028 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）

GB 50027-2001 供水水文地质勘察规范

GB 50275-2010 风机、压缩机、泵安装工程施工及验收规范

GB 50296-2014 管井技术规范

GB/T 14848-2017 地下水质量标准

GB/T 20801.1-2015 压力管道规范 第 1 部分：工业管道

DZ/T 0148-2014 水文水井地质钻探规程

HJ 25.3-2019 建设用地土壤污染风险评估技术导则

HJ 25.4-2019 建设用地土壤修复技术导则

HJ 25.5-2018 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则

HJ 25.6-2019 污染地块地下水修复和风险管控技术导则

HJ 682-2019 建设用地土壤污染风险管控和修复术语

HJ 2007-2010 污水气浮处理工程技术规范

HJ 2015-2012 水污染治理工程技术导则

HJ 2025-2012 危险废物收集贮存运输技术规范

HJ 2026-2013 吸附法工业有机废气治理工程技术规范

HG/T 20717-2020 污染场地岩土工程勘察标准

YS/T 5215-2021 抽水试验规程

T/GIA 002-2021 污染地下水原位注入修复技术指南

T/SSSC XXX-2026 化工场地复合污染绿色修复管控技术规程 水力循环强化生化修复（征求意见稿）

T/SSSC XXX-2026 化工场地复合污染绿色修复管控技术规程 立体阻隔（征求意见稿）

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

化工场地 chemical site

从事或曾经从事石油化工、煤化工、焦化、农药、染料、医药中间体等化学品生产、贮存、利

用、处置活动的建设用地，涵盖在产、搬迁、关闭不同生产运营状态

3.2

复合污染 co-contamination

场地中同时存在多种污染物（如有机物、重金属）的污染状态。

3.3

绿色修复管控 green remediation and control

在保障污染治理效果的前提下，以低碳、低耗、低扰动、低二次污染为核心，通过全流程优化管控措施，最小化修复工程自身的环境与资源代价，实现安全治理与生态友好协同的场地修复管控模式。

3.4

强化多相抽提 enhanced multiphase extraction

采用曝气、增溶等措施强化多相抽提效率，提升对有机污染地块修复效能的技术。

3.5

增溶强化 solubilization enhancement

向土壤注入增溶材料，使有机污染物从土壤和地下水中脱附，提升抽提效果的技术。

3.6

曝气强化 aeration enhancement

向土壤注入空气、氧气等介质，加速有机污染物在土壤和地下水中迁移，提升抽提效果的技术。

4 总体原则

4.1 技术联合兼容原则

化工场地复合污染修复管控过程中，应坚持各类修复与管控技术协同适配、兼容联用，根据化工场地多组分、多层级污染特征，合理组合物化修复、生物修复、风险管控等技术，避免工艺冲突与功能重叠，在保证修复管控安全与效果的前提下，提升治理效率、降低工程能耗与二次环境影响，

实现多技术耦合的绿色协同修复与管控。

4.2 全生命周期原则

化工场地复合污染修复管控工程应覆盖场地调查、方案设计、施工实施、运维管控、验收及后期监测全生命周期，开展连续数据监测、动态研判与综合效果评估，统筹治理成效、资源消耗、碳排放、生态影响及长期稳定性，实现效果可控、绿色效益最大化。

4.3 绿色低碳原则

综合考虑经济、社会与环境效益，采用环境友好型材料、低扰动方式及绿色低碳技术，提升能源利用效率，降低能耗与废弃物产生，减少生态破坏，避免二次污染，确保治理后场地达标，实现高效修复与长效阻控。

4.4 安全实用原则

充分评估潜在风险，采取有效措施防止对施工人员、周边居民健康及生态环境的危害。合理控制药剂用量和范围，避免有毒中间产物和二次污染，紧密结合化工场地污染特点，确保技术可操作性、经济性和适用性。

4.5 动态优化原则

考虑污染地块水文地质条件、污染物空间分布刻画等的不确定性，在方案设计初始阶段应尽可能保守设计，并在工程运行监测等获取数据的基础上，对设计方案进行动态优化。

5 工作程序

工作流程包括技术适用性评估、场地条件精细刻画、工艺设计、主要工艺设备与材料、工程施工及运维和监测与过程控制等内容。增溶/曝气强化多相抽提技术工作流程如图所示。

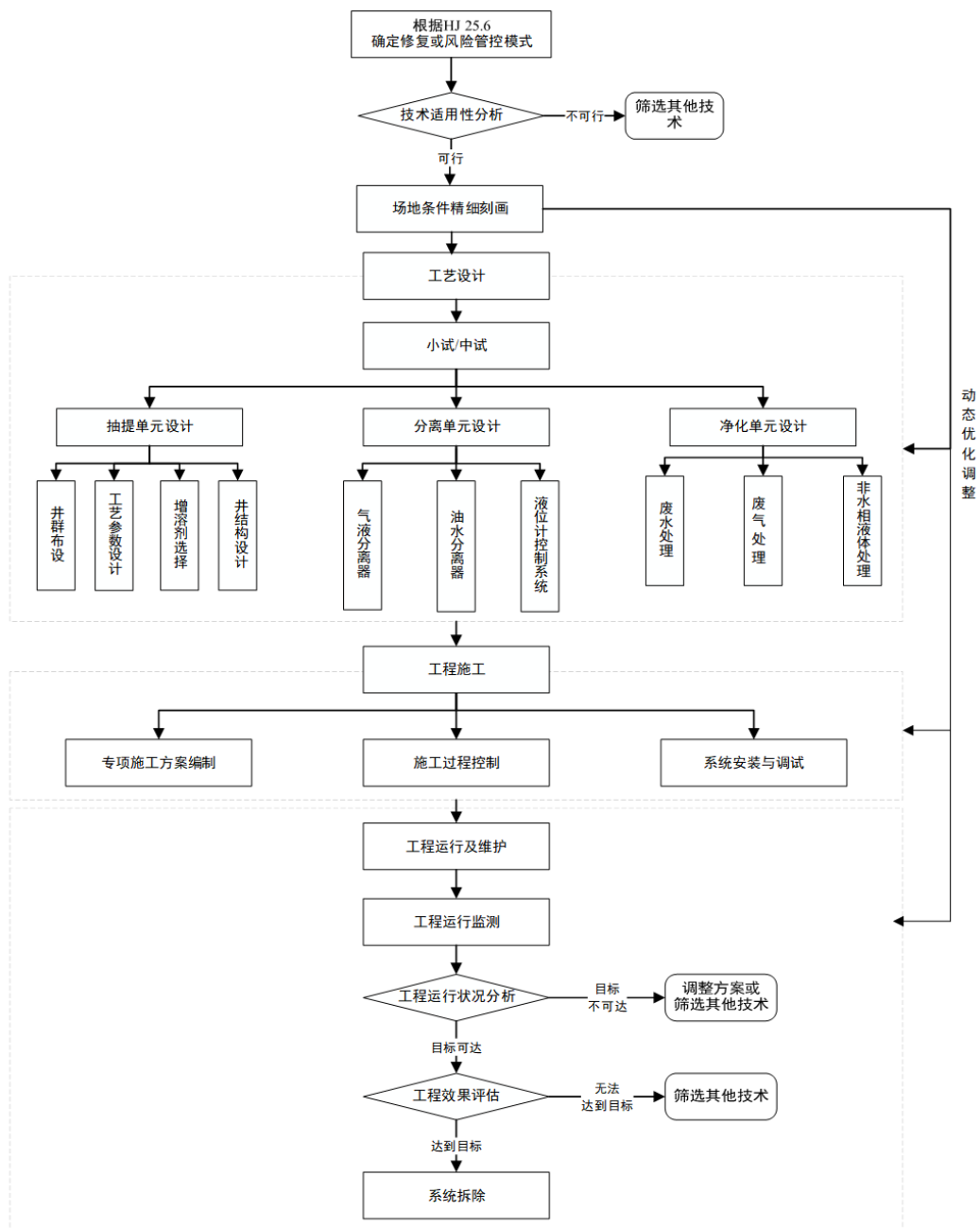


图 1 总体工作流程

6 技术适用性分析

6.1 多相抽提技术适用于气相有机污染物、残留相有机污染物、溶解相有机污染物和 NAPL 污染物的处置。

6.2 增溶强化多相抽提适用于有机污染物难挥发或存在厚 NAPL 层时，地层渗透系数为 $10^{-5}\text{cm/s}\sim 10^{-3}\text{cm/s}$ 。

6.3 曝气强化多相抽提适用于有机污染物可好氧生物降解时，地层渗透系数为 $10^{-4}\text{cm/s}\sim 10^{-3}\text{cm/s}$ 。

6.4 不适用于渗透性极低 ($K < 10^{-7} \text{m/s}$) 的黏土或致密基岩含水层, 场地空间极其受限, 无法布置有效井网的情况。

7 工艺设计

7.1 场地条件精细刻画

场地水文地质特征、污染源特征、污染物分布特征、敏感受体识别等场地条件精细刻画要求应符合《T/SSSC XXX-2026 化工场地复合污染绿色修复管控技术规程 水力循环强化生化修复》(征求意见稿) 第 7.1 条的规定。

7.2 系统构造设计

7.2.1 增溶/曝气强化多相抽提工艺系统构造分为增溶注入、曝气注入和多相抽提。

7.2.2 从动力提供和修复深度又可分为单泵系统和双泵系统。

7.2.3 单泵系统仅由真空泵提供抽提动力, 适用于修复深度不大于 10m 的浅层地块修复。

7.2.4 双泵系统由真空泵和水泵提供抽提动力, 适用于修复深度大于 10m 的深层地块修复。

7.3 抽提单元设计

7.3.1 井群设计

7.3.1.1 抽提井设计

7.3.1.1.1 根据污染特征、地层结构、水文地质条件等确定注入井、曝气井与抽提井的数量及位置。

7.3.1.1.2 抽提井的布设应采用正六边形或正三角形布局, 最大深度以污染最深的介质深度为准, 应为最深深度向下延伸 0.5~1m; 间距应为 2~6m, 具体的井间距应根据实际场地污染特征、地层构造、水文地质条件、修复效率、修复工期等因素调整。

7.3.1.2 注入井/曝气井设计

7.3.1.2.1 注入井/曝气井与抽提井的布设相对位置见下, 即抽提井居中, 注入井/曝气井环绕四周, 注入/曝气井按照正三角形或正六边形布置, 井间距可根据场地水文地质特征及预期的影响半径优化确定。

7.3.1.2.2 曝气井最大深度以污染最深的介质深度为准，应为最深深度向下延伸 0.5~1m，布设间距应为 5~17m，可根据场地实际情况进行调整。

7.3.1.2.3 增溶强化药剂注入方式可采用直推式、高压旋喷或建井方式注入，增溶药剂注入井最大深度以污染最深的介质深度为准，应为最深深度向下延伸 0.5~1m，布设间距应为 2~6m，可根据场地实际情况进行调整。

7.3.1.2.4 曝气/增溶注入井和抽提井的数量比例应根据场地条件确定，在 6:1~2:1 之间。

7.3.1.3 监测井设计

7.3.1.3.1 监测井应布设在修复区域内部，用于监控修复效果，修复区域上游、下游及两侧边界，用于监控污染物是否发生逃逸和关键疑似薄弱区或地质条件复杂区。

7.3.1.3.2 监测井的筛管位置应根据监测目标（如水位、水质、土壤气）进行专门设计。

7.3.2 工艺参数设计

7.3.2.1 真空度、抽提流量设计试验

7.3.2.1.1 真空度与抽提流量存在耦合关系，试验应确定兼顾污染物去除效率、运行能耗与系统稳定性的最佳真空度、气相及液相抽提流量，找到效益拐点。

7.3.2.1.2 宜采用中心抽提井+放射状布置多口不同方位、不同距离观测井的试验布点方式；配备可调压 MPE 设备、气液流量计、PID/FID 在线气体检测仪、真空表、水位计、数据记录仪。

7.3.2.1.3 试验从较低真空度（如-5 kPa）逐级提升，每一级真空度下系统应稳定运行 2 h~4 h，待流量、浓度读数趋于稳定后，同步记录井头真空度、气/液瞬时流量、VOCs 浓度、抽提井及各观测井水位降深、观测井真空度。

7.3.2.1.4 出现设备真空度达上限、污染物去除进入平台期、液相抽提占比过高阻碍气相抽提、过大水位降深存在污染物绕流或地层堵塞风险任一情形，即可终止试验。

7.3.2.1.5 应计算气相污染物质量去除率、单位能耗效率；依据真空度-质量去除率曲线确定效益拐点，拐点对应参数即为最佳操作参数，同时结合真空度-单位能耗效率曲线开展经济性校核。

7.3.2.2 抽水影响半径试验

7.3.2.2.1 应采用已确定的最佳真空度与最佳抽提流量开展抽水影响半径试验，获取抽水条件下的降落漏斗，计算抽水影响半径。

7.3.2.2.2 观测井宜沿 1 条及以上相互垂直射线布设，遵循近密远疏原则，布点应可捕捉水位降深的边界位置；试验前测定各井初始静水位。

7.3.2.2.3 系统恒定工况运行，按规定时间序列监测水位，待全部井水位降深连续 1 h~2 h 无趋势性变化，判定达到稳定流，记录各观测井稳定水位降深。

7.3.2.2.4 以观测井距离抽水井的对数距离为横坐标、稳定水位降深为纵坐标绘制数据曲线；曲线外推至降深为 0 处，对应横轴距离即为抽水影响半径。

7.3.2.3 曝气影响半径试验

7.3.2.3.1 通过监测监测井气泡、地下水位、溶解氧、土壤气 VOCs、压力变化，评估注气曝气的影响范围；抽提气体流量宜不小于注入气体流量的 1.2 倍，保障污染物捕获效果。

7.3.2.3.2 注气压力宜按 0.2 MPa、0.3 MPa、0.4 MPa、0.5 MPa 阶梯提升，具体结合场地地质条件确定；可采用放射状布点方式布设监测井，采用压力传感器、示踪气体监测气流分布。

7.3.2.3.3 曝气试验前测定各监测点地下水位、溶解氧、土壤气本底压力、氧气、VOCs 浓度，作为本底参照。

7.3.2.3.4 保持注气流量恒定，按时间间隔记录注入压力与各监测点压力；注入压力每抬升预设台阶，全部监测点应同步开展土壤气采样，测定氧与 VOCs 浓度。

7.3.2.3.5 出现压力达到地质条件限定安全上限、最远监测点出现明确压力与氧气响应、升压但影响范围不再明显扩大、地面隆起或裂缝迹象任一情况应立即停止曝气。

7.3.2.3.6 整理各压力台阶监测数据，分别确定压力影响半径、氧气影响半径；绘制注入压力-影响半径关系曲线，选取安全压力下的氧气影响半径作为设计曝气影响半径。

7.3.2.4 增溶影响半径试验

7.3.2.4.1 增溶影响半径试验应分别确定水力影响半径、化学影响半径、修复效应半径，以三者综合判定增溶强化多相抽提的综合影响半径。

7.3.2.4.2 宜采用中心抽提-周边注入监测的准中试试验布置：设置中心多相抽提井，配套增溶剂注入井、水力监测井、化学监测井，必要时布设土壤气监测探头；注入井宜环形布设或垂直地下水流向布置，控制增溶剂无序向下游扩散。

7.3.2.4.3 先开展保守示踪剂注入试验，根据示踪剂运移突破曲线校准场地水文地质概念模型；再开展增溶剂-示踪剂联合注入，同步运行多相抽提系统；试验前期提高取样频次，后期可适度降低。

7.3.2.4.4 监测指标应包含水样示踪剂、增溶剂、目标污染物、pH、电导率、表面张力；同步监测土壤气 VOCs、真空度、抽提气液流量与污染物浓度，计算污染物质量去除率。

7.3.2.4.5 停止增溶剂注入后应继续维持抽提系统运行，开展后效监测，掌握残余增溶剂与污染物洗出特征。

7.3.2.4.6 根据水位降深等值线确定水力影响半径；依据增溶剂有效浓度等值线确定化学影响半径；依据污染物浓度削减等值线确定修复效应半径；综合三者得到综合影响半径，同时对比基线抽提与增溶强化阶段的污染物去除效果，评估强化修复效能。

7.3.3 增溶剂选择

7.3.3.1 增溶剂应根据场地污染类型、水文地质条件、二次污染风险、修复目标综合选型，优先选用环境友好、可生物降解、生态毒性低的绿色增溶剂。

7.3.3.2 微生物基增溶剂（如鼠李糖脂、槐糖脂）适用于石油烃、苯系物、多环芳烃、氯代烃类地下水污染修复；可乳化 NAPLs，兼具增溶与碳源供给功能。

7.3.3.3 植物基增溶剂（如茶皂素、甘草酸）适用于重金属-有机物复合污染场地；可同步增溶有机污染物、络合重金属离子，天然降解无生态累积风险，适合饮用水源保护区等环境敏感区域，可利用农业副产物制备以降低成本，增溶性能受 pH、离子强度影响显著，注入阶段应开展水质条件调控。

7.4 分离单元设计

多相分离单元设计应符合下列规定：

7.4.1 应包括气液分离器和油水分离器，并应与抽提单元配套；

7.4.2 气液分离器可采用旋风气液分离器；

7.4.3 油水分离器可采用管式或聚结板式；

7.4.4 分离容器内应安装液位计控制系统；

7.4.5 LNAPL 出口应位于油水分离器上部；DNAPL 出口应位于油水分离器底部。

7.5 净化单元设计

7.5.1 废气处理

7.5.1.1 增溶曝气强化多相抽提系统抽提废气处理单元需与多相抽提主机实现负压联锁控制，工程现场可采用两级颗粒活性炭串联吸附，也可根据废气浓度选用催化氧化、冷凝等其他工艺，当抽提废气 VOC 浓度接近爆炸下限 25%LEL 时，应设置阻火器、稀释降温等安全措施，禁止直接进入活性炭吸附罐。

7.5.1.2 废气收集管路维持-2~-8kPa 负压运行，管路接头、阀门、采样点位全部实施密封防渗处理。

7.5.1.3 吸附单元前端设置气液分离罐，去除废气中携带的冷凝水与气溶胶，控制进气相对湿度低于 85%。

7.5.1.4 现场按频次开展进出口废气采样监测，当出口特征污染物浓度超过设计排放限值的 80%时，及时切换更换活性炭；更换产生的废活性炭属于危险废物，密闭封装暂存，交由资质单位处置。

7.5.2 废水处理

7.5.2.1 多相抽提系统产出的抽提地下水与系统冷凝废水，水质受曝气抽提时序、NAPL 相扰动释放影响波动幅度大，废水单元采用吹脱-活性炭深度吸附组合工艺。

7.5.2.2 抽提废水首先进入密闭调节池，实现均质均量，缓冲系统水质水量冲击负荷，池体全部加盖密闭，池面挥发废气接入前端废气处理系统，规避二次污染。

7.5.2.3 吹脱单元气水比控制在 15:1-30:1，吹脱后出水进入活性炭吸附柱深度处理。

7.5.2.4 处理后出水需检测目标污染物指标，达标后可回用于场地增溶药剂配制，不满足回用条件则作为危废废水委外处置；池体及输送管线落实防渗措施，定期清除池底浮渣沉积物，废吸附填料、浮渣全部按危险废物规范收集。

7.5.3 NAPL 处理

7.5.3.1 曝气扰动会促使地层中重质氯代烃 NAPL 相发生解吸迁移，抽提流体中可检出游离态 NAPL 组分，NAPL 处理单元以重力相分离、密闭收集、合规处置为核心。

7.5.3.2 多相抽提产出的气-水-NAPL 混合流体进入三相分离罐，依靠重力实现三相分层，设置油水界面在线监测，定期排油，减少游离 NAPL 进入废水、废气后端单元，避免造成后端处理单元负荷过载。

7.5.3.3 分离得到的 NAPL 转入专用危废储罐，储罐配套防渗围堰、呼吸阀与液位监测，做好防雨防晒，杜绝 NAPL 跑冒滴漏再次污染场地。

7.5.3.4 NAPL 属于危险废物，完整记录产生量、贮存、转运全流程台账，委托资质单位处置，严禁现场回注地层或就地倾倒。

7.5.3.5 曝气强度需结合地层渗透性管控，潜水层曝气压力宜控制在 5-25 kPa，避免过强水力扰动驱动 NAPL 横向迁移，防止污染羽范围扩大。

7.6 增溶/曝气强化多相抽提耦合联用设计

7.6.1 先增溶后曝气（SE→AS→MPE）适用于低渗透性污染场地，污染物以高黏度 NAPLs（如重质石油烃、多氯联苯 PCBs）为主。

7.6.2 先曝气后增溶（AS→SE→MPE）适用于高挥发性有机物（VOCs）与半挥发性有机物（SVOCs）混合污染场地。

7.6.3 增溶/曝气交替循环（AS→SE→AS→MPE）对于复杂污染（VOCs+SVOCs+NAPLs），可采用交替循环模式（AS→SE→AS→MPE），以兼顾挥发性和难溶性污染物的去除。

8 主要工艺设备与材料

8.1 地下注入和抽提系统

8.1.1 注入井/抽提井

8.1.1.1 井管材料应采用 UPVC（未增塑聚氯乙烯）Schedule80 或更高标准，或 AISI304/316 不锈钢。

在强腐蚀性环境中，优先选用 UPVC 或更高等级不锈钢。

8.1.1.2 井管规格直径应根据设计注入/抽提流量确定，抽提井单泵系统管径应 $>15\text{cm}$ ，双泵系统可根据潜水泵的空间要求进行调整。

8.1.1.3 注气井结构应符合 GB50296 规定，注气方式应采用脉冲式注气，注气井管径应为 2.5~10cm，多井并联时可配置流量平衡阀。

8.1.1.4 筛管/花管材料必须与井管材质一致。缝隙应根据场地水文地质条件（特别是含水层颗粒级配）选择，常用缝宽为 0.2~2.0mm，以确保通畅并防止细颗粒涌入。

8.1.1.5 滤料材料应采用化学成分稳定、磨圆度好的石英砂。粒径应为筛管缝隙宽度的 4~6 倍。

8.1.1.6 止水材料应采用钠基膨润土球或粉末，或水泥基灌浆材料。性能膨润土膨胀系数应 $\geq 24\text{mL}/2\text{g}$ ，水泥浆凝固后渗透系数应 $<1\times 10^{-7}\text{cm/s}$ 。

8.1.2 潜水泵/气提泵

8.1.2.1 类型根据井深和扬程要求，可选择潜水电泵（用于深井）或气提泵（用于浅井，耐腐蚀性好）。

8.1.2.2 材质与介质接触的泵体、叶轮等核心部件必须采用不锈钢 316 耐腐蚀工程塑料。

8.1.2.3 性能应具备变频调节功能，以实现流量的精确控制。

8.2 地面处理系统

8.2.1 分离单元

8.2.1.1 油水分离器类型应为重力斜板式分离器或聚结式分离器。罐体材质应采用碳钢（内衬环氧沥青或聚乙烯防腐）或玻璃钢（FRP）。

8.2.1.2 气液分离器类型应为旋风分离器或挡板式分离器。材质为不锈钢 304/316 或 PP，性能要求能有效去除 $\geq 10\mu\text{m}$ 的液滴。

8.2.2 气处理单元

8.2.2.1 活性炭吸附装置里面活性炭应采用煤质或椰壳颗粒活性炭（GAC），碘值不低于 800mg/g，四氯化碳吸附率不低于 60%。罐体材质为碳钢（防腐）或不锈钢。应设计为双罐（一用一备）或多罐串联，空塔停留时间不低于 2 秒。

8.2.2.2 催化氧化装置催化剂应为贵金属（铂、钯）催化剂，起燃温度应低于 300℃，装置应具备自动控温、超温报警和安全泄爆功能。

8.2.3 废水处理单元

8.2.3.1 高级氧化装置臭氧发生器应优先选择板式放电体，臭氧产量和浓度需满足设计需求。紫外灯管：应采用低压高强汞灯或微波紫外灯，波长 254nm，寿命不低于 8000h。

8.2.3.2 过滤装置袋式过滤器过滤精度可根据需求选择 1~100μm。活性炭过滤器填充 GAC，用于深度吸附残余污染物。

8.3 增溶剂系统

8.3.1 增溶剂储罐材质应采用聚乙烯（PE）或玻璃钢（FRP）材质，避免与表面活性剂发生反应。容量应根据药剂消耗量和补加周期确定，并设置液位计和通气口。投加泵类型应采用机械隔膜泵或螺杆泵。

8.3.2 泵头过流部分需为 PVC、聚四氟乙烯（PTFE）或不锈钢 316。必须配备变频器，实现与注入水流的联动和精确比例投加，精度不低于±2%。

8.4 曝气系统

8.4.1 空气压缩机类型为无油螺杆式或涡旋式空压机，确保供给无油空气。排气量和压力需满足设计注入量和井头压力要求。空气过滤装置必须配备高效除油除尘过滤器和空气干燥机，确保注入空气的洁净度。

8.5 检测、控制与安全要求

8.5.1 系统应配备 PLC（可编程逻辑控制器）或 DCS（集散控制系统），实现对流量、压力、液位、

关键水质参数（如 pH、ORP）和气体浓度的实时监测与自动控制。

8.5.2 所有电气设备在潜在爆炸性环境区域必须符合防爆标准。药剂储罐区域应设置防渗漏围堰，其容积不低于最大单罐容积的 1.1 倍。系统管道应设置安全阀和压力表，高压设备应设置超压报警和停机连锁。

9 工程施工及运维

9.1 工程施工

9.1.1 施工准备

9.1.1.1 技术准备包括工程地质和水文地质资料，气象、水文资料，工程用地、交通运输及其环境条件，施工供水、排水、通信、供电和其他动力条件，与施工有关的其他情况和资料等。

9.1.1.2 现场准备包括划定施工区域、材料堆放区和设备安装区，药剂储存区必须设置防渗围堰，落实临时水电接口，容量应满足施工峰值需求，布置现场办公、消防及应急设施。

9.1.2 钻井与成井施工

9.1.2.1 开孔作业

9.1.2.1.1 采用无水钻进工艺（干钻），防止地表水带入地表污染物向下迁移污染深层土体。

9.1.2.1.2 开孔直径按照设计井径执行（常规 110mm/168mm），开孔深度 0.5~1.0m，孔壁保持完整，不坍塌。

9.1.2.1.3 开孔完成后，检查孔口稳定性，若表层土质松散，立即下入临时护筒，防止孔口垮塌。

9.1.2.2 正常钻进作业

9.1.2.2.1 匀速向下钻进，根据土层软硬调整钻进速度：软土层慢钻、勤提钻；硬土层适当加大钻压，禁止暴力猛钻。

9.1.2.2.2 每钻进 1m，提取一次钻渣，现场记录土层变化，填写《钻井地层记录表》，土层与勘察报告不符时第一时间上报技术员。

9.1.2.2.3 接近设计污染层顶部时，降低钻进速度，精准控制滤管安装位置。

9.1.2.2.4 钻进至设计井深后，停止钻进，提钻前静止 5~10min，让孔内钻渣自然沉淀。

9.1.2.3 井管下放、滤管定位

9.1.2.3.1 管材连接：PVC 管采用专用粘接剂粘接，粘接后静置不少于 15min，确保粘接牢固；不锈钢管采用丝扣连接，缠绕生料带，拧紧不渗漏。

9.1.2.3.2 按照“底部沉砂管→滤管→实管”的顺序提前组合管柱，在地面预组装、标记长度。

9.1.2.3.3 下放至设计位置后，固定井口，保证滤管段完全对应地下污染层、含水层，位置偏差不得大于 30cm。

9.1.2.3.4 沉砂管位于井管最底部，长度不小于 0.5m，用于沉淀细小砂粒，防止堵塞滤管。

9.1.2.4 滤料回填、止水封井

9.1.2.4.1 滤料选用 2~4mm 洁净石英砂，从井口四周均匀缓慢投入，禁止单侧集中倾倒造成管柱偏斜。

9.1.2.4.2 滤料回填高度：从滤管底部至滤管顶部以上不小于 1.0m，滤料围填厚度不小于 100mm。

9.1.2.4.3 回填过程中，每隔 0.5m 使用测绳测量滤料顶面高度，保证回填均匀、密实，出现架空、空洞必须重新回填。

9.1.2.4.4 滤料全部回填完成后，静置 30min，让滤料自然沉降。

9.1.2.4.5 滤料以上开始回填黏土球/膨润土止水材料，分层回填、分层捣实。

9.1.2.4.6 止水段总长度不小于 1.0m，目的是隔绝上下地层水力联系，防止地表水、浅层污水沿井壁下渗，也防止地下污染物向上窜流。

9.1.2.4.7 井口最顶端使用混凝土或高强度黏土密封，密封厚度不小于 0.3m，做到井口坚固、不渗水、不塌陷。

9.1.2.5 洗井

9.1.2.5.1 常规地层采用活塞洗井+空压机联合洗井。

9.1.2.5.2 细砂、粉土地层采用潜水泵抽水洗井，避免活塞扰动造成大量出砂。

9.1.2.5.3 下入洗井活塞/潜水泵，开启设备反复提拉、抽水，将井内泥浆、细小砂粒、浑浊水体全部抽出。

9.1.2.5.4 单井洗井总时长不少于 2h；地层含细砂、淤泥时，延长至 4h 以上。

9.1.2.5.5 出水清澈，静置 5min 后底部无明显积砂。

9.1.2.6 井内安装

9.1.2.6.1 多相抽提井内部安装

- (1) 井内下入负压抽吸管，吸口位置位于滤管中下部，处于地下水液面以下、油相聚集区。
- (2) 同步下入潜水泵（液相抽取），泵体固定牢固，距离井底沉砂管顶部不小于 0.3m，防止吸砂。
- (3) 井口安装密封法兰、密封盘根，做到全密封，保证井内负压不泄漏，这是多相抽提成败的关键。
- (4) 井口外侧安装阀门、真空表、取样口，便于调节、监测、采样。

9.1.2.6.2 曝气井内部安装

- (1) 井内下入曝气散气管，散气段全部位于滤管范围内，管底加装配重，防止管路上浮。
- (2) 散气管开孔朝下，避免地层泥沙堵塞气孔；井口做密封处理，外接供气阀门、压力表、流量计。
- (3) 管路固定牢固，避免曝气震动导致管路移位、磨损。

9.1.2.6.3 增溶注入井内部安装

- (1) 下入加药直管，出药口位于滤管中上部，保证药剂直接进入污染含水层。
- (2) 井口密封，安装调节阀、流量计、快速接头，方便切换清水、药剂管路。

9.1.3 地面系统安装与连接

9.1.3.1 设备布局

9.1.3.1.1 整套系统采用撬装集中布置为主，分散设备为辅，管路走向最短、转弯最少，便于操作、

巡检、维修。

9.1.3.1.2 按照工艺流程顺序摆放：加药系统→曝气系统→抽提主机→气液分离罐→油水分离罐→末端废气处理→废水处理。

9.1.3.1.3 设备之间预留操作通道，通道宽度不小于 1.2m，满足人员通行、设备检修需求。

9.1.3.2 各单元设备安装

9.1.3.2.1 增溶注入系统安装

系统组成：药剂储存桶/药剂罐、搅拌器、计量加药泵、过滤器、阀门、流量计、管路。

- (1) 药剂罐摆放平稳，罐体直立，底部垫高 10~15cm，便于排污、检修。
- (2) 药剂罐上口加盖密封盖，防止雨水、杂物进入，罐侧设置液位观察口。
- (3) 安装搅拌装置：搅拌电机固定牢固，搅拌桨距离罐底 15~20cm，避免刮擦罐底。
- (4) 吸药管路：管路入口加装 Y 型过滤器（滤网孔径≤60 目），阻挡药剂内杂质，防止计量泵堵塞。
- (5) 计量泵安装：泵体水平固定，进出口方向严格按照介质流向标识安装，泵前后均加装球阀。
- (6) 管路依次连接：药剂罐→过滤器→计量泵→总干管→分支管→各注入井。
- (7) 每一条分支管（对应单口注入井）独立设置调节阀、流量计、单向阀，防止地下水倒流进入药剂罐。

9.1.3.2.2 曝气系统安装

系统组成：空压机、储气罐、冷却器、干燥过滤器、总阀、分压阀、流量计、曝气支管。

- (1) 空压机放置在通风良好区域，远离药剂、挥发性气体，电机散热口无遮挡。
- (2) 空压机出口连接储气罐，储气罐竖直安装，底部安装排污阀，每日定期排水。
- (3) 气路依次加装：空气过滤器、调压阀、总压力表，对压缩空气进行净化、稳压。
- (4) 总干管分出多条支管，每条支管对应一口曝气井，单支管设置独立球阀、流量计、压力表。

9.1.3.2.3 多相抽提系统安装

系统组成：水环式真空泵/罗茨真空泵、气水总干管、真空表、主阀门、分支管路。

- (1) 真空泵为整套系统核心负压设备，必须水平安装，减震措施到位。
- (2) 真空泵进气总管安装高精度真空表（量程-100~0kPa），实时监测系统负压。
- (3) 总干管分设多条支管，一对一连接抽提井，每条支管设置独立球阀、支路真空表、取样口。
- (4) 所有抽提管路、井口全部密封，漏气是抽提效率下降的最主要原因，安装阶段逐段检查密封。

9.1.3.2.4 气液、油水分离、废气、废水等单元安装

- (1) 气液分离罐：竖直安装，上进下出，气相从罐体顶部引出，液相从罐体底部排出。罐体安装液位计、超高液位报警口，防止液体倒灌进入真空泵。
- (2) 油水分离罐：串联在气液分离罐之后，利用重力分层，罐体设置可视观察窗、排油口、排水口。浮油层从上部排油口收集，水体从下部排水口流出。
- (3) 废气处理（活性炭吸附罐）：串联在气液分离罐气相出口，吸附罐立式安装，气体下进上出，内部装填柱状活性炭。罐体前后安装压差表，用于判断活性炭是否饱和。废气达标后高空排放，排放高度不低于 15m。
- (4) 废水处理单元：根据水质设置沉淀池、絮凝箱、回调池，管路自流或泵提输送，处理后水体达标排放或回用于场地洒水、药剂稀释。

9.1.3.3 管路布置

9.1.3.3.1 药剂管路、高污染废水管路：选用耐腐蚀 UPVC 管或 304 不锈钢管；

9.1.3.3.2 空气管路：普通镀锌钢管或耐压软管；

9.1.3.3.3 真空抽提主管：厚壁 UPVC 管/不锈钢管，严禁使用薄壁软管作为长期真空主管。

9.1.3.3.4 管路走向：横平竖直，尽量减 90°急转弯，多用 45°弯头，降低管路阻力。

9.1.3.3.5 管路固定：长距离管路使用管卡、支架固定，悬空管路不得下垂、晃动。

9.1.3.3.6 坡度要求：液相管路设置 1%~2%坡度，坡向罐体、收集池，防止管路积水积油。

9.1.3.4 电气与自控系统安装

9.1.3.4.1 所有电机、仪表、开关、灯具全部使用 Ex 防爆型，符合易燃易爆场所用电要求。

9.1.3.4.2 按照电气图纸完成主回路、控制回路接线，接线端子压紧，线头无裸露。

9.1.3.4.3 所有设备金属外壳、罐体、井管、管路统一做等电位接地，接地线路串联可靠。

9.1.3.4.4 现场就地显示仪表，安装高度便于人员读数（距地面 1.2~1.5m）。

9.2 工程调试

9.2.1 系统正式投运前，应完成曝气管路、增溶注入管路、多相抽提负压管路的试压 / 气密性试验，以及各子系统单机、带载、单井接入调试，全部合格后方可投入修复运行，详细调试操作方法参见附录 E。

9.2.2 曝气管路气压试压：试验压力 0.2MPa，保压 30min，保压阶段管路无泄漏，总压力表压降 $\leq 5\%$ 为试压合格；泄漏点应泄压处置后重新试压。

9.2.3 增溶注入管路水压试压：试验压力 0.3MPa，保压 30min，管路、阀门、泵体、罐体接口无渗水滴水、压力无明显下降判定水压试验合格。

9.2.4 多相抽提负压管路气密性试验：系统密闭后抽至负压-60kPa，独立保压 30min；负压回升 ≤ 10 kPa，无明显漏气声响，气密性判定合格。

9.2.5 子系统带载调试：曝气系统调节压力与流量，验证自动排污功能；增溶注入系统宜采用清水替代药剂试打，泵组连续运行不少于 30min，流量压力可调、无倒流渗漏；多相抽提系统空载连续运行不少于 1h，气液分离、废气处理、废水处理单元功能应正常。

9.2.6 井组接入应逐井依次带载试运行，严禁一次性全部开启所有井组；单井小负荷稳定运行 30min 无异常后，方可接入下一口井，全过程记录系统负压、压力、流量参数。

9.3 工程试运行

9.3.1 清水试运行正常后，转入带药剂试运行。初始阶段应采用较低浓度的表面活性剂和较小的注入/抽提流量。

9.3.2 试运行时间不应少于 168h（7 天）。

9.3.3 期间应全面监测并记录：系统各单元的压力、流量、液位。注入药剂浓度与总量出水水质（pH、浊度、污染物浓度等），废气排放浓度。

9.3.4 根据试运行数据，对系统运行参数进行最终优化，直至系统运行稳定、处理效果达到设计预期。

9.4 现场运行

9.4.1 增溶注入系统

9.4.1.1 增溶注入单井注入速率控制在 $0.1\sim 0.5\text{m}^3/\text{h}$ ，系统注入压力为 $<0.5\text{MPa}$ （严禁超压，防止地层劈裂、药剂窜流），单次注入总量按照地层孔隙体积的 5%~15%控制。

9.4.1.2 分为连续注入和间歇注入，注入阀门打卡顺序为总阀→分支阀→单井注入阀。

9.4.1.3 修复初期（高污染）采用中高浓度（2%~5%）增溶剂，快速增溶大量游离态、吸附态的污染物。修复中期（浓度下降）增溶剂下调浓度至 1%~2%，维持增溶效果，降低药剂成本。修复后期（低浓度、趋近达标）增溶剂采用低浓度（0.5%~1%），或改用清水置换，清洗地层残留药剂。

9.4.2 曝气注入系统

曝气注入供气压力控制在 $0.1\sim 0.3\text{MPa}$ ，单井曝气流量为 $0.5\sim 3\text{m}^3/\text{min}$ ，气水比（曝气总量：抽提水量）控制为 5:1~20:1。现场分为连续曝气、脉冲曝气两种模式。

9.4.2.1 连续曝气

9.4.2.1.1 所有曝气井持续恒定供气，流量、压力保持稳定。

9.4.2.1.2 每 4h 巡检一次压力、流量、设备温度。

9.4.2.1.3 适合修复前期，快速解析大量污染物。

9.4.2.2 脉冲曝气

9.4.2.2.1 设定曝气时长+停机静置时长，循环启停。

9.4.2.2.2 短时大流量曝气，利用气流冲击扰动地层；停机阶段让气体缓慢扩散、污染物解析。

9.4.2.2.3 优势：减少地层细颗粒运移造成的滤管堵塞，降低设备能耗。

9.4.3 多相抽提系统

9.4.3.1 真空泵分步空载加载启动

9.4.3.1.1 关闭总抽提主阀门，设备完全空载状态启动，空载运行 5min，观察电机运转、轴承、机体振动、温度、声音全部正常，无异响、无卡顿、无异常升温。

9.4.3.1.2 缓慢开启总抽提阀门，分阶段梯度提升负压，严禁一次性满负压运行；第一阶段负压控制-0.02~0.03MPa，稳定运行 10min，抽排井内积水、游离气体、松散杂质。

9.4.3.1.3 逐步提升负压至-0.05~0.06MPa，稳定运行 20min，观察井组出液、出气状态、管路密封状态。

9.4.3.1.4 根据地层特性调整至额定运行负压，粉质黏土致密地层稳定-0.06~0.075MPa，中粗砂疏松地层稳定-0.075~0.09MPa，全程梯度升压、稳态运行。

9.4.3.2 单井抽提工况精细化调试

9.4.3.2.1 单井出水量大、水质浑浊、含泥沙量大：立即关小该井支管调节阀，降低单井负压、减小抽提流量，放缓抽提速度，防止高速抽吸造成井壁失稳、土体坍塌、筛管破损、大量泥沙入井；持续出砂超过 30min，立即临时关井，静养地层，待土体稳定后重新调试开启。

9.4.3.2.2 单井长期只有气相、无液相出水：适当开大支管阀门，提升单井抽吸力，排查地下水位下降、地层缺水情况，记录水位变化数据，作为后续参数调整依据。

9.4.3.2.3 井群均衡调试：同一修复单元内所有抽提井负压差值严格控制 $\leq 0.01\text{MPa}$ ，杜绝个别井负压过大、个别井负压过小，防止负压偏移形成修复死角、局部治理不达标。

9.4.4 三系统联动稳态运行与动态调参

9.4.4.1 运行时序

9.4.4.1.1 整套增溶曝气强化多相抽提系统开机顺序固定不可逆：第一步系统预曝气、第二步药剂投加、第三步地层静置反应、第四步启动多相抽提，任何情况下禁止颠倒顺序开机。

9.4.4.1.2 曝气系统提前预运行 30~60min，稳压扰动地下土壤孔隙、置换地层原始气体、疏通堵塞微

孔隙，消除地层憋压、气流不通问题；

9.4.4.1.3 完成药剂精准配制、定量投加，保证药剂均匀渗入污染土层、含水层；

9.4.4.1.4 地层静置反应，轻污染区域静置 2~3h，重污染核心区域静置 4~6h，给予药剂充足的增溶、解吸、乳化反应时间，最大化破除污染物吸附状态；

9.4.4.1.5 静置时间达标后，启动多相抽提系统，开展气、液、多相同步抽提作业。

9.4.4.2 依据污染物浓度变化动态调参

9.4.4.2.1 现场每 3~5 天开展水土、尾气取样检测，根据检测结果执行调参：

9.4.4.2.2 污染物浓度持续下降、尾气 VOC 浓度稳步降低：逐步降低运行负荷，药剂浓度下调 0.2%~0.3%，投加频次减半；曝气总管压力下调 0.03~0.05MPa，减少无效曝气能耗。

9.4.4.2.3 污染物浓度居高不下、降解缓慢、尾气浓度持续高位：提升系统修复强度，在合规范围内小幅提高药剂浓度、增加单井投加总量；提升曝气压力、延长每日有效曝气时长。

9.5 系统维护

9.5.1 制定修复工程设备的定期维护计划，对现场设备设施进行定期检查，并记录检查内容与结果。

9.5.2 维护人员根据技术要求与规范对工程设备开展定期检查、维护和更换必要的部件和材料。

9.5.3 准确、完整填写系统的运行日志、设备缺陷记录、故障处置记录和维护保养记录，并对采集、记录的数据进行分析，及时发现潜在问题。

9.6 系统停止和拆除

9.6.1 运行和维护人员可根据现场的数据，包括地下水中污染物采样结果、抽提管道尾气浓度等，判断系统的停止时间。

9.6.2 根据修复效果评估建议，可保留监测系统，持续获取地下水水质参数等信息，最后拆除。

9.6.3 拆除装置设施前，对作业过程进行危险识别和风险评估。

9.7 施工安全与环境保护

9.7.1 施工期间必须严格遵守安全生产法律法规，对有限空间作业、高空作业、动火作业等实行作业

许可制度。

9.7.2 所有危险化学品（特别是表面活性剂）的储存、搬运和使用必须遵守 MSDS（材料安全数据表）的要求。

9.7.3 施工产生的废水、废渣应分类收集，妥善处理，不得随意排放。噪声排放应符合《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB 12523）的要求。

9.7.4 制定并落实应急预案，配备必要的应急器材，防止污染事故扩大。

10 监测与过程控制

10.1 监测内容

10.1.1 多相抽提系统设计阶段，工艺参数监控应包括渗透系数、孔隙度、含水率等土壤特性，土壤真空/压力分布，水位分布，流体流动速度与方向，测压管压力分布，污染物浓度和分布和 NAPL 厚度和污染面积等内容。

10.1.2 多相抽提系统启动阶段，工艺参数监控应包括土壤真空/压力分布，水位分布，流体流动速度与方向，地下水含氧量、浊度、氧化还原电位、电导率和 pH，气液/油水分离器中液位等，分离气体相对湿度和抽提气体中挥发性有机物（VOC）浓度等内容。

10.1.3 多相抽提系统运行阶段，工艺参数监控应包括土壤真空/压力分布，水位分布，流体流动速度与方向，地下水含氧量、浊度、氧化还原电位、电导率和 pH，气液/油水分离器中液位等，分离气体相对湿度，包气带污染物浓度，抽提土壤气中 VOC 浓度，NAPL 厚度和能耗、水耗等内容。

10.2 监测频次

10.2.1 启动阶段，监测频率应至少保持每天一次，同时应做好巡检工作，巡检内容应包括多相抽提设备、抽提井、管路系统的运行状况等。

10.2.2 修复高负荷运行阶段每周不少于 1 次；修复后期浓度趋于达标可调整每 2 周一次。

10.2.3 废水、废气处理过程中，每日应监测出口处污染物浓度。废气应采用活性炭罐吸附处理，挥发性有机物检测时，可在废气排放口采用火焰离子检测器（FID）或光离子检测器（PID）确定。水

位监测每周不应少于 1 次。

10.3 过程控制

10.3.1 对地下水目标污染物浓度、管道废气浓度、曝气压力、增溶注入压力、抽提流量、地下水溶解氧等常规水质参数进行实时监测。对系统参数进行优化调整，提高修复效率。

10.3.2 控制系统配有安全联动装置，在发生突发情况时，可以关闭抽提系统或注入系统。

10.3.3 施工所用的设备设施、管材、管道附件和主要原材料等进入施工现场时必须进行进场验收并妥善存放。

10.4 效果评估

10.4.1 经综合分析运行过程的定期检测结果后，若判断修复达到目标值，可开展修复效果评估。

10.4.2 修复效果评估应在系统拆除前开展，总体满足 HJ 25.5 的技术要求。

10.4.3 效果评估过程中，土壤采样点数量和布置位置需结合实际运行过程中污染物浓度和水质参数的监测结果确定，重点设置在污染物浓度较高区域等修复薄弱区。

附录 A

(资料性)

典型工程案例

典型工程案例见表 A.1。

表 A.1 多相抽提相关典型工程案例

原场地用途	主要污染物	污染深度/m	地下水污染物初始质量浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	主要地层结构	土层渗透系数/ $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$	地下水埋深/m	抽提井尺寸	布井间距/m	抽提井影响半径/m	井头真空度/MPa	单井抽提量/ m^3/h	修复目标值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
制漆厂	苯污染	5.5	3983~4655	素填土、粉质粘土、粉质粘土	/	0.85~4.62	井深 6m 内径 57mm		2~3	-0.03	水： 0.10~0.15 气： 1~1.5	985
工业仓库	氯代烃、二甲苯等	2~6	二氯乙烯： 4.7×104 四氯乙烯： 1.2×105 二甲苯： 112.1	素填土、粉质黏土	/	0.9~1.0	井深 4m 井口直径 80mm 外管径 50mm 抽提管长 3.5m，直径 20mm	2~3	1.5	-0.03/-0.06	水： 0.3/0.5 气： 10/25	二氯乙烯：20 四氯乙烯：40 二甲苯：70
电子机械	总石油烃、多环	0.5~4	总石油烃： 130386；苯	粉质粘土、砂	粉质粘土： 0.015	0.8~1.2	井深 4m 外径 40mm	3	1.5	-0.02	水：0.3 气：14	总石油烃：2110 苯并(a)芘：5

原场地用途	主要污染物	污染深度/m	地下水污染物初始质量浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	主要地层结构	土层渗透系数/ $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$	地下水埋深/m	抽提井尺寸	布井间距/m	抽提井影响半径/m	井头真空度/MPa	单井抽提量/ m^3/h	修复目标值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
厂	芳烃及苯系物；有明显的LNAPL		并(a)苊：22；苯并(a)蒽：248；乙苯：459；1，2，4-三甲苯：816	质粉土	砂质粉土：0.15		抽提滴管长2.5m，直径25mm					苯并(a)蒽：2 乙苯：43 1，2，4-三甲苯：51
化工企业	氯苯、二氯苯等	6	氯苯：62100 1,2-二氯苯：23900 1,4-二氯苯：15000	杂填土、粉质黏土、淤泥质黏土、黏土层	杂填土：0.5 粉质黏土：0.04 淤泥质粉质黏土：0.036 淤泥质黏土：0.02 黏土层：0.001	0.66~2.03	井深 6m 井口直径 80mm 外管径 50mm 抽提滴管长 5m，直径 20mm	1.5	0.75	-0.05	水:0.4 气：15	氯苯：834 1,2-二氯苯：3751 1,4-二氯苯：713
漆厂、树脂厂	苯系物、石油烃	0.5~6	/	杂填土、粉质砂土层、粉质黏土层	粉质黏土层： 2.88×10^{-4} 粉质砂土层：0.034	0.55~1.10	井深 6m 抽提滴管外径 25mm	2.5	1.5	-0.02~-0.03	2	苯：30；甲苯 3.56×10^4 ；乙苯：150 二甲苯：802；联(二)苯:60；二苯醚: 7.78×10^3 TPH: 4.29×10^3

备注：“/”表示部分案例原始资料缺失

附录 B

(资料性)

抽提/曝气/注入成井记录单

抽提/曝气/注入成井记录单见表 B.1。

表 B.2 抽提/曝气/注入成井记录单

项目名称					
钻机类型		井管直径 (mm)		井管材料	
井管总长 (m)		孔口距地面高度 (m)		滤水管类型	割缝
滤水管长度 (m)		建孔日期	自年月日开始 至年月日结束		
沉淀管长度 (m)					
实管数量 (根)					
砾料起始深度	m				
砾料终止深度	m				
砾料 (填充物) 规格					
止水起始深度 (m)		止水厚度 (m)			
止水材料说明	颗粒膨润土				
井结构示意图		钻探负责人			
		技术负责人			
		日期	年月日		

附录 C

(资料性)

增溶曝气强化多相抽提系统构造

增溶曝气强化多相抽提系统构造见图 C.1。

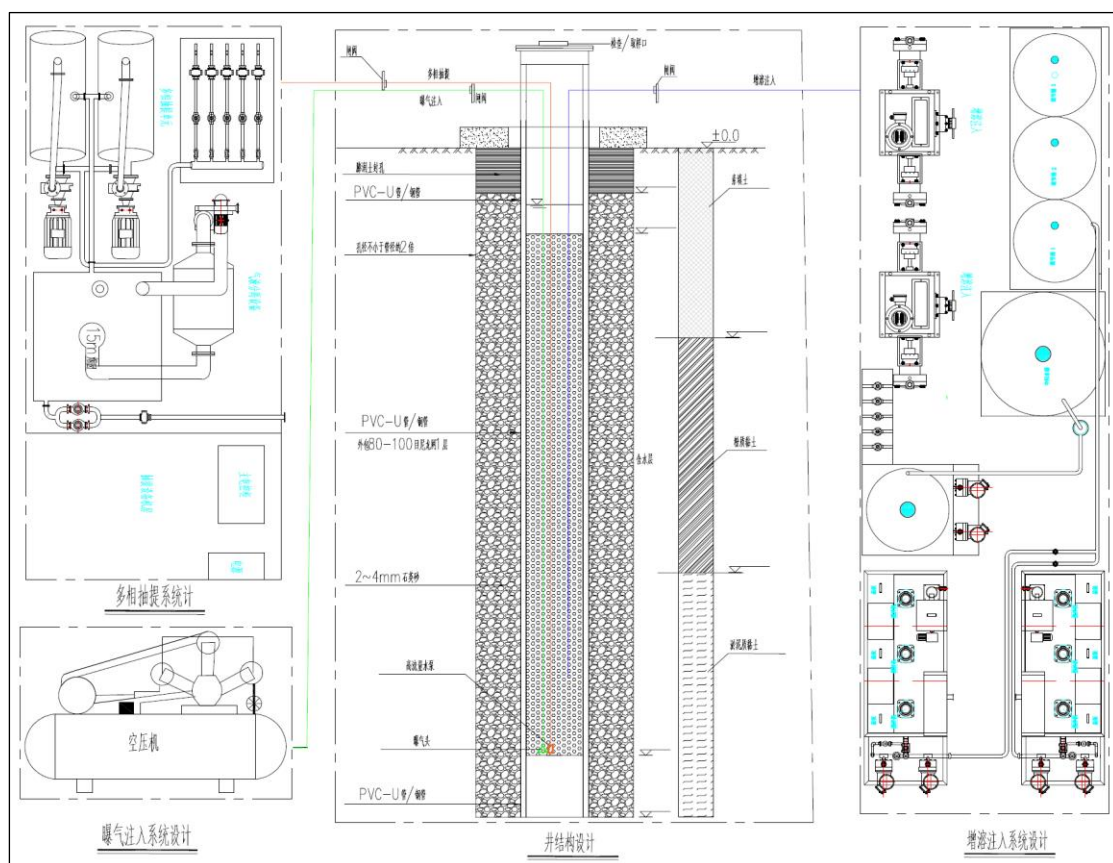


图 C.1 增溶曝气强化多相抽提系统构造

附录 D

(资料性)

抽提、注入/曝气井设计

抽提、注入/曝气井设计见图 D.1。

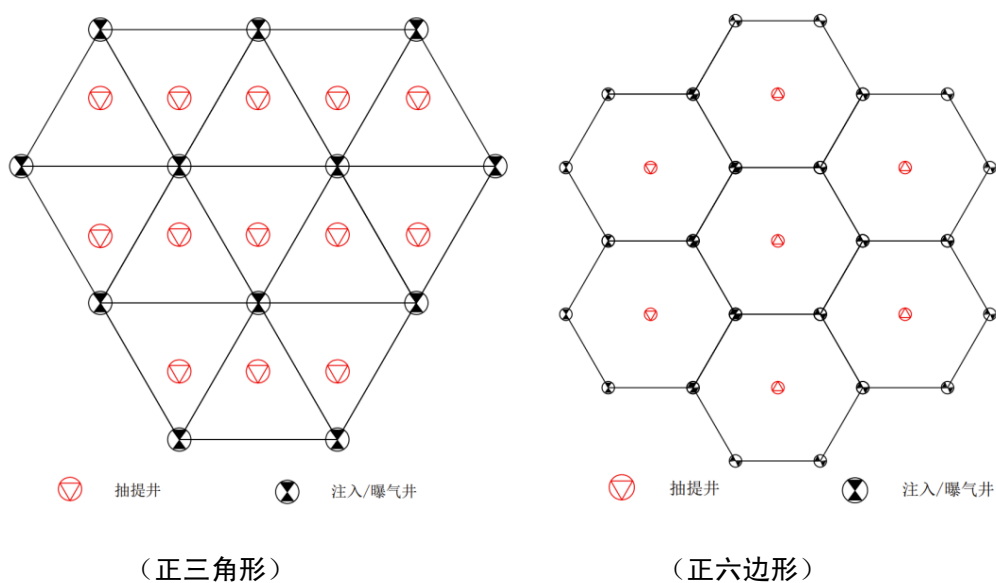


图 D.1 抽提、注入/曝气井设计

附录 E

(资料性)

多相抽提系统工程调试方法

本附录给出曝气管路、增溶注入管路、抽提管路试压及系统调试的推荐实施步骤，工程实施可结合设备型号、场地条件采用等效调试方案。

E.1 曝气管路系统试压

曝气管路系统试压试验参数为 0.2MPa，保压 30min，具体实施规程如下：

- (1) 关闭所有曝气井支路阀门，打开空压机总阀，缓慢启动空压机，向气路系统升压。
- (2) 压力升至 0.2MPa 后，关停空压机，开始计时保压。
- (3) 巡检人员逐段检查管路接头、阀门、罐体接口，采用肥皂水涂抹法检漏：涂抹肥皂水后，无气泡产生即为合格；出现气泡即为泄漏点，做好标记。
- (4) 保压 30min 后，观察总压力表：压降 $\leq 5\%$ 为试压合格。
- (5) 出现泄漏处理：泄压后紧固接头、更换垫片/生料带，修复完成后重新试压，直至合格。
- (6) 气路试压全部合格后，缓慢打开各支路阀门，释放管路压力，气路试压结束。

E.2 增溶注入管路系统试压

增溶注入管路系统试压试验参数为 0.3MPa，保压 30min，具体实施规程如下：

- (1) 关闭注入井所有出口阀门，打开清水进水阀，向药剂管路、加药管路缓慢注水，排尽管路内部空气。
- (2) 管路充满水后，继续升压至 0.3MPa，关闭进水阀，开始保压计时。
- (3) 巡检人员检查所有管路、阀门、泵体、罐体接口，目视观察无渗水、滴水、流水为合格。
- (4) 保压 30min，压力无明显下降、无渗漏点，水压试验合格。

(5) 渗漏处理：泄压后更换密封件、重新粘接/丝扣连接，修复后二次试压。

(6) 试压合格后，排尽管路内试压清水，药剂管路做好清洁。

E.3 增溶注入管路系统试压

多相抽提系统依靠负压运行，微小漏气都会导致负压不足、抽提失效，必须严格试压，具体实施规程如下：

(1) 关闭所有抽提井支路阀门、系统对外阀门，保证整套抽提管路、罐体、井口形成密闭整体。

(2) 点动启动真空泵，缓慢抽取系统内部空气，逐步提升负压至-60kPa。

(3) 达到设定负压后，立即关停真空泵，关闭真空泵前后阀门，系统独立保压，开始计时。

(4) 巡检人员逐段检查：井口密封、法兰、管路接头、阀门、罐体、仪表接口，听异响、观察负压变化。

(5) 合格标准：30min 内，系统负压回升 $\leq 10\text{kPa}$ ，无明显漏气声响，气密性合格。

E.4 系统调试

E.4.1 曝气系统调试

(1) 点动开机：观察电机转向是否与标识一致，转向错误立即断电调换相序。

(2) 空载运行 5min：检查机身震动、噪音、温度，无异响、无异常发热为正常。

(3) 带负荷调试：逐步打开支路阀门，调节调压阀，依次调整单路流量、压力，记录设备运行参数。

(4) 测试自动排污功能：储气罐排污阀自动排水功能正常。

(5) 停机测试：正常停机、紧急停机按钮动作可靠。

E.4.2 增溶注入系统调试

- (1) 清水替代药剂，加入药剂罐，进行清水试打。
- (2) 启动加药泵，调节泵体冲程、频率，改变输出流量，核对流量计显示与泵体输出是否一致。
- (3) 检查单向阀动作：管路不倒流、泵体空转不吸液等故障及时处理。
- (4) 连续运行 30min，泵体无渗漏、压力稳定、流量可调，调试合格。

E.4.3 多相抽提系统调试

- (1) 点动启动，确认电机转向正确，水环式真空泵保证补水正常。
- (2) 逐步开启支路阀门，模拟不同井组开启状态，负压平稳变化，无剧烈波动。
- (3) 连续空载运行 1h，泵体温度、震动、噪音正常，润滑系统正常。
- (4) 气液分离罐、油水分离罐：通入气流、水流，观察分层效果、液位变化，超高液位报警功能正常。
- (5) 活性炭吸附装置：通气后检查气密性，压差表显示正常，无短路、漏气。
- (6) 废水处理单元：进水、出水、搅拌、加药全部动作正常。

E.4.4 单井接入带载调试（逐井试运行）

- (1) 完成分项调试后，逐口接入抽提井、曝气井、注入井，禁止一次性全开所有井组。
- (2) 单井接入后，开启对应支路阀门，小负荷运行 30min，观察井内出水、出气状态，管路无震动、无大量出砂。
- (3) 单井运行正常后，再接入下一口井，依次类推，逐步增加运行井数量。
- (4) 全程记录每一口井接入后的系统负压、压力、流量变化。