

# 中华人民共和国国家生态环境标准

HJ 1165—2021

---

## 污染土壤修复工程技术规范 原位热脱附

**Technical specifications for contaminated soil remediation**

**in-situ thermal desorption**

本电子版为正式标准文本，由生态环境部环境标准研究所审校排版。

2021-04-30 发布

2021-04-30 实施

---

生态环境部 发布

## 目 次

前 言 .....	ii
1 适用范围 .....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义 .....	2
4 污染物与污染负荷.....	3
5 总体要求 .....	3
6 工艺设计 .....	4
7 主要工艺设备和材料.....	10
8 检测与过程控制.....	11
9 主要辅助工程.....	12
10 劳动安全与职业卫生.....	12
11 施工与调试.....	13
12 运行与维护 .....	13
附录 A（资料性附录） 不同加热方式的适用条件.....	16

## 前 言

为贯彻《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国土壤污染防治法》《中华人民共和国大气污染防治法》《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》等法律法规，防治环境污染，改善生态环境质量，规范污染土壤原位热脱附修复工程建设和运行，制定本标准。

本标准规定了污染土壤原位热脱附修复工程的设计、施工、调试和运行维护的技术要求。

本标准附录 A 为资料性附录。

本标准为首次发布。

本标准由生态环境部科技与财务司、法规与标准司组织制订。

本标准主要起草单位：生态环境部南京环境科学研究所、江苏大地益源环境修复有限公司、北京建工环境修复股份有限公司、北京高能时代环境技术股份有限公司。

本标准生态环境部 2021 年 4 月 30 日批准。

本标准自 2021 年 4 月 30 日起实施。

本标准由生态环境部解释。

# 污染土壤修复工程技术规范 原位热脱附

## 1 适用范围

本标准规定了污染土壤原位热脱附修复工程的污染物与污染负荷、总体要求、工艺设计、主要工艺设备和材料、检测与过程控制、主要辅助工程、劳动安全与职业卫生、施工与调试、运行与维护等。

本标准适用于污染土壤原位热脱附修复工程的建设与运行管理，可作为工程设计、施工、运行及维护的技术依据。

## 2 规范性引用文件

本标准引用了下列文件或其中的条款。凡是注明日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本标准。凡是未注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本标准。

GB 3096	声环境质量标准
GB 3836.1	爆炸性环境 第1部分：设备 通用要求
GB 3836.15	爆炸性环境 第15部分：电气装置的设计、选型和安装
GB 3838	地表水环境质量标准
GB 8978	污水综合排放标准
GB 9078	工业炉窑大气污染物排放标准
GB 12348	工业企业厂界环境噪声排放标准
GB/T 12917	油污水分离装置
GB 13271	锅炉大气污染物排放标准
GB 14554	恶臭污染物排放标准
GB/T 14848	地下水质量标准
GB 16297	大气污染物综合排放标准
GB/T 20801	压力管道规范 工业管道
GB/T 31962	污水排入城镇下水道水质标准
GB 37822	挥发性有机物无组织排放控制标准
GB 50016	建筑设计防火规范
GB 50058	爆炸危险环境电力装置设计规范
GB 50087	工业企业噪声控制设计规范
GB 50140	建筑灭火器配置设计规范
GB 50187	工业企业总平面设计规范
GB 50268	给水排水管道工程施工及验收规范
GB 50273	锅炉安装工程施工及验收规范
GB 50275	风机、压缩机、泵安装工程施工及验收规范
GB 50727	工业设备及管道防腐蚀工程施工质量验收规范
HJ 25.2	建设用土壤污染风险管控和修复监测技术导则
HJ 25.4	建设用土壤修复技术导则
HJ 25.5	污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则
HJ 25.6	污染地块地下水修复和风险管控技术导则
HJ/T 389	环境保护产品技术要求 工业有机废气催化净化装置

## HJ 1165—2021

HJ 580	含油污水处理工程技术规范
HJ 1095	芬顿氧化法废水处理工程技术规范
HJ 2000	大气污染防治工程技术导则
HJ 2006	污水混凝与絮凝处理工程技术规范
HJ 2007	污水气浮处理工程技术规范
HJ 2015	水污染防治工程技术导则
HJ 2026	吸附法工业有机废气治理工程技术规范
HJ 2027	催化燃烧法工业有机废气治理工程技术规范
CJJ 33	城镇燃气输配工程施工及验收规范

### 3 术语和定义

下列术语适用于本标准。

#### 3.1

##### 原位热脱附 in-situ thermal desorption

向地下输入热能，加热土壤、地下水，改变目标污染物的饱和蒸气压及溶解度，促进污染物挥发或溶解，并通过土壤气相抽提或多相抽提实现对目标污染物去除的处理过程，包括热传导加热、电阻加热及蒸汽强化抽提等。

#### 3.2

##### 热传导加热 thermal conductive heating

热量通过传导的方式由热源传递到污染区域从而加热土壤和地下水的处理过程。可以通过电能直接加热的方式对加热井进行加热，也可以通过燃气等能源产生的高温热烟气等介质对加热井进行加热。

#### 3.3

##### 电阻加热 electrical resistance heating

将电流通过污染区域，通过电流的热效应加热土壤和地下水的处理过程。也称为电流加热。

#### 3.4

##### 蒸汽强化抽提 steam enhanced extraction

通过将高温水蒸气注入污染区域，加热土壤、地下水，从而强化目标污染物抽提效果的处理过程。

#### 3.5

##### 爆炸极限 explosive limit

又称爆炸浓度极限。可燃气体或蒸汽与空气混合后能产生爆炸的浓度范围。

#### 3.6

##### 爆炸极限下限 lower explosive limit

爆炸极限的最低浓度值。

#### 3.7

##### 土壤气相抽提 soil vapor extraction

通过专门的地下抽提（井）系统，利用真空或注入空气产生的压力迫使非饱和区土壤中的气体发生流动，从而将其中的挥发性有机污染物和半挥发性有机污染物脱除，达到清洁土壤的目的。

#### 3.8

##### 多相抽提 multiple phase extraction

通过真空提取手段，抽取地下污染区域的土壤气体、地下水和油层到地面进行相分离及处理，以控制土壤和地下水中有机的污染的技术。

## 4 污染物与污染负荷

4.1 原位热脱附技术可用于污染土壤和地下水中苯系物、石油烃、卤代烃、多氯联苯、二噁英等挥发性有机污染物和半挥发性有机污染物的治理。

4.2 原位热脱附工程实施前，应按照国家相关标准规范对目标污染地块进行全面深入的调查。根据工程设计需要，收集相关资料，主要包括：

- a) 地块污染特征，包括污染物及浓度分布、污染深度、范围等，重点关注易挥发、恶臭类污染物；
- b) 地块地质和水文地质条件，包括：地层结构、土壤渗透性、导热导电特性、地下水位、流向等；
- c) 区域气象气候条件，包括气温、降水量、主导风向等；
- d) 地下构筑物或埋藏物分布；
- e) 地块用途（现状及规划）；
- f) 周边敏感点及分布，包括居民点、地表水源地及地下水源地等；
- g) 能源供应条件，包括燃气、电力、蒸汽供应等。

4.3 热传导加热技术的加热温度通常在水的沸点以上。当地下水流速较大（大于  $10^{-4}$  m/s），影响到修复区域加热时，应考虑地下水阻隔。具体技术适用性要求参见附录 A。

4.4 电阻加热技术的加热温度通常在水的沸点以下。为保证加热区域良好的导电条件，土壤的含水率宜保持在 20% 以上。具体技术适用性要求参见附录 A。

4.5 蒸汽强化抽提技术的加热温度通常不超过 170℃。为保证蒸汽传输和加热效果，土壤的渗透系数宜在  $10^{-4}$  cm/s 以上。具体技术适用性要求参见附录 A。

4.6 修复过程中的二次污染主要包括：

a) 废气：包括原位热脱附的抽提蒸汽、燃料燃烧产生的废气及无组织排放的废气等。废气污染物主要包括原位热脱附修复涉及的目标污染物、颗粒物、非甲烷总烃等。

b) 废水：包括蒸汽冷凝水、抽出的污染地下水、建井施工过程产生的废水、井点降水、清洗废水等。废水的污染物主要包括原位热脱附修复涉及的目标污染物及中间产物等。

c) 固体废物：包括生活垃圾、包装材料、安装废料、建井施工过程的泥浆，以及废水处理产生的污泥及冷凝废油/废液、废活性炭等。

## 5 总体要求

### 5.1 一般规定

5.1.1 原位热脱附修复工程需遵循绿色修复的理念，避免能源和资源浪费。

5.1.2 原位热脱附修复工程应符合环境影响评价文件及审批意见的要求，其防治污染设施应与主体工程同时设计、同时施工、同时运行。

5.1.3 原位热脱附处理后的土壤和地下水中目标污染物含量需满足修复目标值的要求。

5.1.4 原位热脱附修复工程应因地制宜、科学合理，具备针对性和有效性。修复工艺设计应本着成熟可靠、技术先进、经济适用的原则，并考虑节能、安全、操作简便。修复工程应与修复工艺水平相适应。

5.1.5 应对原位热脱附修复工程施工和运行过程中所产生的废气、废水、固体废物及其他污染物进行治理，并达到 GB 9078、GB 13271、GB 14554、GB 16297、GB 37822、GB 8978、GB 12348 等国家、地方和相关行业排放标准要求。

## 5.2 工程构成

5.2.1 原位热脱附修复工程由主体工程、辅助工程和配套设施组成。

5.2.2 主体工程包括：加热单元、抽提单元、废水废气处理单元、监测单元及控制单元等。加热单元主要为地下加热井；抽提单元包括地下抽提和地面抽提单元；废水废气处理单元包括冷凝、气液分离、废水处理和废气处理等单元；监测单元包括温度、压力等运行参数的监测；控制单元包括温度、压力、流量、液位等运行参数的控制。

5.2.3 辅助工程包括：供能单元、阻隔、给排水和消防等。

5.2.4 配套设施包括：办公室、值班室、厂区围挡、道路等。

## 5.3 总图布置

5.3.1 场址选择与总图布置应参照 GB 50187 的规定执行。

5.3.2 宜结合工艺特点和地块现状对办公区、加热区、设备控制区、能源供应区、材料加工区、废水废气处理区和危废暂存区等进行分区布置。

5.3.3 施工平面布置应遵从降低环境影响、方便施工及运行维护等原则，并按照消防要求留出消防通道和安全保护距离。

5.3.4 应综合考虑周边主要敏感点的分布，废气、废水处理设备宜布置在主要敏感点区域主导下风向处或远离主要敏感点区域，以减少有害气体等对人群或环境的影响。

5.3.5 修复区域周边需设置围护和警示标志，禁止无关人员进入。

## 6 工艺设计

### 6.1 一般规定

6.1.1 原位热脱附修复工程针对污染土壤和地下水进行治理，总体设计应满足 HJ 25.4、HJ 25.5、HJ 25.6 的规定。

6.1.2 工程设计前，应对地下构筑物或埋藏物进行彻底排查，排除安全隐患。

6.1.3 应根据地块污染特征、地质及水文地质条件、修复目标、修复周期、周边环境敏感点、能源供给条件等，并结合调研、小试、中试结果，确定原位热脱附系统的设计方案。

6.1.4 工艺设计方案主要包括加热单元、抽提单元、监测单元、控制单元、阻隔单元、废水废气处理单元等设计。其中加热单元设计包括加热模式、能源供应、加热/抽提井的布设、地下加热单元的构造及安装。

6.1.5 应开展原位热脱附中试试验确定加热/抽提井布设方案、系统运行参数等。

### 6.2 工艺流程

6.2.1 根据加热方式的不同，原位热脱附可采用热传导加热、电阻加热以及蒸汽强化抽提等单一或几种技术联用。

6.2.2 原位热脱附的工艺流程为：在污染区域范围内设置加热井或电极井，对目标污染区域的土壤及地下水进行加热，促进污染物挥发或溶解，利用真空抽提井对气相/液相的污染物进行抽提，通过冷凝分离，再对提取出的气体和液体分别进行无害化处理，最后达标排放。具体工艺流程见图 1。

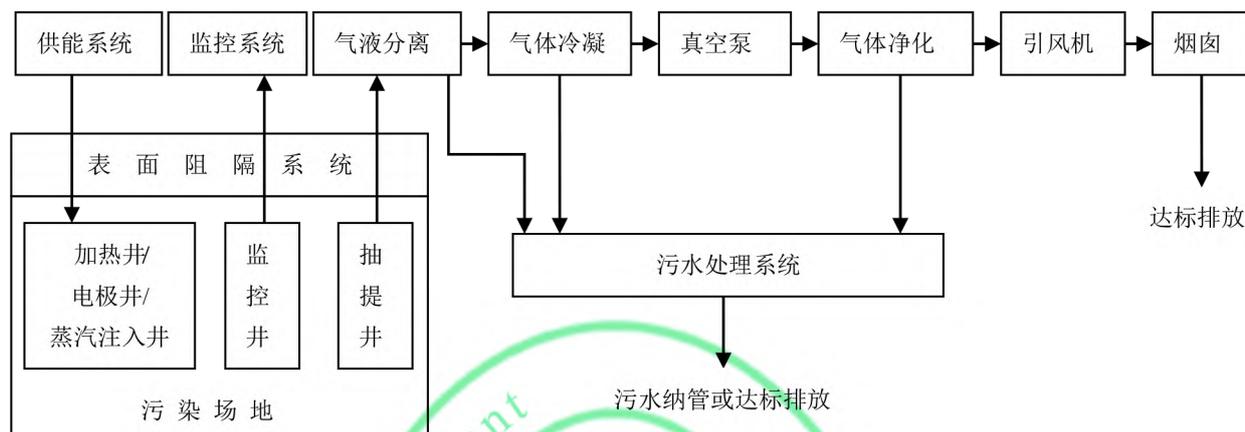


图1 原位热脱附技术工艺流程图

### 6.3 工艺设计要求

#### 6.3.1 加热模式

6.3.1.1 应根据地块污染特征、修复时间和修复成本要求，确定原位热脱附修复工程的加热模式，具体包括：加热方式；加热目标温度；升温、控温、降温等不同工艺阶段的温度控制等。

6.3.1.2 原位热脱附修复工程加热模式的选取同时受地块地质和水文地质条件、能源匹配条件等因素的影响。

#### 6.3.2 供热能源

6.3.2.1 供热能源的选择根据现场及周边能源供应条件确定。选用的能源需满足国家及地方相关规定，能源需求量应通过能量平衡计算确定。

6.3.2.2 电加热可选用工频交流电。

6.3.2.3 燃气燃油加热通常可选用管道天然气、压缩天然气、液化天然气、液化石油气、丙烷、柴油等。

6.3.2.4 蒸汽强化抽提采用高温蒸汽。地块周边存在满足项目要求的蒸汽源时宜优先选用。现场自行生产一般采用蒸汽锅炉，参照 GB 50273 等标准的要求，锅炉污染物排放应满足 GB 13271 要求。

#### 6.3.3 加热井/抽提井/监测井的布设

6.3.3.1 应根据地块污染特征、地质及水文地质条件、修复目标、修复周期等确定加热井与抽提井的数量及位置。

6.3.3.2 热传导的加热井间距一般为 2~6 m，电阻加热的电极井间距一般为 4~6 m，蒸汽注入井间距一般为 6~15 m。具体的井间距需根据地块实际进行调整。加热井的最大深度以污染最深的介质深度为准，一般为最深深度向下延伸 1~3 m。

6.3.3.3 应根据地块污染特征布置加热井，一般采用正六边形或正三角形布局。

6.3.3.4 抽提井可与加热井设置在同一点位或靠近加热井的位置设置，也可设置在以加热井为顶点构成的正六边形或正三角形的中心位置。

6.3.3.5 加热井和抽提井的数量比例宜在 4:1~1:1 之间。加热井和抽提井的布设示例见图 2、图 3。

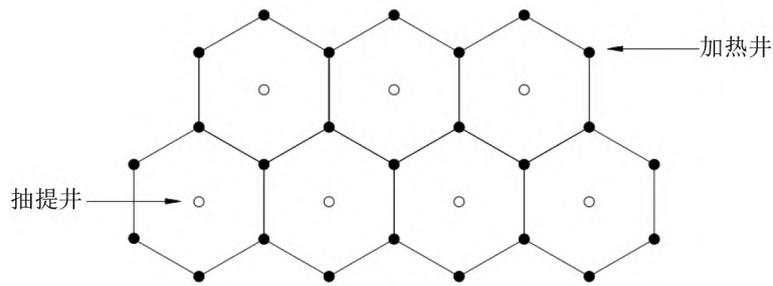


图2 正六边形加热井/抽提井布设示例

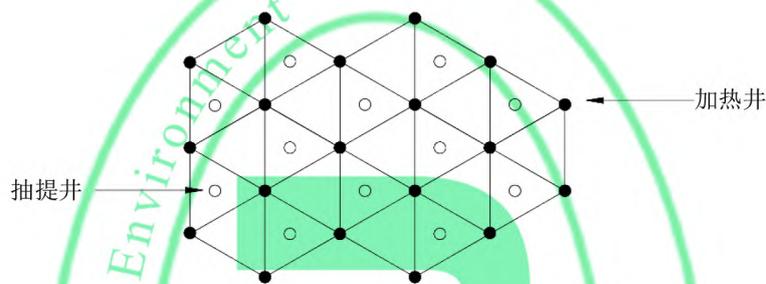


图3 正三角形加热井/抽提井布设示例

6.3.3.6 有效加热及抽提范围应在水平及垂直方向上完全覆盖目标修复区块边界，并适度扩展，以确保达到修复效果。

6.3.3.7 地下温度监测点可安装在加热井内，也可安装在加热井之间。宜在加热井的远点、冷点位置设置温度监测点。纵向上监测点的设置间隔应保证每个点位上有3~10个监测点，数量应能满足修复地块的地下土层性质和类型的要求。

6.3.3.8 地下压力监测点可安装在加热井、抽提井的井口或井管内，也可安装在加热井和抽提井之间。宜在加热区域内高温高压点及低温低压点等位置设置压力监测点。

6.3.3.9 地下温度、压力监测点的安装位置及设置数量由监控目的、地块特征确定。

#### 6.3.4 地下加热单元的构造和安装

6.3.4.1 热传导加热的加热单元为加热井，由加热元件、密封套管、控制元件等组成。

6.3.4.2 燃气热传导加热的加热元件为燃烧器，由送气模块、点火模块、监测模块和电控模块等组成，结构示意图见图4。

6.3.4.3 电热传导加热的加热井由底部密封的金属套管及内置电加热元件共同组成，结构示意图见图5。

6.3.4.4 电阻加热的加热单元为电极井，由电极、电缆、填料和补水单元等组成，结构示意图见图6。

6.3.4.5 蒸汽强化抽提的加热单元为蒸汽注入井，为底部密封、开筛的不锈钢井管，结构示意图见图7。

6.3.4.6 加热井、电极井和蒸汽注入井的直径、厚度以及材料根据安装方法、深度、工作温度和地块污染特征确定。

6.3.4.7 加热井、电极井和蒸汽注入井可采用先成孔再置入的方式或直推置入的方式进行安装。钻进方式可采用螺旋钻进、冲击钻进、清水/泥浆回转钻进、直接贯入钻进成孔等。

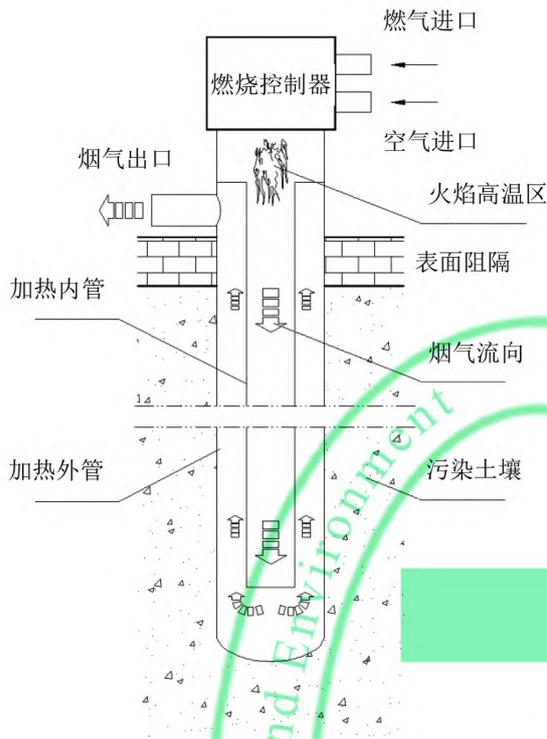


图4 燃气热传导加热井构造示意图

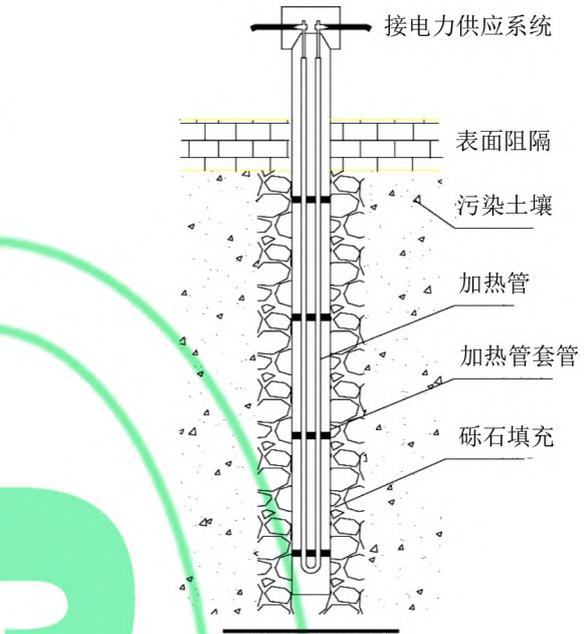


图5 电热传导加热井构造示意图

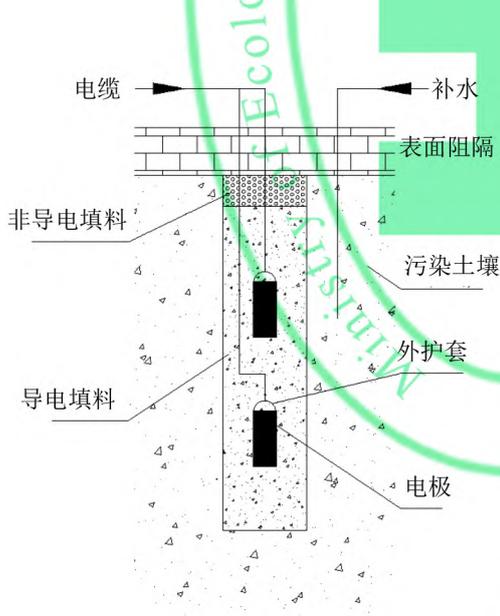


图6 电极井构造示意图

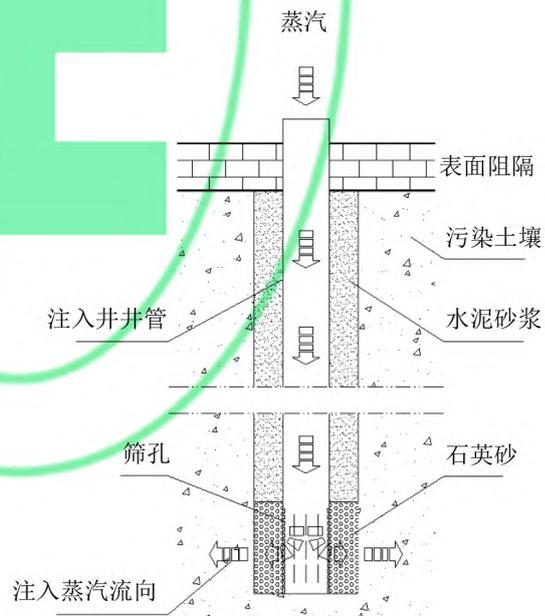


图7 蒸汽注入井构造示意图

### 6.3.5 抽提单元的构造和安装

6.3.5.1 抽提单元包括抽提井、管路、动力设备、仪器仪表等。抽提井包括垂直抽提井和水平抽提井。

6.3.5.2 垂直抽提井由井口保护装置、井管、滤网构成，结构示意图见图8。应根据污染深度设置井管筛孔的位置。井管可外包金属滤网，再填充滤料。对于包气带，抽提管以气相抽提为主；对于饱和带地

下水，抽提管以多相抽提为主。

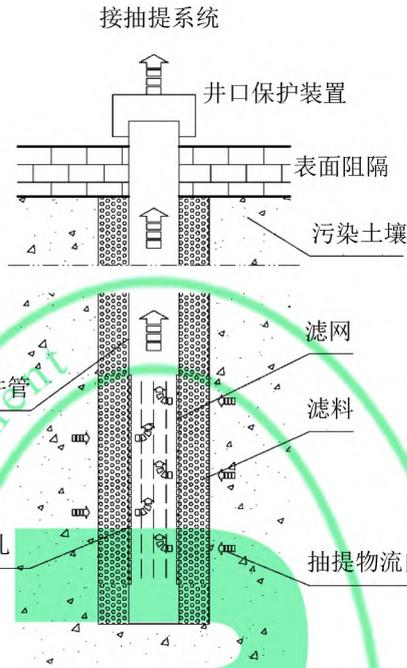


图 8 垂直抽提井结构示意图

6.3.5.3 水平抽提井由井口保护装置、井管、滤网构成，结构示意图见图 9。水平抽提井设置在包气带，通常在地表以下 0.5 m 以内。

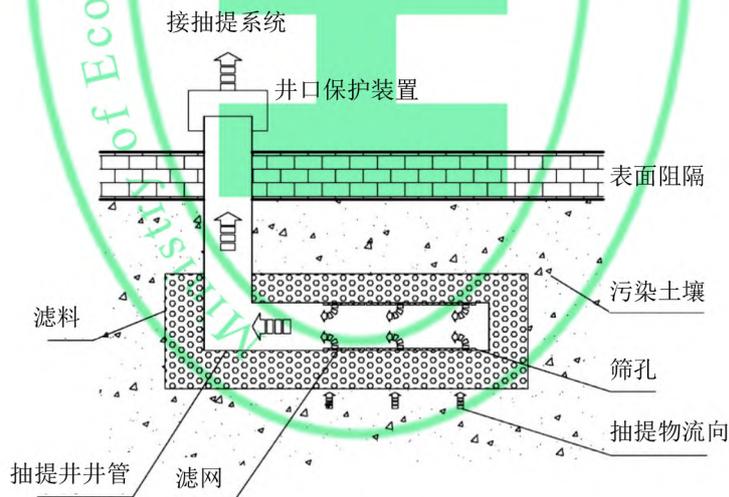


图 9 水平抽提井结构示意图

6.3.5.4 垂直抽提井的钻进方式可采用螺旋钻进、冲击钻进、清水/泥浆回转钻进、直接贯入钻进成孔等方法。水平抽提井的成井可采用人工开挖、机械开挖、水平定向等钻进方式。

6.3.5.5 抽提井井管采用耐高温、耐腐蚀的无污染材质（如碳钢镀锌或 304 不锈钢），井管之间连接可采用丝扣或焊接方式，不得使用造成二次污染的胶粘剂。井管可外包金属滤网，再填充滤料（如粗砂或石英砂）。井口地面应采取防渗措施。

6.3.5.6 应根据污染物的性质、修复面积及深度、土壤渗透性等，确定抽提所需的真空度及抽气速率

并选取合适的真空设备。蒸汽强化抽提系统中抽提速率一般应为注入速率的 1~3 倍，抽提真空负压系统应根据蒸汽注入速率来确定，一般为 20~60 kPa (0.2~0.6 atm)。

6.3.5.7 抽提泵及管道等的设计安装需满足 GB/T 20801。

6.3.5.8 抽提单元应采取保温措施，或提高流速、设置刮板、扰流片等，以防止污染物在管路中大量冷凝对抽提系统造成影响。

6.3.5.9 抽提单元应保证污染气体不外泄至大气环境造成二次污染，应采取的措施包括但不限于：

- a) 井口地面采取阻隔防渗措施；
- b) 进行负压设计以保障抽提单元运行过程中处于负压状态；
- c) 保证抽提单元的动力设备稳定运行；
- d) 抽提管道全密封。

### 6.3.6 地下水控制

6.3.6.1 当地下水入渗影响修复区域加热温度、修复效果时，应对修复区域进行地下水控制。

6.3.6.2 地下水控制可采用阻隔、降水等方法。

6.3.6.3 阻隔控制可在修复地块边界外布设止水帷幕等阻隔设施。降水方式可采用井点降水或井管降水等。两种方法可结合使用。抽出的污染地下水输送至污水处理站进行处理。

### 6.3.7 表面阻隔

6.3.7.1 水平表面阻隔层面积上应大于抽提处理区域，阻隔材料应具有良好的隔热及防渗性能。地表温度应不高于 60℃。一般从下至上依次为防渗层和混凝土层。混凝土层的厚度一般在 10~60 cm。

6.3.7.2 采用电阻加热时，应在防渗层和混凝土层之间设置等电位层。

### 6.3.8 废气处理单元

6.3.8.1 原位热脱附工程的废气处理单元主要对热脱附抽提蒸汽、废水吹脱处理等环节产生的有组织工艺废气进行处理。

6.3.8.2 废气处理工程设计及施工应符合 HJ 2000、HJ/T 389 等标准的相关规定。废气排放应符合 GB 37822、GB 16297、GB 9078、GB 14554 及相关行业和地方标准要求。

6.3.8.3 废气处理单元的处理能力需同时满足预期的最大废气产生量、最高污染物负荷和尾气排放限值要求。

6.3.8.4 通过抽提系统收集到地面的废气经过气体冷凝、气液分离等处理后，产生的尾气、冷凝水、非水相液体分别进行处置。

6.3.8.5 尾气处理可采用吸附法、燃烧法等。吸附法参照 HJ 2026。催化燃烧法参照 HJ 2027。

6.3.8.6 废气处理单元产生的非水相液体有回收利用价值时宜进行回收，或按照固体废物鉴别相关要求要求进行鉴别后处理。

6.3.8.7 废水集输、储存、处理设施敞开液面挥发性有机物逸散排放控制应符合 GB 37822 的规定。

### 6.3.9 废水处理单元

6.3.9.1 原位热脱附工程废水处理单元主要对抽出的污染地下水和抽提废水等进行集中处理。

6.3.9.2 废水处理设计施工按照 HJ 2015、GB 50268 等标准规范的规定执行。废水排放应符合 GB 8978、GB 3838、GB/T 14848、GB/T 31962 及相关行业和地方标准要求。

6.3.9.3 废水处理的技术工艺通常包括：油水分离、混凝、吹脱、高级氧化、活性炭吸附等。油水分离技术参照 GB/T 12917、HJ 580。混凝法参照 HJ 2006。吹脱法参照 HJ 2007。高级氧化法参照 HJ 1095。

6.3.9.4 废水处理单元产生的非水相液体有回收利用价值时宜进行回收，否则应按照固体废物鉴别相关要求要求进行鉴别后处理。废水处理产生的污泥应按照固体废物鉴别相关要求要求进行鉴别后处理。

## 6.4 固体废物处理处置

6.4.1 施工和运行过程中所产生的污染土壤等固体废物的处理应符合国家、地方和相关行业规定。

6.4.2 施工和运行过程中所收集的废弃活性炭等危险废物的处理应符合国家、地方和相关行业危险废物处理与处置的规定。

## 6.5 噪声控制

6.5.1 噪声控制应符合 GB 12348 和 GB/T 50087 的规定。

6.5.2 钻探、机房和处理设备的设计、安装、建设、运行应采取有效的隔声、消声等降低噪声的措施。噪声和振动控制的设计应符合 GB/T 50087 的规定；机房内、外的噪声应分别符合 GB 3096 的规定；厂界环境噪声排放应符合 GB 12348 的规定。

## 7 主要工艺设备和材料

### 7.1 一般要求

7.1.1 主要工艺设备的性能应满足本标准 6.3 的要求。

7.1.2 当治理具有腐蚀性污染物时，管道、风机、阀门等应满足相关防腐要求。

7.1.3 爆炸性气体环境使用的加热设备，使用单位根据危险场所分类正确选择防爆电气设备的防爆型式，应符合 GB 3836.1 及 GB 3836.15 的规定。

### 7.2 热传导加热技术主要工艺设备和材料

7.2.1 燃气热传导加热技术的主要工艺设备有燃烧器、助燃风机、抽提泵、气液分离器、温度、压力监测仪等。主要功能与性能应满足以下要求：

- a) 燃烧器应具有调节燃气量及熄火保护功能。
- b) 助燃风机的选择应满足以下条件：
  - 1) 助燃风机流量范围应能满足系统风量变化要求；
  - 2) 助燃风机的工作压力应能满足最不利点所需风压的要求；
  - 3) 所选助燃风机应能稳定保持在高效区内运行。
- c) 抽提泵的选型应根据其所输送介质的特性及抽提泵的用途来确定，并应满足下列条件：
  - 1) 抽提泵的工作压力应能满足最不利点所需真空度的要求；
  - 2) 所选抽提泵应能稳定保持在高效区内运行。
- d) 温度、压力监测设备需满足量程要求。

7.2.2 电热传导加热技术的主要工艺设备有配电柜、抽提泵、气液分离器、温度、压力监测仪等。主要材料有电加热棒、电缆、加热井填料、管材等。主要功能与性能应满足以下要求：

- a) 电加热棒需耐高温、耐腐蚀，宜选择不锈钢、耐腐蚀合金作为加热棒的材质；
- b) 配电柜等温控系统需具有恒温控制功能；
- c) 抽提泵、温度、压力监测设备的选型要求同 7.2.1。

7.2.3 地块存在腐蚀性污染物时，应选择不锈钢、耐腐蚀合金等作为加热井套管的材质。

### 7.3 电阻加热技术主要工艺设备和材料

7.3.1 电阻加热技术的主要工艺设备有配电柜、可调式控制电源、抽提泵、气液分离器、温度监测设备等。主要材料有电极、电缆、电极井填料、管材等。

7.3.2 电极宜采用具有良好导电性、耐腐蚀的金属/非金属材料。在电极和井壁之间宜设置导电填料增强电极井的导电性，可选用石墨和不锈钢球等。

7.3.3 根据水文地质条件设置补水单元，可考虑回用水作为补充水源。

7.3.4 抽提泵、测温、测压设备的选型要求同 7.2.1。

#### 7.4 蒸汽强化抽提技术主要工艺设备和材料

7.4.1 蒸汽强化抽提技术主要工艺设备包括蒸汽锅炉、蒸汽输送管道、蒸汽注入井、抽提泵、气液分离器、温度、压力监测仪等。

7.4.2 为防止蒸汽冷凝水堵塞管路，需在埋地最低点处设置疏水阀，自动排出凝结水、空气及其他不凝结气体，并阻止水蒸气泄漏。

7.4.3 换热器的主要作用是将抽提井抽出的气、液进行冷却，经过冷却设备后的气液温度应不高于 35℃。

7.4.4 锅炉给水泵应能自动进行给水、停泵，水位过高、过低时均能自动报警，锅炉自动停止运行。

7.4.5 抽提泵、温度、压力监测设备的选型要求同 7.2.1。

## 8 检测与过程控制

### 8.1 检测

8.1.1 原位热脱附应对以下系统参数或指标进行监控：

- a) 加热区地下温度、压力。
- b) 地上废气、废水抽提总管及部分抽提井口温度、压力、目标污染物浓度。
- c) 废水废气排放口污染物浓度。
- d) 燃气热传导的监控指标还应包括：
  - 1) 燃气/燃油流量。燃气/燃油流量应能满足该地块的能耗和加热目标需求；
  - 2) 管道压力。燃烧器进口处的管道压力至少大于 3.4 kPa；
  - 3) 燃烧器出气温度和一氧化碳含量。对两项指标进行实时在线监测，确保燃烧充分。
- e) 电加热热传导技术监控的指标还应包括加热棒温度、加热电流等。
- f) 电阻加热技术监控的指标还应包括加热电流、地层电阻率、加热区地表电压等。
- g) 蒸汽强化抽提技术监控的指标还应包括入口处的蒸汽温度、蒸汽压力、蒸汽流量等。

8.1.2 地下温度应连续监测。可通过热电偶、光纤分布式温度传感器以及电阻层析成像技术等方式获取。应对温度数据进行分析，适时对加热工况进行调整，确保加热效果符合设计要求。

8.1.3 在原位热脱附修复工程实施过程中，应对排放的废气进行日常监测。废气采用活性炭吸附等工艺处理时，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）进行检测，监测频次不低于每日 2 次。

8.1.4 应定期对尾气排放口开展有组织大气污染排放监测，对加热区内及周边、厂区边界开展无组织大气污染排放监测。监测指标包括目标污染物、颗粒物、非甲烷总烃等。监测频次不低于每月 1 次。

8.1.5 根据原位热脱附现场运行状况，可对修复区域及周边的土壤、地下水进行取样监测。采样、制样及送检过程中应采取措施防止污染物在高温作用下逸散，并防止人员烫伤。取样后应对表面的阻隔层进行恢复。监测指标包括目标污染物及可能产生的中间产物。取样检测应参考 HJ 25.2。

8.1.6 对修复区域的土壤进行热采样时，宜采用钻孔方式进行，可根据土层特征和钻探作业条件选择合适的钻探设备。钻探过程宜使用耐高温的钢制套管。取土管应立即置于预先准备好的冰浴槽中急冷降温，再进行取样和分样。

8.1.7 地下水进行热采样时，受热部分采样管应与置于冰浴槽内的不锈钢换热盘管连接，不锈钢换热盘管出口与出水管连接，从出水管出口直接采集水样。不锈钢换热盘管长度以出水温度不超过环境温度为宜。

## 8.2 过程控制

8.2.1 监测系统应实时监测地下土壤和地下水的温度并传输到控制系统。

8.2.2 控制系统对各系统参数如温度、压力、流量、液位等进行监测和数据处理，同时对生产设备工作状态进行画面监测和控制。

8.2.3 控制系统应配有安全联动装置，在发生突发情况时，可以关闭加热系统。

8.2.4 控制系统可采用中控室集中控制系统或分站就地控制系统。

## 9 主要辅助工程

9.1 电气系统设计应满足 GB 50058 的要求。

9.2 给水、排水设计应符合相关给水排水设计规范的有关规定。

9.3 防火间距、安全疏散的设计应符合 GB 50016 的规定。

9.4 应按照 GB 50140 的规定配置移动式灭火器。

## 10 劳动安全与职业卫生

10.1 污染土壤修复工程的设计、施工和运行应符合国家和地方的劳动生产安全与职业卫生法规和标准。

10.2 应制定火灾、爆炸、自然灾害等意外事件的应急预案；生产作业区应配备消防器材；厂区各明显位置应配有禁烟、防火和限速等标志。

10.3 产生有害气体、易燃气体和异味的场所应采取通风措施并设置报警装置。

10.4 电力控制装置应将电网电压调节至合适的电压等级再输送给加热电极。井场内的导电部件应连接并做等电位处理。变压器、配电盘、工艺设备及其它导电系统部件应按照相关要求连接并接地。

10.5 采用电阻加热的修复区域，跨步电压应小于 15V。可利用电流、电压三极法测量接地电阻的试验线路和电源来进行跨步电压的测试。

10.6 在修复系统设计阶段，应考虑不利运行工况下，易爆气体在系统中的局部积累，充分设置抽提系统的负荷余量，使加热区及系统内部的污染物蒸气浓度低于爆炸极限下限，并设置相应的爆炸监测预警及应急装置。

10.7 蒸汽注入井的蒸汽输送管道、输送泵的设计安装需满足 GB/T 20801。

10.8 工程的受压容器应按压力管道设计的有关规定进行设计和检验，高温设备和管道应设置保温绝热层。地面管道、装置外表面温度宜不高于 60℃，同时在现场高温区域设置警示标志。项目现场应设置明显标志，严禁明火。

10.9 应选用噪声小的设备。对于噪声较大的设备，应采用减震消音措施。

10.10 应对操作人员、技术人员及管理人员进行相关专业技术、安全防护、应急处理等理论知识和操作技能的培训。

10.11 岗位操作人员应配戴个人专用防护用品，防护用品应根据不同岗位合理配备。

10.12 所有从事生产作业的人员应定期体检并建立健康档案卡。应定期对职工进行职业卫生教育，加强防范意识。

## 11 施工与调试

### 11.1 施工

11.1.1 原位热脱附修复工程的施工应符合国家和行业相应专项工程施工规范、施工程序及管理文件的要求。

11.1.2 施工中采用的工程技术文件、承包合同文件对施工质量验收的要求不得低于国家相关专项工程规范的规定。

11.1.3 施工应按设计文件、施工图纸和设备安装使用说明书的规定进行，工程变更应取得设计单位确认并出具设计变更文件后再进行施工。

11.1.4 设备、材料、器件等应符合国家相关标准，需具备产品的合格证书、产品性能检测报告。主要材料应有进场复验报告。

11.1.5 施工除遵守相关的施工技术规范以外，还应遵守国家的质量、劳动安全及卫生、环境保护、消防等强制性标准。

11.1.6 需要采用防腐蚀材质的设备、设施和管件等的施工和验收应符合 GB 50727 的规定。

11.1.7 燃气管道的验收应符合 CJJ 33 的相关规定。风机、压缩机、泵安装工程施工及验收应符合 GB 50275 的相关规定。

11.1.8 在钻探建井过程中，应选择适宜的施工方式防止地下污染物的扩散和迁移。

### 11.2 调试

11.2.1 工程安装、施工完成后应首先对相关仪器仪表进行校验，后根据工艺流程进行分项调试和整体调试。

11.2.2 整体调试要求：各项系统运转正常，技术指标达到设计要求。

11.2.3 调试期间应对工程运行进行性能试验，主要包括以下内容：

- a) 污染区域加热效果；
- b) 抽提系统最大抽提量；
- c) 废水系统处理效率；
- d) 废气系统处理效率；
- e) 能源和药剂消耗；
- f) 运行稳定性。

## 12 运行与维护

### 12.1 一般规定

12.1.1 原位热脱附修复工程的运行、维护和安全管理工作除执行本标准外，还应符合国家现行有关标准的要求。

12.1.2 应在满足设计工况的条件下运行，并根据工艺要求，定期对设备、电气、仪器仪表及建（构）筑物进行检查维护，确保系统稳定可靠运行。

12.1.3 应建立健全与原位热脱附修复工程相关的各项规章制度，以及运行、维护和操作规程，建立主要设备运行状况的台账制度。

## 12.2 系统启动

12.2.1 原位热脱附修复工程运行应在系统通过整体调试、各环节运转正常、技术指标达到设计和合同要求后启动。

12.2.2 原位热脱附系统的启动顺序为废气处理单元—抽提单元—废水处理单元—供能单元—加热单元。

## 12.3 人员与运行管理

12.3.1 整个系统应设专人管理和运行，应对管理和运行人员进行定期培训，确保管理和运行人员熟练掌握正常运行的操作和应急情况的处理措施。

12.3.2 运行操作人员上岗前应进行的专业培训包括但不限于以下内容：

- a) 必要的工艺技术知识、安全知识；
- b) 启动前的检查和启动要求条件；
- c) 设备的正常运行维护，包括设备的启动和关闭；
- d) 控制、报警和指示系统的运行和检查，以及必要时的纠正操作；
- e) 最佳运行条件参数的调节；
- f) 设备运行故障的发现、检查和排除；
- g) 事故或紧急状态下人工操作和事故处理；
- h) 设备日常和定期维护；
- i) 设备运行及维护记录，以及其他事件的记录和报告；
- j) 常用有毒有害化学品运输、使用知识及防毒、防腐蚀、防火等安全知识和技能培训。

12.3.3 应建立修复系统运行状况、设施维护等的记录制度，主要记录包括但不限于以下内容：

- a) 系统的启动、停止时间；
- b) 材料进场质量分析数据、数量、时间；
- c) 系统运行工艺控制参数；
- d) 主要设备维修情况；
- e) 运行事故及处理、整改情况；
- f) 定期检验、评价及评估情况；
- g) 废水、废气排放处置情况。

## 12.4 维护

12.4.1 应制定修复工程设备的定期维护计划。

12.4.2 维护人员应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。重点维护对象包括加热组件、水平阻隔层、转动设备等。

12.4.3 维护人员应做好相关维护保养记录。

## 12.5 事故应急处理措施

12.5.1 制定原位热脱附修复工程事故应急预案，当出现紧急事故时，应立即采取相应措施进行处理，尽可能地降低事故影响，包括对主体工程运行安全、人员伤亡、财产损失和环境污染和破坏等。

12.5.2 原位热脱附修复工程事故应急措施内容至少应包括排放超标应急处理措施、事故停机应急处理措施、重要设备/系统故障应急处理措施、火灾事故应急处理措施、触电事故应急处理措施、突发停水/停电应急处理措施、人员伤亡应急救援措施、环境污染和破坏应急处理措施等。

12.5.3 事故处理时应做好记录、分析原因，防止同类事故重复发生。

## 12.6 系统停止

12.6.1 运行和维护人员可根据现场的数据，包括温度记录、土壤及地下水自检数据、抽提蒸汽的污染物含量记录等，判断系统的停止时间。

12.6.2 停机的顺序要求：加热单元—供能单元—抽提单元—废气处理单元—废水处理单元。

12.6.3 原位热脱附修复工程效果评估应按 HJ 25.5 等污染地块治理修复相关规范进行。

12.6.4 效果评估布点应结合地块污染分布、土壤性质、加热井设置、温度场分布等，在高浓度污染物聚集区、温度相对较低、距离加热井和抽提井远端等修复薄弱区域、修复范围边界处等位置增设采样点。

附 录 A  
(资料性附录)  
不同加热方式的适用条件

表 A.1 给出了不同加热方式的适用条件。

表 A.1 三种加热方式的适用性分析

加热方式	最高温度/℃	适合土质	适用条件	不适用条件
热传导加热	750~800	粉砂、粉土、壤土、黏土、基岩裂隙	(1) 适合于各种地层，特别是低渗透及均质性差的污染区域修复； (2) 适用于挥发性有机物、石油类等半挥发性有机物、农药、二噁英以及多氯联苯等； (3) 可以实现定深加热或不同深度分段加热	地下水流速较大的污染区域通常需要进行阻隔
电阻加热	100~120	粉砂、粉土、壤土、黏土	(1) 适合于各种地层的污染区域修复，特别是低渗透性污染区域的修复； (2) 适用于挥发性有机物、含氯有机物和石油类等半挥发性有机物	(1) 不适用于基岩和裂隙等地质状况； (2) 地下有绝缘体构筑物时，对修复效果影响较大； (3) 土壤含水率过低时，需要进行补水； (4) 地下水流速较大的污染区域通常需要进行阻隔
蒸汽强化抽提	170	沙砾、砂土、粉砂	(1) 适合于渗透性较好的地层； (2) 适合对挥发性有机物污染源区及污染物程度重的区域进行修复	(1) 不适用于渗透系数较小 ( $< 10^{-4}$ cm/s) 的区域； (2) 不适用于地层均质性差的污染区域； (3) 污染深度浅及污染范围大时，由于热量损失过大及蒸汽注入压力受限，限制应用； (4) 地下水流速较大的污染区域通常需要进行阻隔