



地下水污染防控与修复产业联盟团体标准

T/GIA 002—2017

原位化学氧化注入修复指南

Guide for in situ chemical oxidation

（征求意见稿）

2017- ×× - ××发布

2017- ×× - ××实施

地下水污染防控与修复产业联盟 发布

目 次

引 言	2
前 言	3
原位化学氧化注入修复指南.....	4
1 范围	4
2 规范性引用文件.....	4
3 术语和定义.....	5
4 场地准备.....	6
5 修复原理.....	10
6 系统构成.....	10
7 前期准备.....	11
8 技术要求.....	11
9 实施过程.....	23
10 二次污染防治.....	23
11 共用工程要求.....	24
12 职业卫生与劳动安全.....	29
13 工程概算.....	29
14 环境监理.....	32
15 验收与后期管理.....	34
16 典型参考案例.....	35
附录 A（资料性附录）流量计的选型	36
附录 B(资料性附录) 典型参考案例	43

引 言

土壤污染是全球三大环境要素（大气、水体和土壤）的污染问题之一，也是全世界普遍关注和研究的主要环境问题。在土壤污染日益严重的今天，寻找高效、经济的土壤修复技术已刻不容缓。土壤化学氧化修复技术是基于饮用水和废水的化学氧化处理方法上发展起来的。强氧化剂从 19 世纪 30 年代开始用在去除市政和工业废水中的有机污染物，同时也作为消毒剂使用。随后开始应用于原位和异位的土壤和地下水修复，近十年来取得了重大进展。

原位化学氧化注入修复主要是利用注入设备将氧化试剂引入地下，通过氧化反应将有害污染物转化为更稳定、活性较低和/或惰性的无害或毒性较低的化合物，从而有效降低土壤和地下水中的污染物的方法。

原位化学氧化注入修复技术所需的工程周期一般在几天至数月不等，具体因待处理污染区域的面积、氧化剂的性质、氧化剂的输送速率、修复目标值及地下含水层的特性等因素而定。

可能限制本技术适用性和有效性的因素包括：可能出现不完全氧化，或中间体形式的污染物，取决于污染物和所使用的氧化剂；可能出现氧化剂传输困难和传输不均匀等问题，取决于场地内的注入设备的结构、布置以及场地内的水文地质条件；土壤中存在腐殖酸、还原性金属等物质，会消耗大量氧化剂；在渗透性较差的区域(如粘土)，药剂传输速率可能较慢；化学氧化过程可能会发生产热、产气等不利影响；同时，土壤修复的化学氧化反应受 pH 值影响较大。

另外，由于注入点数量有限和水力传导系数分布的问题，通过水相注入系统控制氧化剂的用量非常困难。因此，需要对含水层的性质、地球化学变化的可逆性（如溶解作用、解吸作用、pH 值变化）、污染物的分布和通量进行详细的评价，以设计出有效的原位处理系统。

与其他修复法相比，原位化学氧化法不必开挖土地，不破坏地上结构，不用处理被挖出的受污染土壤。

本指南制定旨在为采用原位化学氧化注入修复技术的行业内从业者提供进行实际操作的技术指导。

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2009 给出的规则起草。

本文件由地下水污染防控与修复产业联盟提出及归口。

本文件起草单位：中国环境科学研究院、中国科学院生态环境研究中心、轻工业环境保护研究所、中国地质科学院水文地质环境地质研究所、上田环境修复股份有限公司

原位化学氧化注入修复指南

1 范围

本文件规定了原位化学氧化注入修复的术语和定义、场地准备、修复原理、系统构成、前期准备、技术要求、实施过程、二次污染防治、共用工程要求、职业卫生与劳动安全、工程概算、环境监理、验收与后期管理和典型参考案例。

本文件适用于原位化学氧化注入修复从业者进行实际操作的技术指导。

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 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 16297-1996 大气污染物综合排放标准

GB 50034-2013 建筑照明设计标准

GB 50052-2016 供配电系统设计规范

GB 50055-2011 通用用电设备配电设计规范

GB 50058-2014 爆炸危险环境电力装置设计规范

GB/T 50062-2008 电力装置的继电保护和自动装置设计规范

GBJ 65-1983 工业及民用电力装置的接地设计规范

GBZ 1-2010 工业企业设计卫生标准

GBZ 2.1-2007 工作场所有害因素职业接触限值 第1部分：化学有害因素

GBZ 2.2-2007 工作场所有害因素职业接触限值 第2部分：物理因素

HJ 25.2-2014 场地环境监测技术导则

HJ/T 91-2002 地表水和污水监测技术规范

HJ/T 55-2000 大气污染物无组织排放监测技术导则

HJ/T 164-2004 地下水环境监测技术规范

HJ/T 166-2004 土壤环境监测技术规范

HJ/T 373-2007 固定污染源监测质量保证与质量控制技术规范

HJ/T 397-2007 固定源废气监测技术规范

HJ 494-2009 水质采样技术指导

国经贸委安全[2000]189 号劳动防护用品配备标准

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 场地 site

某一地块范围内的土壤、地下水、地表水以及地块内所有构筑物、设施和生物的总和。

3.2 土壤 soil

指由矿物质、有机质、水、空气及生物有机体组成的地球陆地表面上能生长植物的疏松层。

3.3 地下水 groundwater

埋藏于地表以下的各种形式的重力水。

3.4 污染场地 contaminated site)

因堆积、储存、处理、处置或其他方式（如迁移）承载了有害物质的，对人体健康和环境产生危害或具有潜在风险的空间区域。包括土壤和地下水。

3.5 土壤污染 soil pollution

人类活动或自然过程产生的有害物质进入土壤，致使某种有害成分的含量明显高于土壤原有含量，从而对生物、水体、空气和人体健康产生危害的现象。

3.6 地下水污染 groundwater pollution

人为或自然原因导致地下水化学、物理、生物性质改变从而使水质恶化的现象。3.7

3.7 修复技术 remediation technology

可改变待处理污染物的结构，或减轻污染物毒性、迁移性或数量的单一或系列的化学、物理或生物治理措施。

3.8 场地修复目标 site remediation goal

由场地环境调查和风险评估确定的目标污染物对人体健康和生态受体不产生直接或潜在危害，或不具有环境风险的污染修复终点。

3.9 原位 In-Situ

在污染土壤或地下水的原地点。

3.10 化学氧化法 chemical oxidation

通过氧化剂通过失去电子对目标物进行氧化的方法。

4 场地准备

4.1 一般要求

场地准备主要包括场地平面布置、临时水电、进出场道路等基础设施建设和场地平整。

4.2 场地平面布置

4.2.1 场地平面布置应遵循的原则：

- 1) 平面布置要紧凑合理，尽量减少施工用地；
- 2) 尽量利用原有设施或构筑物；
- 3) 合理组织运输，保证现场运输道路畅通，尽量减少二次搬运；
- 4) 各项施工设施布置都要满足方便施工、安全防火、环境保护和劳动保护的要求；
- 5) 临时水电应就近铺设；
- 6) 在平面交通上，要尽量避免打井、安装以及其他各专业施工相互干扰；
- 7) 考虑施工场地状况及场地主要出入口交通状况；

- 8) 结合拟采用的施工方案及施工顺序;
- 9) 满足材料堆放及加工需要;
- 10) 实施严格的安全及施工标准, 争创安全文明工地。

4.2.2 场地平面主要布置

4.2.2.1 场地平面布置范围

原位化学氧化注入修复场地主要包括: 办公生活区、施工修复区、辅助修复区、材料堆放区等。

场地内应设置大门、围挡、临时道路、并进行临水临电的布置等。

在场地布置过程中, 根据业主提供的地下物现状图以及地质勘探报告所提供的地下物分布图, 进行场地布置方案的编制。

在必要时还应走访附近住户, 进一步全面了解地下物的分布情况, 对于已经掌握的穿越场地的市政管线、煤气、热力、电力、通讯、消防、人防通道和地下文物等, 应配合业主与政府主管部门取得联系, 探讨并确定解决问题的办法。

4.2.2.2 办公生活区

根据现场的实际条件以及污染土壤和地下水分布范围, 将办公生活区设置场区远离污染区域的上风向处, 尽量紧靠主要道路, 交通便利。

根据需要设置办公生活区, 办公区内可设置办公室和其他相关科室, 并设置卫生间等配套房间。生活区内可设置员工宿舍、食堂、浴室、卫生间等相关设施房间。

办公区和生活区用房材料可根据需要进行选择, 但需满足政府相关部门规定的安全、生活和卫生标准。

4.2.2.3 施工修复区

场地施工修复区根据场地土壤和地下水污染分布情况进行设置, 应预留机械设备停放区, 以方便药剂注入设备等相关设备的设置和停放管理

4.2.2.4 辅助修复区

若现场需要进行抽水或工艺改造, 可根据设计进行平面布置, 布置位置可紧邻施工修复,

以减少管线或材料的消耗。

4.2.2.5 材料堆放区

现场材料主要包括管路配件、水泥、氧化剂等。材料堆放区宜设于场地中部，其中氧化剂存储应满足《危险品库房管理规范》的要求。

4.3 临时水电建设

4.3.1 临时用水

4.3.1.1 在施工中，现场用水主要有三部分组成，一部分办公区用水，一部分为污染土壤或地下水修复的用水，一部分为消防用水和施工现场防止扬尘洒水用水。

4.3.1.2 根据现场规划，临时水管网的布置采用最短路原则，即依据总平面图及现场实际，在兼顾到办公区、修复处置区等各单元用水的前提下，尽量减少总环网管的长度。

4.3.1.3 在北方寒冷地区施工时，若修复实施过程需要在零下的温度下进行，临时供水管网设计应设置防止结冰措施。

4.3.1.4 水平管必须采取保暖防冻措施，加缠保温棉或埋地一定的深度（埋地深度根据当地政府公布的冰冻线深度确定）。

4.3.1.5 水平管安装时必须考虑放倒坡 0.3%~0.5%，以确保在注水间歇时可将水管中残余水排放干净，防止结冰。

4.3.2 临时用电

4.3.2.1 在施工中，现场用电主要包括办公生活区用电及修复区用电。临时用电必须遵循《施工现场临时用电安全技术规范》（JGJ46-2005）的规定。

4.3.2.2 3~10kV 的高压线采用环状，沿主干道布置；380/220V 低压线采用枝状布置。工地上通常采用架空布置，距路面或建筑物不小于 6m。

4.3.2.3 临电的参与作业人员，必须是受过国家专业机构培训并取得合格证的电气工作人员。

4.3.2.4 总配电室的负荷需根据总平面的布局和各支路用电负荷的大小和集中状况，通过计算确定。

4.3.2.5 总配电室至二级箱柜必须按照要求架空或埋地处理，要避免遭受物体打击、车辆碾压或介质腐蚀。

4.3.2.6 制定用电方案时，应预见性的考虑在各个用电区域的结点位置。

4.3.2.7 选择的电缆规格和电流大小要匹配，开关的容量和漏电动作电流要匹配。

4.3.2.8 需组织安全员及电工进行日常巡回检查，不定期抽查个漏电开关的动作灵敏性，遇有不规范用电行为要及时制止。

4.4 进场和出场道路

4.4.1 临时道路的建设

进出场临时道路的建设，可将临时道路分为两个等级，其中一级临时道路为小时交通量大于 80 辆/h 的道路，二级临时道路为小时交通量小于 80 辆/h 的道路。

4.4.2 路线设计

路线设计应根据其服务对象，正确选用道路等级，正确运用技术指标，保持线形连续、均衡，驾驶安全；尽量结合当地对交通的长远规划，利用既有道路。

4.4.3 路基路面

4.4.3.1 路基路面应根据道路功能、等级、交通量，结合地形、地质及路用材料等自然条件进行设计，保证其具有足够的强度、稳定性和耐久性。同时路面面层应满足平整和抗滑的要求。

4.4.3.2 路基设计应重视排水设施的设计。

4.4.3.3 路基断面形式应与沿线自然环境相协调，避免深挖、高填，尽量采用半挖、半填断面形式，填挖高度一般不超过 6m。

4.4.3.4 重视路床顶面以下 0~1.5m 的填料及压实度，确保其强度和稳定，以保证路面的稳定，减少其维护量。

4.4.3.5 深挖、高填段路基防护应进行特殊设计。

4.4.3.6 路面面层类型以砂石路面为主，对于场地及主干道车辆活动影响范围可采用水泥混凝土路面。个别情况可采用沥青混凝土、沥青碎石、沥青表面处治路面。

4.4.3.7 路面结构层所选材料应满足强度、稳定性和耐久性要求。同时路面垫层材料宜采用水稳性好的粗粒料或各种稳定类粒料。如果路基面为石质挖方或填石路堤，水稳性较好，可不设垫层。

4.5 场地平整

4.5.1 在场地布置完毕后，根据确定的施工场地的范围，需要根据需要对场地进行平整。

4.5.2 根据业主提供的地下物现状图以及地质勘探报告所提供的地下物分布图，进行场地平整方案的编制。

4.5.3 为了便于施工场地内有效进行排水，平整场地的表面坡度应符合设计要求，如果设计对此无具体要求，应将施工场地向排水沟方向做成不小于 2‰的坡度。

4.5.4 平整场地时要考虑注入系统或其他现场设施要求的深度和坚固度，要满足施工时钻机或相关注入设备对场地平整度和地基承载力的要求。

4.5.5 场地平整后场地表面需要逐点进行检查，检查时可以采用水准仪测量、汇集测量据进行计算的方法。检查点为每 100~400m²取 1 点，但整个施工场地不应少于 10 点；长度、宽度和边坡均为每 20m 取 1 点，每边不应少于 1 点。

4.5.6 在平整场地的过程中，需要布置好给水、排水、消防水、施工用电等设施 and 做到施工道路的畅通。

4.6 其他

在进行场地准备的过程中，同时要进进行大门、围挡、公司 CI 宣传的设置等，并满足场地安全文明施工的要求。

5 修复原理

通过注入设备向土壤或地下水的污染区域注入氧化剂，使得氧化剂在地下扩散，与土壤或地下水中的污染物接触，通过氧化作用，使土壤或地下水中的污染物转化为无毒或相对毒性较小的物质，从而有效降低土壤和地下水中的污染物的方法。

常见的氧化剂包括高锰酸盐、过氧化氢、芬顿试剂、过硫酸盐和臭氧等。

6 系统构成

6.1 系统构成

系统由药剂制备/储存系统、药剂注入井(孔)、药剂注入系统(注入井注入或直推)、监测系统等组成。

药剂注入系统包括：药剂储存罐、药剂注入泵、药剂混合设备、药剂流量计、压力表等。

6.2 实施过程

6.2.1 氧化药剂通过注入井或 Geoprobe 等直推注入设备注入到污染区，药剂类型、注入量、注入速率以及注入压力等相关参数通过相关资料、小试和中试实验获得。

6.2.2 注入点的分布、数量和深度根据污染区的大小、污染分布情况和污染程度进行设计，并通过数值模拟以及现场中试实验进行更新和确定。

6.2.3 在注入井（孔）的周边及污染区的外围还应设计监测井，对污染区的污染物及药剂的分布和运移进行修复过程中及修复后的效果监测。

6.2.4 可以通过设置抽水井或其他辅助工程，促进地下水循环以增强混合，有助于快速处理污染范围较大的区域。

7 前期准备

7.1 原位化学氧化技术的应用需要充分了解原位化学氧化反应和传质过程。应用该技术之前，需通过实验室研究确定药剂处理效果和投加量，并进行中试试验进一步确定和优化设计参数，确定注入点的水平和垂向有效影响半径、土壤结构分布、污染去除率、反应产物等。还可以通过建立场地概念模型、反应传质模型等方式指导系统设计和运行。

7.2 进行原位化学氧化注入修复系统设计时，需重点考虑注入点布置的间距和深度、药剂注入量、监测井布置的间距和深度等。还要注意工人的培训、化学药剂的安全操作以及修复产生废物的管理。

8 技术要求

8.1 技术要求指标范围

影响原位化学氧化技术修复效果的关键技术参数包括：氧化剂类型、药剂投加量、药剂投加浓度、场地水文地质、土壤理化性质、注入设备、地下基础设施等，另外，根据经验首先对这些初始设计参数进行选择后，还需要进行实验室小试和中试试验，以对参数进行优化和确定，从而为实际修复提供依据。

8.2 氧化剂类型选择

8.2.1 不同场地，其土壤和地下水中的污染物类型和质量存在差异，不同药剂适用的污染物

类型不同，常用的氧化剂包括双氧水、芬顿试剂、过硫酸钠、高锰酸钾、臭氧等，针对不同污染物，首先进行氧化剂的初选，然后通过针对性的小试、中试实验，并考虑场地建设条件，确定最终使用的氧化剂的类型。

8.2.2 如果场地内存在非水相液体 (NAPL)，由于溶液中的氧化剂只能和溶解相中的污染物反应，因此反应会限制在氧化剂溶液/非水相液体 (NAPL) 界面处。如果 LNAPL (轻质非水相液体) 层过厚，建议 LNAPL 修复区结合或利用其它技术进行清除。

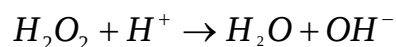
8.3 氧化药剂投加量

药剂的用量由污染物药剂消耗量、土壤药剂消耗量、还原性金属的药剂消耗量等因素决定。

8.4 氧化剂的反应机理

8.4.1 过氧化氢 (H₂O₂)

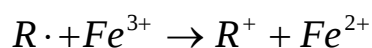
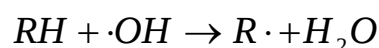
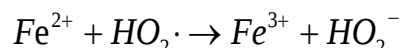
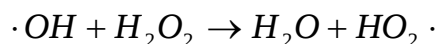
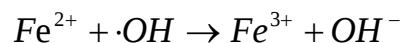
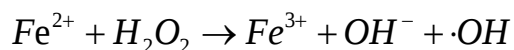
过氧化氢是通过直接氧化降解有机污染物的，其反应机理为：

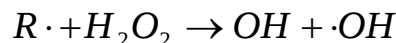


H₂O₂ 极不稳定，半衰期短，有效距离短，进入土壤后会立即分解成水和氧气。

8.4.2 Fenton 试剂

Fenton 试剂主要是通过 Fe²⁺ 与 H₂O₂ 反应生成自由基来降解有机污染物，其反应机理为：

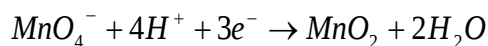




Fenton 试剂扩散控制, $k > 109 \text{ mol}^{-1} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ 可将污染物彻底矿化为 CO_2 和 H_2O 。

8.4.3 高锰酸盐 (MnO_4^-)

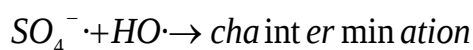
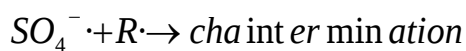
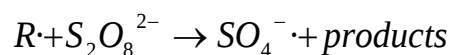
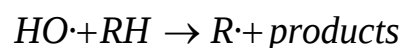
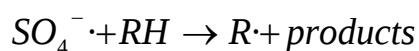
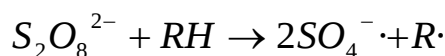
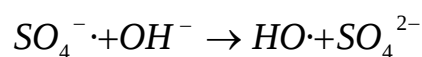
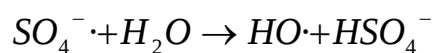
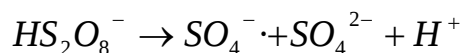
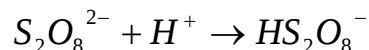
高锰酸盐的反应机理如下:



由于高锰酸盐的 SOD (土壤氧化剂需要量) 较高, 在应用过程中需要消耗的量较大。且工业级高锰酸盐中可能有金属杂质 (铬、镍等), 可能会给环境带来潜在影响。此外, 反应产物 MnO_2 沉淀可能会堵塞井口, 或影响土壤的渗透性。

8.4.4 过硫酸盐

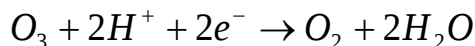
过硫酸盐的反应机理如下:



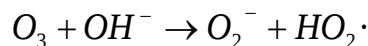
过硫酸盐适用范围广，能够与很多污染物反应，但与土壤中天然有机质的反应有限，即 SOD 低，对于处理有机质含量较高的污染土壤很有效，用量也相对较少。

8.4.5 臭氧 (O_3)

臭氧降解 PAHs 的原理有两种：第一种是直接氧化，即



另一种是通过 OH^- 、 Fe^{2+} 或腐殖质等形成自由基，然后氧化降解 PAHs，即



臭氧氧化效率高，适用范围广，是一种强氧化剂，臭氧分解产生的氧气有利于有机污染物的微生物降解，因此可以与生物通风等技术结合应用来修复污染场地。臭氧极不稳定，半衰期短，反应迅速，传输距离短，且腐蚀性强，需要现场生成。

8.5 氧化剂理论添加量

8.5.1 以过氧化氢为代表的氧化剂由于 SOD 相对较低，与土壤中有机物反应较少；以高锰酸钾为代表的氧化剂由于 SOD 较高，在应用过程中需要消耗的量较大。

8.5.2 对药剂量的使用量需采用不同的计算方法。对以过氧化氢为代表的氧化剂，可考虑采用电子升降平衡及质量平衡公式作为基本依据，计算氧化剂的初始使用量；对以高锰酸钾为代表的氧化剂由于 SOD 较高，可考虑以 SOD 值作为依据，计算氧化剂初始参考使用量。

8.5.3 计算结果均为初始理论计算结果，具体的添加量以及催化剂与氧化剂的添加比例需要通过现场的小试和中试核算及进一步确定。

8.6 氧化剂注入浓度

8.6.1 双氧水

8.6.1.1 双氧水的注入浓度多选择在 3wt%~35wt%（体积分数）。一般要求 pH 在 3.5~5 来保持溶液中的亚铁离子以催化双氧水。许多种类的酸都可以用来调节 pH，但是要确保酸和土壤环境及污染物相容，以免发生不良反应。比较常用的酸有盐酸，硫酸，柠檬酸和磷酸。

8.6.1.2 采取一些改进措施后也可以不需要调节 pH，用铁的螯合溶液来替代亚铁离子，这一

方法可以在中性条件下使用。这非常有利于在碳酸盐含量较高的含水层使用，因为碳酸盐的缓冲作用，加酸很难调节 pH。

8.6.1.3 最低浓度（3%）的双氧水一般用在反应开始阶段，在一些案例中，也有不加 Fe 单独使用低浓度双氧水来增加 BTEX 的可生化性。最高浓度（35%）的双氧水一般用在存在 DNAPL 的工程案例中。

8.6.1.4 初始的双氧水和 Fe 催化剂基于饱和土壤和水相的污染程度（是否有 DNAPL 吸附或沉积）、被修复土壤和地下水的特性（如，渗透系数，有效孔隙）来确定，同样还需要实验室小试去验证 H_2O_2 : Fe 是否合适。

8.6.2 高锰酸钾

8.6.2.1 采用高锰酸钾作为氧化剂时，随着高锰酸钾浓度的增加，有机物的降解速率增加，同时高锰酸钾的消耗也加快。这是因为高锰酸钾与反应生成的 MnO_2 反应而被分解。因为氧化剂与非目标化合物的反应，经常要添加额外增加氧化剂，所以自然有机质和还原性金属量在设计高锰酸钾浓度时需要重点考虑。这一类非目标反应的速率也非常快，能和目标污染物竞争氧化剂。

8.6.2.2 虽然每个场地都有自己的特点，但对高锰酸盐的浓度一般选择在 1%~40%。选择高锰酸钾还是选择高锰酸钠主要从经济角度考虑，高锰酸钾的单价要远远低于高锰酸钠，但是高锰酸钾的溶解度很低，所以在使用时需要一套复杂的储存、运输和混合装置才能得到浓缩的溶液，而高锰酸钠溶解度相对较大，就很容易配制。

8.6.3 过硫酸钠

8.6.3.1 过硫酸钠是一种较新的氧化剂，一些研究表明螯合的三价铁离子能作为催化剂使过硫酸钠氧化 VOCs。也有研究将螯合的三价铁离子与螯合的二价铁离子对比， Fe^{3+} -EDTA 在土壤中比较活跃，而且不像二价铁游离在溶液中，因此，可以将 Fe^{3+} -EDTA 随过硫酸盐一起输送，对过硫酸钠较合适的催化剂剂量是 100~200mg/L 的 Fe。

8.6.3.2 研究表明，将碳酸钠添加到过硫酸钠中可以有效缓冲 pH。碳酸盐的加入减慢了过硫酸盐的反应速率但不会抑制对 VOCs 的最终氧化效果。碳酸盐剂量为硫酸盐摩尔量的 10~50% 左右较合适。碳酸盐还能改善过硫酸盐的稳定性。过硫酸盐的浓度也会影响反应。一般而言，过硫酸盐的浓度越高，和 VOCs 的反应越快，氧化效率越高。此外，过硫酸盐的 SOD 值低，即不容易与天然有机质反应。

8.6.4 臭氧

当用氧气制臭氧时浓度一般在 5%~10%，用空气制臭氧时一般为 1%。臭氧发生器的需求量取决于总氧化剂需要量、土壤可接受的气流速度、修复需要的时间。

8.7 氧化剂传输设计

8.7.1 氧化剂传输方式

氧化剂传输方式的选择随钻井、成井和注入方式等技术的不同而不同。大多情况下，注入井（孔）或者注入设备都是根据现场条件和目的来设计。

对于有较长半衰期的氧化剂，如高锰酸盐和过硫酸盐，其传输可以使用地下水循环来实现。表 1 是几种注入方式的适用条件，本指南主要针对常用的直接注入和注入井注入进行说明。

表 1 不同氧化剂注入方式

工艺	适用氧化剂	土壤渗透性
直接注入	全部氧化剂	渗透性需要较高（不适合基岩）
注入井或注入-抽出循环	全部氧化剂	渗透性需要较好
土壤混合	高锰酸盐、过硫酸盐	渗透性影响较小
土壤压裂	高锰酸盐、过硫酸盐	需要对土层进行压裂
自然渗透	高锰酸盐、过硫酸盐	渗透性需要较高

8.7.2 氧化剂的注入压力

8.7.2.1 氧化剂的注入压力和水流条件也很重要，而且还关系到氧化剂的扩散。较低或适中的流速（如层流）经常是采用重力注入实现。当氧化剂以高压高速注入时，湍流能导致水力压裂或者泥浆喷出，重力注入不同深度的影响半径的示意图见图 1。

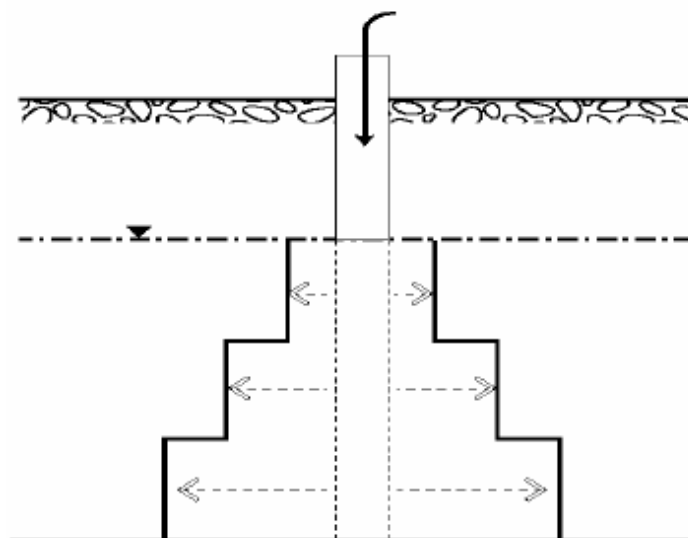


图1 重力注入不同深度的影响半径

8.7.2.2 加压注入有利的一面是可以实现以较小的流量达到更快的氧化剂扩散。然而，如果超过了土壤的破裂压力，那就需要注意能够确保控制不出现裂缝，因为裂缝的生成就会导致优先通道的形成。

8.7.2.3 氧化剂进入污染区深度需要设定的压力可以通过公式进行初步计算，随后根据中试结果进行最终的确定。

8.8 注入间距设计

8.8.1 一般而言，氧化剂可以通过足够多的注入井（孔）形成水平或垂直方向上的重叠区域，使整个修复区域的氧化剂能与污染物很好的接触。氧化剂在地下系统中传输的影响半径示意图见图2。多数情况下，当目标污染物既不吸附于土壤也不是沉积或自由相的 NAPL（非溶解相）时，就需要采取多种措施或增强系统操作。同时，土壤特性数据的不确定性也会频繁的导致阶段性方法的不同，所以对土壤污染修复的方案设计要具有灵活性。

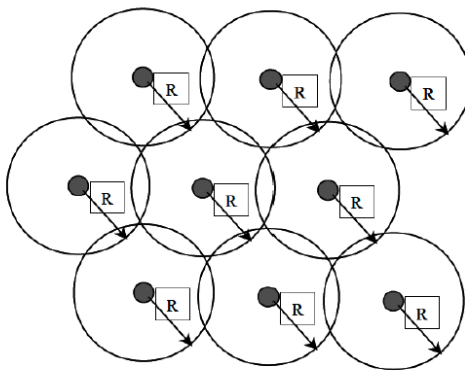


图 2 影响半径示意图

8.8.2 氧化剂在地下系统中传输的影响半径决定了注入井（孔）的间距和分布情况。在进行注入井井间距设计时可首先根据经验数据给出初始值，然后通过场地数值模拟以及中试实验等获得最终的注入间距，初始注入间距可设定为影响半径的 2 倍左右。氧化剂的扩散可能因为它们通过土壤时的消耗而使氧化反应受限。因此，氧化反应的有效半径可能在实际上小于其水力半径 (ROI)。

8.8.3 氧化反应的反应速率越快其有效的扩散距离越短。此外，土壤的非均质性也会影响到氧化剂的影响半径，不同渗透系数氧化剂影响半径示意图见 3，在渗透性不同的土壤中氧化剂的影响半径不同。因此在实际的工程中，需要通过中试实验进一步确定场地内氧化剂注入的影响半径以及注入井（孔）间距。

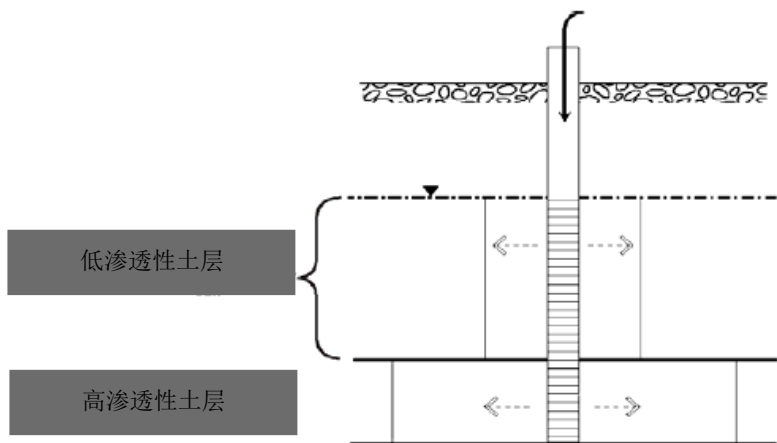


图 3 不同渗透系数氧化剂影响半径

8.9 注入设备

8.9.1 注入井

8.9.1.1 注入井包括水平注入井和垂直注入井，根据场地水文地质条件，若污染物贯穿不同土壤层，为避免可能的二次污染，可采用分层注入的方式进行修复治理。

8.9.1.2 注入井结构及质量

注入井主要由封闭段（用于非污染层的封闭）、注药段（用于修复污染目的层，药剂的流入和流出）和沉砂段（用于井底，非目的层、防淤塞）组成。

成井主要工艺内容包括选择井管、下管、填砂、止水、洗井、抽水实验等。目的是将目的层经过疏通，使其能够自由地流入或流出井中，封闭或隔离非目的层。

8.9.1.3 井管的选择

井管包括井壁管、过滤筛管和沉砂管，井壁管安装在场地非污染层，起隔水护壁的作用（相当于套管）；过滤筛管位于土壤或地下水污染层，起滤水挡砂和护壁的双重作用；沉砂管安装在井底部，沉积水中所含泥砂，防治淤塞过滤筛管。非完全井沉砂管应封底，避免翻砂，基岩井（即在基岩岩层中打出的井）可延长井深，代替沉砂管。

8.9.1.4 井管材料

井管材料要满足以下要求：不宜由两种材质组成；应顺直无弯曲、残缺、断裂现象；内壁应平整圆滑，接头能弥合，连接后无弯曲。

8.9.1.5 下管方法

井管下管方法主要包括直接提吊法、托盘提吊下管法、浮力塞提吊下管法、二次下管法（分为提吊二次下管法和托盘二次下管法）和综合下管法。其中浮力塞提吊下管法较适宜静水位较高的区域，提吊二次下管法适用于抗压强度较大的金属管，托盘二次下管法适用于非金属管。

8.9.1.6 过滤材料及填砂

在井建设过程中，需要在过滤筛管外围填充砾料，起到过滤控砂防止过滤管孔眼堵塞而影响注水和出水量的作用。

8.9.1.7 止水

为了对目的污染层以外的其它含水层或者非含水层进行封闭和隔离，以防止对目的污染

层的干扰和污染，同时防止药剂进入非目的层造成浪费，需要对非目的层进行止水。止水方法可采用粘土止水 and 水泥止水。

8.9.1.8 洗井

为了清除井壁泥皮，井内泥沙，疏通目的层，密实填砾，保证注入药剂可以顺利进入目的污染层，实现对土壤或地下水中污染物的治理。洗井的方法包括抽水洗井、活塞洗井、空压机震荡洗井、液态二氧化碳洗井、盐酸洗井、磷酸盐洗井和综合洗井。

8.9.1.9 抽水实验

通过抽水实验判断井的抽注水效果，反应井的质量，必要时可求出相关的水文地质参数。

8.9.2 注入孔直推设备

8.9.2.1 目前，原位化学氧化注入孔直推设备主要为 Geoprobe 直推。Geoprobe 推进器由三个主要部分构成：探测组建、液压系统和电气系统。其中，用于药剂注入的部分为液压系统。可通过液压系统将配置好的一定浓度的氧化剂直接注入的修复目的层，使其完成对土壤或地下水中污染物的修复。

8.9.2.2 Geoprobe 设备的参数主要包括重量、地面压力、地面速度和尺寸参数、发动机参数和液压系统参数，其中，设备的转运高度、转运宽度、转运长度、向下力、液压系统压力（最大）、液压系统流速、左前侧或后侧的辅助液压接头流速（最大）和右前侧辅助液压接头流速（最大）为设备选型时需要考虑的主要参数，可根据注入（孔）布置情况进行设备的选型。

8.9.3 其他的影响因素

8.9.3.1 土壤孔隙度

描述土壤中存在的孔隙体积的参数。设计注入总体积需要知道土壤孔隙度。需要注意的是在很多情况下，水流并不能进入到所有的孔隙中，因此，更多的是测量出土壤的有效孔隙，注入总体积不应超过有效孔隙体积。

8.9.3.2 地下水水力梯度

对于含有地下水的修复区域，通过地下水水力梯度可以判定地下水的流向和速度。在原位氧化修复技术实施时，可以通过以下两方面提高修复效率：一方面可根据地下水流向合理布置注入点和监测点，另一方面可根据地下水流速确定最合适的氧化剂用量。因此，地下水水力梯度主要涉及到修复设计阶段注入井（孔）及监测井的设置。

8.9.3.3 土壤理化性质

在化学氧化技术中，了解土壤和地下水中的金属含量也极其重要，因为氧化剂的反应都是非选择性的，即在氧化污染物的同时也会和其他可被氧化的物质反应。可氧化物质是指土壤或地下水中自然存在，能被氧化剂氧化的有机物和无机物，分析样品的可氧化物质是为了确定自然氧化剂需要量（NOD）。多数金属都能被氧化剂氧化，如，铁、锰、铬、硒等，了解金属含量的另一个目的是可以在注入期间有选择性的对其进行监测，从而大致判断氧化剂的分布及反应程度。此外，还需要根据金属含量额外增加氧化剂的量。一般而言，前期调查应该要确定以下金属的浓度范围：砷、钡、镉、铬、铜、铁、铅、硒。另外，因为三价铬被氧化会转变成六价铬，因此需要测定六价铬含量。一般的矿物分析包括总溶解固体（TDS），主要阴离子（ Cl^- ， SO_4^{2-} ， NO_3^- ， F^- ），主要阳离子（ Ca^{2+} ， Na^+ ， Mg^{2+} ， K^+ ， Mn^{2+} ）。其他指标还有化学需氧量（COD）、总有机碳（TOC）、总无机碳（TIC）。

8.9.3.4 水质指标

水质指标包括，pH、氧化还原电位、溶解氧、溶解二氧化碳、温度、电导率。pH 值一般会影响氧化剂的氧化效率，尤其对于双氧水，双氧水需要较低的 pH 以促进羟基自由基的生成。修复过程中需要定期监测 pH。溶解氧是能够反映水体有机污染物含量的一个指标（DO 随污染物浓度增加而减少）。

二氧化碳是氧化反应的最终产物，二氧化碳量的变化能够反映氧化反应的速度和范围。需要注意的是二氧化碳也可以由碳酸盐生成，因此该指标仅用于评估。温度的变化在使用双氧水时变化很明显，在开始注入后立刻就能检测到温度的升高。

为安全起见，井内温度应该随时监测和控制。电导率在加入氧化剂后可以观察到少量的增加。也能通过电导率的变化来追踪氧化剂的扩散。

8.9.3.4 现场参数

以上这些参数在现场非常容易得到，却可以给修复设计提供很多数据，也能在整个修复过程中很大程度上反应氧化反应的进行。

8.9.5 地下基础设施：若存在地下基础设施（如电缆、管道等），则需谨慎使用该技术。

在对原位化学氧化（注入修复）方案技术参数进行初步设计后，需要通过实验室小试和中试实验对技术参数进行优化，以更适用于场地土壤和地下水的修复需要。

8.10 实验室小试

对于多数原位化学氧化注入修复技术的应用，实验室小试是确保现场应用成功的一次前期测试。实验室小试最主要的两个目的：一是评估在饱和土壤或溶解相中氧化剂对目标污染物的氧化效果；二是测定土壤的氧化剂需求量。

完成实验室小试并分析结果后，可直接或间接根据实验室小试结果设计中试试验。实验室小试试验不仅是在相对较小的容器内进行，而且供试土壤或水样从取样到试验的一系列过程中被扰动程度大。实验室小试通常来讲是处于一个静态条件下，不同于现场应用的动态条件。较小规模的试验扩大到较大规模的试验都需要经过一个非线性的放大，因此，小试结果是不能充分反映化学氧化修复技术在实际条件下的处理效果。尽管如此，在原位化学氧化注入修复技术的设计过程中，通过实验室小试测试土壤氧化剂需要量仍是一个必不可少的步骤。

8.11 现场中试

8.11.1 现场中试的一般要求

相对于实验室小试，中试试验能为原位化学氧化注入修复技术现场实施提供更多必要的信息，比如注入井（孔）间距、注入流量、各氧化剂效果等。也可以通过中试得到的相关参数估算实际修复时的成本，这些参数包括：氧化剂浓度、注入速率、温度、压力、影响半径、注入总量等。中试试验也能验证氧化剂在实际土壤环境中的修复效果。从某种意义上讲，中试试验实际上就是将修复场地的一小地块提前进行修复治理。因此，进行中试试验是很有必要的，通过中试结果，不仅能对现场应用有一个理性的预期，而且也为现场应用的设计提供相关参数。

8.11.2 现场中试设计应注意以下几点：

- 1) 选取的试验地块要具有代表性；
- 2) 氧化剂的注入可以使用已有的注入井、新的注入井，直接注入或者联合使用的方式。

注入井（孔）间距设计是否合适非常重要的，要确保氧化剂在污染区域均匀扩散，注入井（孔）的影响范围要有重叠。氧化剂的注入量需要根据污染物和土壤的氧化剂需求量确定；

3) 通过在注入井（孔）附近布置地下水监测井来设计一个监测网。在注入井（点）附件或地下水下游方向必须要设有监测井，距离注入井（孔）不同距离也都要有监测井，这样才能观测到氧化剂的扩散，也能收集更充足的数据。同时要监测中试场地外的污染羽和氧化剂，防止它们扩散进试验区域影响结果；

- 4) 同时要指定一个取样和监测方案，这样能更系统的监测氧化剂的扩散和修复效率。相

对修复效率的监测而言，要更频繁的关注氧化剂扩散；

5) 对于气态注入系统，中试试验要验证注入点周围气相的影响区域，这可以通过压力变化、溶解氧增加、元素示踪和注入气体的浓度扩散来评估。对于液态注入系统，中试试验要验证不同注入流量下的影响范围以及在地下水中的扩散，这可以通过压力影响、溶解氧增加、地下水位和注入液体的浓度扩散来评估；

6) 在大多数情况下，氧化剂需要量远大于与目标污染物的化学计量值，所以对于确定氧化剂的使用量，实验室小试和现场中试试验就是一个非常有必要的步骤，这也是在原位化学氧化注入修复技术设计过程中必不可少的步骤。

9 实施过程

9.1 处理系统建设

据经验及前期实验确定的药剂对污染物的降解效果，选择适用的药剂及药剂添加浓度。再结合中试试验，确定注入浓度、注入量和注入速率，确定的注入井（孔）位置和数量，建立原位化学氧化处理系统。

9.2 药剂注入过程

药剂注入前需要通过药剂搅拌系统进行充分混合，药剂注入过程要实时监测药剂注入过程中的流量和压力变化。

9.3 修复监测

进行污染土壤和地下水原位化学氧化的修复过程监测以及修复后的监测。主要包括对污染物浓度、pH、氧化还原电位等参数进行监测和现场环境监测，如果污染物浓度出现反弹，可能需要进行补充注入。

10 二次污染防治

10.1 建立污染防治体系

在原位化学氧化（注入修复）过程中，需要建立污染防治体系，责任到人。同时，要制定大气环境、水环境、声环境以及固体废物的二次污染防治措施。

10.2 大气污染防治

现场大气污染二次污染控制过程主要包括成井过程、洗井及采样过程、修复过程中的有害气体挥发控制以及整个过程中的尾气及扬尘二次污染控制，确保整个场地土壤或地下水修复过程场内大气和扬尘满足《大气污染物综合排放标准》（GB16297-1996）或业主要求的其他标准，尾气满足国家第三阶段排放标准（即《车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法（中国Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ阶段）》（GB17691-2005）中的第三阶段排放控制要求或业主要求的其他标准。

10.3 地下水污染防治

现场地下水二次污染防治过程主要包括成井过程，防止水流入非目的层，造成地下水迁移扩散；氧化剂的管理和选用过程，防止氧化药剂的泄露以及氧化剂对水体造成的二次污染；施工废水的处理过程，确保废水处理过程不造成额外的土壤、地下水和大气污染，确保废水排放满足相关技术标准的要求。

10.4 声环境污染防治

现场声环境二次污染防治过程主要包括建筑施工厂界环境噪声管理，严格执行《建筑施工场界环境噪声排放标准》（GB12523-2011）中的排放限值；现场人为噪声管理，施工现场提倡文明施工，建立健全控制人为噪声的管理制度，尽量减少人为的大声喧哗，增强全体施工人员噪声扰民的自觉意识；以及强噪声作业时间管理，需满足周围环境及业主要求。

10.5 固体废弃物污染防治

现场固体废弃物二次污染防治措施主要包括气体收集系统产生的活性炭或其他固体废物的处理处置，需送至有相关资质的单位进行处理；现场施工产生的建筑及施工垃圾需单独贮存、设置安全防范措施且有醒目标识。废弃物的运输确保不遗洒、不混放，做到安全妥善处置。施工人员所产生活垃圾经分类收集后，由当地环卫部门统一外运作进一步处置；现场产生的施工人员所产生活垃圾经分类收集后，由当地环卫部门统一外运作进一步处置。

11 共用工程要求

11.1 电气系统

11.1.1 场地配电系统的设计与安装应符合 GB50052-2016 的要求。

11.1.2 注浆泵、抽水泵以及各种设备用电的选型应符合 GB50055-2011 的要求

11.1.3 氧化剂仓库内的电力安装及设计应符合 GB50058-2014 的要求。

11.1.4 场地内自动化控制系统的设计应符合 GB/T50062-2008 的要求。

11.1.5 场地内办公生活区照明设计应符合 GB50034-2013 的要求。

11.1.6 场地内电力接地设计应符合 GBJ65-1983 的要求。

11.2 仪表与自动化控制系统

11.2.1 药剂注入系统

包括流量计、压力计、注入管道及注入井，其中属于仪表的为流量计和压力计。在安装流量计的管道上需装有控制阀和隔离阀，为避免由于阀门引起一些流速分布扰动和气穴而影响流量计测量，一般控制阀应安装在流量计的下游，隔离阀安装在流量计的上游，上游阀应离流量计足够距离，当流量计运行时，上游阀应全开以避免流速分布畸变等扰动；在安装压力计时，取压口到压力表之间应装有切断阀，以备检修压力表时使用。切断阀应装设在靠近取压口的地方。需要进行现场校验或经常冲洗导压的地方，切断阀可改用二通阀。

11.2.2 流量计

流量计的技术参数主要为：测量流量（瞬时流量）还是总量（累积流量）；准确度要求；重复性；线性度；流量范围和范围度；压力损失；输出信号特性和流量计的响应时间等。另外，注入药剂的性能对流量计的选型同样有影响。具体的流量计选型要求见附录 A。

11.2.3 压力计

11.2.3.1 就地压力指示

当压力在 2.6Kpa 时，可采用膜片式压力表、波纹管压力表和波登管压力表。如接近大气压的低压检测时，可用膜片式压力表或波纹管式压力表。

11.2.3.2 远距离压力显示

若需要进行远距离压力显示时，一般用气动或电动压力变压器，也可用电气压力传感器。

11.2.3.3 压力表量程的选择

根据被测压力的大小确定仪表量程。

11.2.3.4 压力表精度选择

根据生产允许的最大测量误差，以经济、实惠的原则确定仪表的精度级。一般工业用压

力表 1.5 级或 2.5 级已足够。

11.2.3.5 压力表使用环境及介质性能的考虑

环境条件恶劣，如高温、腐蚀潮湿、振动等，被测介质的性能，如温度的高低、腐蚀性、易结晶、易燃、易爆等等，以此来确定压力表的种类和型号。

11.2.3.6 压力表外形尺寸的选择

现场就地指示的压力表一般表面直径为 $\phi 100\text{mm}$ ，在标准较高或照明条件较差的场合用表面直径为 $\phi 200\sim\phi 250\text{mm}$ 的，盘装压力表直径为 $\phi 150\text{mm}$ ，或用矩形压力表。

11.2.3.7 压力表的安装

应选在能正确而及时反映被测压力实际数值的地方，设置在被测介质流动平稳的部位，不应太靠近有局部阻力或其他受干扰的地方。取压管内端面与设备连接处的内壁应保持平齐，不应有凸出物或毛刺，以免影响流体的平稳流动。

11.2.3.8 切断阀的配置

取压口到压力表之间应装有切断阀，以备检修压力表时使用。切断阀应装设在靠近取压口的地方。需要进行现场校验或经常冲洗导压管的地方，切断阀可改用三通阀。

11.2.4 在线监测系统

考虑施工过程的连续性，根据现场施工区域布置情况，可在施工现场修复区域集成建立实时在线监测系统和监控系统，在线监测系统可实现对厂区无组织排放大气的实时在线监测，监测指标为温度、湿度、风速、风向及相关目标污染物；在线监控系统可实时观测现场的修复实施过程。工作人员可以根据实时监测和监控系统数据，指导现场修复工作，对施工作业进行相应调整，对现场环保措施进行相应整改。

11.2.5 快速检测设备

现场应具有可以检测相关关注污染物的快速检测设备，以快速掌握场地情况。

11.3 给水排水系统

11.3.1 原位化学氧化（注入修复）系统可能涉及到的给水排水系统包括注浆泵、抽水机的安装、注水管或抽水管的安装、相关附属设备和材料的安装、生活区用水安装和给水排水系统的检验与调试。

11.3.2 泵在安装前应核对基础定位尺寸及标高，其允许偏差应符合规范要求；

11.3.3 泵的型号应与设计相符，动力机械与泵的功率应匹配；产品合格证、产品说明书及随机配件应齐全；

11.3.4 泵在安装前应对其外表及组装件进行一次外观质量检查；如发现有质量问题，不得安装；

11.3.5 安装后，泵体的底座应水平，且与基座接触严密，定位基准线应符合设计要求，设备的平面位置及允许偏差应符合相关规范的规定；

11.3.6 泵的管口与管道连接应严密，无渗漏水现象；

11.3.7 电机的绝缘电阻应符合相关规范的规定；

11.3.8 所有泵类设备，在泵进出口未与管道连接前，泵进出口均应用钢板封堵；

11.3.9 试运转时注意事项：

——启动前必须确认叶轮的旋转方向；

——合闸后，不应立即启动，应通过控制系统对各种泵类进行自检，如发现有故障出现，应检查并排除故障，然后方可点动，若电机不转，应迅速果断地拉闸，应检查并排除故障，以免损坏电机；

——水泵或注浆泵启动后，应注意观察电机及电源线路电压表和电流表，若有异常现象，应立即停机查明原因，排除障碍后方能重新合闸启动；

——几台水泵由同一台变压器供电时，不应同时启动，应由大到小逐台启动，停止时，应由小到大逐台停止；

——运行中泵体的电流不应超过铭牌上的额定电流，三相电流不平衡度，空载时不应超过10%，额定负载时不应超过5%；

——运行中电源电压与额定电压的偏差不应超过 $\pm 5\%$ ，三相电压不平衡度不应超过1.5%。

11.3.10 管道安装应符合下列要求：

1) 对管子进行检查与准备，确认管及管件不得有妨碍使用的缺陷；

2) 管材必须符合设计标准及规范的要求，且应有合格证和出厂检验报告；

3) 管道安装要严格按照设计方案进行。

11.3.11 附属设备及材料安装 应复合下列要求:

1) 阀门、管件等在安装前均应进行检查,并清除管内、管口杂物;

2) 阀门安装前,应作耐压强度试验。试验应以每批(同牌号,同规格、同型号)数量中抽查 10%,且不少于一个,如有漏、裂不合格的应再抽查 20%、仍有不合格的则须逐个试验;

3) 对于安装在主干管上起切断作用的闭路阀门,应逐个作强度和严密性试验。强度和严密性试验压力应为阀门出厂规定的压力,同时应有试验记录备查;

4) 阀门安装位置、方向应符合设计要求,阀门、管件的连接应牢固、紧密,不应有渗漏现象;

5) 安装后,阀门与管道中心线应垂直,操作机构灵活、准确;有传动装置的阀门,指示机构指示的位置应正确,传动可靠,无卡涩现象;

6) 阀门安装应保证其型号、规格符合设计要求,表面洁净,朝向正确,启闭灵活;

7) 安装的阀门在工程最终验收前不得有漏水痕迹。

11.3.11 检验与调试应复合下列要求:

1) 给排水系统调试,给排水系统调试包括单体设备的测试和各系统的调试两部分,在施工组织方案内应提供调试方案,在调试过程中应按批准的调试方案和计划进行,并在监理工程师的监督下完成。

2) 泵的调试安装完毕,应根据相关规定进行调试及试运转前的检查及试运转,并做出记录;试运转应符合下列规定:

—电机转动方向正确;

—泵体运转无卡阻现象和异常声响;

—泵体带负荷连续运转不应少于 2h;

—附属系统的运转应正常;管道连接应牢固无渗漏;

—各密封部位无渗漏水现象;

- 电机电流不超过额定值；
- 安全保护和电控装置及各部分仪表均应灵敏、正确、可靠；
- 仪表的灵敏度和阀类启闭的灵活性；
- 抽注水流量满足设计要求。

12 职业卫生与劳动安全

12.1 职业卫生

现场职业卫生应按 GBZ188-2007、GBZ 1-2010、GBZ 2.1-2007 和 GBZ 2.2-2007 的规定执行。

12.2 劳动安全用品

现场劳动安全用品应按照《劳动防护用品配备标准（试行）》（国经贸委安全[2000]189号）执行。

13 工程概算

13.1 工程概算

建设项目的工程概算是初步设计文件的重要组成部份，工程概算文件应单独成册。

13.2 文件组成

工程概算文件由封面、签署页(扉页)、编制说明、修复项目总概算表、单项工程概算表等内容组成。

13.3 封面

封面包括：项目名称、编制单位、编制年月。

13.4 签署页(扉页)

扉页包括：编制单位法定代表人、项目总负责人、技术总负责人和各专业负责人的姓名，并经法定代表人和项目总负责人签署或授权盖章。

13.4 编制说明

13.4.1 工程概况

工程概况包括：简述修复项目的地点、规模、周边环境概况、污染现状和修复目标值等。

13.4.2 编制依据

编制依据包括：

—技术方案

—国家和地方政府有关建设和造价管理的法律、法规和规程；

—当地和主管部门现行的概算定额(或预算定额、综合预算定额)、单位估价表、类似工程造价指标、材料及构配件预算价格、工程费用定额和有关费用规定的文件等；

—人工、设备及材料、机械台班价格依据；

—建设单位提供的有关概算的其他资料；

—工程建设其他费用计价依据；

—有关文件、合同、协议等。

13.4.3 概算编制范围

13.4.4 其他特殊问题的说明

13.4.5 概算成果说明

概算成果说明包括：

—说明概算的总金额及场地准备总费用、场地原位修复总费用、场地措施总费用、现场监测检测费用等

—技术经济指标；

—主要材料消耗指标。

13.5 修复项目总概算表

具体给出场地准备总费用、场地原位修复总费用、场地措施总费用、现场监测检测费用等，初步设计阶段，单位工程概算书一般应考虑零星工程费，修复项目概算表见表2。

表2 修复项目概算表

项目	分项	项目	工程量	总价	备注
场地准备	场地平整				
	场地建设				根据平面图对围挡、大门、办公生活区、材料区、仓库、道路等进行建设
	临水建设				
	临电建设				
	给排水系统建设				
	总价				
原位化学氧化（注入修复）	工程建设				
	材料购买及加工				
	机械使用				
	药剂使用				
	仪表及设备				
	总价				
措施费	二次污染防治				
	安全文明施工				
	应急预案				
	其他				
	总价				
检测费用	修复效果自检测				
	修复效果自验收				
	总价				
总价					

注：本表较为概况，实际工作中可根据分项进一步细分，以给出更为详细的报价单。

14 环境监理

14.1 监理依据

场地环境监理主要依据表 3 中的标准，以及业主给出的特殊标准。

表 3 场地环境监理依据

修复标准	标准编号
《大气污染物综合排放标准》	GB16297-1996
《污水综合排放标准》	GB8978-1996
《建筑施工场界环境噪声排放标准》	GB 12523-2011
《大气污染物无组织排放监测技术导则》	HJ/T 55-2000
《固定源废气监测技术规范》	HJ/T 397-2007
《固定污染源监测质量保证与质量控制技术规范	HJ/T373-2007
《场地环境监测技术导则》	HJ25. 2-2014
《土壤环境监测技术规范》	HJ/T 166-2004
《地下水环境监测技术规范》	HJ/T 164-2004
《地表水和污水监测技术规范》	HJ/T 91-2002
《水质采样技术指导》	HJ 494-2009
《空气和废气监测分析方法》	中国环境科学出版社，2003，第四版

14.2 监理原则

14.2.1 通过制定严格的监理计划和工程管理目标实现对修复工程的监理，应根据本项目环境管理各阶段特征，与环境调查与风险评估、治理修复、工程验收的目的和要求紧密结合。

14.2.2 环境监测的过程中应妥善处理好环境调查监理、治理修复监理、工程验收监理的相互关系，确保监理结果的协调性、一致性和时效性。

14.2.3 委托当地环境部门认可的具有资质的环境监测机构对修复项目的修复效果及修复过程中产生排污情况定期进行监理，以保障修复工程顺利完成并通过当地环境部门的验收。

14.2.4 设计和修复过程中需要给出相应的监测点位分布图，且在监测执行过程中按照规范对

监测点位进行标识。

14.3 环境监理计划

14.3.1 气象监理

可在施工区域内设立小型气象站，以指示现场风速、风向、大气湿度及气温等基本天气信息，保证施工人员尽量站在上风向进行施工作业。

14.3.2 大气监理

14.3.2.1 大气监理分类

大气监理可按照污染源的特点分为固定源监理、无组织源监理，其中无组织源监理又可分为无组织取样监理和现场快速检测，从而反映整个修复过程中的环境状况。也可按照污染物可能的危害分为环境影响监理和污染物排放监理。环境影响监理旨在反映修复过程对场地周边大气环境的影响，污染物排放监理旨在反映修复过程中可能的大气二次污染源的污染程度。

14.3.2.2 大气监理依据

大气监理应按 HJ/T 55-2000 和 HJ/T 397-2007 的规定执行，并符合 HJ25.2-2014 中 6.2.4 的要求。

14.3.2.3 其他相关采样

其他相关采样应按中华人民共和国环境保护部《大气监测规范、方法标准》的规定执行。

14.3.3 水环境监理

14.3.3.1 修复场区水环境包括地下水、地表水和污水等。

14.3.3.2 场区内地下水监理

应按照 HJ/T 164-2004 的规定执行，并符合 HJ25.2-2014 中 6.2.2 的要求。

14.3.3.3 地表水和污水监理

应按照 HJ/T 91-2002 的规定执行，并符合 HJ25.2-2014 中 6.2.3 的要求。

14.3.3.4 其他特殊监理

其他特殊监理应按照中华人民共和国环境保护部《水监测规范、方法标准》中的相应规

定准执行。

14.3.4 声环境监理

声环境监理应按照 GB12523-2011 的规定执行,其他特殊要求可按照中华人民共和国环境保护部《环境噪声与振动标准》的规定执行。

14.3.5 治理过程监测

14.3.5.1 土壤治理修复过程中的监测点位或监测频率,应根据工程设计中规定的原位治理修复工艺技术要求确定,每个样品代表的土壤体积应不超过 500m³。

14.3.5.2 地下水治理修复过程中的监测点位应按照工程环境影响评价或修复工程设计的要求布置。

14.3.5.3 修复过程监测通常在药剂注射前、注射中和注射后很短时间内进行,监测参数包括药剂浓度、温度和压力等。

14.3.5.4 若修复过程中产生大量气体或场地正在使用,则可能还需要对挥发性有机污染物、爆炸下限(LEL)等参数进行监控。

14.3.5.5 效果监测的主要目的是依据修复前的背景条件,确认污染物的去除、释放和迁移情况,监测参数为污染物浓度、副产物浓度、金属浓度、pH、氧化还原电位和溶解氧。若监测结果显示污染物浓度上升,则说明场地中存在未处理的污染物,需要进行补充注入。

15 验收与后期管理

15.1 验收

15.1.1 对治理修复后的场地土壤进行验收监测时,一般应采用系统布点法布置监测点位,原则上每个监测地块面积不应超过 1600 m²,也可参照环境调查详细采样监测阶段的监测点位布置。

15.1.2 工程验收监测过程中,如发现未达到治理修复目标的地块,则应在二次治理修复后再次进行工程验收监测。

15.1.3 需要对地下水、地表水和环境空气检修监测,监测点位按照 3.10.3 中的环境监测点位布置。

15.1.4 对地下水进行验收监测、可利用场地环境调查、评价和修复过程建设的监测井,但原

监测井数量不应超过验收时监测井总数的 60%，新增监测井位置布置在地下水污染最严重区域。

15.2 后期管理

15.2.1 场地原位化学氧化（注入修复）根据场地土壤、地下水和化学氧化药剂的特点，可能存在“拖尾”等现象，需要对场地进行回顾性监测。

15.2.2 对土壤进行定期回顾性评估监测，应综合考虑环境调查详细采样监测、治理修复监测和工程验收过程中相关点位进行监测点位布置。

15.2.3 对地下水、地表水、环境空气进行回顾性监测，可按照 3.10.3 中的环境监测点位布设。

15.2.4 长期治理修复过程中可能影响的区域范围也应布置一定的监测点位。

16 典型参考案例

国内外采用原位化学氧化注入修复的典型参考案例见附录 B。

附录 A（资料性附录）流量计的选型

A.1 药物注入系统中流量计的技术参数主要有：测量流量（瞬时流量）或总量（累积流量）；准确度；重复性；线性度；流量范围和范围度；压力损失；输出信号特性和流量计的响应时间等。

A.2 注入药剂的性能对流量计的选型有重要影响。具体的选型应按照表 A.1 和表 A.2 进行，可根据设计流量选择合适的型号。

表 A.1 不同流量计的选型适用性

		主要药剂特征																
		液体											气体					
		流体特征						液体工艺过程条件										
名称		清洁	脏污	腐蚀性浆	腐蚀性	非液液混合	液气混合	高温	低温	小流量	大流量	脉冲流	一般	小流量	大流量	腐蚀性	高温	蒸汽
差压式	孔板	★	★	×	●	★		★	★	●	★	◆	★	●	●	●	★	★
	喷嘴	★	◆	×	●	★	●	★	◆	×	★	◆	★	●	●	●	★	★
	文丘里管	★	●	×	●	★	●	★	◆	×	★	◆	★	●	●	●	★	★

		主要药剂特征																
		液体											气体					
		流体特征						液体工艺过程条件										
名称		清洁	脏污	腐蚀性浆	腐蚀性	非液液混合	液气混合	高温	低温	小流量	大流量	脉冲流	一般	小流量	大流量	腐蚀性	高温	蒸汽
	弯管	★	●	●	●	★	●	◆	◆	◆	★	◆	★	×	×	●	◆	◆
	楔形管	★	★	★	●	★	●	●	●	×	×	◆	×	×	×	×	×	×
	均速管	★	×	×	×	★	●	★	★	×	★	◆	★	×	★	●	★	★
浮子式	玻璃管	★	×	×	●	×	×	×	×	★	×	×	★	★	×	●	×	×
	金属锥管	★	×	×	●	×	×	●	×	★	◆	◆	★	★	◆	●	×	★
容积式	椭圆齿轮	★	×	×	×	●	×	◆	×	★	×	×	×	×	×	×	×	×
	腰轮	★	×	×	×	●	×	◆	×	×	★	×	★	×	×	×	×	×

		主要药剂特征																
		液体											气体					
		流体特征						液体工艺过程条件										
名称		清洁	脏污	腐蚀性浆	腐蚀性	非液液混合	液气混合	高温	低温	小流量	大流量	脉冲流	一般	小流量	大流量	腐蚀性	高温	蒸汽
	刮板	★	×	×	×	●	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	膜式	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	★	★	×	×	×	×
涡轮式		★	×	×	×	●	×	★	×	★	×	×	★	×	×	×	×	×
电磁式		★	★	★	★	★	◆	×	◆	★	★	★	×	×	×	×	×	×
振荡式	涡街	★	●	×	◆	●	×	★	★	×	×	×	★	×	★	×	★	★
	旋进涡旋	★	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	★	×	×	×	×	×

名称		主要药剂特征																
		液体											气体					
		流体特征						液体工艺过程条件										
清洁	脏污	腐蚀性浆	腐蚀性	非液液混合	液气混合	高温	低温	小流量	大流量	脉冲流	一般	小流量	大流量	腐蚀性	高温	蒸汽		
超声式	多普勒法	★	★	★	★	★	◆	×	×	●	×	×	×	×	×	×	×	
	传播时间×法	★	×	×	×	●	×	◆	◆	×	★	★	◆	×	★	◆	×	★
靶式		★	★	×	×	★	●	◆	×	×	×	◆	×	×	×	×	×	×
热式		×	×	×	×	×	×	★	×	×	★	×	×	×	×	×	×	×
科式力		★	★	×	×	●	◆	◆	◆	×	×	◆	◆	×	×	◆	×	×
插入式		★	-	×	-	-	-	-	-	×	★	-	★	×	★	×	×	×

表 A. 2 不同流量计的性能指数和安装条件

名称	类型	测试性能							安装条件	
		准确度	最低雷诺数	范围度	压力损失	高准确度流量适用性	高准确度总量适用性	公称通径范围 (mm)	传感器安装方位和流量方向	上游直管段长度要求
差压式	孔板	中	2×10	小	中~大	◆	×	50~1000	任意	短~长
	喷嘴	中	1×10	小	小~中	◆	×	50~500	任意	短~长
	文丘里管	中	7.5×10	小	小	◆	×	50~1200 (1400)	任意	短~中
	弯管	低	1×10	小	小	×	×	>25	任意	短~中
	楔形管	中~低	5×10	小	中	×	×	25~300	任意	短~中
	匀速管	低	10	小	小	×	×	>25	任意	短~中
浮子式	玻璃管	低~中	10	中	中	×	×	1.5~100	垂直从上到下	无
	金属锥管	中	10	中	中	◆	×	10~150		无

名称	类型	测试性能							安装条件	
		准确度	最低雷诺数	范围度	压力损失	高准确度流量适用性	高准确度总量适用性	公称通径范围(mm)	传感器安装方位和流量方向	上游直管段长度要求
容积式	椭圆齿轮	中~高	10	中	大	×	★	6~250	水平或垂直	无
	腰轮	中~高	10	中	大	×	★	15~500		无
	刮板	中~高	10	中	大	×	★	25~300		无
	膜式	中	2.5×10	大	小	×	●	15~100		无
涡轮式		中~高	10	低~中	中	★	★	10~500	水平	短~中
电磁式		中~高		中~大	无	★	★	6~3000	水平	无~中
振荡式	涡街	中	无限制	小~大	小~中	◆	×	—	任意	中~长
	旋进涡旋	中	2×10	中~大	中	◆	×	50~150	任意	很短
超声式	多普勒法	低	5×10	中~大	无	×	×	>100(25)	任意	短~长

名称	类型	测试性能							安装条件	
		准确度	最低雷诺数	范围度	压力损失	高准确度流量适用性	高准确度总量适用性	公称通径范围(mm)	传感器安装方位和流量方向	上游直管段长度要求
	传播时间×法	中	5×10	小~大	无	◆	◆	>25	任意	短~中
靶式		低~中	2×10	小	中	◆	×	15~200	任意	短~中
热式		中	10	中	小	×	×	4~30	任意	无~中
科式力质量式		高	无数据	中~大	中~很大	★	●	6~15	水平或任意	无
插入式		低	无数据	取决于测量头	小	×	×	>100	取决于测量头	中~长

注：其中的★代表最合适，●代表通常适用，◆代表在一定条件下适用，×代表不适用

附录 B(资料性附录)典型参考案例

B.1 美国马萨诸塞州昆西某有机污染场地

B.1.1 场地概况

该场地在 1951~2000 是一个工业制造工厂，在马萨诸塞州环保部门在 19 世纪 80 年代中期发现该场地土壤和地下水受 VOCs 污染，被划为第二层级。该场地以前是一片湿地，上层沙土，下层粉土。地下水流自东南向东北，水力梯度在整个场地内较为平缓，地下水流速度没有相关材料证明，但估计小于 100 英尺/年。

B.1.2 污染概况

1999 年 4 月，发现 PAHs，随后调查中还发现，该场地污染物还包括含氯挥发性有机污染物和他们的生物降解产物，以及少量的 PCE，TCE，DCE 和 VC。

B.1.3 修复设计

修复分两阶段设计，一开始是两个中试阶段（2000 年和 2001 年），随后在 2002 年进行现场修复。采用高锰酸盐的化学氧化修复技术作为在原有抽出处理修复技术基础上的强化修复措施。

B.1.4 2000 年中试试验及结论

第一次中试试验完成于 2000 年 12 月，确认氧化技术是否适用于该场地。物理参数的监测在 2000 年 12 月 6 日加入高锰酸盐前的 11 月和 12 月进行。地下水样品分析了 VOCs，COD，氯化物，色度和溶解金属（铜，铁，锰和钠）。高锰酸钠是通过 5 口井进行注入，大约共注入 4200 磅氧化剂。

注入氧化剂后地下水的监测每周一次，包括水体颜色、高锰酸盐浓度、其他物理参数。影响半径大约在 10~15 英尺，但试验中也有部分氧化剂通过回填区冒出。在第 5 周和第 12 周对地下水样结果显示 VOCs 浓度减少。氧化剂的注入图见图 B.1。



图 B.1 氧化剂的注入

B.1.5 2001 年中试试验及结论

第二次中试只注入了少量的高锰酸盐（约 400 磅），共采用了两种注入方法，并评价了每种方法的相对效率：3/4-英寸的钢管和 2-英寸的 PVC 管。钻出的土壤样品用来分析土壤氧化剂需求量。

第二次中试试验结果得出影响半径为 15 英尺，并确定了小口径的注入井更有利于高锰酸盐的分布。土壤和地下水中的 VOCs 浓度降低也说明采用高锰酸钾的化学氧化技术针对该场地是可行的。

高锰酸盐的两次中试试验分别于 2000 年 12 月和 2001 年 4 月完成，证实了化学氧化技术适用于该场地。结果指出，采用高锰酸钾能大量降低土壤和地下水中 VOCs 浓度，这说明化学氧化技术针对该场地是可行的。基于这一结论，Raytheon 公司选择扩大化学氧化技术的应用，制定了 2001 年场地地下水修复整体计划，现场施工图见 B.2。



图 B.2 原位化学氧化(注入修复)现场图

B.1.6 2001 年修复计划

高锰酸盐通过 114 个临时的小口径注入点（PVC 或者钢管），采用直接注入的方式，注入深度为地面以下 12~14 英尺。8 个土芯被取出来评价土层结构，同时再一次进行土壤氧化剂需求量试验。由于注入容量的限制，额外增设了 3 个大口径的真空抽出井。

于 2001 年 7 月、8 月和 9 月采集了地下水样品，分析 VOCs 的同时分析了 COD，Cl⁻，色度和溶解金属（Na，K，Fe 和 Mn）。每周还测定了 ORP，DO，pH 和 SC。总共 44680 磅高锰酸盐在 10 周内（2001-09-17~2001-11-30），通过 97 个井被注入。

几个地下水监测井用来监测修复效果，第一次取样在 2001 年 10 月中旬，随后在 2001 年 11 月和 2002 年 3 月进行了采样。监测结果显示，VOCs 浓度降低并且未出现反弹。

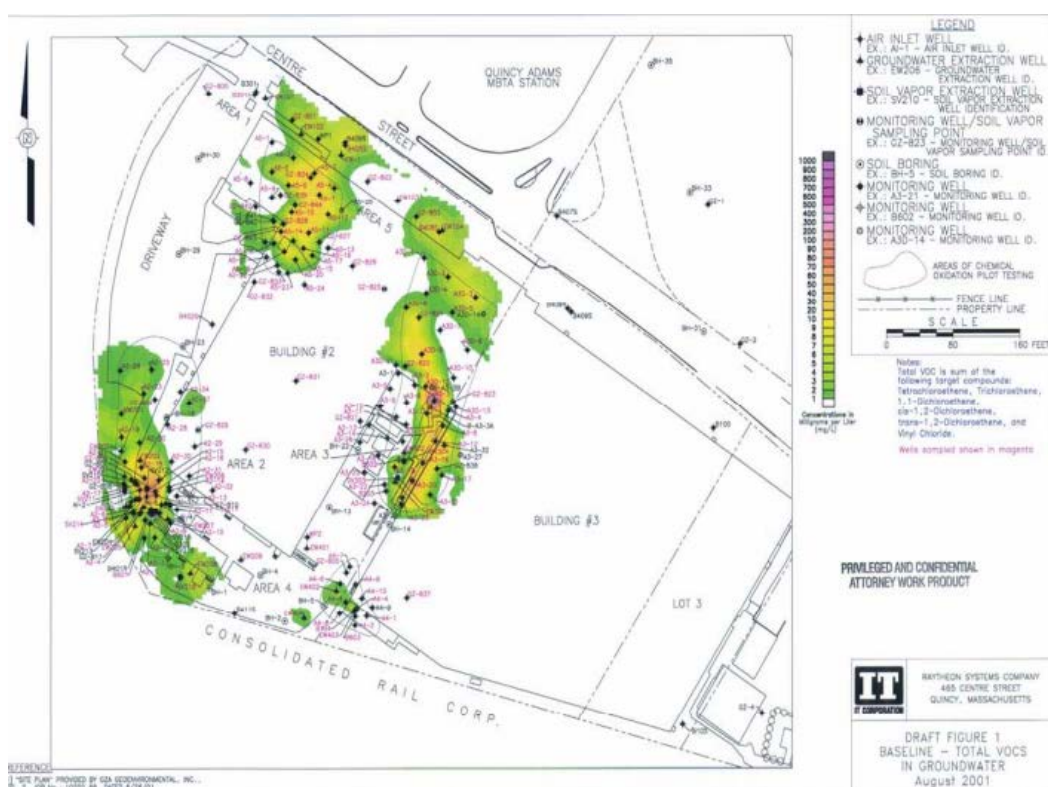


图 B.3 处理前场地 VOCs 的浓度 (总 VOCs>1ppm)

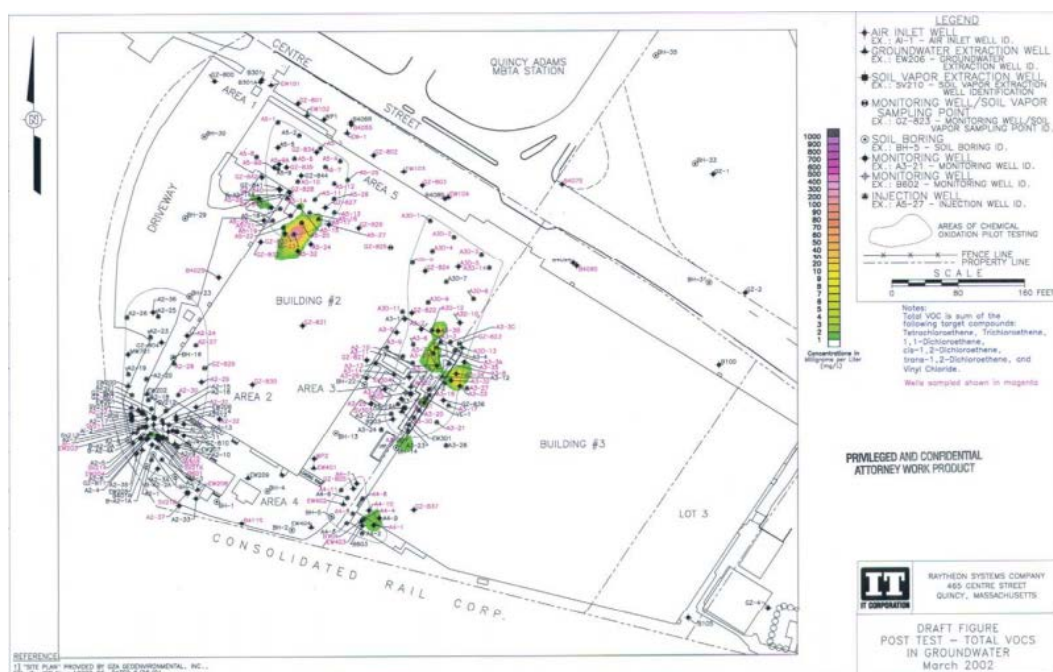


图 B.4 处理后场地 VOCs 的浓度 (总 VOCs>1ppm)

B.1.7 2002 年修复计划

这次修复计划主要针对残留的 VOCs，采用了直接开挖并添加高锰酸钠溶液。对地下水水位进行采集，提供水文地质参数和药剂估算的依据，并将修复结果和补救修复过程编写在报告中。

B.2 常州某地下水有机污染场地

B.2.1 场地概况

该修复区位于江苏省常州市，包含了一个农药厂和两个化工厂，场地分两期开发，首先进行一期场地的修工作。

根据调查，场地地面下 30m 深度范围内地层结构为：地表以下 6m 左右主要为淤泥质或粉质粘土，其下为厚 20m 左右的粉砂。场地 30m 范围内的地下水主要有上层滞水和第 I 承压含水层。上层滞水主要赋存在表层 1.5~2m 的杂填土中，在丰水季节有少量水赋存，枯水季节基本无水。

B.2.2 场地污染概况

地下水中主要关注污染物包括总石油烃，卤代脂肪族化合物（二氯甲烷，四氯化碳，1,2-二氯乙烷，三氯乙烯和四氯乙烯）和单环芳香烃类化合物（甲苯，乙苯，二甲苯）等。地下水修复以 COD_{Cr} 总量及污染物浓度的去除率 $\geq 50\%$ 作为修复目标。

B.2.3 修复设计

修复分两个阶段进行，首先在 2014 年进行场地地下水修复中试项目，随后在 2015 年进行现场修复。采用芬顿试剂及活化的过硫酸盐作为氧化药剂，原位化学氧化注入修复技术的基础上，增加抽出和曝气等强化修复措施。

B.2.4 中试试验及结论

B.2.4.1 试验目的

- 1) 通过室内试验，确定场地化学氧化修复所选药剂对地下水中污染物的去除效果以及投加比；
- 2) 确定井位布点方式的合理性；
- 3) 确定原位注射影响半径及相关参数，并为后期布井确定参数；
- 4) 通过中试实验，确定原位化学氧化注入修复技术以及在该基础上改进的新技术新工艺的修复效果及技术参数。

B.2.4.2 试验过程及结论

1) 小试试验及结论

通过氧化药剂的比选过程以及实际经验，确定采用芬顿试剂以及活化的过硫酸盐作为化学氧化修复过程中使用的氧化剂，并通过小试试验验证其对污染物的去除效果。芬顿试剂小试实验共进行了 2 组，活化的过硫酸盐小试实验共进行 1 组。实验结果显示，这两种药剂均具有良好的氧化效果，可用于场地污染地下水的修复。

2) 中试试验及结论

中试场地内共计有 11 口井，其中 1 口抽水井，6 口注射井，4 口观测井。抽水井的外径为 330mm，井深 28m；注射井外径 63mm，井深 22m；观测井外径 50mm，井深 22m。

为了进一步提高场地修复效率以及降低药剂添加量过高可能造成的高修复成本，根据场地条件，在原有化学氧化修复工艺的基础上，改进出一种地下水抽提注射循环处理技术用于场地污染地下水的修复，该技术通过抽提井和注射井结合，抽出后的水利用曝气或添加药剂等手段去除其中的污染物，通过注射井将处理后的水注入到地下，使地下水在地表地下之间循环流动，增加地下水的修复效果。并通过中试试验对其进行验证。

3) 原位化学氧化注入修复结果

原位化学氧化注入修复结果显示，关注污染物浓度在技术实施后均显著降低，并满足修复目标要求，为避免修复过程中出现的反弹现象，可通过对地下水进行周期性多次药剂注入或通过技术改进来提高固相中污染物向液相中释放的速率，来有效避免可能的反弹现象。

地下水抽提注射循环处理技术结果显示：采用曝气技术对抽提出的地下水进行强化处理，可去除水中大部分的挥发、半挥发有机污染物，处理过的水经与氧化药剂混合后，再次注入到地下水中，对水中固相污染物进行冲刷，可大幅降低药剂的使用量，减少修复成本，且提高场地总体修复效率，可对场地目标污染物较好的完成修复，适用于场地地下水的修复工程中。

B. 2. 5 修复计划

B. 2. 5. 1 注入井共 135 口

对该场地采用原位化学氧化及地下水抽提注射循环处理技术进行修复治理，注入井共 135 口，另外增加 6 口大口径抽水井和曝气设施。

B. 2. 5. 2 具体步骤为：

- 1) 测定地下水污染物浓度、pH 值等参数，作为污染本底值；
- 2) 进行系统设计，建设注射井、降水井、曝气设备及监测井；
- 3) 配置适当浓度的药剂溶液，向污染区域进行注射，对部分区域同时进行抽出曝气和回灌；

4) 药剂注射完成一段时间后, 采样观察地下水气味、颜色变化情况, 并对地下水污染物浓度进行过程监测;

5) 连续监测达标区域停止药剂注射, 污染浓度检出较高, 或颜色明显异常、异味较重的区域, 则增加药剂注射量或加布注射井, 直至达到修复标准。