



文章栏目：工程创新与行业动态

DOI 10.12030/j.cjee.202009098

中图分类号 X703

文献标识码 A

蒋良伟, 茹凌宇, 李蕾, 等. 应用于道路建设工程的封场垃圾填埋场综合整治案例[J]. 环境工程学报, 2021, 15(8): 2839-2848.

JIANG Liangwei, RU Lingyu, LI Lei, et al. A case study of remediation of closed landfill for road construction [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(8): 2839-2848.

应用于道路建设工程的封场垃圾填埋场综合整治案例

蒋良伟¹, 茹凌宇², 李蕾^{2,*}, 彭韵², 王小铭², 彭绪亚², 朱玉修³

1. 重庆市市政环卫监测中心, 重庆 401147

2. 重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045

3. 重庆渝泓土地开发有限公司, 重庆 401120

第一作者: 蒋良伟 (1971—), 男, 大学本科, 高级工程师。研究方向: 环境卫生工程, 垃圾渗滤液处理。
E-mail: 1151016262@qq.com

*通信作者: 李蕾 (1989—), 女, 博士, 副教授。研究方向: 固体废物污染控制与资源化利用。E-mail: lileicqu@126.com

摘要 以重庆市九龙坡区科技路尾段二期道路整治工程项目为例, 分析了封场后填埋场土地再利用的工程措施及效果。拟建道路穿越了重庆市九龙坡区兴隆垃圾填埋场。通过场地稳定化监测与评估发现, 整治区域内垃圾有机质含量低、产气趋于衰竭, 但部分区域 CH_4 和 H_2S 含量分别达到 66.2%(体积分数)和 $62.2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (质量浓度), 存在气体横向迁移引发燃烧爆炸或影响道路结构的风险, 也易造成空气污染。鉴于此, 本项目设置帷幕灌浆系统、填埋气主动导排及在线监测系统分别用于填埋气的阻隔、疏导和监测。结果表明, 实施帷幕灌浆后, 可切断垃圾填埋场与道路间填埋气的横向通道。当监测系统监测到气体浓度超过预设限值 (CH_4 的体积分数 > 5%, H_2S 的质量浓度 > $0.6 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) 时, 主动抽气导排系统自动启动, 气体浓度可降至报警值以下。因此, 联合帷幕灌浆、填埋气主动导排及在线监测技术可实现对填埋气的有效阻隔与控制, 实现老龄垃圾填埋场场地的安全利用。

关键词 垃圾填埋场; 帷幕灌浆; 填埋气导排; 在线监测

过去 40 年, 我国城市生活垃圾产量以 5.82% 的复合增长率持续增长^[1]。填埋作为最主要的垃圾处理方式, 消纳了近 70% 的生活垃圾^[2], 但也占用了累积达 $3.5 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 的土地资源^[3]。受地区气候条件和垃圾组成等因素影响, 在不加人工调控的情况下, 传统填埋场一般要在封场后 30~50 a 才能完全稳定。因此, 垃圾填埋场不仅占地, 且这种占地效应是长期的^[4-6], 这极大地制约了填埋场地及其周边区域的开发建设。近年来, 随着城市化进程的加快, 原本处于城市远郊区的填埋场逐渐进入城市近郊区甚至主城区范围, 填埋场越发成为城市建设的“眼中钉”^[6]。我国高度重视垃圾填埋/堆放场所的人工整治及土地再利用。国家环境保护“十二五”、“十三五”规划都强调要对垃圾简

收稿日期: 2020-09-14; 录用日期: 2021-04-26

基金项目: 重庆市市政管科学 (2019) 第 14 号; 中央高校基本科研业务费 (2019CDCGHS307)

易处理或堆放设施和场所进行整治,对已封场的垃圾填埋场和旧垃圾场要进行生态修复、改造^[6]。国务院《关于鼓励和引导民间投资健康发展的若干意见》国发〔2010〕13号中更指出,鼓励民间资本参与土地整治和矿产资源勘探开发。另外,《生活垃圾填埋场降解治理的监测与检测》《生活垃圾填埋场稳定化场地利用技术要求》等政策法规的相继颁布实施,也大大推动了填埋场的治理及土地开发利用工作。

国内外封场后的填埋场主要利用方向有休闲娱乐用地(如生态公园、高尔夫球场等)、林地、农业用地(如植物园、苗圃等)、硬化用地(如道路、停车场等)等^[7-9]。如杭州天子岭填埋场、广州李坑填埋场封场后建成了生态公园;深圳玉龙坑填埋场内建起拥有60个标准杆位的高尔夫球场;武汉市金口垃圾填埋场修复后成为了第十届中国国际园林博览会主会场等^[6,10]。然而,这些封场填埋场工程往往是采取异地转运、原位封场、开挖筛分、好氧稳定化等技术,对整个填埋场进行污染整治与修复,涉及的工期长、投资高^[6,11-12]。相比之下,因局部占用填埋场土地,需采取的小范围整治工程则鲜见报道。

本文阐述科技路尾段二期道路局部穿越重庆市兴隆垃圾填埋场时,所采取的填埋场综合整治措施,并分析工程取得效果,以期为类似工程项目提供参考。

1 项目背景

1.1 工程概况

1) 工程原始概况。重庆市九龙坡区兴隆垃圾场始建于1989年,占地面积33 000 m²,垃圾填埋总量(8~10)×10⁵ t,垃圾层厚度20~30 m。该填埋场位于U形沟谷区,建设期未设置雨污分流及填埋气收集导排等系统。但垃圾场在2003年底实施规范封场时设置了雨水导排系统,将导排的雨水排入周边彩云湖。垃圾表面还覆盖了HDPE膜,以防止雨水入渗并阻隔气体。在渗滤液导排处理方面,考虑到场底以第四系黏土层为主,透水性差,故将其作为天然防渗层;场底存在自然坡度,堆体产生的渗滤液会自流至场地最低点(即下河谷口垃圾坝前),故在此处设置了渗滤液导排系统。鉴于检测到的渗滤液COD和氨氮分别小于200和30 mg·L⁻¹,故收集的渗滤液直接排入周边污水处理项目中集中处理。此外,还单独设置了填埋气收集竖井及水平收集管道,所抽气体集中到垃圾场北侧火炬燃烧处理。

2) 前期整治情况。2005年和2009年,兴隆垃圾场东南侧及西侧分别进行了达飞彩云小区和渝高香洲小区的开发建设。在2个项目建设前,开发商都曾对其涉及的垃圾场边界进行整治,主要措施有场地清理换填、气体阻隔与导排及可燃气体报警等。由于这2个项目的开发建设,垃圾场顶部被建筑弃土覆盖,覆土厚度达7.6~19.0 m。

3) 道路工程概况。科技路尾段道路为2016年规划的市政道路。道路位于重庆市高新区二郎科技新城,始于科技路中新区段,止于红狮大道。道路选址穿越了兴隆垃圾填埋场南侧场地,设计标高高于垃圾封场层10 m以上。地质勘探结果显示,拟建道路下部为建筑、生活垃圾形成的杂填土。地基承载力特征值160 kPa。道路沿线地形平坦,相对高差约3 m。涉及区域未见危岩崩塌、滑坡、泥石流、地下采空区、地下洞室等不良地质现象,仅存在填土不均匀沉降和湿陷性问题。另外,下伏基岩连续稳定,无断裂构造,拟建场地基本稳定。科技路尾段一期道路已于2016年修建完成,本项目涉及的二期道路计划工期为2018年。道路全长324.47 m,侵占填埋场土地9 910 m²。道路区位及与周边环境的关系见图1。

1.2 场地利用风险分析

填埋场封场后开展土地利用应符合现行国家标准《生活垃圾填埋场稳定化场地利用技术要求》(GB/T 25179-2010)的规定。判定指标包括封场年限、填埋物有机质含量、地表水水质、填埋

堆体中气体浓度等。此填埋场封场年限大于 10 a；且道路穿越区为旱地，无地表水体，故着重对填埋场中垃圾的理化性质及产气情况进行了监测。

监测范围包括整治区域及其外扩 20 m 范围，共设置 13 个监测点进行填埋气 (CO 、 H_2S 、 CH_4 、 O_2) 的监测 (见 图 1)。对填埋场内的 JC2、JC3、JC4、JC7 这 4 个监测点进行钻孔取样，分析垃圾含水率、机质含量和生物可降解度 (biologically degradable matter, BDM)。结果显示，监测区域内垃圾含水率为 20%~30%，有机质含量约 2%，BDM 为 11%~13%。我国湿垃圾含水率往往在 45%~65%^[13]。填埋过程中，随着垃圾的降解矿化，垃圾孔隙度增加，持水性能会变差，故含水率呈降低趋势^[14]。本填埋场含水率与稳定度良好的填埋场垃圾含水率是可比的^[14]，且其有机质含量也已满足 GB/T 25179-2010 中的场地稳定化高度利用要求 (<9%)，表明产气已趋于衰竭。这与监测到的单孔产气量小于 $0.05 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 是一致的。而 BDM 高达 10% 以上则指示垃圾稳定度不足，这可能是部分区域检测到高浓度 CH_4 和 H_2S 的原因。从 图 2 可知，13 个监测井中，有 7 个点存在高浓度 CH_4 和 H_2S 。其中， CH_4 的体积分数最大可达 66.2%， H_2S 的质量浓度最高可达 $62.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

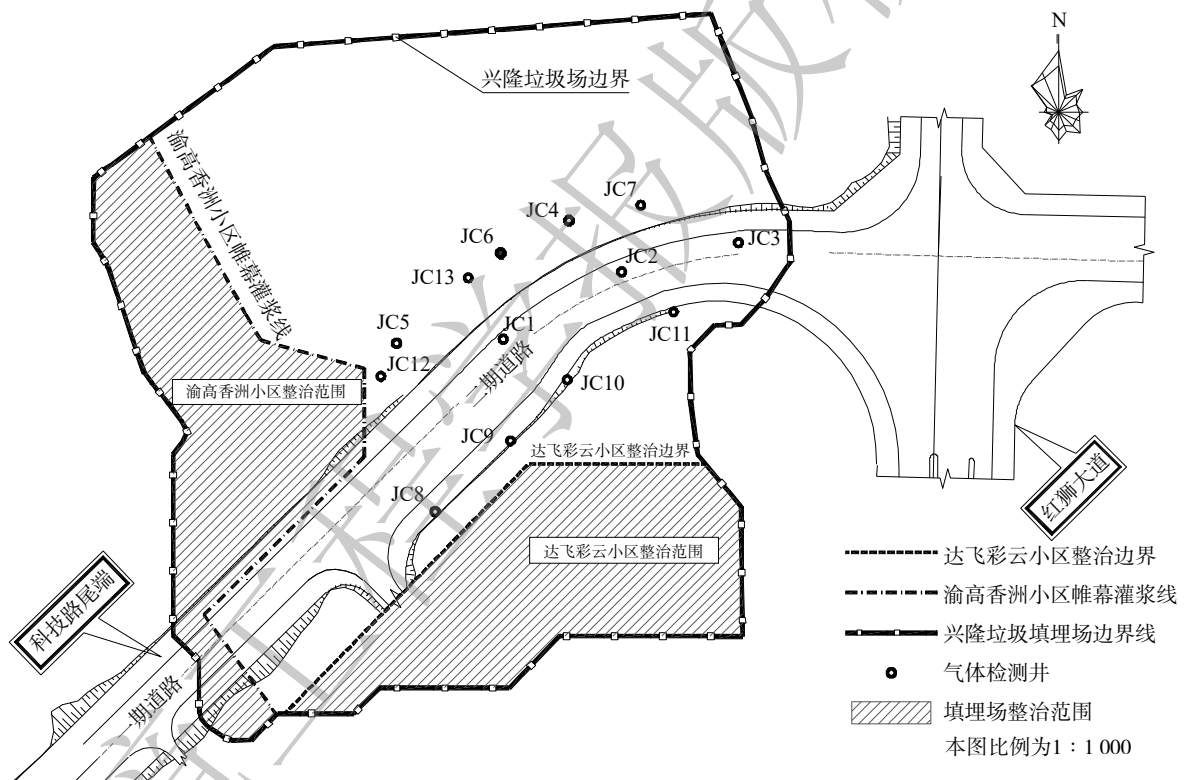


图 1 道路区位及周边环境

Fig. 1 Location and surroundings of Keji road

有研究者指出，垃圾填埋场的 BDM 小于 3% 时，方可达到高度稳定状态^[15]。大量简易填埋场在 BDM 低至 5% 时仍能在填埋气中检测到高浓度 CH_4 ^[15-17]，故本研究的监测结果是合理的。填埋气中的 CH_4 源自于有机物的厌氧产沼，而 H_2S 则可能是厌氧微生物 (主要是硫酸盐还原菌) 利用场内剩余 BDM 还原早期积累的硫酸盐而产生。杜耀等^[18]曾指出这是老垃圾场 H_2S 的主要来源，且很多填埋场都存在严重的 H_2S 污染，如北京阿苏卫垃圾填埋场 H_2S 质量浓度高达 $179.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，国外有些填埋场的 H_2S 质量浓度甚至超过 $5000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。但也有部分区域未检测到 CH_4 和 H_2S ，而是存在高浓度 O_2 ，这可能是封场膜局部损坏，导致空气进入了堆体造成的。此外，堆体 CO 浓度基本都在 $1.25 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下，这与前期研究者指出的此类气体在填埋气中体积分数极低是一致的^[19]。

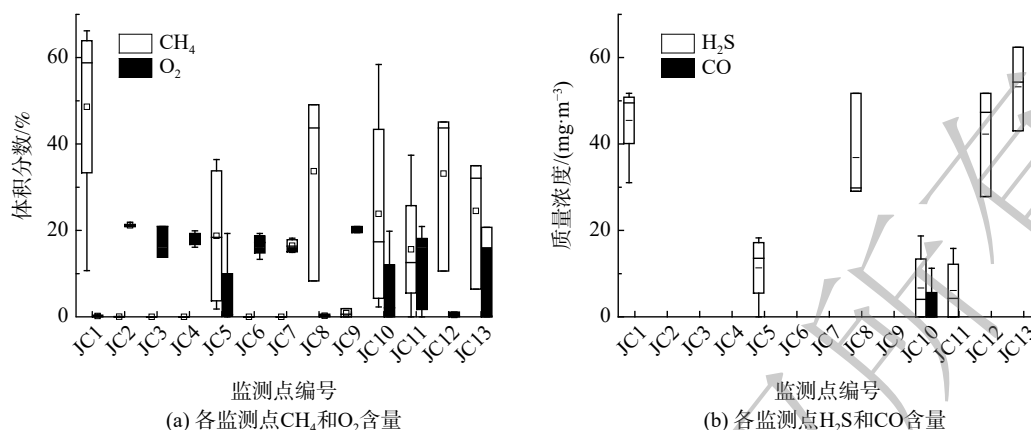


图2 监测点填埋气浓度分布图

Fig. 2 Distribution of landfill gas concentration at monitoring points

综上所述,本填埋场垃圾填埋年限、有机质含量等指标已满足 GB/T 25179-2010 的中度甚至高度开发利用标准。拟建道路周边无地表水体,且设计标高远高于填埋场的渗滤液水位,不会与之相互干扰,因此,无渗滤液影响道路施工的风险。填埋场在规范封场时已整平,地基承载力良好,因此,也无堆体稳定性风险。但部分区域 CH₄ 浓度和恶臭气体浓度较高,存在燃烧爆炸及影响道路结构的风险,也易造成空气污染^[20]。基于此,场地利用之前对填埋场进行适宜地整治是必须的。

2 整治措施

本项目主要风险在于气体迁移可能引发爆炸、损坏道路结构,拟定采取阻隔、疏导和监测三者相结合的整治措施,确保道路建设及使用安全稳定。1) 在道路左侧采取阻隔墙工艺阻隔填埋气向公路内侧迁移; 2) 设置气体导排系统,采取合适的抽气工艺保证场内的 CH₄ 气体被有效收集及处理; 3) 在两侧按国家标准布设 CH₄ 在线监测系统,实时监控气体浓度情况。此外,本次整治区域有部分与早年实施的渝高香洲小区及达飞彩云小区整治区域重叠。具体而言,道路 K0+424.873~K0+480 段北侧紧邻已实施的渝高香洲整治工程,南侧为已实施的达飞彩云小区整治工程。根据地质勘探报告,该段道路下方为素填土、粉质黏土、泥岩及砂岩组成,已无垃圾堆体。因此,本次整治工程以桩号 K0+480 为分界, K0+424.873~K0+480 段为 A 区域, K0+480~K0+691.877 段为 B 区域。整治分区图见图 3。

2.1 帷幕灌浆工程

B 区道路左侧存在大量垃圾体。由于垃圾纵横向气体渗透系数差异明显,产生的填埋气会优先横向迁移^[21]。为防止整治区域外的填埋气体向道路区域横向扩散迁移,本工程对道路 K0+514~K0+708 段左侧地下垃圾层采取帷幕灌浆阻隔处理,帷幕灌浆深入至基岩。帷幕灌浆本是广泛应用于水工建筑防渗工程和交通工程基础地基工程中的防渗技术,因具有工期短、见效快、设备简单、占地面积小、对环境的影响小、易于控制等优点,近年来也被应用于城市生活垃圾填埋场处理工程。蒋良伟等^[22]在重庆某已封场垃圾填埋场中采用帷幕灌浆技术进行气体防渗,就发现实施帷幕灌浆可有效阻断填埋场与周边建设工程间填埋气的横向逸出通道,从而确保填埋场场地上建设工程的安全性。

帷幕灌浆工程主要包括钻孔施工、水泥浆制备、灌浆施工、控制封孔 4 个环节^[23]。作为帷幕灌浆的基础工程,钻孔的效果好坏直接影响该工程的效果好坏,并关系到整治工程的施工质量^[24]。本工程采用取芯钻孔。帷幕灌浆孔在 B 区域道路左幅人行道边界外扩 5 m 处设置。处理平面长度约 210 m,孔距 1 m,设计分为 2 排,排距 0.8 m,分四序施工,具体见图 4。每孔灌浆自上而下分

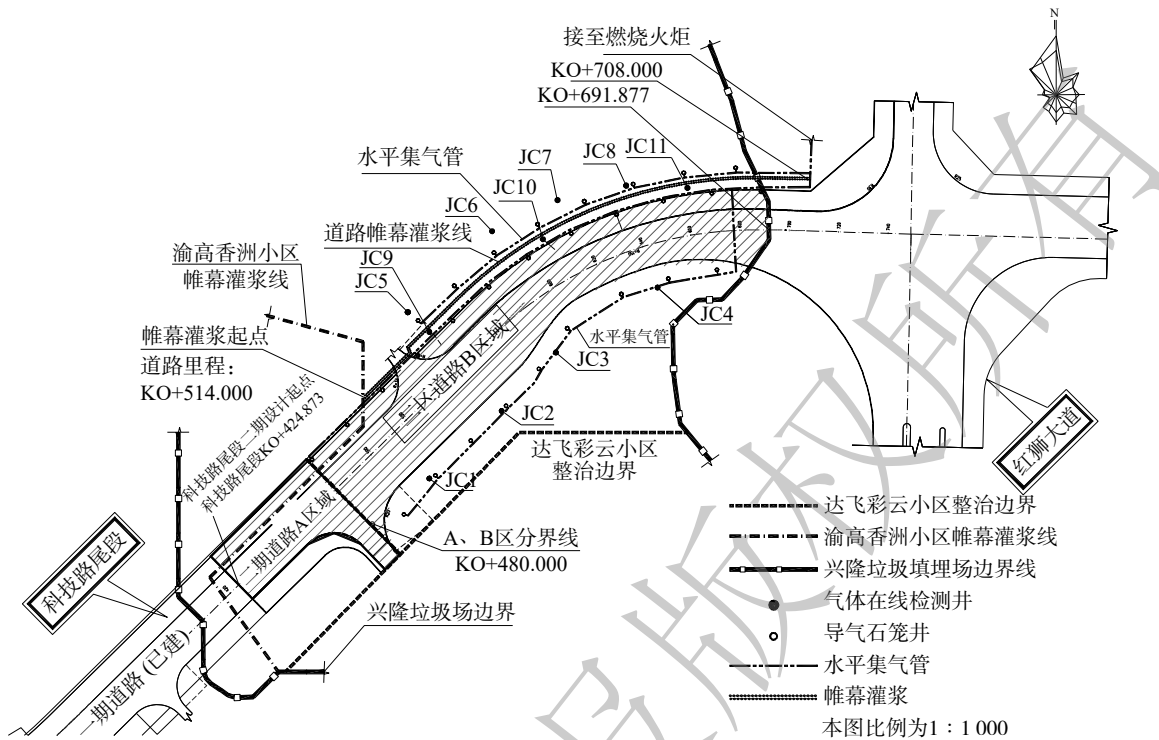


图 3 整治分区示意图

Fig. 3 Zoning of remediation and reclamation area

段进行，每段灌浆长度不大于 5 m。上一段灌浆终凝之后才允许实施下一段灌浆，灌浆完成后用水泥砂浆封孔。灌浆压力根据垃圾的松散度不同，由现场试验确定。具体而言，考虑到垃圾层及填土层中空隙连通性较好，试验时灌浆采用无压灌浆，空隙连通较好时水灰比按 1:1、0.8:1、0.5:1 由稀至浓试验，空隙连通性较差时水灰比按 3:1、2:1、1:1 由稀至浓试验。试验完成后选择最优水灰比进行灌浆。灌浆材料采用 42.5 普通硅酸盐水泥浆液，如出现跑浆情况，采用间歇式灌浆或投入砂料增稠处理。结束灌浆标准为单位吸水量小于 5 Lu。帷幕灌浆墙体渗透系数应小于 $1 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.2 填埋气导排系统

B 区道路下方及右侧也存在垃圾体。由于垃圾量少，该区域不设置帷幕灌浆。若该区域垃圾产生的气体出现局部聚集，也存在燃烧爆炸或损坏道路结构的风险，而填埋气导排是规避上述风险的重要措施，导排方式有主动导排和被动导排^[25]。其中，被动导排系统主要依靠垃圾中设置的填埋气体流通管等，以自然导排的方式来排出垃圾中的气体。该系统受气候和气压变化等因素的影响较大，排气稳定性不高，只适用于对填埋气扩散要求不高的场景。主动导排系统是在填埋气导排管中加装抽气泵，可随时抽取或控制填埋场气体排放的大小，故能实现填埋气的快速收集及防止外漏^[25]。本工程需严格控制填埋气的无序扩散，因此采用主动导排系统。

填埋气导排系统由主动抽气石笼井、水平集气管网和燃烧火炬 3 部分组成。《生活垃圾填埋

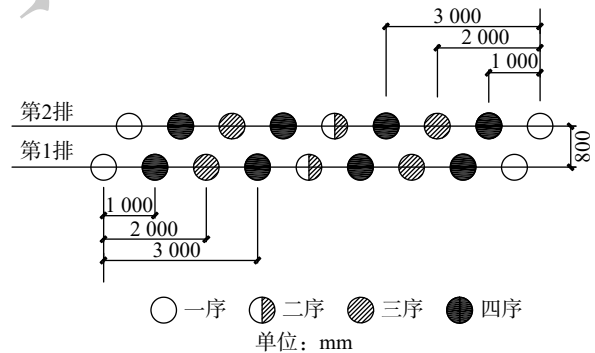


图 4 帷幕钻孔布置示意

Fig. 4 Schematic diagram of curtain grouting drilling layout

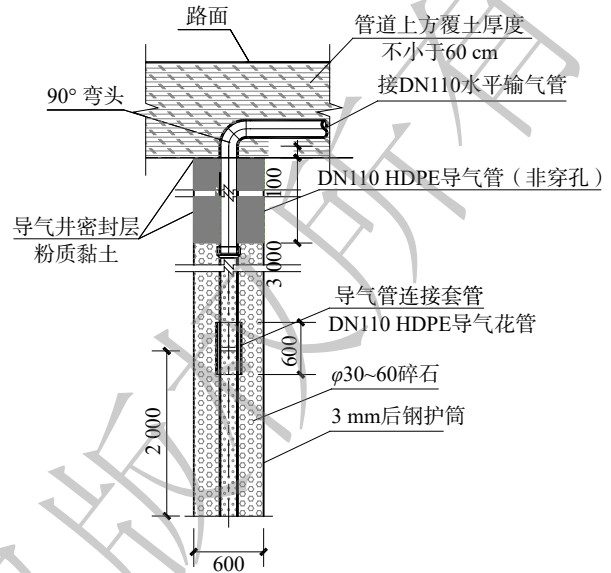
场填埋气收集处理及利用工程技术规范》(CJJ 133-2009)中规定,垃圾堆体中部的主动导排井间距不应大于50 m,边缘布置的不宜大于25 m。然而,为提高填埋气收集效率,在工程中一般会将主动导排井的有效收集间距控制在15~25 m^[19]。本研究中,主动导排石笼井按20 m间距加密布置在B区域道路两侧的人行道,以有效导排道路区域垃圾产生的填埋气体。同时,为进一步减缓整治区域外填埋气体向道路横向扩散,在帷幕灌浆墙北扩5 m处以同样间距加设一排主动导气石笼井。导气石笼井按成孔方式可分为钻孔法成孔和打桩法成孔。由于垃圾压实密度较低,用干钻法打井容易塌方,且空气易通过井孔进入井内,当钻头遇到石块产生火花则容易发生火灾或爆炸。相比之下,打桩法即管桩施工法,属挤土施工,其打入过程比较简单,施工过程中空气不与填埋气体接触。由打桩机将桩管送入设计深度即可,安全性较高^[26],故本工程选用管桩法成孔。石笼井具体做法见图5。导气石笼井上部采用阀门井形式,阀门井内设置流量调节阀、流量计,便于根据实际情况调节各个石笼井的抽气流量。

上述导气石笼井通过水平集气管网连接。考虑到填埋气体的腐蚀性及在库区易发生不均匀沉降,水平集气管采用HDPE管。集气管网收集到的填埋气可采用高温焚烧进行无害化处理。因填埋气主要成分为 CH_4 ,具有较高的热值,很多填埋场也会选择将其收集进行热电联产、作为锅炉或工业炉窑燃料或提纯后作为清洁燃料使用^[27-29]。一般进行资源化利用时,需要达到一定产气量。如美国华盛顿特区环保局指出的填埋场填埋气发电项目基本标准有:存量垃圾大于 $1 \times 10^6 \text{ t}$;填埋场仍在运行或封场不久;填埋深度大于12 m^[30]。而本整治区域垃圾存量低,且垃圾场已封场十余年,产气能力衰竭,故没有工程应用价值。考虑到填埋气中 CH_4 具有极强温室效应,在本项目中选择集中燃烧排放作为其无害化处理手段。因此,收集到的填埋气被引至北侧燃烧火炬站燃烧排放。燃烧火炬由进气控制系统、引风机、火炬主体等组成。设计采用撬装站形式,即除火炬塔体外,其余设备均置于撬装房内。该形式具有构造简单、易于维护管理的特点。此外,填埋气导排系统还配备了2台罗茨风机(一用一备)抽气以实现填埋气的主动导排。风机的启停由2.3节的在线监测系统控制。

2.3 填埋气在线监控系统

为便于后期对兴隆垃圾填埋场路段内填埋气体导排情况进行跟踪监测,在A、B区域布置了填埋气在线监测系统以实时监控可燃气体浓度。该系统由监测井、气体预处理系统、固定式 CH_4 和 H_2S 气体检测仪、无线网络服务器等组成(见图6)。

兴隆垃圾场原有8座稳定性监测井位于道路两侧人行道外。现沿用此8座监测井并在帷幕墙与道路边界之间加设3座,燃烧火炬处加设1座,共计12座监测井,进行填埋气体的在线监测(见图3)。监测井的布置方式与前述导气石笼井一致。监测井内气体收集管与地面气体检测仪器相接,并设仪器柜进行保护。检测仪器含固定式 CH_4 、 H_2S 气体检测仪,应用于现场 CH_4 、 H_2S 气体



注:本图比例为1:50,尺寸单位为mm。

图5 导气石笼井大样图

Fig. 5 Detailed drawing of landfill gas well

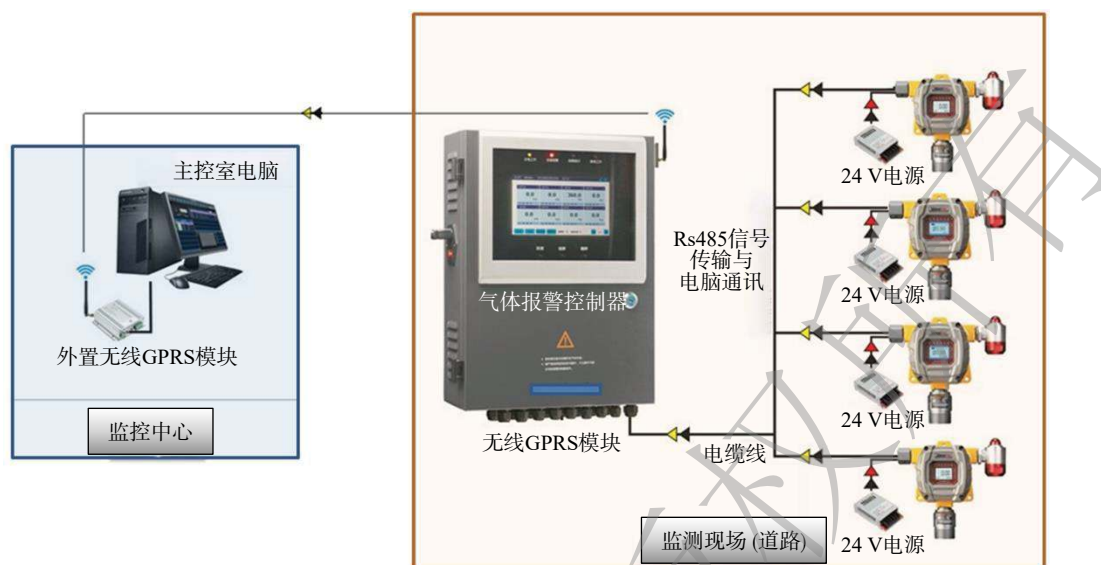


图 6 在线监控系统示意图

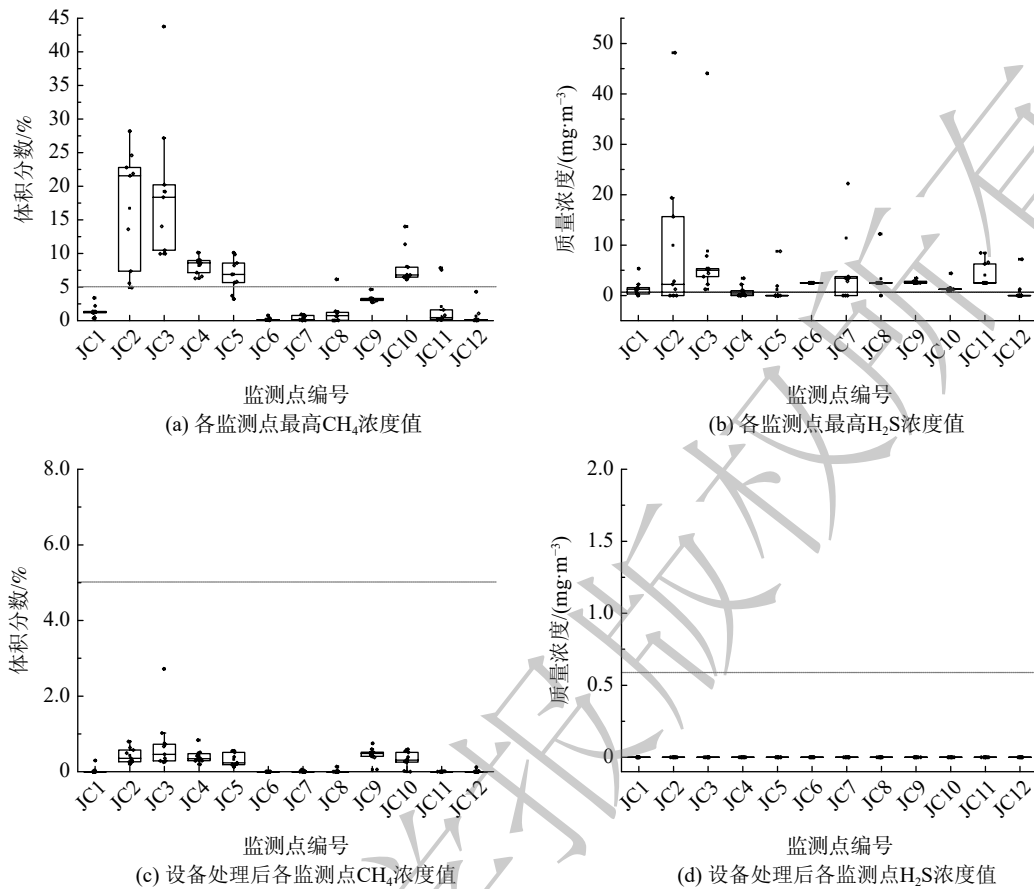
Fig. 6 Schematic diagram of the online monitoring system

含量的 24 h 连续在线监测及温湿度的测量，可同时实现现场显示浓度和远程数据传输。此外，鉴于无线互联网监控服务(如 GPRS)有助于促进环境监测和管理任务的进行^[31]，实现对环境应急事件的实时监控、指挥和管理，提高环保部门对环境突发事件的应急反应能力^[32]。项目中还采用了无线网络服务器对数据进行传输和处理，将采集到的气体探头中的数据通过无线传输 GPRS 发射端进行实时上传，无线传输 GPRS 接收端把接收到的数据传送至电脑后进行处理。当监测系统监测到的气体浓度值达到预设限值时(CH_4 的体积分数 $>5\%$ ， H_2S 的质量浓度 $>0.6 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$)，会发出告警并弹出告警信息(如告警位置、指标类别及其浓度值)。随后填埋气导排系统的抽气风机会启动，开始大风量抽气以使 CH_4 的体积分数低于最低爆炸极限(1.25%)。即此系统不仅有跟踪检测整治效果的作用，还可以在出现异常时调控填埋气导排系统的运行。

3 整治效果评价

从 2018 年 11 月整治系统建立完善并运行以来，通过固定式 CH_4 、 H_2S 气体检测仪对监测井中的 CH_4 、 H_2S 气体进行了连续在线监控。图 7(a) 和 (b) 分别展示了 2019 年 1 月—2020 年 3 月期间各监测点的 CH_4 及 H_2S 浓度。由图可知，位于帷幕灌浆区域外垃圾侧的 JC5~JC8 号监测井测得的气体浓度较低，表明帷幕灌浆措施很好的阻隔了填埋气向道路的横向迁移。而在未设帷幕灌浆的其余区域，受道路下方垃圾产气的影响，JC9~JC11 号监测井部分数据达到了告警限值；而道路右侧的 JC2~JC4 号监测井，受道路下方及右侧垃圾的双重影响，气体浓度更持续超过警戒值。然而，启动主动气体导排系统，经过风机大风量抽气后，各监测井不论是 CH_4 还是 H_2S ，其含量都会急剧下降(见图 7(c) 和 (d))。其中， CH_4 体积分数可降至 1.5% 以下甚至趋近于 0， H_2S 降至报警值以下，可见对于这部分区域，主动填埋气导排措施很好控制了气体聚集及扩散的风险。

鉴于 CO_2 不是 GB/T25179-2010 规定的填埋场中度利用必须的判定指标，在线监测系统中未对此指标进行监测。然而，老垃圾场往往含有高浓度 CO_2 ^[33]。本研究离线检测了道路上 CO_2 的质量浓度，发现尽管此道路通车车流量大(平均单向车流量为 $70 \text{ 辆}\cdot\text{min}^{-1}$)，但 CO_2 的质量浓度为 $(354.13 \pm 82.91) \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，远小于张雪报道的南京市机动车道路上大气 CO_2 的质量浓度平均值 $(965.43 \pm 47.99) \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[34]。由此可见，填埋场并未加剧道路上大气中的 CO_2 浓度，甚至由于开展整治工程可能对降低道路 CO_2 含量产生积极影响。



注：图中虚线为生活垃圾填埋场稳定化场地利用技术要求（GB/T 25179-2010）中规定的 CH_4 或 H_2S 限值。

图7 各监测井气体导排前后各监测点 CH_4 及 H_2S 含量的变化

Fig. 7 Variation of methane and hydrogen sulfide concentrations in each monitoring well before and after gas venting

综上所述，本工程采取的整治措施取得了良好气体阻隔及导排效果，对保证道路的安全建设及后期车辆的安全通行具有积极意义。

4 结论

1) 对项目穿过的封场垃圾填埋场开展稳定性评估，发现垃圾堆体有机质含量低，产气趋于衰竭，但部分区域 CH_4 体积分数为 66.2%， H_2S 的质量浓度为 $62.2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，表明场内存在气体横向迁移引发燃烧爆炸或影响道路结构的风险，也存在空气污染风险。

2) 项目设置帷幕灌浆系统、填埋气主动导排及在线监测系统分别进行填埋气的阻隔、疏导和监测。实施帷幕灌浆后，可切断垃圾填埋场与道路间填埋气的横向通道。当监测系统监测到气体含量超过预设限值 (CH_4 体积分数 $>5\%$ ， H_2S 的质量浓度 $>0.6 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) 时，启动主动抽气导排系统处理，处理后气体浓度可降至报警值以下。

3) 联合帷幕灌浆、填埋气主动导排及在线监测技术可实现对填埋气的有效阻隔与控制，可实现已封场垃圾填埋场场地的安全利用。

参考文献

- [1] 魏潇潇, 王小铭, 李蕾, 等. 1979~2016年中国城市生活垃圾产生和处理时空特征[J]. 中国环境科学, 2018, 38(10): 3833-3843.

- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [3] 孔令强, 田光进, 柳晓娟. 中国城市生活固体垃圾排放时空特征[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(4): 1408-1417.
- [4] LANER D, CREST M, SCHARFF H, et al. A review of approaches for the long-term management of municipal solid waste landfills[J]. *Waste Management*, 2012, 32(3): 498-512.
- [5] 韩祖光, 郭小平, 周晔, 等. 北京黑石头填埋场治理后期土壤质量评价[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(9): 5319-5325.
- [6] 李玲, 王颀军, 唐跃刚, 等. 封场垃圾填埋场的治理与城市土地可持续利用[J]. *环境卫生工程*, 2013, 21(3): 20-22.
- [7] O'DONNELL S T, CALDWELL M D, BARLAZ M A, et al. Case study comparison of functional vs. organic stability approaches for assessing threat potential at closed landfills in the USA[J]. *Waste Management*, 2018, 75: 415-426.
- [8] HRAD M, HUBER-HUMER M. Performance and completion assessment of an in-situ aerated municipal solid waste landfill- Final scientific documentation of an Austrian case study[J]. *Waste Management*, 2017, 63: 397-409.
- [9] CAMERINI G, GROPPALI R. Landfill restoration and biodiversity: A case of study in Northern Italy[J]. *Waste Management & Research*, 2014, 32(8): 782-790.
- [10] 曹丽, 陈娜, 胡朝辉, 等. 垃圾填埋场: 世界最大的生态修复案例: 以武汉市金口垃圾填埋场为例[J]. *城市管理与科技*, 2016, 18(3): 24-27.
- [11] 马先芮, 胡佳晨, 王欢, 等. 好氧生物治理技术在瑞安东山垃圾填埋场治理中的应用[J]. *广东化工*, 2019, 46(13): 157-159.
- [12] 胡健明. 简易填埋场内存量垃圾治理技术浅析[J]. *广州化工*, 2019, 47(14): 139-141.
- [13] 何海杰, 兰吉武, 高武, 等. 压缩空气排水井在填埋场滑移控制中的应用及分析[J]. *岩土力学*, 2019, 40(1): 1-8.
- [14] 李玲, 王颀军, 唐跃刚, 等. 长春市简易垃圾填埋场中垃圾特性研究[J]. *环境保护科学*, 2015, 41(6): 72-75.
- [15] 唐嵘. 封场非正规垃圾填埋场好氧降解快速稳定技术及应用研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2012.
- [16] 高斌. 固体好氧生物反应技术在存量垃圾治理中的应用[J]. *广东化工*, 2018, 45(11): 217-220.
- [17] 戴小松, 邵靖邦, 叶亦盛, 等. 垃圾填埋场好氧生态修复技术在武汉金口垃圾填埋场治理工程中的应用[J]. *施工技术*, 2016, 45(S2): 699-703.
- [18] 杜耀, 方圆, 沈东升, 等. 填埋场中硫化氢恶臭污染防治技术研究进展[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(z1): 269-275.
- [19] 迟军永, 张忠原. 垃圾场填埋气收集导排和处理利用的研究[J]. *低碳环保与节能减排*, 2020, 39(1): 150-152.
- [20] LOHILA A, LAURILA T, TUOVINEN J, et al. Micrometeorological measurements of methane and carbon dioxide fluxes at a municipal landfill[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(8): 2717-2722.
- [21] 刘盛涛, 郑有飞. 基于产气模型对填埋场垃圾产气速率与气压的估算[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(26): 334-339.
- [22] 蒋良伟, 刘元元, 吴正松, 等. 垃圾填埋场地利用中的气体阻隔和承载力强化[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(11): 127-130.
- [23] 陈鹏举. 水利工程施工中帷幕灌浆施工技术的应用分析[J]. *建材发展导向(上)*, 2019, 17(3): 269.
- [24] 刘永桃, 孙航舰. 水利工程施工中帷幕灌浆施工技术的应用[J]. *装饰装修天地*, 2019(23): 382.
- [25] 王霄峰. 包头市东河区生活垃圾卫生填埋场(旧场)封场方案设计[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2017.
- [26] 李伶俐, 宋永刚, 刘建平. 某简易垃圾填埋场封场工程设计要点[J]. *市政技术*, 2019, 37(4): 215-217.
- [27] 张静. 北京六里屯垃圾填埋场填埋气利用途径与效益分析[J]. *环境卫生工程*, 2018, 26(3): 26-28.
- [28] 余召辉. 崇明生活垃圾填埋场填埋气产量估算及利用途径分析[J]. *环境卫生工程*, 2016, 24(2): 20-24.
- [29] 董辉. 老港综合填埋场生活垃圾填埋运行现状及成本分析[J]. *环境卫生工程*, 2018, 26(4): 78-80.
- [30] 张相锋, 肖学智, 何毅, 等. 我国垃圾填埋气发电项目利用清洁发展机制的可行性研究[J]. *太阳能学报*, 2007, 28(9): 1045-1048.
- [31] TSOU M H. Integrated mobile GIS and wireless internet map servers for environmental monitoring and management[J]. *American Cartographer*, 2004, 31(3): 153-165.

- [32] SU L I, ZHUANG D F. Long-range command system on environment emergency based on GSM/GPRS and 3S technology[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 29(1): 40-42.
- [33] 贾明升, 王晓君, 陈少华, 等. 简易生活垃圾填埋场温室气体的排放研究[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(3): 136-141.
- [34] 张雪. 南京市机动车CO₂和CH₄排放特征及估算分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.

(责任编辑: 靳炜)

A case study of remediation of closed landfill for road construction

JIANG Liangwei¹, RU Lingyu², LI Lei^{2,*}, PENG Yun², WANG Xiaoming², PENG Xuya², ZHU Yuxiu³

1. Chongqing Municipal and Environmental Sanitation Monitoring Center, Chongqing 401147, China

2. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China

3. Chongqing Yuhong Land Development Co., Ltd., Chongqing 401120, China

*Corresponding author, E-mail: lileicqu@126.com

Abstract Taking the 2nd stage construction project at the rear of Keji Road in Jiulongpo District of Chongqing as an example, this paper analyzed the utilization effects of the applied engineering measures on closed landfill sites. The proposed road is going to cross Xinglong landfill site in Jiulongpo District, Chongqing. According to the results of site stabilization monitoring and evaluation, the organic matter content of landfilled waste in the reclamation area was low and the gas production tended to be exhausted. However, the methane and hydrogen sulfide content in some regions remained as high as 66.2% and 62.2 mg·m⁻³, respectively, suggesting potential risks of fire and explosion caused by gas migration, affecting road structure or causing air pollution. In view of this, the configuration of curtain grouting, landfill gas venting and online monitoring systems were applied in this project to block, transport and monitor landfill gas. Results showed that the implementation of curtain grouting can effectively cut off the path of gas migration between closed landfill and the proposed road area. In addition, when the gas concentration was detected by the monitoring system exceeding corresponding limitation (methane>5%, hydrogen sulfide>0.6 mg·m⁻³), gas concentration can be reduced to below the alarming values by the active landfill gas venting system. Therefore, the combination of curtain grouting, landfill gas venting and online monitoring systems can effectively block and control the landfill gas in order for safe utilization of aged landfill sites.

Keywords landfill site; curtain grouting; landfill gas venting; online monitoring