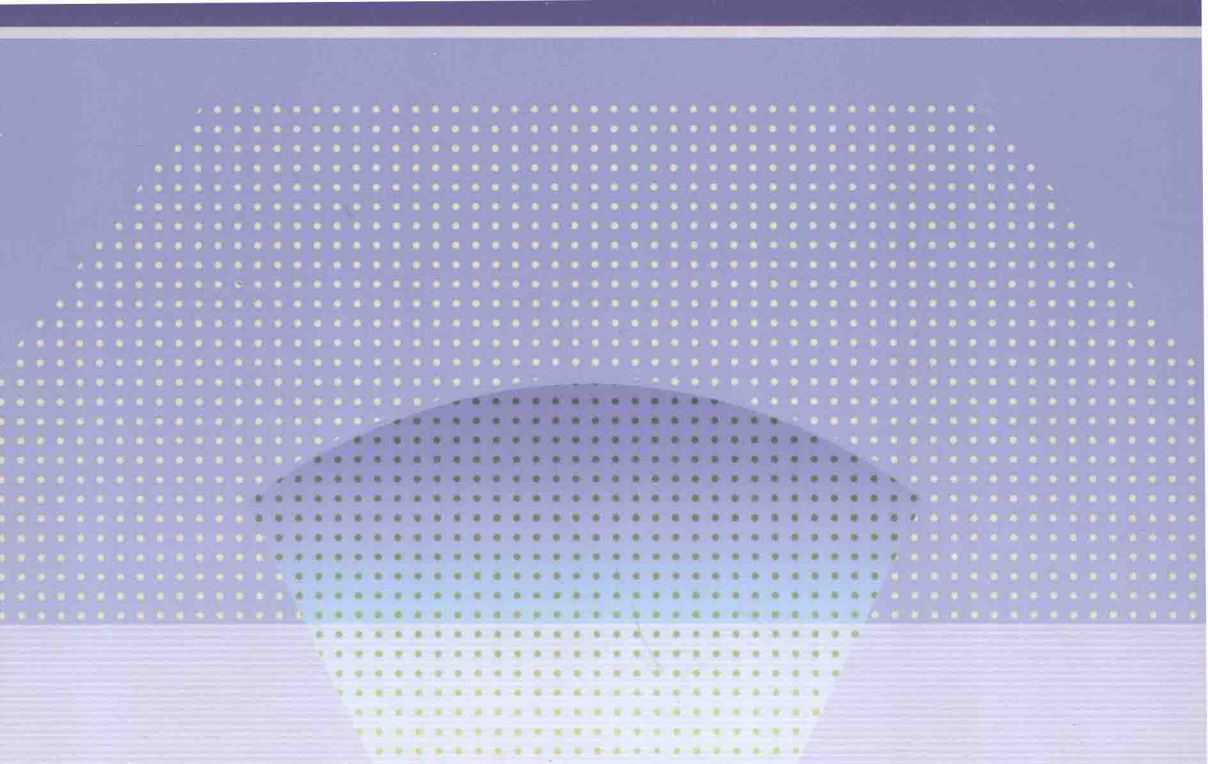
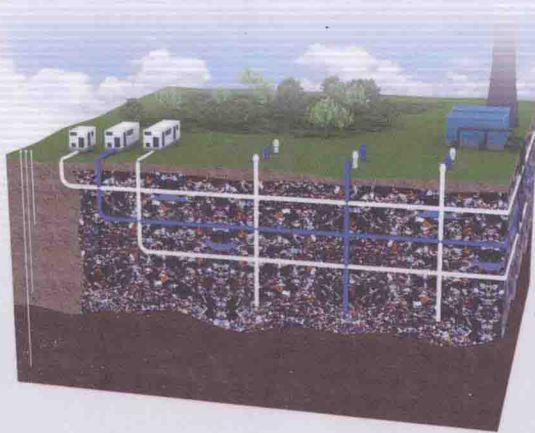




生活垃圾填埋场气液运移 致灾机理与防控

薛强 赵颖 刘磊 万勇 陈亿军 著



科学出版社

生活垃圾填埋场气液运移 致灾机理与防控

薛强 赵颖 刘磊 万勇 陈亿军 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统总结作者 10 多年来在生活垃圾填埋场气液运移致灾机理与防控技术方面的研究成果,包括垃圾填埋气体释放迁移机理及资源化利用、渗沥液污染物释放传输机理与远程在线监测技术、防渗系统性能演化特性与生态屏障技术、封场覆盖系统开裂失效机制与生态污泥腾覆覆盖技术等。本书内容涵盖了生活垃圾填埋场气液产生运移机理、防渗和封场覆盖系统破坏机制及灾害防控技术等方面内容。全书理论性和技术性相结合,科学研究与工程实践相结合,力求内容系统全面而简洁、深入和实用。

本书适合环境工程、岩土工程、固体废弃物处置工程及新能源科学与工程等专业的高年级本科和研究生作为教学参考书使用,也可供相关科学研究、工程设计和工程管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

生活垃圾填埋场气液运移致灾机理与防控/薛强等著. —北京:科学出版社, 2017. 4

ISBN 978-7-03-047929-7

I. ①生… II. ①薛… III. ①垃圾处理-卫生填埋场-废气治理-灾害防治②垃圾处理-卫生填埋场-废液处理-灾害防治 IV. ①X70②X4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 061906 号

责任编辑:孙伯元 刘宝莉 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:照 望

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 4 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 4 月第一次印刷 印张:23 1/4

字数:450 000

定价:145.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

我国垃圾填埋场工程特性复杂,填埋场运行过程中存在渗沥液渗漏污染和填埋气体气涌失调、防渗系统和封场覆盖系统破坏失效等重大环境灾害隐患。因此,准确表征填埋场污染物释放传输规律,精确监控和预警填埋场灾害演变过程,有效防控垃圾填埋场环境与安全灾害的发生已成为我国垃圾填埋场亟待解决的核心重大工程需求。

近年来,本书作者一直致力于开展生活垃圾卫生填埋场环境与安全灾变控制方面的理论研究及灾变调控方法与调控技术的开发工作,并在国家自然科学基金专项基金、国家自然科学基金面上项目、国家“973”课题、“863”课题及中国科学院重要方向性项目等支持下,经 10 多年科学研究和技术攻关,形成了生活垃圾填埋场气液运移致灾机理与防控方面的创新性研究成果。本书是对作者多年来科学研究和技术开发工作的系统性总结。

本书针对垃圾填埋场运行过程中气液运移引发的典型环境灾害(包括气体和渗沥液污染物渗漏污染、底部衬垫及覆盖系统渗漏失效等)的重大工程难题,以多学科交叉研究方法为牵引,系统分析了垃圾填埋场气液运移灾变机理,提出了一系列垃圾填埋场灾变孕育、发生、发展及调控的新理论、新方法、新设备和新技术,为广大科技工作者与工程技术人员提供了垃圾填埋场气液致灾过程预测与评价分析方法,并提出了灾害防控的工程技术解决方案,具有重要的理论价值和工程应用价值。书中探讨的关键性科学问题涉及岩土工程、环境工程、生物工程和环境地球化学等多个领域,对各学科间的交叉和融合起到了推动作用。

本书共五章,从垃圾填埋场气液运移机理、防渗和封场覆盖系统破坏失效机制以及灾害防控技术等方面开展了系统研究和深入分析。第 1 章为绪论,由赵颖、刘磊、万勇编写;第 2 章为垃圾填埋气体释放迁移机理及收集系统协同优化调控方法,由薛强、刘磊编写;第 3 章为垃圾渗沥液污染物释放传输机理与在线监测技术,由薛强、赵颖编写;第 4 章为垃圾填埋场防渗系统性能演化特性与生态屏障技术,由薛强编写;第 5 章为垃圾填埋场封场覆盖系统开裂失效机制与生态污泥腾发覆盖技术,由薛强、万勇、陈亿军编写。全书由赵颖统稿。

与本书内容相关的研究工作得到了中国科学院武汉岩土力学研究所环境土力学与工程学科方向组研究人员的通力协作。特别感谢席本强、陆海军、张乾、蔡光华、胡竹云、王静、曾刚、许越、李江山等参加的部分研究工作,以及张亭亭、王士权、

马骏、黄茜等在书稿编排、整理和校阅工作中付出的辛勤劳动。同时,河南百川畅银环保能源股份有限公司、宜昌市固废处置管理中心、武汉环境投资开发集团有限公司等单位为项目研究和本书的编写提供了试验场地、试验材料和相关工程资料,在此表示衷心的感谢。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.1.1 垃圾填埋场环境与安全灾变问题	1
1.1.2 垃圾填埋场工程难题与科技问题	4
1.2 国内外研究现状	6
1.2.1 垃圾填埋气体释放迁移机理及收集利用研究进展	6
1.2.2 垃圾渗沥液污染物释放传输机理及监测研究进展	9
1.2.3 垃圾填埋场防渗系统性能演化特性及渗控研究进展	14
1.2.4 垃圾填埋场封场覆盖系统开裂失效机理与控制研究进展	21
第 2 章 垃圾填埋气体释放迁移机理及收集系统协同优化调控方法	25
2.1 填埋气体释放迁移耦合数学模型	25
2.1.1 填埋气体释放迁移模型基础形式及方程	25
2.1.2 填埋场内温度释放过程定量描述	26
2.1.3 填埋气体释放迁移生化-渗流-热耦合动力学模型	27
2.2 填埋气体收集系统协同优化调控方法及应用	28
2.2.1 填埋气体收集系统协同优化调控方法	28
2.2.2 河南省某垃圾填埋场填埋气体收集系统协同优化调控与井群设计	32
2.2.3 湖北省某垃圾填埋场填埋气体收集系统协同优化调控与井群设计	42
第 3 章 垃圾渗沥液污染物释放传输机理与在线监测技术	64
3.1 垃圾渗沥液产生及运移规律	64
3.1.1 垃圾填埋堆体内源水产生规律	64
3.1.2 垃圾填埋堆体渗透系数演化规律	70
3.1.3 垃圾土-水特征曲线测试及参数反演	73
3.2 垃圾渗沥液污染物释放传输数值仿真分析	78
3.2.1 渗沥液污染物释放传输数学模型	78
3.2.2 渗沥液污染物释放传输数学模型求解	89
3.2.3 渗沥液污染物释放传输数学模型工程应用	98
3.3 垃圾填埋场污染物远程在线监测系统	140
3.3.1 远程在线监测系统硬件组成	140

3.3.2	远程在线监测系统软件开发	148
3.3.3	远程在线监测系统的工程应用	156
第4章	垃圾填埋场防渗系统性能演化特性与生态屏障技术	165
4.1	渗沥液侵蚀下 HDPE 土工膜抗拉及刺破特性	165
4.1.1	渗沥液侵蚀下 HDPE 土工膜抗拉及刺破试验	165
4.1.2	渗沥液侵蚀下 HDPE 土工膜抗拉及刺破特性演化规律	169
4.2	高浓度溶液侵蚀下 GCL 渗透特性	178
4.2.1	高浓度溶液侵蚀下 GCL 渗透试验	178
4.2.2	高浓度溶液侵蚀下 GCL 渗透特性演化规律	180
4.3	渗沥液侵蚀下黏土固化结石体渗透特性演化与微观机理	189
4.3.1	渗沥液侵蚀下黏土固化结石体渗透特性演化规律	189
4.3.2	渗沥液对黏土固化结石体侵蚀作用的微观分析	195
4.4	可控黏土胶凝固结生态屏障技术及应用	214
4.4.1	可控黏土胶凝固结生态屏障材料	214
4.4.2	可控黏土胶凝固结生态屏障技术	219
4.4.3	可控黏土胶凝固结生态屏障技术工程应用案例	225
第5章	垃圾填埋场封场覆盖系统开裂失效机制与生态污泥腾发覆盖技术	236
5.1	填埋场封场覆盖系统开裂失效机理	236
5.1.1	干湿循环作用下压实黏土层开裂失效机理	236
5.1.2	开裂过程中压实黏土层热-水-气迁移规律	249
5.2	填埋场封场覆盖系统开裂失效过程数学模型及应用	255
5.2.1	封场覆盖系统开裂失效数学模型及求解	256
5.2.2	封场覆盖系统开裂失效过程数值仿真分析	269
5.3	填埋场封场覆盖系统失效控制的生态污泥腾发覆盖技术	279
5.3.1	生态污泥腾发覆盖技术总体构架	279
5.3.2	生态污泥腾发覆盖材料改性机理	281
5.3.3	生态污泥腾发覆盖材料力学特性	285
5.3.4	生态污泥腾发覆盖边坡冲刷特性	293
5.3.5	生态污泥腾发覆盖系统水分迁移规律	301
5.3.6	生态污泥腾发覆盖防护基材稳定性	310
5.3.7	生态污泥腾发覆盖技术工程应用	321
	参考文献	346

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

1.1.1 垃圾填埋场环境与安全灾变问题

解决垃圾填埋场的生态安全问题是国家环境与安全领域的重大战略需求。我国生活垃圾年产量在 1.5 亿吨以上,且每年以 8% 的速度递增,垃圾的历年堆存量已达 66 多亿吨,垃圾集中处理率约为 64%,无害化处理率仅为 35%。2011 年,国务院专门颁布了《关于进一步加强城市生活垃圾处理工作的意见》,指出城市生活垃圾处理是城市管理和环境保护的重要内容,重点强调了生活垃圾处理对环境与安全影响的重要性和紧迫性。目前,填埋方法是我国垃圾的主要处理方式,但填埋场在运行过程中也逐渐暴露出严重的环境与安全灾变问题,直接影响填埋场的正常运行。

我国城市生活垃圾填埋工程特性复杂,填埋场服役环境极端,频繁引发数万座在役填埋场城市的环境与安全灾害,影响达数十千米、持续时间达上百年,严重威胁城市安全。复杂环境条件下填埋场灾变与控制形势仍然十分严峻。全国 935 座垃圾填埋场中,没有采取防渗措施(防止垃圾渗沥液污染土壤和地下水)的占 34%,仅有 26% 通过环保“三同时”验收。垃圾填埋场环境复杂,具有显著的隐蔽性,致使灾变过程的演化机理尚不明确,灾变问题仍未得到有效解决,与填埋场生态安全相协调的配套保障关键技术缺乏,存在许多安全隐患和灾害性事故,包括填埋气体无组织释放引发的环境污染和垃圾渗沥液潜在性渗漏对土壤水环境的污染、防渗系统失效等问题。

近年来,随着城市环境卫生行业安全运营意识的不断提高,特别是国家颁布实施《安全生产法》以后,生产安全事故的有效预防和控制、重大事故的风险管理已经引起全社会的高度重视。然而,我国生活垃圾填埋场整体生态安全问题十分严重,填埋场工程运营期间事故多发。其重要原因之一是我国垃圾填埋场工程配套的安全监控预警与控制技术滞后于填埋场工程建设的需要,安全监管手段相对比较滞后。垃圾填埋场存在的生态安全隐患已成为制约卫生填埋技术发展的瓶颈。如何控制填埋场灾害性事故发生已成为国家环境与安全领域亟待解决的重大工程难题。因此,开展垃圾填埋工程的安全性灾变控制技术研究对于促进填埋场工程

的安全建设与运营具有重要的理论意义和工程应用价值。

目前垃圾填埋场运行过程中存在的环境与安全灾变问题主要包括污染物渗漏、衬垫防渗系统和封场覆盖系统失效等,亟待从理论、方法和技术上进行有效解决。

1. 垃圾填埋场污染物渗漏

污染物渗漏造成的环境污染问题是垃圾填埋场建设和运营过程中普遍存在的环境与安全灾变问题。垃圾填埋场污染物主要包括垃圾渗沥液和填埋气体两类。垃圾渗沥液是由垃圾分解后产生的内源水与外来水分所形成的高浓度废水,其中化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)和生化需氧量(biochemical oxygen demand, BOD)高达几万 mg/L。渗沥液含有多种有毒有害物质,有机污染物经技术检测有 99 种之多,其中的 22 种已经被列入我国环境保护部和美国国家环保署的重点控制名单,一种可直接致癌,五种可诱发致癌。因渗沥液浓度高,流动缓慢,渗漏持续时间长,其无序释放会导致垃圾填埋场附近土壤和地下水的严重污染,直接威胁生命健康。渗沥液渗入地下后,会使周围地层介质的物性发生变化,土壤被污染后,将会盐碱化、毒化,土壤中的寄生虫、致病菌等病原体能使人致病。垃圾渗沥液渗透也会污染地下水,并最终进入人类的食物链,对整个生态环境系统造成严重破坏。渗沥液对环境的污染还是一个长期的过程,填埋场封场后生物分解过程还会持续 10~20 年,即使在封场后 70~100 年的时间内仍可能有渗沥液渗出。

填埋气体是填埋场内垃圾中可生物降解有机物在微生物作用下产生的一种成分复杂的易燃、易爆和温室性混合气体,对环境、人体健康及人身安全具有潜在威胁。填埋气体成分复杂,含有甲烷、二氧化碳、氨、一氧化碳、氢、硫化氢、氮、氧和其他微量组分,这些气体的无序排放会造成环境隐蔽性污染和爆炸事故的发生,对环境和安全产生极大的危害。当甲烷在空气中的体积比达到 5%~15% 的爆炸范围时,就可能导致爆炸和火灾。填埋气体中的某些组分还会对人类产生各种不同的毒理作用。占主要成分的甲烷是一种强烈的温室效应气体,对温室效应所起的作用比 CO_2 大得多,对环境造成难以逆转的破坏。此外,高压气体如不能及时抽排,还会造成气涌顶膜,破坏封场覆盖系统。

据资料报道,早期的城市垃圾填埋场大多比较简陋,渗沥液和填埋气体渗漏现象频频发生。近几年来,各级政府逐渐重视垃圾的处理问题。在经济发达地区的城市,垃圾填埋技术有了较大发展,处理方法由简单的倾倒、分散堆放向集中处理、卫生填埋方向发展。但由于施工、维护过程中的疏漏,其渗沥液和填埋气体向外渗漏的现象也很难避免。研究认为,目前几乎所有的填埋废弃物防渗层都会渗漏,渗沥液和填埋气体不仅会渗入到土壤和地下水中,还直接污染大气。国内外有关填

埋场污染物污染环境、填埋气体爆炸的事故屡有发生,已成为各界密切关注而又感到束手无策的难题。“十三五”期间,我国垃圾填埋进入高峰期,城市垃圾填埋场污染物渗漏、填埋气体爆炸引发潜在性污染问题 and 安全隐患将会成为各界密切关注的难题。

2. 填埋场衬垫防渗系统失效

为了阻止垃圾渗沥液对填埋场周边的土壤与地下水环境的污染,在填埋场的底部和四侧通常建有防渗系统。近些年来,土工合成防渗材料为基础的衬垫防渗系统广泛应用于填埋防渗工程中。这种衬垫系统不仅具有良好的防渗能力,且具有抗剪强度高、抗沉降能力和吸附能力强、施工方便等优点。可以将废物与周围环境隔离开来,阻止、延迟或限制渗沥液向下迁移而污染地下水。因此,这种衬垫防渗系统在填埋场建设中的应用越来越广泛。

尽管包含有土工织物和黏土层等土工合成材料构成的复合衬垫防渗系统能起到很好的防渗作用,但黏土与土工合成材料、土工合成材料与土工合成材料界面之间的剪切强度较低,衬垫系统可能存在的内部失稳,或者衬垫系统界面发生滑动破坏。由于填埋场中的垃圾填埋堆体会对衬垫产生较大的压应力与剪应力,衬垫防渗系统很可能在压力与剪力的作用下产生比较大的变形,进而引起衬垫防渗系统的破坏。此外,垃圾渗沥液是一种复杂的高浓度化学溶液,通常含有多种离子组分,并且具有一定的酸碱度,它与土工合成材料及岩土介质之间的相互作用将会导致材料孔隙率、材料颗粒的排列方式和介质性状等微观结构发生变化,从而降低材料的抗渗特性。另外,离子交换作用还会使衬垫系统的抗压、抗剪强度发生明显变化。因此,长期赋存于填埋场内的衬垫防渗系统在填埋介质应力和水化学同时作用下,也常会发生破坏失效现象,导致渗沥液和填埋气体的渗漏与环境污染。

3. 填埋场封场覆盖系统失效

为减少垃圾渗沥液的产生及保护填埋场生态环境安全,在垃圾填埋场达到储量后,要求建设填埋场封场系统。封场系统是垃圾填埋场防渗系统的重要组成部分,封场覆盖系统结构稳定性是保障垃圾填埋场安全运行的关键,其质量高低对于填埋场能否保持良好封闭状态至关重要。垃圾填埋场封场覆盖材料包括天然防渗材料(如黏土、黏土与钠基膨润土混合材料等)和人工合成防渗材料(如土工膜、土工合成材料等)两类。我国《生活垃圾卫生填埋处理技术规范》(GB 50869—2013)推荐采用压实黏土覆盖结构,且要求压实黏土层的渗透系数必须小于 $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 。但此种压实黏土封场系统在填埋场内部与外部环境耦合作用下,常出现干燥开裂现象。黏土封场系统一旦出现开裂,将为雨水的下渗提供便捷路径,使填埋场内渗

沥液产量剧增、水位上升,引起垃圾填埋堆体内孔隙水压上升,最终导致堆体失稳;另外,渗沥液水位上升导致填埋场垃圾填埋气体产量下降,影响填埋气体利用工程的稳定运行;此外,垃圾渗沥液水位上升增加了渗沥液对下层填埋场衬垫防渗系统的冲击,渗沥液中的污染物质在较大水压力作用下,极易穿透衬垫防渗层而进入土壤和地下水系统,引起土壤和地下水污染。为了维护垃圾填埋堆体的稳定及填埋场周围生态环境的安全,要求及时排出垃圾渗沥液,使渗沥液水位恢复到允许范围内,导致填埋场处理垃圾渗沥液的运行成本剧增,增加了垃圾填埋场管理企业的经济负担。同时,封场系统一旦开裂,充满恶臭的填埋气体将沿裂缝外泄到大气中,严重影响填埋场周围的空气质量,且当浓度达到一定程度时使人窒息甚至死亡。因此,填埋场封场覆盖系统的开裂破坏将引起严重的次生环境地质灾害,对填埋场周围的生态环境安全造成巨大冲击。

1.1.2 垃圾填埋场工程难题与科技问题

长期以来,众多岩土工程专家、学者在填埋场环境污染物的减排与安全控制方面开展了大量的研究工作,并开发相应的控制技术,取得了一定的研究成果。但在填埋场环境灾变与安全问题方面一直未能得到很好的解决,与填埋场生态安全相协调的配套保障与预警技术缺乏,造成许多安全隐患和灾害性事故频繁发生。目前我国垃圾填埋场尚存在如下的工程难题和科技问题亟待解决。

1. 垃圾填埋场污染物(填埋气体和渗沥液)传输演化的机制、模型及调控方法

在垃圾填埋场污染物对环境污染日益严重、高压填埋气体泄漏和爆炸事故频发的背景下,开发相应的环境与安全控制技术是垃圾填埋处理工程中最为迫切的需求之一。而掌握填埋气体和渗沥液传输特性及其时空分布规律是环境与安全控制方案提出的理论基础。同时,为合理预测填埋气体和渗沥液释放传输过程,表征污染物传输状态,必须建立准确的填埋场污染物演化过程预警模型。而预警模型的建立必须以污染物释放、传输的动力学机制与规律的研究为基础。因此,深入揭示填埋气体和渗沥液释放与传输演化机制,建立合理的污染物释放传输过程预警模型是解决垃圾填埋场环境污染问题的首要前提。同时,在理论研究的基础上,迫切需要开发切实可行的污染物导排方法,以解决填埋场高气压气涌顶膜、产气率低、高水位渗沥液浸泡垃圾体及导排管淤阻问题,有效控制填埋场污染物对环境的污染,避免填埋场污染物泄漏事件的发生。

2. 垃圾填埋场渗漏污染物的过程监控与控制方法

现阶段我国填埋场大多仍为简易的垃圾填埋场,对周围生态环境的破坏非常严重。垃圾填埋场作为主要环境污染源之一,必须对填埋场气体及渗沥液的排放、

周围土壤-地下水环境的变化进行监控。因此,垃圾填埋场生态安全监控预警系统的开发与相应应急处理措施的出台已刻不容缓。国内外学者与研究机构对环境在线监测技术研究和应用方面进行了大量的研究,并取得了显著的研究成果。但对于垃圾填埋场污染物多参数一体化的在线监测技术的研发几乎是空白,其设备研制必将推动当前填埋场渗沥液和填埋气体监测效率的提高和监测成本的降低,具有很好的经济效益和环境效益。

3. 衬垫防渗系统破坏失效与新型生态屏障技术

单一或复合土工合成材料为主体的传统防渗系统易刺破、易老化、长期稳定性差的局限性尚未得到根本解决,污染物渗漏问题仍是垃圾填埋场建设工程中亟待解决的工程技术难题,迫切需要开发一种新型有效的生态屏障技术,以解决复杂环境条件下(高浓度、高渗透压和高温度)垃圾填埋场防渗系统的安全性问题。同时,已完成填埋的垃圾填埋场,其底部和垂直防渗系统均处于隐蔽环境中,一旦出现破坏,其修复问题则成为困扰工程师的一大技术瓶颈问题和工程难题。因此,防渗系统破坏后的污染控制技术也是目前垃圾填埋工程所面临的一大需求。

4. 封场覆盖系统开裂机制与控制方法

黏土、膨润土等天然封场覆盖材料由于具有高膨胀性,在高温和干湿循环作用下极易出现失水开裂现象。垃圾填埋场封场覆盖系统开裂机理的研究严重不足,致使垃圾填埋场由封场覆盖系统开裂导致的环境地质灾害频发。因此,开展复杂环境下垃圾填埋场封场覆盖系统开裂机制的研究,对于减少或避免填埋场封场系统开裂破坏的发生,指导填埋场封场覆盖系统的设计及施工具有十分重要的理论意义和应用价值。

同时,随着垃圾填埋场建设量逐渐增加,可使用的黏土量和膨润土不断减少,无形地增加了封场覆盖的成本。土工膜、土工合成材料等在施工过程中易出现拉断、穿破等破损情况。因此,传统的防渗材料已无法满足填埋场封场覆盖系统保护要求。为探求有效的封场覆盖保护材料,众多学者进行了大量的尝试性研究,但其工程实用性还需要进一步现场验证与论证。新型节能、环保的封场覆盖材料及其配套技术的研发尤为迫切。

为此,本书采用理论与数值模拟研究相结合、现场调查与定性评价相结合、室内试验和现场监测相结合、技术开发与工程应用相结合的方法,针对当前垃圾填埋场衬垫和防渗系统失效破坏现象严重、污染物渗漏污染事件频发、污染范围广等生态环境与安全问题,以国内多个典型垃圾填埋工程为依托,系统开展了影响生活垃圾填埋场建设与运营过程中工程安全的共性技术、关键技术的应用基础研究,深入探讨了垃圾填埋场环境与安全灾害形成的动力学规律及灾变机理,构建了

填埋场灾变时效监控与预警方法,开发了垃圾填埋场灾变控制的调控方法及控制技术,有效提升了填埋场工程灾变控制的整体技术水平,为填埋场工程的安全性建设与灾变控制技术的实施提供理论与技术支持。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 垃圾填埋气体释放迁移机理及收集利用研究进展

1. 垃圾填埋气体释放机理及数学模型

垃圾填埋气体的产出特征由生物降解特性决定。产气能力主要包括产气量和产气速率两个方面的描述。垃圾降解产气规律研究方面主要采取三种方式:模型估算、试验模拟和现场测试。由于填埋场填埋废物种类、填埋方式的复杂性以及影响填埋场释放气体产生因素的多样性,一般采用固体废物的化学需氧量或总有机碳(total organic carbon, TOC)预测填埋场气体的理论产生量,再利用经验系数将其转换成实际产气量。在填埋气体产出速率模型方面,垃圾降解反应一级动力学产气模型及其衍生模型因其灵活、简便等特点而得到了广泛应用,如 Palos Verdes (P-V)模型、EPA 模型和 Scholl Canyon (S-C)模型等。Faour 等(2007)采用 EPA 模型对湿度较高的垃圾填埋场甲烷产气速率模型参数进行了修正。Gioannis 等(2009)采用 P-V 模型对垃圾氧化预处理后的降解产气规律进行了预测。但模型多集中在单场作用下的产气速率描述。为考虑填埋气体产率受填埋场内多种因素影响,El-Fadel 等(1996)首次建立了温度对甲烷产出速率影响的耦合模型。Naranjo 等(2004)在此基础上提出了温度和水分对垃圾有机质降解过程中甲烷产出规律影响的耦合计算模型。但以上模型是在假设填埋气体释放的初始阶段即进入产出高峰的前提下构建的,对产气量的预测只反映了降解衰减的过程,不能对整个降解反应过程中气体产出速率的变化规律进行预测。国内学者针对我国生活垃圾的典型组成,通过垃圾降解反应试验相继开展了大量的研究工作,焦学军等(1996)、陈鲁言(1997)、陈绍伟等(2000)对垃圾降解产气规律进行了定性研究。彭绪亚(2004)研究了垃圾成分对填埋气产生的影响规律,得出产气一级动力学模型参数之间存在较大差异。瞿贤等(2008)对比分析了纤维素类和食物类垃圾对甲烷产出规律的影响机理。侯贵光等(2008)提出了两步一级反应动力学模型。此外,刘富强等(2001)、陈家军等(2008)研究了渗沥液回灌对填埋气体产生的影响规律。Ge 等(2015)开展了以白腐真菌为外加试剂对生活垃圾降解产气的加速作用,并开展了定量分析。以上室内试验研究多集中在垃圾单场产气模型方面,而在生物-化学-热耦合效应对填埋气体产出特性影响的试验研究方面几乎没有报道。

2. 垃圾填埋气体迁移数学模型

填埋气体在垃圾体及周边土壤的运动是一个复杂的问题。压力差和浓度梯度被认为是运动过程的推动力。一般情况下,填埋气体会沿着阻力最小的路径在垃圾介质中穿行并可能越过填埋场边界进入其他土层很远的区域(Esmaili, 1975)。填埋气体在孔隙中的运移速率较慢,而且不同类型的填埋场地以及不同方向的渗透性能也存在差别。因此,扩散率和渗透率是填埋气体运移特性的研究重点,众多学者对此进行了深入的研究。Metcalf等(1987)研究了垃圾填埋气体在非饱和土壤中的迁移模型。黎青松等(1999)通过深圳市玉龙坑垃圾填埋场现场打井抽气试验,研究了填埋气控制与回收利用工程基本参数。邹春等(1998)和李雁等(2000)相继开展了垃圾填埋气体的现场监测试验。彭绪亚等(2003)通过对填埋垃圾体压实方向和其垂直方向上气体渗透系数的测定,研究了在不同压实密度、不同含水率条件下垃圾体渗透特性的变化情况。Amjad等(2004)测试了填埋垃圾和焚烧后垃圾的气体渗透性。魏海云等(2007)开展了孔隙比、饱和度和垃圾组分对气体渗透性影响的研究。

在气体运移动力学模型方面,相关研究主要集中在填埋气体压力和浓度分布变化规律的描述。为了更全面地描述填埋场内气体的释放特性,一些学者将生物降解模型转化为力学模型来探讨填埋气体产生到迁移的全过程,这一思路推动了气体动力学模型的发展(陈家军等,1999;Popov et al., 2000;Mehrdad et al., 2002;Chen et al., 2003)。此外,部分学者开展了填埋气体运移的多场耦合模型研究,如Nastev等(2001)在多组分污染物水-热耦合运移模型的基础上提出了TOUGH2-LGM模型。Thompson等(2009)开展了German EPER、TNO、Belgium、Land-GEM和Scholl Canyon models四种垃圾产气模型的对比研究。Sanchez等(2010)建立了三维数值模型探讨垃圾填埋场渗透率、孔隙度和弯曲度及总产气潜能的变化情况。Robeck等(2011)在此模型的基础上推导得到了固相有机质与填埋气体释放的耦合数学模型。薛强等(2002, 2003c, 2005b)基于连续介质力学、多孔介质流-固耦合渗流及热力学理论,建立了可压缩填埋气体迁移的气-热-力耦合动力学模型。陈云敏等(2006b, 2014)建立了一维固、液、气三相耦合的大孔隙垃圾固结数学模型。

Liu等(2015)通过降压试验方法(gas pressure dropping test)分析了含水率和生物降解对气体优势渗透过程的影响,并通过穿越曲线的实测和模拟结果对比,验证了双渗透率模型(dual permeability model, DPM)预测优势渗透的可靠性。同济大学冯世进等(Feng et al., 2015;冯世进等, 2015)开展了填埋气体非线性迁移及渗沥液回灌对气体分布影响规律的预测研究。研究发现,水平方向与竖直方向渗透比值对气体分布影响显著;水平井和竖井联合抽排对气体收集更为有效。

此外,英国南安普顿大学 White 等(2013,2014)开展了考虑化学多组分及水分相互作用条件下的气体迁移模拟。Fytanidis 等(2014)采用计算流体力学(computational fluid dynamics)CFD 技术开展了考虑甲烷氧化过程的气体分布模拟预测。

3. 填埋气体收集调控技术

填埋气体的收集和控制主要通过注井抽气完成,抽气井的设计和运行对于填埋气体的控制至关重要,同时也是填埋气体安全收集和高效资源化利用的重要保障。抽气井的运行效能取决于垃圾堆体工况和抽气井性能的双重作用,而两者的影响因素较多,包括堆体结构、垃圾填埋龄、水分分布、井的结构、抽气强度、堆体产气能力等(Mehrdad et al,2002;Xue et al.,2013a,2013b,2014)。此外,由于填埋库区面积较大,由多个抽气井组成的井群需要协同运行,实现填埋气体收集量的最大化,同时各井之间不能相互影响。因此,抽气井井群的优化设计也是填埋气体收集调控不可或缺的组成部分。

为了进一步分析以上因素对气井效能的影响,国内外学者相继开展了大量的现场抽气试验和仿真预测研究。在现场抽气试验方面:一些学者通过现场抽气试验得到填埋气的稳定流量、组分、抽气井的影响范围和垃圾的产气速率,为填埋气体收集利用工程提供了关键评价参数。具有代表性的有侯贵光等(2003)、黄正华等(2004)、罗钰翔等(2009)和陈晓梅(2011)等。马小飞(2013)通过上海浦东黎明垃圾填埋场抽气试验,开展了渗沥液水位对抽气井影响半径及抽气量的影响分析。由于气井对填埋气体的控制将决定收集系统的工作效率。提高气井的控制能力意味着扩大气井的有效覆盖范围。Vigneault 等(2004)提出采用气井收集量与填埋气体产出量之间的比例关系来确定影响半径,较现场测试方法节约了大量的时间和人力。抽气井中的气体产量受多种因素的影响,包括井的分布、垃圾产气能力和填埋场结构等(Chen et al.,2003;Xue et al.,2005b),特别是产气能力具有较强的时间效应。这些因素的协同效应必须考虑,通过抽气井系统进行优化配置,才能实现填埋气体收集效率最大化。

在仿真预测方面,Young(1992)构建了气体压力为变量的气体流动连续性控制方程。部分学者在此模型基础上发展了多组分气体运移动力学模型来描述抽气状态下填埋气体的分布(Mehrdad et al.,2002;Sanchez et al.,2006)。填埋气体的分布状态不仅受压力梯度的作用,也受垃圾有机质降解及伴随热能释放的影响。冯世进等(2015)基于考虑了气体竖向和水平向运移的解析解,研究了竖井、水平井收集系统和排气层对填埋场内气体压力和回收率的影响。一些学者试图通过多场耦合模型来描述垃圾填埋场内物理、生物、化学和热的变化(行为),进一步分析填埋气体的运移特征(Nastev et al.,2001;Gholamifard et al.,2008;Sanchez et al.,

2010; Liu et al., 2011; 薛强等, 2005a, 2006a, 2011; 许越, 2014)。Sanchez 等(2007)首次提出了垃圾堆体渗透特征的非均质性对气体预测结果的影响, 并通过构建孔隙度、气体渗透率、弯曲因子和产气速率的空间分布优化, 预测了填埋气体压力分布规律随抽排时间的变化。

上述试验研究及模型的构建为填埋气体收集系统的效能分析提供了参考和借鉴。但对于库区内整体抽气井的优化设计, 特别是考虑多因素(典型工况)条件下气体分布优化设计的研究几乎未见报道。国内外相关规范中也未见气井优化设计提高抽气效率的规定或参考意见。

1.2.2 垃圾渗沥液污染物释放传输机理及监测研究进展

1. 垃圾渗沥液释放与传输机理

渗沥液水分及污染物迁移转化机理的研究是填埋场水质水量预测研究, 防渗系统、导排系统、渗沥液处理系统设计, 渗沥液污染控制的重要基础。因此, 国内外学者及工程技术人员, 针对不同科学研究和工程建设的需要开展了大量的渗沥液水分及污染物迁移转化机理及相关试验研究。

在填埋场内渗沥液释放传输方面的代表性研究包括: Veeken 等(2000)考虑到固定的挥发性脂肪酸浓度范围为 $3\sim 30\text{g/L}$ 和 $\text{pH}=5\sim 7$, 对垃圾中有机成分的厌氧降解率进行了分析。刘建国等(2001)开展了水分迁移室内试验研究。赵颖(2008)开展了填埋场渗沥液污染物释放传输的耦合动力学模型研究。El-Fadel 等(2002)在填埋场现场修筑大型土柱, 研究了粉碎后填埋和打包后填埋两种方式对垃圾降解的影响, 给出降解生成污染物的时程关系。Tatsi 等(2002)对地中海气候下填埋场渗沥液产生量和渗沥液质量进行了调查。Bilgili 等(2007)通过四个室内填埋反应器, 研究了渗沥液回灌对城市生活垃圾好氧和厌氧微生物降解的影响。刘疆鹰等(2000)研究了大型垃圾填埋场渗滤水氨氮和 COD 衰减规律。蒋建国等(2002)利用垃圾污染负荷浸出试验装置对下坪垃圾填埋场渗沥液水质变化规律进行了模拟研究。张振营等(2002)依据天子岭填埋场垃圾原试样, 研究了填埋后垃圾的降解时程关系, 给出相应的经验方程。赵由才等(2003)通过平行试验研究了垃圾降解过程中渗沥液排出量及污染物浓度变化, 得出了渗沥液浓度随时间变化的计算模式。介玉新等(2005)用取自京郊某垃圾堆填场的垃圾土样进行渗透试验, 比较了不同密度情况下渗透系数的差别。刘宏远等(2005)通过对采用渗沥液回灌的生物反应器填埋场的研究表明, 回灌调节了垃圾堆体的含水率, 改善了微生物的生存环境, 强化了微生物的降解作用。刘丹等(2005)开展了不同的模拟填埋场试验, 模拟了准好氧型生物反应器填埋场渗沥液的化学需氧量和氨氮浓度去除率。肖正等(2005)以杭州市天子岭填埋场为例, 对不同深度填埋层中的重金属总

量、重金属迁移率和重金属形态分布进行了研究。王琪等(2005)依据准好氧和厌氧填埋原理,构建了大型模拟填埋场,并定期对渗沥液水质进行监测分析。杜金山等(2006)通过室内垃圾柱淋滤装置对锦州市南山垃圾填埋场渗沥液水质变化规律进行了室内试验研究。王洪涛等(2006)测定了六里屯填埋场原状垃圾土饱和含水率和饱和渗透系数,通过试验及模型模拟,揭示了填埋垃圾水分特征曲线的变化规律。张文杰(2007)通过室内和现场试验对垃圾的饱和及非饱和水力特性进行了研究。

由卫生填埋场渗沥液泄漏所造成的地下环境污染问题越加严重,因此,国内众多学者针对垃圾渗沥液水分及污染物在填埋场周围岩土介质中的迁移问题,开展了大量基础性试验研究,并取得了大量的指导性成果,其研究主要集中在岩土介质对渗沥液水分及污染物的阻滞和截留性能等方面(薛强等,2006a)。Toupiol等(2002)利用处于室外环境中的大型黏土层,对砷的运移进行了历时13年的试验研究。Edil(2003)的研究表明,即使是完好的衬垫系统,污染物也可能缓慢扩散出去。Johnson等(2003)采用三氯甲烷分别对原状样和重塑样进行出流试验,以验证非理想运移过程的物理和化学因素的影响。刘建国等(2001)通过室内试验研究了盖层渗透性较强而衬层渗透性较弱和盖层、衬层渗透性均较弱两种不同防渗配置下系统内的水分运移规律。李启彬(2001)在研究传统填埋场黏土防渗层设计时将防渗层防渗性能、净化性能以及填埋场场址区水文地质特征、地下水环境容量有机结合进行了综合考虑。栾茂田等(2004)考虑填埋场中垃圾的生物降解效应和含水层中土颗粒对污染物的吸附性,探讨了非平衡吸附条件下污染物运移过程及其机理。李建萍等(2004)用若干土柱模拟试验研究了垃圾渗沥液有机污染组分在不同岩性、不同厚度包气带介质中的运移规律,并计算了有机污染组分在包气带中运移的有关水化学迁移参数。陈云敏等(2003,2005)对固体废物的土工特性、填埋场的土工问题以及黏土对污染物吸附的土工特性以及渗沥液防渗等问题从环境岩土工程角度进行了详细论述,并开展了多场耦合作用下锌离子在黏土衬垫中迁移性状等方面的研究。刘长礼等(2006)通过试验研究了黏性土对垃圾渗沥液的截污容量、有效阻隔厚度,并对土层的污染防护能力进行了评判。董军等(2006)通过土柱试验研究了垃圾渗沥液污染物在地下环境中降解的生物地球化学作用和分带现象,并对污染前后土壤中的 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 、氧化容量和还原容量等的变化进行了分析。刘莹莹等(2006)研究了不同岩性的土壤对垃圾渗沥液污染晕染物衰减的影响。付美云等(2006)采用序批次吸附试验,研究了不同填埋年限垃圾对渗沥液在土壤中的吸附影响。周磊等(2006)分析了渗沥液与土壤介质作用机理,计算了污染物在土层中的阻滞因子和水化学迁移率。

由此可见,垃圾渗沥液释放与传输机理方面,主要集中在定性研究上,而定量给出可用于数值计算的试验结果方面的报道则相对较少。尤其在渗透系数测定的