



# 垃圾填埋气体运移的 多场耦合理论及应用

薛强 刘磊 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 垃圾填埋气体运移的 多场耦合理论及应用

薛 强 刘 磊 著

科学出版社

北 京

## 前 言

垃圾填埋气体的灾变控制与资源化开发一直是国际岩土工程领域中的重要研究课题。如何有效地对垃圾填埋气体进行时效减排与灾变控制已成为国家能源与环境领域亟待解决的重大地质环境灾害问题,而定量描述垃圾填埋气体运移及释放过程的内在机制并进行合理的预测评价是解决这一难点的关键性科学问题之一。近年来,本书作者一直致力于开展此方面的研究工作,并在国家自然科学基金专项基金(50927904)及面上项目(51079143、11002153、50309015)、中国科学院重大科研装备项目(YZ200942)、中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX2-YW-QN114)、国家重点基础研究发展 973 计划(2012CB719802)生物地质与环境地质教育部重点实验室开放基金(BGEG1008)的支持下,对垃圾填埋气体运移规律及预警开展了系统研究。本书是作者在总结近年相关研究成果的基础上完成的。

全书共 10 章,分别从垃圾填埋气体产出及运移过程中耦合效应的内在机制、特征描述、模型分析等多个角度进行了分析和研究。

第 1 章主要从垃圾填埋气体运移耦合理论的研究背景出发,在整合国内外研究动态的基础上,揭示了开展垃圾填埋气体运移耦合理论研究的必要性。

为了从根本上弄清垃圾填埋气体运移过程所出现的耦合效应,本书在第 2 章着重从垃圾填埋气体的产出、储存和迁移环境(介质)的变化特征出发,结合微生物降解动力学、生物-化学动力学、热化学动力学、土力学和传热学等理论,详细论述了垃圾填埋气体运移过程中的多场耦合作用机理。

第 3 章重点探讨了垃圾填埋气体运移过程中所发生的滑脱效应。以多孔介质渗流力学为基础,建立考虑滑脱效应影响下的气体运动方程,采用摄动法给出了运动方程的精确解,从而实现了滑脱效应影响下垃圾填埋气体压力分布的动态规律;同时,结合有限差分方法给出了考虑滑脱效应影响下气体浓度控制方程的数值格式,分析了抽气情况下受滑脱效应影响的气体浓度的动态分布。

垃圾填埋气体在填埋场内的运移特性不仅受压力梯度和浓度梯度的影响,孔隙内的有效应力也是决定气体释放规律的主要因素之一。为此,本书在第 4 章首先探讨了渗透系数的变化对孔隙压力分布的影响,结合多孔介质流-固耦合理论,建立了垃圾填埋气体运移过程的 H-M 耦合数学模型,并给出该模型的解析解,对比分析了考虑应力效应和不考虑应力效应两种条件下气体压力和流动速率的变化情况。

从岩土工程角度看,垃圾填埋场是一个由固体骨架、液体和气体三相共存的有机整体。其中,水分含量的变化也伴随着垃圾填埋气体产出到释放的整个过程,为了进一步探讨非饱和状态下垃圾填埋气体的运移规律,本书在第5章中以水-气两相渗流理论为基础,建立了水相作用影响下气体运移的非线性模型,开展了非饱和状态下以及水入渗条件下气体运移动态变化规律的分析。

垃圾填埋气体产出的过程中不仅伴随水分含量和应力状态的变化,也释放了大量的热,这些热能以垃圾有机质为源向填埋场周边扩散。本书第6章分别建立了垃圾填埋气体运移的T-H耦合和T-H-M耦合数学模型,通过数值仿真方法对填埋场内的温度分布进行了预测,并通过解析分析,探讨了T-H-M耦合效应对气体分布状态的影响。

第7章以生物化学动力学和渗流力学为基础,建立了垃圾填埋气体运移生物-渗流耦合模型,并将此模型应用于垃圾填埋场单井抽气的预测和评估,首次提出了抽气井影响半径的计算方法,全面阐述了填埋年份、有机质含量等因素对气井影响半径的影响,并分析了固有渗透率、覆盖层厚度、垃圾填埋年份对气井收集量的影响,为垃圾填埋气体资源化利用工程的实施和运营提供了理论基础。

第8章采用室内垃圾降解和沉降试验分析了垃圾填埋处理后的生物-渗流-应力间的相互作用,并结合生物降解动力学、渗流力学和土力学原理,建立了垃圾填埋气体产出的B-H-M耦合模型,通过数值仿真技术模拟了生物降解对垃圾沉降及孔隙度变化的影响,分析了水相、气相和固相在相互作用条件下有效应力的变化。

在第6章和第7章研究内容的基础上,第9章以多孔介质渗流力学、生物化学动力学、化学热动力学以及溶质运移动力学等交叉学科为基础,着重探讨垃圾填埋气体运移过程中的生物-渗流-热耦合效应;以室内试验为基础,探讨不同有机质配比垃圾降解条件下垃圾填埋气体的产出规律,并拟合得到产气模型的相关参数,建立温度与降解速率之间的耦合函数关系,给出不同有机质配比条件下耦合模型的参数值;结合数值仿真技术对生物-渗流-热耦合效应进行了仿真分析,给出填埋场内温度随季节变化的分布状态以及温度对降解产气特性和放热特性的影响。

第10章以我国南方某垃圾填埋场为背景,采用第9章建立的垃圾填埋气体热释放传输耦合动力学模型,开展了垃圾填埋场热能释放和气体运移的仿真预测研究,分析了外界的温度变化对填埋场内部热释放和产气规律的影响;对填埋场内气井产量进行了模拟预测,并将气井总产气量的预测结果与监测结果进行了对比,结果显示二者关于产气量的变化规律基本一致,验证了耦合动力学模型的可靠性。

综上所述,本书结合多孔介质渗流力学、生物化学动力学、土力学、化学热动力学以及溶质运移动力学等学科交叉理论,以多物理场耦合理论研究为基础,以室内试验和现场监测数据为依据,以数值仿真计算为主导,对垃圾填埋气体在多场耦合

作用下的反应、传输及产生的内在机制进行了系统分析和定量预测评价。以上研究成果不仅为合理揭示垃圾填埋气体的内在反应机理及传输机制提供理论依据,同时为定量预测和评价垃圾填埋场运营期间气体产能、清洁发展机制(clean development mechanism, CDM)项目开发潜力的决策评估提供技术支持,具有重要理论意义和实际应用价值。

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、岩土力学与工程国家重点实验室研究人员的通力协作,在此对他们表示感谢;同时特别感谢赵颖博士、杨勇博士、周小军博士等参加了部分研究工作。此外,感谢王静、徐正明、万勇、陈亿军、胡竹云、李江山和张乾在研究工作中付出的辛勤劳动,感谢武汉市环境卫生科学研究设计院田宇高级工程师提供的相关工程资料,特别感谢辽宁工程技术大学梁冰教授对本书相关内容的指导。

因学识所限,书中难免存在不足之处,尚望大家不吝赐教。

# 目 录

## 前言

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....                    | 1  |
| 1.1 引言 .....                             | 1  |
| 1.2 垃圾填埋气体运移的国内外研究现状 .....               | 8  |
| 1.2.1 垃圾降解产气规律研究 .....                   | 9  |
| 1.2.2 垃圾降解热释放规律研究 .....                  | 12 |
| 1.2.3 垃圾填埋气体运移规律研究 .....                 | 14 |
| <b>第 2 章 垃圾填埋气体运移过程的多物理场耦合作用机理</b> ..... | 18 |
| 2.1 垃圾有机质降解产气的动力学原理.....                 | 19 |
| 2.1.1 垃圾有机质降解产气过程中的生物-化学反应 .....         | 19 |
| 2.1.2 垃圾有机质降解的基本动力学原理 .....              | 19 |
| 2.1.3 垃圾有机质降解过程中有机碳的转化和分配 .....          | 20 |
| 2.2 垃圾填埋气体产出的动力学特征.....                  | 22 |
| 2.2.1 垃圾填埋气体产出规律分析 .....                 | 22 |
| 2.2.2 影响垃圾填埋气体产出的主要因素 .....              | 24 |
| 2.3 垃圾填埋气体产出过程中热能释放规律研究.....             | 25 |
| 2.3.1 垃圾填埋气体产出过程中的热化学动力学描述 .....         | 25 |
| 2.3.2 热释放对垃圾降解特性影响的特征分析 .....            | 26 |
| 2.4 垃圾填埋气体产出过程中孔隙结构变形特征.....             | 30 |
| 2.5 垃圾填埋气体运移特征分析.....                    | 33 |
| 2.5.1 对流运动——达西定律 .....                   | 33 |
| 2.5.2 弥散运动——菲克定律 .....                   | 34 |
| 2.6 填埋场内垃圾堆体的热传导特性.....                  | 34 |
| 2.7 填埋场水力传导特征.....                       | 36 |
| 2.7.1 垃圾填埋场水分运移的动力学规律 .....              | 36 |
| 2.7.2 水分运移对垃圾填埋气体释放传输特性的影响 .....         | 37 |
| 2.8 垃圾填埋气体释放传输的多物理场耦合特征.....             | 37 |
| <b>第 3 章 垃圾填埋气体运移过程的滑脱效应研究</b> .....     | 39 |
| 3.1 滑脱效应概述.....                          | 39 |
| 3.2 滑脱效应对垃圾填埋气体释放过程压力分布的影响分析.....        | 40 |

|            |                                       |            |
|------------|---------------------------------------|------------|
| 3.2.1      | 考虑滑脱效应条件下垃圾填埋气体渗流数学模型 .....           | 40         |
| 3.2.2      | 数学模型解析解的建立 .....                      | 41         |
| 3.2.3      | 解析解的理论分析与验证 .....                     | 44         |
| 3.3        | 滑脱效应对垃圾填埋气体释放过程中的浓度分布影响分析 .....       | 48         |
| 3.3.1      | 垃圾填埋气体逸出过程的动力学耦合模型 .....              | 48         |
| 3.3.2      | 耦合模型数值解的建立 .....                      | 50         |
| 3.3.3      | 算例分析 .....                            | 51         |
| 3.4        | 本章小结 .....                            | 56         |
| <b>第4章</b> | <b>垃圾填埋气体运移过程的渗流-应力耦合效应研究 .....</b>   | <b>57</b>  |
| 4.1        | 渗透系数的非线性变化对孔隙压力分布影响研究 .....           | 57         |
| 4.1.1      | 渗透系数非线性变化的耦合数学模型 .....                | 58         |
| 4.1.2      | 非线性模型的摄动解 .....                       | 59         |
| 4.1.3      | 实例计算与分析 .....                         | 62         |
| 4.2        | 垃圾填埋气体运移过程中的 H-M 耦合模型研究 .....         | 64         |
| 4.2.1      | H-M 耦合数学模型的建立 .....                   | 65         |
| 4.2.2      | 数学模型的摄动解 .....                        | 67         |
| 4.2.3      | 算例分析 .....                            | 69         |
| 4.3        | 本章小结 .....                            | 72         |
| <b>第5章</b> | <b>垃圾填埋气体运移过程的水-气两相渗流效应研究 .....</b>   | <b>73</b>  |
| 5.1        | 水-气两相渗流数值模型的建立 .....                  | 73         |
| 5.1.1      | 水-气两相渗流的基本原理 .....                    | 73         |
| 5.1.2      | 水-气两相渗流控制方程 .....                     | 77         |
| 5.1.3      | 本构模型 .....                            | 80         |
| 5.1.4      | 定解条件 .....                            | 83         |
| 5.1.5      | 有限元数值模型的建立 .....                      | 84         |
| 5.2        | 模型的应用与分析 .....                        | 87         |
| 5.2.1      | 非线性数值算法可靠性的验证 .....                   | 88         |
| 5.2.2      | 水入渗条件下垃圾填埋气体迁移的数值仿真研究 .....           | 90         |
| 5.3        | 本章小结 .....                            | 106        |
| <b>第6章</b> | <b>垃圾填埋气体运移过程温度-渗流-应力耦合效应研究 .....</b> | <b>108</b> |
| 6.1        | 垃圾填埋气体运移过程的 T-H 耦合模型研究 .....          | 108        |
| 6.1.1      | T-H 耦合数学模型的建立 .....                   | 108        |
| 6.1.2      | 数学模型定解条件的确定 .....                     | 109        |
| 6.1.3      | Galerkin 数值解的建立 .....                 | 110        |
| 6.1.4      | 算例分析 .....                            | 111        |

|                                              |            |
|----------------------------------------------|------------|
| 6.2 垃圾填埋气体运移过程的 T-H-M 耦合模型研究 .....           | 115        |
| 6.2.1 T-H-M 耦合数学模型的建立 .....                  | 116        |
| 6.2.2 摄动法求解耦合模型 .....                        | 118        |
| 6.2.3 解析解的理论分析 .....                         | 122        |
| 6.3 本章小结 .....                               | 125        |
| <b>第 7 章 垃圾填埋气体运移过程生物-渗流耦合效应研究 .....</b>     | <b>126</b> |
| 7.1 垃圾填埋气体运移生物-渗流耦合模型的建立 .....               | 126        |
| 7.2 填埋场气井影响半径预测分析 .....                      | 128        |
| 7.3 抽气状态下气体压力和气井产量预测分析 .....                 | 134        |
| 7.3.1 固有渗透率对气体压力和气井产量的影响 .....               | 134        |
| 7.3.2 填埋场覆盖层厚度对气体压力和气井产量的影响 .....            | 137        |
| 7.3.3 垃圾填埋年份对气体压力和气井产量的影响 .....              | 139        |
| 7.4 覆盖层甲烷氧化特性分析 .....                        | 142        |
| 7.4.1 甲烷氧化耦合动力学模型 .....                      | 143        |
| 7.4.2 仿真算例 .....                             | 144        |
| 7.5 本章小结 .....                               | 152        |
| <b>第 8 章 垃圾填埋气体运移过程的生物-渗流-应力耦合效应研究 .....</b> | <b>153</b> |
| 8.1 有机物降解对垃圾变形影响试验研究 .....                   | 153        |
| 8.1.1 测试装置和试验方法 .....                        | 153        |
| 8.1.2 垃圾填埋体基本参数的测定 .....                     | 156        |
| 8.1.3 测试结果分析 .....                           | 158        |
| 8.1.4 沉降模型对比分析 .....                         | 167        |
| 8.2 垃圾填埋气体释放的 B-H-M 耦合模型及仿真预测研究 .....        | 169        |
| 8.2.1 B-H-M 耦合模型的建立 .....                    | 169        |
| 8.2.2 B-H-M 耦合效应仿真预测分析 .....                 | 172        |
| 8.3 本章小结 .....                               | 177        |
| <b>第 9 章 垃圾填埋气体运移过程的生物-渗流-热耦合效应研究 .....</b>  | <b>178</b> |
| 9.1 垃圾降解过程中生化-热耦合动力学特征描述 .....               | 178        |
| 9.1.1 垃圾降解产气速率模型 .....                       | 178        |
| 9.1.2 垃圾降解产热动力学模型 .....                      | 181        |
| 9.1.3 垃圾降解系数随温度变化的预测研究 .....                 | 182        |
| 9.2 垃圾填埋气体运移过程的生物-渗流-热耦合动力学模型的建立 .....       | 196        |
| 9.2.1 物质守恒原理 .....                           | 196        |
| 9.2.2 垃圾降解的热平衡方程 .....                       | 196        |
| 9.2.3 垃圾降解的气体运动连续性方程 .....                   | 198        |

---

|               |                                     |            |
|---------------|-------------------------------------|------------|
| 9.2.4         | 定解条件 .....                          | 198        |
| 9.2.5         | 耦合动力学模型的数值解 .....                   | 199        |
| 9.3           | 垃圾生化降解过程中热释放及气体运移规律仿真预测 .....       | 201        |
| 9.3.1         | 垃圾填埋场温度分布预测 .....                   | 201        |
| 9.3.2         | 温度对垃圾降解产气速率及放热速率影响的仿真预测 .....       | 211        |
| 9.4           | 本章小结 .....                          | 213        |
| <b>第 10 章</b> | <b>垃圾填埋气体抽排发电工程的可行性预测评价研究 .....</b> | <b>214</b> |
| 10.1          | 垃圾填埋场区域环境概况 .....                   | 214        |
| 10.1.1        | 自然地理条件 .....                        | 214        |
| 10.1.2        | 场地工程、水文和环境地质条件 .....                | 215        |
| 10.2          | 填埋场处理区分布概况 .....                    | 216        |
| 10.3          | 垃圾填埋气体资源化利用预测评价研究 .....             | 218        |
| 10.3.1        | 垃圾填埋场产气速率预测分析 .....                 | 219        |
| 10.3.2        | 垃圾填埋场放热预测分析 .....                   | 221        |
| 10.3.3        | 垃圾填埋场产气量预测分析 .....                  | 225        |
| 10.4          | 本章小结 .....                          | 231        |
| <b>参考文献</b>   | .....                               | <b>232</b> |
| <b>附录</b>     | .....                               | <b>242</b> |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引 言

随着社会经济发展,人口逐步增长,城市中垃圾的产量日益增多,并以每年 8%~10%速率增长,一些城市相继建立了大型垃圾填埋场,垃圾填埋场投入运营约一年后,开始产生垃圾填埋气体,这些气体在填埋场内累积,并向外释放,对周围环境及人类生命造成危害。城市垃圾填埋场中垃圾填埋气体的二次污染问题已引起人们的广泛关注,城市生活垃圾(municipal solid waste, MSW)已被公认为城市环境的主要污染源之一。

自 2002 年 10 月国家环境保护总局公布《中国城市垃圾填埋气体收集利用国家方案》以来,我国一直致力于开展温室气体减排和垃圾填埋处理的资源化利用。随着《京都协议书》的签署和哥本哈根、坎昆气候峰会的召开,温室气体的控制与减排已被各国政府列入长期发展计划中,这一棘手问题也得到了国家的高度重视。2009 年,中国通过了《关于积极应对气候变化的决议》,随后公布了总体的碳排放指标和应对措施,并将其纳入了国民经济和社会发展中长期规划。因此,开展垃圾填埋气体运移特性的应用基础研究对温室气体的减排和监控具有重要的科学意义和现实意义。

垃圾填埋气体(landfill gas, LFG)是指垃圾体内所含的大量有机物经过填埋处理后,被微生物厌氧消化、降解所生成的气体。垃圾填埋气体在所有的垃圾填埋场中都有产生。垃圾填埋气体实际上是一种混合气体,主要成分有甲烷、二氧化碳、氮气和氧气等,其中甲烷和二氧化碳之和占 80%以上(见表 1.1)。

表 1.1 垃圾填埋气体典型成分

| 气体成分   | 符 号             | 比例/%  |
|--------|-----------------|-------|
| 甲烷     | CH <sub>4</sub> | 40~60 |
| 二氧化碳   | CO <sub>2</sub> | 30~50 |
| 氮气     | N <sub>2</sub>  | 0~10  |
| 氧气     | O <sub>2</sub>  | 0~2   |
| 氢气     | H <sub>2</sub>  | 0~0.2 |
| 非甲烷有机物 | NMOC            | 微量    |

如果垃圾填埋气体得不到适当的收集和处理,将会引发一系列直接或潜在的危害:

(1) 甲烷是一种易燃易爆的气体,当甲烷在空气中的浓度达到 5%~15% 时,遇火将会爆炸。填埋场内产生的大量气体无规则地随处迁移和扩散,会形成爆炸和火灾的隐患。

(2) 气体中微量浓度的硫化氢和硫醇等化合物是产生臭气之源。此外,垃圾填埋气体中还可能含有一些有毒有害的挥发性有机气体如二甲苯、含卤化合物等,长期与之接触可使人致癌。

(3) 甲烷是一种温室气体,其温室效应的增温潜能相当于相同质量二氧化碳的 21 倍。据统计,全球每年排放的甲烷量大约为 5 亿 t,其中有 2200 万~3600 万 t 来自城市垃圾填埋场,占全球甲烷排放总量的 6%~13%,是温室气体的主要来源之一。

根据国外有关资料显示,垃圾填埋气体可透过填埋场周边的土壤流动,并且在 100~200m 以外的建筑物内可测得 5% 的填埋甲烷气体。垃圾填埋气体的泄露和散发严重威胁着周边环境,如果垃圾填埋场不使用衬层和收集系统加以阻挡,垃圾气体可以迁移到离填埋场较远的周边地区,并沿较小的路线移动,然后由地表逸出释放到大气中,或通过树根造成的裂痕、疏松层、通风道和地下人造管道等途径迁移而释放到环境中,最终造成环境隐蔽性污染和事故的发生(见图 1.1~图 1.4)。例如,土耳其伊斯坦布尔垃圾填埋场出现自燃和堆体滑坡,以色列 Hiriya 垃圾填埋场发生断裂及滑动,菲律宾奎松市垃圾填埋场出现大面积滑坡,中国上海、岳阳、成都、北京等地都有由于填埋场内垃圾填埋气体引起的场外隐蔽性污染事故发生。致使这些事故发生的根本原因在于,对垃圾填埋气体运移和控制方面的研究工作没有引起足够的重视。所以,在垃圾填埋场附近开发时都必须对其潜在的危险性进行评价。

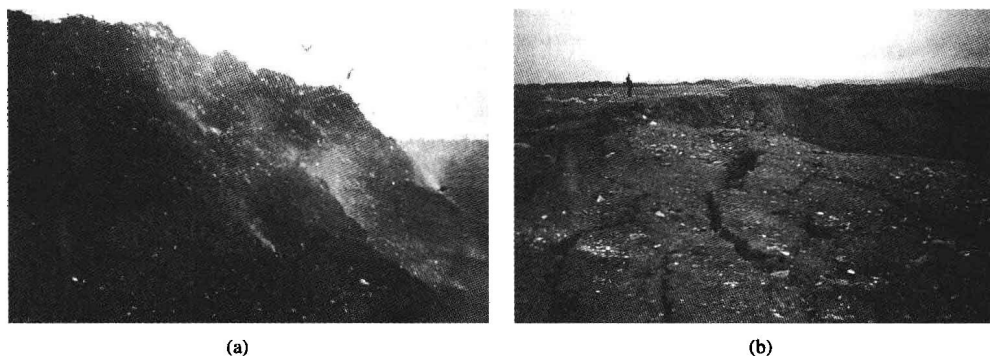


图 1.1 土耳其伊斯坦布尔垃圾填埋场自燃及滑坡现象(Kocasoy et al., 1995)

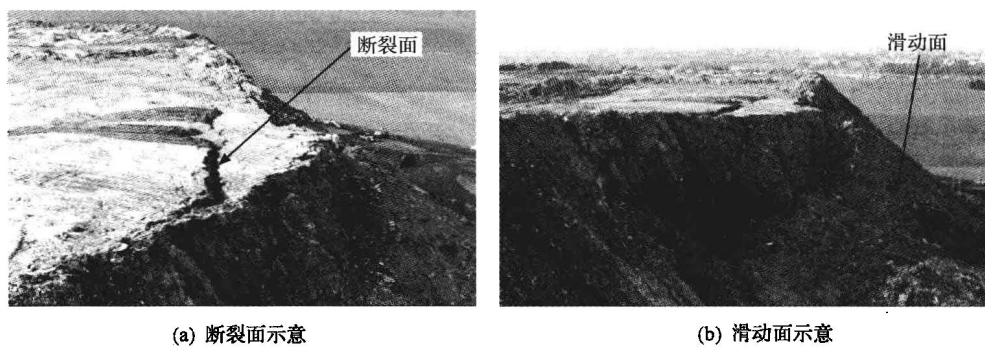


图 1.2 以色列 Hiriya 垃圾填埋场(Isenberg, 2003)



图 1.3 菲律宾奎松市(Quezon City)垃圾填埋场大面积滑坡(Kolsch et al., 2004)



图 1.4 覆盖层土工膜隆起(Thiel et al., 2005)

垃圾填埋气体是一种可回收利用的清洁能源,具有很高的热值,约  $19\text{MJ}/\text{m}^3$ ,与城市煤气的热值接近,是纯天然气热值  $37.19\text{MJ}/\text{m}^3$  的一半, $1\text{m}^3$  填埋沼气的能量相当于  $0.45\text{L}$  柴油或  $0.6\text{L}$  汽油的能量。以一个城市三口之家为例,每年产生约  $1\text{t}$  生活垃圾,若将  $1\text{t}$  垃圾全部发酵,产生的垃圾填埋气体量约为  $300\text{m}^3$ , $1\text{m}^3$  可燃气体能发电  $1.5\text{kW}\cdot\text{h}$ 。也就是说, $1\text{t}$  生活垃圾通过处理,实际上可提供  $400$  多千瓦时电能,差不多可满足一个三口之家半年的用电需求。

自 20 世纪 70 年代以来,西方发达国家就十分重视对垃圾填埋气体的回收和利用。而且随着近些年来环境变迁和温室效应的加剧、石油价格的上涨以及能源危机的加剧,垃圾填埋气体的利用更是受到了重视。美国是在垃圾填埋气体资源化利用方面发展最快的国家,据估算,美国全国 1% 的天然气可被填埋场中的  $\text{CH}_4$  取代, $1000\sim 4000$  个填埋场适合气体利用工程,每年可产  $2$  千亿  $\text{ft}^3$  (约合  $570$  亿  $\text{m}^3$ ) 气体,每年对这些气体的利用可为国家节约  $5$  亿~ $7$  亿美元(合人民币  $34$  亿~ $42$  亿元)。截至 1990 年,欧共体的垃圾填埋气体利用项目就有  $175$  个。而在美国,截至 1999 年 6 月,有  $270$  个填埋场进行了垃圾填埋气体的利用,美国环保局(US Environmental Protection Agency, US EPA)估计在近几年将有  $500$  个填埋场要进行垃圾填埋气体的利用。

20 世纪 90 年代,我国大多数垃圾的处置还处于简单堆放阶段,除少数堆放场及新建填埋场采取了一些气体导排手段以外,大多数堆放场气体仍是无组织释放。由于国内城市垃圾的卫生填埋起步较晚,符合卫生填埋标准的填埋场非常有限,除在鞍山有小规模试验外,还没有一个填埋场对其释放气体进行利用。但是,当时对填埋场释放气体的控制和利用已引起广泛的注意。

到了 20 世纪 90 年代末,我国在垃圾填埋气体资源化利用方面的第一个商业化运营垃圾填埋气体发电工程——杭州天子岭垃圾填埋场的垃圾填埋气体回收利用工程于 1998 年 10 月投入运行,这是我国第一家垃圾填埋气体发电厂,它的投产象征着我国垃圾资源回收利用技术的一大突破,是我国新开发的垃圾产业之一,也是我国城市生活垃圾处理行业规范化的起点,这与我国改革开放以来国家经济技术的不断腾飞密不可分。同时,伴随着 2005 年《京都议定书》的生效,我国垃圾填埋气体资源化利用产业拥有了更广阔的发展空间。1997 年国家环境保护总局在南京、鞍山和马鞍山三个城市启动的城市垃圾填埋气体收集利用试点项目也已于 2003 年完成。截至 2011 年 8 月,经中华人民共和国国家发展和改革委员会批准的垃圾填埋气体 CDM 项目达到了  $42$  个(见表 1.2)。

表 1.2 国内已批准的垃圾填埋气体 CDM 项目

| 项目名称                     | 项目业主              | 国外合作方                                             | 注册时间     |
|--------------------------|-------------------|---------------------------------------------------|----------|
| 南京天井洼 LFG 发电项目           | 南京绿色资源再生工程有限公司    | Eco Securities Group Ltd.<br>(英国)                 | 2005. 12 |
| 梅州垃圾填埋场沼气回收与能源利用项目       | 深圳相控科技有限公司        | Kommunalkredit(奥地利)                               | 2006. 03 |
| 北京安定填埋场 LFG 收集利用项目       | 北京市二清环卫工程集团有限公司   | 荷兰国际能源系统公司<br>(荷兰)                                | 2006. 04 |
| 江苏无锡桃花山垃圾填埋气发电项目         | 无锡天顺环境技术有限公司      | 丰田通商株式会社(日本)                                      | 2007. 04 |
| 深圳下坪固体废物废弃物填埋场填埋气体收集利用项目 | 深圳市利赛实业发展有限公司     | Climate Change Capital Carbon Fund S. A. R. L(英国) | 2007. 05 |
| 济南垃圾填埋气发电项目              | 山东十方新能源有限公司       | Eco Securities Group Ltd.<br>(英国)                 | 2007. 05 |
| 广州兴丰垃圾填埋气回收利用项目          | 广州市惠景环保技术有限公司     | 爱斯凯碳投资组合有限公司<br>(英国)                              | 2007. 09 |
| 南京轿子山垃圾填埋气回收利用供热项目       | 南京允生新能源开发有限公司     | CAMCO International Ltd.<br>(英国)                  | 2007. 11 |
| 南宁城市生活垃圾填埋气发电项目          | 广西洁通科技有限公司        | Biogas Technology Ltd.<br>(英国)                    | 2008. 04 |
| 绵阳市垃圾填埋气发电项目             | 绵阳泰都环境能源技术开发有限公司  | Sindicatum Carbon Capital Ltd.<br>(英国)            | 2008. 05 |
| 昆明五华垃圾填埋气发电项目            | 昆明环业环保工程开发有限责任公司  | Biogas Technology Ltd.<br>(英国)                    | 2008. 07 |
| 天津市双口垃圾填埋场填埋气回收发电项目      | 天津清洁能源环境工程有限公司    | 世界银行(西班牙碳基金)                                      | 2008. 08 |
| 福州红庙岭垃圾填埋气发电项目           | 福建天亿可再生能源技术发展有限公司 | 生态银行株式会社(日本)                                      | 2008. 11 |
| 昆明东郊白水塘垃圾填埋场沼气处理及发电项目    | 昆明环业环保工程开发有限公司    | 意大利阿兹亚环境股份公司<br>(意大利)                             | 2008. 11 |
| 沈阳老虎冲垃圾填埋沼气发电项目          | 沈阳市老虎冲垃圾处理有限责任公司  | 意大利阿兹亚环境股份公司<br>(意大利)                             | 2008. 12 |
| 厦门市东孚垃圾卫生填埋场填埋气体利用工程     | 厦门九日新能源有限公司       | 丸红株式会社(日本)                                        | 2009. 03 |

续表

| 项目名称                    | 项目业主             | 国外合作方                                                     | 注册时间     |
|-------------------------|------------------|-----------------------------------------------------------|----------|
| 太原山庄头垃圾填埋气回收与利用项目       | 太原凯田再生能源环保有限公司   | ASJA Environment International B. V. Mendrisio Branch(瑞士) | 2009. 06 |
| 太原新沟垃圾填埋气回收与利用项目        | 太原凯田再生能源环保有限公司   | ASJA Environment International B. V. Mendrisio Branch(瑞士) | 2009. 06 |
| 洛阳市生活垃圾填埋场填埋气发电项目       | 上海百川畅银实业有限公司     | 复兴碳投资有限公司(英国)                                             | 2009. 07 |
| 大连毛茛子垃圾填埋场沼气回收与发电项目     | 大连相控科技有限公司       | IFC-荷兰碳机构(INCaF)(荷兰)                                      | 2009. 11 |
| 南昌麦园垃圾填埋气回收和利用项目        | 南昌新冠能源开发有限公司     | One Carbon B. V. (荷兰)                                     | 2009. 11 |
| 娄底市苗圃垃圾填埋场填埋气利用发电建设项目   | 娄底市中瀚艾库乐森新能源有限公司 | 艾库乐森股份有限公司(德国)                                            | 2009. 12 |
| 沈阳大辛垃圾填埋气发电项目           | 沈阳新新明天再生利用有限公司   | 丹麦碳基金(丹麦)                                                 | 2010. 01 |
| 湘潭双马垃圾填埋气回收与利用 CDM 项目   | 大唐华银湘潭环保发电有限责任公司 | Essent Trading International S. A. (瑞士)                   | 2010. 01 |
| 西宁爱源垃圾填埋气回收发电项目         | 西宁爱源填埋气有限公司      | Eco Tec Asia Ltd. (英国)                                    | 2010. 01 |
| 合肥市龙泉山生活垃圾填埋气发电工程       | 合肥新冠能源开发有限公司     | One Carbon International B. V. (荷兰)                       | 2010. 03 |
| 邹平县垃圾填埋气回收和利用项目         | 邹平县生活垃圾处置有限责任公司  | 瑞典能源署和亚洲开发银行(瑞典)                                          | 2010. 03 |
| 深圳老虎坑垃圾填埋气回收利用项目        | 深圳市东江利赛再生能源有限公司  | E. ON 气候与可再生能源部(荷兰)                                       | 2010. 04 |
| 武汉市新洲陈家冲生活垃圾卫生填埋场沼气发电工程 | 武汉江环亿碳能源开发有限公司   | Rhodia Energy GHG(法国)                                     | 2010. 04 |
| 漯河市生活垃圾填埋场填埋气发电项目       | 上海百川畅银实业有限公司     | UPM 环境项目管理有限公司(德国)                                        | 2010. 05 |
| 济源市生活垃圾填埋场填埋气发电项目       | 上海百川畅银实业有限公司     | UPM 环境项目管理有限公司(德国)                                        | 2010. 05 |

续表

| 项目名称                    | 项目业主            | 国外合作方                                                              | 注册时间    |
|-------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------|---------|
| 宝鸡市陵塬垃圾填埋场沼气收集利用发电项目    | 宝鸡市易飞明达电力发展有限公司 | 碳资本管理株式会社(日本)                                                      | 2010.06 |
| 乌鲁木齐西山大浦沟垃圾填埋气发电项目      | 新疆华美德昌环保科技有限公司  | RWE Power Aktiengesellschaft<br>(德国)                               | 2010.10 |
| 杭州市第二垃圾填埋场沼气发电厂项目       | 杭州市固体废弃物处理有限公司  | ICF International<br>Clean Fund LLC Lewes,<br>Mendrisio Branch(瑞士) | 2010.10 |
| 山东省莱芜市垃圾填埋场填埋气发电项目      | 山东齐耀新能源有限公司     | 环保桥有限公司(英国)                                                        | 2010.11 |
| 信阳市生活垃圾填埋场填埋气发电项目       | 上海百川畅银实业有限公司    | UPM 环境项目管理有限公司<br>(德国)                                             | 2010.12 |
| 洛阳张落坪市生活垃圾填埋场填埋气发电项目    | 上海百川畅银实业有限公司    | UPM 环境项目管理有限公司<br>(德国)                                             | 2010.12 |
| 青岛胶南生活垃圾厌氧发酵沼气发电项目      | 青岛胶南绿茵环保科技有限公司  | 葡萄牙私人碳基金<br>(葡萄牙)                                                  | 2011.01 |
| 安阳市有机废弃物处理年产400万方沼气示范项目 | 北京联合优发能源技术有限公司  | 雷克碳资产有限公司(英国)                                                      | 2011.02 |
| 潍坊市生活垃圾填埋场填埋气体回收利用发电工程  | 潍坊润通生物能源有限公司    | RWE Power Aktiengesellschaft<br>(德国)                               | 2011.03 |
| 安徽黄山里石亭垃圾填埋气回收和利用项目     | 黄山市生活垃圾处理中心     | 瑞典能源署和亚洲开发银行<br>(瑞典)                                               | 2011.7  |
| 宁波鄞州垃圾填埋场填埋气发电项目        | 宁波齐耀新能源有限公司     | 环保桥有限公司(英国)                                                        | 2011.7  |

资料来源：中国清洁发展机制网。

综上所述,垃圾填埋气体的资源化利用已成为控制其无序释放的主流方式。这与循环经济中所提出的“3R 原则”——减量化(reducing)、再利用(reusing)、再循环(recycling)有着异曲同工之处。因此,研究垃圾填埋气体排放对生态环境影响并进行资源化利用已迫在眉睫。

垃圾填埋气体资源化利用的前提是将其从填埋场中收集起来,控制和收集的有效途径是将垃圾填埋场封闭,并注井抽气。一方面,垃圾填埋气体的产生周期和垃圾生化降解状态描述是评价其资源化利用可行性过程中的重要指标,任何一个理想状态下可用于垃圾填埋气体回收的垃圾填埋场都必须同时具备高产气量、较

长的产气周期以及稳定的产气速率;另一方面,填埋场垃圾稳定化过程必然伴随能量的释放和传递,温度的变化对垃圾产气效能的影响是不可回避的问题。此外,垃圾填埋气体在垃圾堆土及周围介质中释放过程的定量化研究,也是实现垃圾填埋气体污染控制及资源化利用、优化收集系统设计和提高利用效率的有效手段。因此,填埋场内垃圾填埋气体收集效率的有效预测是实现垃圾填埋气体资源化利用及填埋场运营状态评价过程中所必须解决的问题。

用系统动力学方法来分析和研究垃圾填埋气体在环境介质中运移规律是对环境污染防治与控制的一个重要手段和发展趋势。垃圾一经填埋,就伴随着垃圾的微生物降解消耗内部氧气,从而产生大量的热量,填埋场内部温度升高,不但影响岩土、气体的物理性质,而且对填埋场的垃圾堆体应力场、污染物(气体和液体)渗流场和化学场也有重要的影响。同时,垃圾填埋气体作为一种环境因素对岩土的物理力学性质和热对流传输具有重要的影响;此外,垃圾堆体的热物理特性和生化降解反应也对气体浓度、压力以及固相骨架应力和变形起着重要的控制作用。因此,垃圾填埋气体的产出和释放过程受生物-渗流-应力-热耦合效应的影响,这一协同演化特征与垃圾填埋场内部复杂的物理和化学作用密切相关。

为此,本书采用理论与仿真计算相结合、现场调研与定性评价相结合、室内试验与现场监测相结合、技术开发与工程应用相结合的方法,以我国典型城市生活垃圾填埋场资源化利用工程为依托,系统开展了垃圾填埋气体运移过程中的多场多相耦合机理和规律的研究,分析了垃圾填埋气体从产出到运移演化的全过程,揭示了生物、化学、热、应力和渗流协调演化条件下垃圾填埋气体运移的耦合动力学机制,并建立了相应的耦合数值模型;以所建立的耦合模型为依据,以我国南方某垃圾卫生填埋场为依托,开展了沼气发电工程服役年限的仿真预测研究,其成果对于垃圾填埋气体收集系统的优化设计以及资源化利用效率的合理评价具有重要的现实意义。

## 1.2 垃圾填埋气体运移的国内外研究现状

为了弄清垃圾填埋气体在填埋场内的释放特征及迁移演化规律,国内外学者相继从不同角度和层次开展了一系列的理论和试验研究,这些研究成果为开展多场耦合理论及工程实践研究提供了良好的平台。

对垃圾填埋气体的研究始于20世纪70年代末80年代初,由于西方普遍出现能源危机,各国开始重视对新型能源的开发利用研究;另外公民环境保护意识的提高和政府污染物排放加以限制的法规日趋严格,对垃圾填埋场释放气体的控制和利用引起了人们的重视。目前,垃圾填埋气体的控制和处理已是发达国家垃圾卫生填埋场运营和管理的必要组成部分。