

垃圾气力管道运输模拟

尤学一, 张 杰, 赵 坤

(天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300072)

摘 要:随着人们对生活条件和环境的要求日渐提高,传统的以人力清运垃圾的方式已经不能够满足现代人的需求。垃圾的气力输运以卫生、美观、环保、经济的优势,成为了垃圾输运方式的发展趋势。在考虑气力输运特点的基础上,建立了垃圾气力输运管道两相流离散相模型,模拟了管道中垃圾输运情况。通过改变参数设置,分析了运行参数对垃圾输运的影响,为垃圾气力输运系统设计与优化提供了理论指导。

关键词:离散相模型;气力垃圾收集系统;垃圾种类;垃圾处理

中图分类号:X705 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)06-0110-04

Simulation of Waste Pneumatic Transportation in Pipeline

YOU Xue-yi, ZHANG Jie, ZHAO Shen

(School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China)

Abstract: With the increasing demands for favorable living condition and environment, the traditional method of waste transportation cannot meet the people's demand. The waste pneumatic pipeline transportation system noted for its cleanness, tidy, health, and economy is becoming the trend of discharging waste. A discrete phase model is presented and the operational parameters of the system on the transportation efficiency are discussed. The numerical results propose advices on the design and operation of waste pneumatic collection system.

Key words: discrete phase model; waste pneumatic collection system; waste kinds; waste treatment

垃圾气力管道输送系统是当今世界上可对生活垃圾实行全封闭化、压缩化、集装化收运的现代化垃圾收集方式,该系统具有高效率、节能和环境友好等突出优点,大大提高了垃圾收集效率,代表了城市垃圾收运的发展方向。

垃圾气力管道运输系统已经有了一定的应用,工程应用技术相对成熟^[1-4]。西班牙、葡萄牙使用气力管道输送生活垃圾的普及率已达到 10%~20%^[5],亚洲的应用主要集中在日本、新加坡和香港,沙特的麦加市也运用此系统^[6]。至今全球共有近千套垃圾气力管道输送系统投入使用。

上海浦东国际机场和广州市白云新国际机场都

采用该系统,北京国际中心、上海泰晤士小镇住宅区、广州金沙洲居住区和花园酒店的垃圾气力管道输送系统都已经投入使用。与其它国家的输送系统相比较,设备大多采用国外制造,运行控制也很成功^[7]。

目前中国在这一领域研究较少,其它国家气力输运系统制造商很少发布或者出版有关系统设计参数的专业信息,运送材料的流率、运送地点、管道口径和空气压力等等都超出了已有的信息范围^[8-9]。中国引进垃圾收集技术至今仍基于经验确定各项参数^[10],有关气力输运系统的理论研究较少,因此,运送材料的流率、运送管网、管道口径和空气压力、能

收稿日期:2010-04-30

基金项目:国家科技支撑计划课题(2008BAD96B01)

作者简介:尤学一(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事环境系统的数值模拟研究,(E-mail)xyyou@tju.edu.cn。

耗和经济分析等亟待加强研究。

该文通过计算流体力学数值模型,初步分析了运行参数对气力运输系统的影响,为优化设计提供了理论基础。

1 垃圾气力运输系统

垃圾气力运输系统是利用抽风机产生的抽吸效果,使垃圾在地下专用管道内,以一定的速度传送,气力输送系统具有结构简单、性能稳定、运动部件少、工作环境好、易于实现自动化等优点^[11]。如果管道发生堵塞,可以通过提高抽风机的转速,产生高压将管道疏通。垃圾的气力运输可以通过预先铺设好的管道系统,利用负压技术将垃圾分类并抽送至中央垃圾收集站,最后集中处理,如图1所示。垃圾的气力运输系统允许做细节调整,比如提前进行垃圾分类、垃圾粉碎后再运输、城区内还将垃圾抽吸至

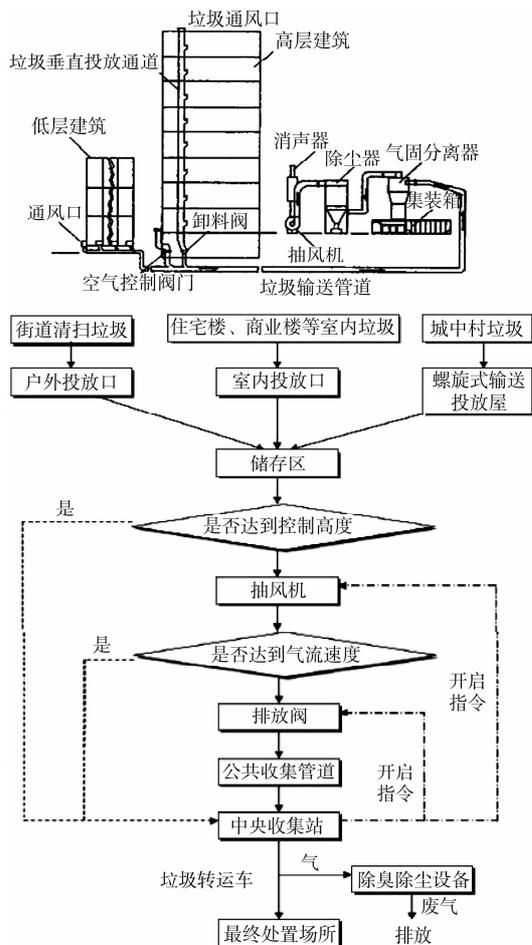


图1 垃圾气力运输系统示意图与工艺流程图^[12]

少量固定垃圾车等。

2 模型建立

假定垃圾经预处理粉碎,空气和垃圾颗粒分别为连续相和分散相,采用离散相两相流模型模拟垃圾颗粒运移。

对于连续相,即管道中的气体,采用不可压缩的N-S方程描述:

$$\nabla \cdot (u_1) = 0 \quad (1)$$

$$\rho_1 \nabla \cdot (u_1 u_1) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_1 (\nabla u_1 + [\nabla u_1]^T)] + \rho_1 g \quad (2)$$

式中 u_1 、 ρ_1 和 μ_1 表示连续相的速度、密度和黏性系数, g 为重力加速度。

对于分散相,即垃圾颗粒,利用拉格朗日法描述颗粒的运动轨迹,即:

$$\frac{du_p}{dt} = F + g \frac{\rho_p - \rho_1}{\rho_p} \quad (3)$$

$$F = F_D (u_1 - u_p) + \frac{\rho_1}{2\rho_p} \frac{d}{dt} (u_1 - u_p) + F_A \quad (4)$$

其中, ρ_p 和 u_p 是颗粒的密度和速度。式(4)右边分别为托曳力、附加质量力和附加力。

连续相湍动采用标准 $\kappa\epsilon$ 模型模拟,离散相采用随机跟踪方法来计算颗粒的湍流扩散,计算时考虑了相间耦合作用。

3 计算区域及各参数设置

气力运输系统包括正压和负压技术系统,以及2种技术结合的系统^[13]。该文选取负压运输考察平直管道中垃圾的运输情况,通过改变不同的运行参数和条件,分析不同参数和变量对垃圾运输的影响。假定垃圾经过粉碎,以粉料的形式存在,垃圾颗粒使用球形近似。

计算管道长为100 m,半径为0.5 m(除特别声明外),水平向使用等比例网格,垂向靠壁面处网格加密一倍。经过网格加密实验,验证了网格的有效性。对于连续相(空气),入口处设置为压力入口,出口处设置为压力出口,边界设置为墙,操作压力为1个大气压。对于离散相(垃圾颗粒),颗粒直径为0.005 m(除特别声明外),入口及管壁边界类型均设为反射,出口边界类型为逸出。

模拟时采用的垃圾常见组分和密度如表1所示。

表1 垃圾组成与密度

物质	灰	木头	塑料	蔬菜	煤	橡胶	湿沙子	玻璃	铝
密度/(kg·m ⁻³)	600	700	920	1 100	1 400	1 600	1 820	2 300	2 719

垃圾在粉碎后,先存放在系统中,满足控制高度后开启鼓风和减压装置,将垃圾输运至中央收集站。论文考虑了 2 种垃圾初始分布的影响,即平铺或堆积。由于垃圾颗粒数目巨大,逐粒计算不现实,故采用典型点作颗粒初始位置,分别为平铺和堆积,如图 2 所示。

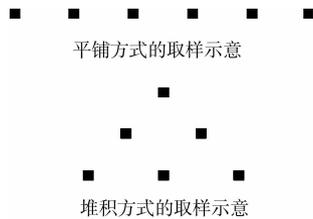


图 2 不同初始颗粒分布图

黑色实心方形代表一个抽象点,每种粒子的初始分布方式由 6 个抽象点代表,每个抽象点设 200 个粒子(粒径=0.005 m,其它粒径下保持颗粒质量流量相同)。颗粒初始速度为零,抽象点位置为距入口处 0.2~0.8 m(平铺)和 0.35~0.65 m(堆积)的范围内。

4 结果与讨论

4.1 粒子堆积方式的影响

选取灰为代表,考察灰粒子初始分布对平均逸出时间的影响。图 3 给出灰在不同堆积初始分布的条件下的结果,表明粒子初始分布对逸出时间影响不大,即堆积初始分布方式不会带来输运时间的改变,该文采用堆积颗粒分布进行研究。

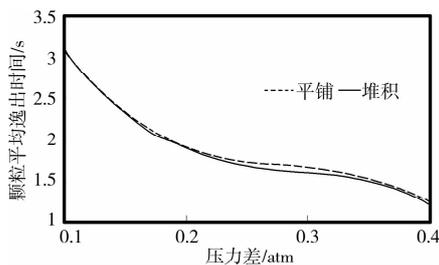


图 3 灰在不同垃圾堆积初始分布时,颗粒逸出时间的对比

4.2 密度的影响

以颗粒的密度为变量,考察不同压力差条件下,颗粒的逸出时间。图 4 给出堆积条件下粒子($d=0.005$ m)的平均逸出时间,每种情况取 3 次计算的平均值。

可以看出,垃圾颗粒密度与平均逸出时间显示了较好的线形关系,但其影响不大。

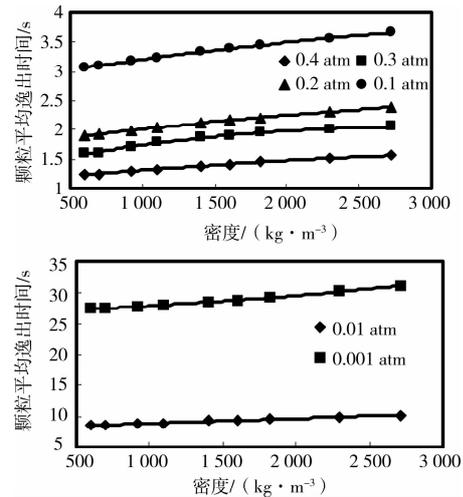


图 4 堆积分布的颗粒逸出时间

4.3 压差的影响

选取 3 种材质(灰、煤、铝)的垃圾颗粒,考察压力差对粒子平均逸出时间的影响,见图 5。可以看出,压力差的不同对颗粒平均逸出时间的影响显著。垃圾颗粒的平均逸出时间与压力差呈反比关系,且逸出时间曲线在 0.01 atm 处发生明显的偏折,说明压力差小于 0.01 atm 时,逸出时间急剧增大,系统效率降低。压力差对颗粒的逸出时间有较大的影响,随着压力差减小,粒子逸出时间加大。

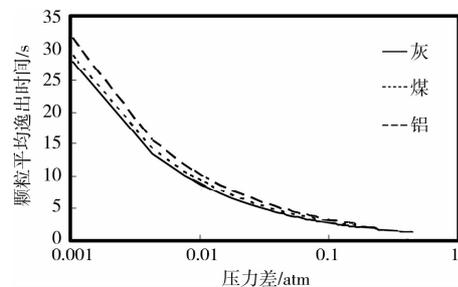


图 5 颗粒平均逸出时间与压力差的关系

4.4 粒径的影响

研究了垃圾粉碎颗粒大小对平均逸出时间的影响。图 6 给出了不同颗粒直径情况下(压力差 0.1 atm)的模拟结果。

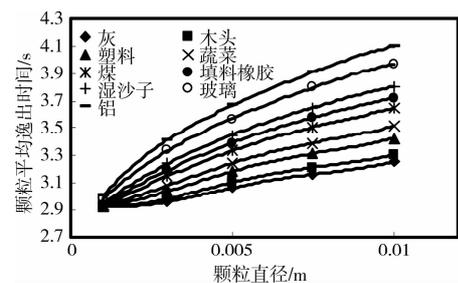


图 6 粒径与颗粒平均逸出时间的关系

可以看出,随颗粒粒径减小,平均逸出时间减小;当粒径减小到某一值时,密度小的颗

粒如灰、木头、塑料等出现平均逸出时间基本趋于同一值。平均逸出时间随粒径的减小总体上保持收敛于同一值的趋势,且在接近 0.001 m 时基本保持相同的逸出时间。

4.5 管径的影响

图 7 给出了管径对平均逸出时间的影响。取灰、煤、铝物质为典型参考物,颗粒粒径选取为 0.005 m、压力差为 0.1 atm,管半径分别为 0.25 m、0.5 m、0.75 m、1 m。可以看出,在相同的压差条件下,逸出时间随管径的减小而保持总体增大的趋势,总体呈多项式关系。在所计算的范围内,认为管半径在 0.5~0.9 m 之间变化的程度放缓。可认为是经济管半径区间。考虑到用材的节约问题,可取 0.5 m 为合适管半径。

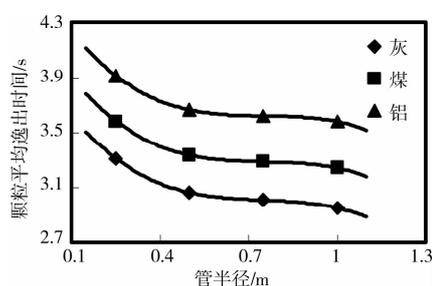


图 7 管径与颗粒平均逸出时间的关系

5 结语

以气力垃圾收集系统管道为模拟对象,对垃圾颗粒运输进行数值模拟,可以看出,粒子堆积方式对颗粒运输影响不大,堆积方式初始分布状态对垃圾的抽送更有利。密度与垃圾运输的速度和时间呈现出较好的线性关系:密度越大,相同管道内输送时间越长,速度越慢;反之密度越小,输送时间越短,速度越快,但总体影响较小。压力差与垃圾运输的时间在所计算压力内基本上呈现反比;当压力差小于 0.01 atm 时,垃圾运输的速度会急剧减慢,输送耗时过长,在实际操作中不可取。垃圾颗粒粒径的选取上,粒径在 0.001 m 左右为适宜粒径。通过逸出时间分析,0.5 m 管半径为最优。

根据其它国家、中国香港、上海及广州的工程建设及运营经验,垃圾输送管道空气和垃圾混合体的经济流速应控制在 15~25 m/s 的范围^[14],比较符合文中给出的模拟数据,此外,垃圾气力输送系统的实用性还与“掉料”现象^[15]、整体控制、电机的调节控制、风机的选择及其出口管道、管道系统及其管件有关。因此,垃圾气力输送系统仍有待进一步深入研究。

参考文献:

[1] MARK G J, KENNETH C W. Predicting the mode of flow in pneumatic conveying systems[J]. Particology, 2008, 6(5):289-300.
 [2] CECILIA A, CHANDANA R, MATHS H. Online prediction of mass flow rate of solids in dilute phase

pneumatic conveying systems using multivariate calibration [J]. Powder Technology, 2009, 195(2): 113-118.

- [3] LAI YENG LEE, TAI YONG QUEK, RENSHENG DENG, et al. Pneumatic transport of granular materials through a 90° bend[J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(21): 4637-4651.
 [4] 林洪,周敬宣,段金明. 气力管道输送在垃圾收运领域的应用研究[J]. 环境保护科学, 2006, 32(4): 36-37.
 LIN HONG, ZHOU JING-XUAN, DUAN JIN-MING. Research on pneumatic pipe conveyance applying in waste transportation field [J]. Environmental Protection Science, 2006, 32(4): 36-37.
 [5] 李林永. 垃圾气力管道输送系统概述[EB/OL]. http://www.toiletweb.cn/, 2008-7-2.
 [6] ABDULLAH S A, ASAD S A. Pipeline transport of solid waste in the Grand Holy Mosque in Makkah[J]. Waste Management Research, 2003, 21: 474-479.
 [7] 郭骅,秦峰. 气力输送专题[EB/OL]. http://www.huanke.com.cn, 2008-12-29.
 [8] 陈迁,胡宏敏. 粉状物料气力输送方式的比较[J]. 水利水电快报, 1999, 20(23): 4-5.
 CHEN QIAN, HU HONG-MIN. Comparison of methods of pneumatic conveying with powder material [J]. Information of Water Resources and Hydropower, 1999, 20(23): 4-5.
 [9] GBENGA M A, MUSA A M. An engineering approach to solid waste collection system: Ibadan North as case study[J]. Waste Management, 2008, 28: 1681-1687.
 [10] 段金明,周敬宣. 真空管道垃圾收集系统关键工艺参数优化设计[J]. 真空, 2007, 44(1): 39-41.
 DUAN JIN-MING, ZHOU JING-XUAN. Optimum design of key process parameters for waste collection system by vacuum conduit[J]. Vacuum, 2007, 44(1): 39-41.
 [11] CALDWELL D G, TSAGARAKIS N, MEDRANO-CERDA G A, et al. A pneumatic muscle actuator driven manipulator for nuclear waste retrieval [J]. Control Engineering Practice, 2001, 9: 23-36.
 [12] 董作刚. 垃圾真空管道收集系统及其社会经济效益分析[J]. 中国高新技术企业, 2008, 17(119): 155-156.
 DONG ZUO-GANG. Analysis of social and economic benefit for waste collection system by vacuum conduit [J]. Chinese High-tech Enterprise, 2008, 17(119): 155-156.
 [13] FREDRIK A C, STEFAN F, GUDMUNDUR S B, et al. Characterization and prediction of sub surface pneumatic response at Yucca Mountain, Nevada [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1999, 38(7): 47-68.
 [14] 刘成林. 真空管道垃圾收集技术在亚运城前期研究中的应用[J]. 市政技术, 2008, 26(4): 337-339.
 LIU CHENG-LIN. Application of Collection Techniques by Vacuum Tube for Domestic Refuse [J]. Municipal Engineering Technology, 2008, 26(4): 337-339.
 [15] LARS F, WOLFGANG P. Identification of material specific attrition mechanisms for polymers in dilute phase pneumatic conveying [J]. Chemical Engineering and Processing, 2005, 44(2): 175-188.