

陶瓷球固体热载体与粉状生物质的热平衡分析^{*}

李志合 易维明 刘焕卫

(山东理工大学轻工与农业工程学院, 淄博 255091)

【摘要】 为研究陶瓷球固体热载体与粉状生物质之间的换热规律,以 90℃ 陶瓷球,在 1.0、1.2 和 1.4 kg/min 质量流量下与室温生物质粉在垂直下降管散体颗粒换热实验台上进行了热交换实验,通过热平衡分析确定了不同陶瓷球流量下生物质粉总吸热速率中对流换热、导热各自所占的比例。研究表明热传导在生物质粉吸热升温过程中占 61%~87%;当陶瓷球流量从 1.0 kg/min 增大到 1.4 kg/min 时,热传导所占的比例减小,而对流换热所占比例增大 19% 以上。

关键词: 陶瓷球 粉状生物质 热平衡

中图分类号: TK6 **文献标识码:** A

Heat Balance Analysis of Ceramic Ball Heat Carrier and Biomass Powder

Li Zhihe Yi Weiming Liu Huanwei

(School of Light Industry and Agricultural Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255091, China)

Abstract

In order to investigate the heat exchange principle between the ceramic balls heat carrier and biomass powder, heat exchange experiments were conducted with ceramic balls of 90℃ at 1.0, 1.2 and 1.4 kg/min and biomass powder of ambient temperature in a vertical down tube heat transfer reactor. The percentages of heat conduction and heat convection of the total endothermic flux of the biomass powder were determined at different ceramic balls mass flow by heat balance analytic method. The results indicate that the heat conduction was the dominant heat transfer mechanism which reached 61%~87% during the heat exchange between the solid heat carrier and biomass powder. The heat conduction ratio decreased distinctly and the heat convection increased over 19% when the ceramic balls mass flow increased from 1.0 kg/min to 1.4 kg/min.

Key words Ceramic ball, Biomass powder, Heat balance

引言

近年来,学者们针对生物质热裂解反应器内生物质颗粒的传热研究,以流化床和循环流化床反应器居多^[1~6]。利用散体颗粒之间的温差可以实现低温物质的快速升温^[7]。固体热载体加热下降管式生物质热裂解液化反应器是利用直径为 2 mm 左右的高温陶瓷球作为热载体,在重力作用下与粉状生物质在一圆形管内混合下降流动过程中进行热交换,使生物质发生热裂解的一种新型工艺。高温陶

瓷球热载体、热解半焦颗粒以及热解气体产物在下降管中的流动与传热是非常复杂的多相流动与传热现象。研究其传热规律有助于该工艺的优化和热解机理的深入了解。

本文对 90℃ 的陶瓷球固体热载体和室温生物质粉在垂直下降管散体颗粒换热实验台上进行了热交换实验,以研究陶瓷球、生物质及空气三者之间的热交换规律,通过热平衡分析确定对流、导热在热交换中所占的比例关系。

收稿日期: 2008-11-12 修回日期: 2008-11-24

^{*} 国家自然科学基金资助项目(50876056、50576048)

作者简介: 李志合,副教授,主要从事生物质热裂解技术研究, E-mail: lizhihe@sdut.edu.cn

通讯作者: 易维明,教授,博士生导师,主要从事生物质热裂解技术研究, E-mail: yiweiming@sdut.edu.cn

1 实验

1.1 实验台

图1为垂直下降管散体颗粒换热实验台结构示意图。下降管采用长1600 mm、内径110 mm的PVC管材。为减少管壁热损失,管内壁附一层厚度为15 mm泡沫塑料绝热材料。从上管口向下分别在100、400、800、1200、1500 mm处放置T型热电偶用以测量管内气体温度。陶瓷球流量依靠调节螺杆的升降带动下端控制阀产生与料箱壁间隙的大小来控制。生物质粉喂料采用螺旋喂料器输送。颗粒分离箱把参与换热后陶瓷球和生物质粉颗粒筛分后进入不同的集料箱,利用T型热电偶检测其温度。

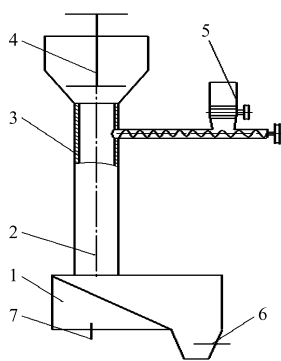


图1 垂直下降管散体颗粒换热实验台结构示意图

Fig.1 Sketch drawing of the down flow tube for heat transfer of particles

- 1.颗粒分离箱 2.垂直下降管 3.保温层 4.调节螺杆
5.二级生物质粉喂料器
6.陶瓷球测温热电偶 7.生物质粉测温热电偶

1.2 实验材料

实验中所采用的陶瓷球颗粒由山东省淄博市华光陶瓷厂生产,陶瓷球直径2 mm,主要成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 ,堆密度为 $2\ 200\ \text{kg}/\text{m}^3$,实密度约为 $2\ 400\ \text{kg}/\text{m}^3$,利用标准分样筛筛分玉米秸秆粉,取堆密度 $120\ \text{kg}/\text{m}^3$ 左右、粒径40~80目的生物质粉作为实验材料。玉米秸秆粉的比热容为 $1.62\ \text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,导热系数与温度呈线性关系^[8]。

1.3 实验过程

首先用 90°C 陶瓷球预热系统,待检测温度恒定时,分别以陶瓷球质量流量1.0、1.2、1.4 kg/min 和陶瓷球与生物质粉质量比15、20、25喂入下降管进行换热实验。记录陶瓷球、生物质粉换热前、后的温度和管内空气的温度数据。

1.4 实验结果与分析

表1为不同陶瓷球质量流量与质量比下陶瓷球、生物质粉和空气换热实验所得到的温度数据。

表1数据说明,同一陶瓷球质量流量下,随着陶瓷球和生物质粉质量比的增大,生物质粉温度变化幅度增大,即生物质粉被加热的温度更高,而陶瓷球温度降低幅度减小。这对生物质热裂解液化具有指导意义,即为避免陶瓷球温度变化较大,增加换热器负荷,可以适当增加陶瓷球与生物质粉质量比。

表1 陶瓷球、生物质和空气换热前、后的初终温度
Tab.1 Initial and final temperatures of ceramic balls, biomass particles and air

陶瓷球流量 $/\text{kg}\cdot\text{min}^{-1}$	质量比	陶瓷球 温度 $^\circ\text{C}$		生物质粉 温度 $^\circ\text{C}$		空气 温度 $^\circ\text{C}$	
		初温	终温	初温	终温	初温	终温
1.0	15	90	72.9	18.2	53.8	41.0	57.6
	20	90	73.9	18.0	55.2	41.7	58.6
	25	90	75.1	18.4	57.5	44.1	60.6
1.2	15	90	75.1	18.8	57.3	49.7	59.8
	20	90	75.7	19.0	58.5	50.5	60.2
	25	90	75.9	19.0	59.4	52.1	61.3
1.4	15	90	74.3	16.0	53.5	41.8	60.6
	20	90	75.3	16.0	56.5	43.8	61.1
	25	90	76.1	16.0	59.5	45.9	62.1

2 热平衡分析

包含颗粒相的多相流系统,其相间传热归纳起来主要有以下几种^[5,9~10]:通过接触表面的热传导,通过接触面附近的气膜导热,颗粒与气体的对流传热;颗粒间的辐射传热;颗粒内部的导热。本研究中,垂直下降管内存在陶瓷球、生物质粉和空气三者之间的热量交换。由于实验是在 90°C 以下进行的,而低于 600°C 以下辐射传热很小^[10],可以不予考虑。热交换过程中,陶瓷球释放热量,温度降低;空气和生物质粉吸收热量,温度升高。对于三者之间的热平衡,可作如下分析:

对于陶瓷球

$$q_c = q_{cb} + q_{ca} \quad (1)$$

式中 q_c ——陶瓷球的放热速率, kJ/min

q_{cb} ——陶瓷球与生物质粉碰撞导热速率, kJ/min

q_{ca} ——陶瓷球和空气的对流换热速率, kJ/min

对于生物质粉

$$q_b = q_{ab} + q_{cb} \quad (2)$$

式中 q_b ——生物质粉总吸热速率, kJ/min

q_{ab} ——生物质粉与空气对流换热速率, kJ/min

对于空气

$$q_{ca} = q_{ab} + q_{\text{lost}} \quad (3)$$

q_{lost} 是由于密封及保温等原因导致进入的少量冷空气造成的热损失。由于管壁采用了绝热性能较好的保温材料,因此热损失很小,在长时间预热系统的前提下,热损失不超过2%。因此,分析中未考虑

这部分热损失的影响。

2.1 陶瓷球放热速率

根据陶瓷球的质量流量,可以计算出陶瓷球每分钟释放的热量

$$q_c = V_c c_p \Delta T_c \quad (4)$$

式中 V_c ——陶瓷球质量流量, kg/min

c_p ——陶瓷球的比定压热容, kJ/(kg·K)

ΔT_c ——陶瓷球换热前后温度差, °C

实验测得陶瓷球的比热容在 70~80°C 时为 0.81 kJ/(kg·K)。根据表 1 中陶瓷球初、终温度和式(4)计算得到各实验工况下陶瓷球的放热速率如表 2 所示。

表 2 不同流量下陶瓷球放热速率

Tab.2 Exothermic heat rate of ceramic balls at different mass flow rate

陶瓷球流量/kg·min ⁻¹	质量比	q_c /kJ·min ⁻¹
1.0	15	13.85
	20	13.04
	25	12.07
1.2	15	14.48
	20	13.89
	25	13.70
1.4	15	17.57
	20	16.66
	25	15.76

从表 2 中可以看出,随着陶瓷球质量流量的增大,陶瓷球的放热速率显著增大。在同一陶瓷球流量下,陶瓷球与生物质粉质量比越小,陶瓷球放热速率越大,即陶瓷球单位时间内放出的热量越多。因为质量比越小,生物质粉相对含量越大,单位时间内生物质粉吸热越多。

2.2 空气吸热速率

实验中,当下落生物质粉后,陶瓷球放出的热量,一部分通过二者之间的碰撞与接触导热传递给生物质粉,另一部分则通过对流传递给空气。陶瓷球与空气的对流换热速率为

$$q_{ca} = h_p A_p \Delta T_m \quad (5)$$

式中 h_p ——陶瓷球与空气的对流传热系数, W/(m²·K)

A_p ——不同流量陶瓷球总表面积, m²/min

ΔT_m ——陶瓷球和管内的空气的对数平均温差, °C

根据实验数据与理论分析^[11],得到陶瓷球在质量流量 1.0、1.2、1.4 kg/min 时的 h_p 值分别为:

291、291、292 W/(m²·K)。利用表 1 中的数据,根据对数平均温差法: $\Delta T_m = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}}$, 计算出陶瓷球和空气之间的平均温差 ΔT_m 如表 3 所示。

表 3 陶瓷球和空气之间的平均温差

Tab.3 Average temperature of ceramic ball and air at different mass flow rate

陶瓷球流量/kg·min ⁻¹	质量比	温差/°C
1.0	15	28.95
	20	28.71
	25	27.26
1.2	15	25.88
	20	25.66
	25	24.43
1.4	15	27.58
	20	27.12
	25	26.23

由于陶瓷球密度大、粒径均匀,因此式(5)中的 A_p 可以通过计算陶瓷球各流量下垂直下降管内每分钟所具有的陶瓷球总数和单个陶瓷球的表面积求出。根据式(5)计算得到不同流量下陶瓷球与空气的对流换热速率如表 4 所示。表 4 表明,随着质量比的增大,陶瓷球与空气之间通过对流方式放出的热量增大显著。而同流量下,随质量比的增大,放热速率有减小的趋势。

表 4 不同流量下陶瓷球和空气的对流换热速率

Tab.4 Convective heat transfer rate of ceramic ball and air at different mass flow rate

陶瓷球流量/kg·min ⁻¹	质量比	q_{ca} /kJ·min ⁻¹
1.0	15	10.46
	20	10.38
	25	9.85
1.2	15	11.25
	20	11.15
	25	10.62
1.4	15	14.01
	20	13.78
	25	13.33

2.3 陶瓷球与生物质粉的导热速率

由式(1)结合表 2 和表 4 计算得到陶瓷球与生物质粉之间的导热速率 q_{cb} ,如表 5 所示。生物质粉总吸热速率为 $q_b = C_b \Delta T_b$,玉米秸秆粉的比热容为 1.62 kJ/(kg·K)^[8],则计算出生物质粉总吸热速率

如表6所示。根据表5和表6及式(2)可以计算出生物质粉与空气对流换热速率,从而计算得到的生物质粉总吸热速率中对流和热传导速率所占的比例如表7所示。从表7可以看出:生物质粉吸热升温过程中,热传导方式占的比例较大,是主要的热传递

方式,达到61%~87%;当陶瓷球流量从1.0 kg/min增大到1.4 kg/min时,热传导的比例减小,而对流换热所占比例增大19%以上。因为陶瓷球流量的增大,通过对流传递给空气的热量增加,加入生物质粉后,空气把更多的热量又通过对流传递给生物质粉。

表5 不同流量下陶瓷球和生物质粉的导热速率

Tab.5 Conductive heat transfer rate of ceramic ball and biomass at different mass flow rate

陶瓷球流量/kg·min ⁻¹	质量比	$q_{cb}/\text{kJ}\cdot\text{min}^{-1}$
1.0	15	3.39
	20	2.66
	25	2.22
1.2	15	3.23
	20	2.74
	25	3.08
1.4	15	3.56
	20	2.88
	25	2.43

表6 不同陶瓷球流量下生物质粉总吸热速率

Tab.6 Biomass endothermic rate at different mass flow rate and mass ratios

陶瓷球流量/kg·min ⁻¹	质量比	$q_b/\text{kJ}\cdot\text{min}^{-1}$
1.0	15	3.95
	20	3.11
	25	2.55
1.2	15	4.90
	20	3.80
	25	3.25
1.4	15	5.4
	20	4.64
	25	3.96

表7 导热和对流换热所占的百分数

Tab.7 Percentage of conductive and convective heat caloric of biomass at different mass flow rate and mass ratios

陶瓷球流量/kg·min ⁻¹	质量比	导热所占比例/%	对流所占比例/%
1.0	15	85	15
	20	85	15
	25	87	13
1.2	15	66	34
	20	72	28
	25	85	15
1.4	15	66	34
	20	62	38
	25	61	39

3 结束语

陶瓷球固体热载体与粉状生物质在垂直下降管混合流动过程中发生热交换,生物质粉在吸热升温过程中,导热占的比例较大,达到61%~87%,是主要的热传递方式;当陶瓷球流量从1.0 kg/min增大到1.4 kg/min时,导热的比例减小显著,而对流换热比例增大19%以上。

参 考 文 献

- 傅利华,郑典模,孙云.生物质快速热解液化技术的研究进展[J].江西化工,2007(2):45~49.
Fu Lihua, Zheng Dianmo, Sun Yun. Research progress in biomass flash pyrolysis technology for liquids production[J]. Jiangxi Chemical Industry, 2007(2):45~49. (in Chinese)
- Bridgwater A V. Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 1999, 51(1): 3~22.
- 戴天红,钱壬章,李宏顺.循环流化床的传热机理——颗粒絮团更新模型[J].燃烧科学与技术,1997,3(3):270~279.
Dai Tianhong, Qian Renzhang, Li Hongshun. Heat transfer mechanism in circulating fluidized beds-cluster renewal model [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 1997, 3(3):270~279. (in Chinese)
- 刘安源.流化床内流动、传热及燃烧特性的离散颗粒模拟[D].北京:中国科学院工程热物理研究所,2002.
Liu Anyuan. Discrete particle simulation of hydrodynamics, heat transfer and combustion in fluidized bed[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, CAS, 2002. (in Chinese)
- 刘安源,刘石.流化床内颗粒碰撞传热的理论研究[J].中国电机工程学报,2003,23(3):161~165.
Liu Anyuan, Liu Shi. Theoretical study on impact heat transfer between particles in fluidized bed[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3):161~165. (in Chinese)

分运动模型,采用 Galerkin 有限单元法对方程进行数值求解。在室内进行模拟试验,用试验实测含水率值和湿润锋对计算值进行了验证,结果表明两者

具有较好的一致性,说明采用本文的数学模型和方法得出的数值解可以很好地模拟乔灌篱沟蓄沟道土壤水分运动状况。

参 考 文 献

- 1 陈渭南,董光荣,董治宝. 中国北方土壤风蚀问题研究的进展与趋势[J]. 地球科学进展,1994, 9(5): 6~12.
Chen Weinan, Dong Guangrong, Dong Zhibao. Achievements and needs of studies on wind erosion in Northern China[J]. Advance in Earth Sciences, 1994, 9(5): 6~12. (in Chinese)
- 2 刘国彬,李敏,上官周平,等. 西北黄土区水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008,6(1):16~21.
Liu Guobin, Li Min, Shangguan Zhouping, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for loess region in the Northwestern China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008,6(1):16~21. (in Chinese)
- 3 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1988:34~42.
- 4 康银红,马孝义,李娟,等. 黄土高原重力式地下滴灌水分运动模型与分区参数研究[J]. 农业机械学报,2008,39(3): 90~95.
Kang Yinhong, Ma Xiaoyi, Li Juan, et al. Soil water movement model and subarea irrigation parameter for gravity subsurface drip irrigation in loess plateau[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(3): 90~95. (in Chinese)
- 5 周青云,孙西欢,康绍忠. 蓄水坑灌条件下土壤水分运动的数值模拟[J]. 水利学报,2006,37(3):342~347.
Zhou Qingyun, Sun Xihuan, Kang Shaozhong. Numerical simulation for soil water movement of water storage pit irrigation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,37(3):342~347. (in Chinese)
- 6 陆垂裕,裴源生. 适应复杂上表面边界条件的一维土壤水运动数值模拟[J]. 水利学报,2007,38(2):136~142.
Lu Chuiyu, Pei Yuansheng. Simulation of 1-D vertical movement of soil adapting complicated upper surface boundary conditions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007,38(2):136~142. (in Chinese)
- 7 Neuman S P. Saturated-unsaturated seepage by finite elements[J]. J. Hydraul. Div., ASCE, 1973,99(12):2 233~2 250.
- 8 Khumoetsile. Experimental and numerical evaluation of analytical volume balance model for soil water dynamics under drip irrigation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003,67(6):1 657~1 671.
- 9 Skaggs T H, Trout T J, Simunek J, et al. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2004,130(4):304~310.

(上接第 106 页)

- 6 孔行健,孙国刚,王茂辉. 大差异颗粒气固流化床传热特性实验研究[J]. 炼油技术与工程,2008,38(3):18~23.
Kong Xingjian, Sun Guogang, Wang Maohui. Experimental investigation on heat transfer behavior of greatly solid fluidization bed[J]. Petroleum Refinery Engineering, 2008,38(3):18~23. (in Chinese)
- 7 郝培业. 混合状态下散体的传热过程研究[J]. 农业机械学报,1996,27(3):83~86.
Hao Peiye. The heat transfer model of grains in the mixed state[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1996,27(3):83~86. (in Chinese)
- 8 刘焕卫. 垂直管内陶瓷球和粉状生物质之间换热规律的研究[D]. 淄博:山东理工大学,2008.
Liu Huanwei. An investigation on heat exchange between ceramic beads and pulverized biomass in a vertical tube[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2008. (in Chinese)
- 9 武锦涛. 移动床中固体颗粒运动与传热的研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.
Wu Jintao. Study on solid flow and heat transfer of granular in moving beds[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)
- 10 Mansoori Z, Saffar-Avval M, Basirat Tabrizi H, et al. Inter-particle heat transfer in a riser of gas-solid turbulent flows[J]. Powder Technology, 2005,159(1):35~45.
- 11 李志合,刘焕卫,高巧春,等. 垂直下降管散体颗粒换热实验台的设计与实验[J]. 农业机械学报,2009,40(1):100~104.
Li Zhihe, Liu Huanwei, Gao Qiaochun, et al. Development and experiment of the vertical down tube for heat transfer of particles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(1):100~104. (in Chinese)