

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.023

生物质气化焦油分离器气相流场数值模拟*

付双成 董连东 邹鑫 程志平 袁惠新

(常州大学机械工程学院,常州 213016)

摘要: 根据焦油的物性和分离要求设计了一种适用于干法脱除焦油的新型焦油分离器,该焦油分离器同时具有冷却降温促焦油冷凝析出和分离焦油液滴的作用。通过对其气相流场的数值模拟发现,壁面降温对其内部温度场影响明显,这是气体运动传热的结果。旋风分离器内气体温度随着周边气流下行温度逐渐降低,随着中心气流上行而逐渐升高,在径向呈现驼峰状分布。温度降低导致了气体密度增加和粘度减小,以及焦油液滴粘度增加,通过对焦油液滴分离理论和焦油的物性分析得出,壁面降温可以减小切割粒径,有利于提高生物质气化燃气中焦油的分离效率。

关键词: 生物质气化 焦油 分离器 数值模拟

中图分类号: TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)07-0133-05

Numerical Simulation on Biomass Gasification Tar Separator

Fu Shuangcheng Dong Liandong Zou Xin Cheng Zhiping Yuan Huixin

(School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China)

Abstract: According to physical properties of the tar and separate requirements, a type of tar separator which is applicable to dry method of removing the tar was designed. This type of tar separator can cool and condensing the tar, at the same time separates the droplets of the tar. It can be seen from the numerical simulation results of gas flow field, the results of gas movement of heat transfer show that wall cooling has a great influence on temperature field in the cyclone separator. The temperature field also presents the characteristics that the surrounding area gradually reducing with surrounding downward flow, and the central zone rising up with centering upward flow, and the radial temperature gradually reducing in the cyclone separator. The decrease of temperature leads to the increase in gas density and the decrease in gas viscosity and the increase in the tar droplets viscosity. Wall cooling can reduce the cut size, as well as improve the separation efficiency of biomass gasification gas tar through the tar droplet separation theory and the physical analysis of tar.

Key words: Biomass gasification Tar Separator Numerical simulation

引言

近年来生物质气化技术作为开发清洁能源的一种方法成为研究的热点,但由于生物质气化气中含有的焦油会对灶具、燃气透平、管道等造成污染、堵塞和腐蚀,所以需对所产生的生物气进行恰当的净化处理^[1-4]。生物质气化燃气中焦油的净化方法主要有热化学脱除法和物理脱除法,热化学脱除法的研

究较多,但物理脱除法因工艺、设备简单,应用较多。然而,现有的物理脱除工艺、设备的净化效果不理想,还不能完全满足燃气发电的要求^[5]。因此,生物质燃气的净化问题已成为制约生物质热解气化技术商业化推广的主要因素,是国内外生物质能科学领域亟待解决的重要课题。本文采用冷却降温和旋流分离组合方式来进行焦油脱除,并对该组合工艺的原理加以研究,以达到优化工艺和结构的目的。

收稿日期:2012-06-02 修回日期:2012-11-12

*“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD02)

作者简介:付双成,讲师,主要从事多相流分离理论研究,E-mail: fushch711@163.com

1 焦油分离器的设计

干法除焦工艺常见流程:生物质原料从螺旋输送机加入气化炉,从气化炉出来的生物质气化气先进入旋风除尘器除掉其夹带的灰分,然后进入换热器进行降温,之后进入一级焦油分离器,通过罗茨风机增压后进入过滤器,净化后的生物质气化气进入气柜后输送到用户。

在干法脱除焦油工艺中一般只有一个换热器(或一次换热)进行冷却降温,一步将高温燃气降至常温后进行除焦。这样会造成大量的焦油冷凝析出并粘附在换热器的管壁上,不但会影响换热效率,甚至会堵塞换热管。显然采用分级冷却分级除焦的方法来脱除焦油效果会更佳,课题组设计了一种生物质气化焦油分离器——CYG-L-500型焦油分离器^[6],其将降温冷却和脱除焦油结合在一起,具有较高的分离效率。CYG-L-500型焦油分离器是由4个直径较小的旋风分离器并联组合而成,其结构如图1所示。4个并联的旋风分离器放置在一个筒体内,在旋风分离器的间隙通入冷却水来降温。为了提高换热效率,在旋风分离器外壁空间设置了折流板。

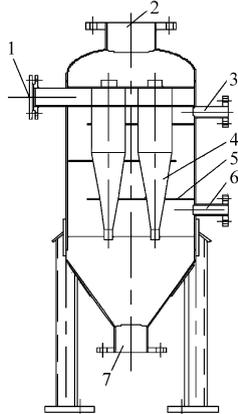


图1 CYG-L-500型焦油分离器

Fig.1 CYG-L-500 tar separator

1. 气体入口 2. 气体出口 3. 冷却水出口 4. 旋风分离器
5. 折流板 6. 冷却水入口 7. 排料口

2 性能试验

CYG-L-500型焦油分离器在南京某公司的生物质气化机组中进行了测试试验,将该焦油分离器安装在气化炉出口,作为焦油的一级分离器来脱除燃气中的焦油和灰分。气化原料为稻壳,采样选用等速采样法,测试参照《人工煤气组分与杂质含量测定方法》^[7]进行。

试验条件:入口气体温度为603℃,压力为-1050 Pa,此工况下的流量 $Q_i = 100 \text{ m}^3/\text{h}$ 。测定参

数为冷却水(工况I)、无冷却水(工况II)两种工况下的分离效率 η 、压力降 Δp 和气体出口温度 T_o ,如表1所示。

表1 试验数据

Tab.1 Test data

工况	$\eta/\%$	$\Delta p/\text{Pa}$	$T_o/^\circ\text{C}$
I	81.2	2404	448
II	65.8	2132	600

由表1可以看出,降低温度增加了分离效率和压降,为了揭示降温对旋风分离器性能影响的规律,利用Fluent 6.3软件对壁面降温的旋风分离器的气相流场进行了数值模拟。

3 数值模拟

3.1 基本原理

旋风分离器气相流场是一个强旋湍流流场。由于对旋风分离器进行降温,可以假定旋风分离器内进行的是一个不等温、可压缩过程,因此旋风分离器内气体流动可以由连续方程、动量守恒方程、能量守恒方程来描述。

目前RSM模型能较好地预测强旋湍流流场^[8-9]。在RSM应力模型中,考虑到湍流的各相异性,对动量方程中雷诺应力项写出输运方程,对其中包含的未知的三阶关联项用二阶封闭法,即按梯度模拟概念模拟,并用相应的方法模拟与压力脉动有关的关联项,从而使雷诺应力方程组封闭^[8]。描述雷诺应力输运方程可以写成

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho_g u_k \overline{u_i' u_j'}) = D_{ij} + P_{ij} + \Phi_{ij} - \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

式中 ρ_g ——气体密度 u_k ——速度

$\overline{u_i' u_j'}$ ——雷诺应力张量

D_{ij} ——扩散输运项

P_{ij} ——应力产生项

Φ_{ij} ——压力-应力关联项

ε_{ij} ——耗散项

下标 i, j, k 均为1、2、3。

3.2 建模和网格划分

数值模拟时对模型和边界条件进行简化,只模拟该焦油分离器中的一个旋风分离器。旋风分离器模型的尺寸和结构见表2和图2a,网格采用结构化网格,网格节点数为63597个,网格划分见图2b。

表2 旋风分离器结构尺寸

Tab.2 Structure size of cyclone mm

参数	a	b	D_c	S	h	H	H_1	B	D
数值	60	20	45	125	250	550	50	50	100

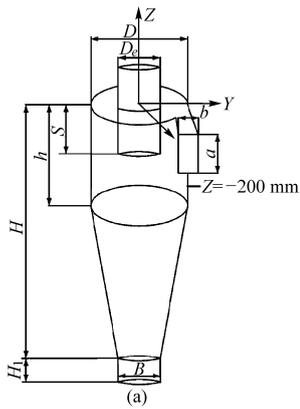


图 2 旋风分离器模型及网格

Fig. 2 Model and mesh cyclone

(a) 旋风分离器模型 (b) 旋风分离器网格

3.3 参数设置

计算采用雷诺应力模型(RSM), 介质选择理想气体, 粘度为 $\mu = 1.76 \times 10^{-5} (T/273.15)^{0.68}$ [8,10]。气相入口边界条件取质量入口条件, $m_i = 0.01 \text{ kg/s}$, $p_i = -1000 \text{ Pa}$ 。气相出口边界条件按压力出口条件处理, 出口表压 $p_o = -2000 \text{ Pa}$ 。在壁面处采用无滑移边界条件, 对近壁网格点采用壁面函数近似处理, 采用 QUICK 差分格式计算和 SIMPLEC 算法求解。

分别对两种工况进行数值模拟:

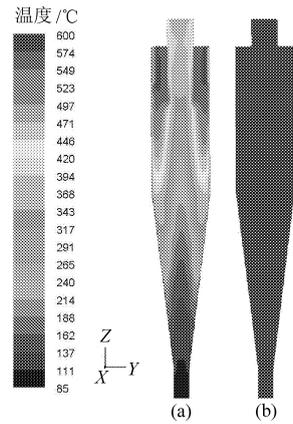
工况 I: 焦油分离器中通入冷却水, 对旋风分离器进行降温。进入旋风分离器的气体温度为 600°C , 旋风分离器筒体和锥体的壁面温度设为 85°C 。

工况 II: 焦油分离器中不通入冷却水, 空气对焦油分离器的降温影响较小, 故忽略空气对壁面温度的影响, 设旋风分离器筒体和锥体的壁面热通量为零。

4 数值模拟结果与讨论

4.1 温度场比较

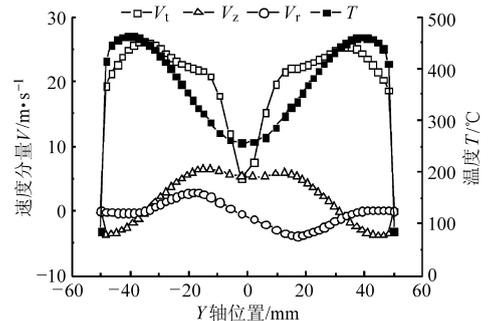
旋风分离器降温变化最明显的是温度场, 两种工况下 $X=0$ 截面的温度场云图如图 3 所示。从图中可以明显看到旋风分离器在工况 II 壁面等温时, 模拟计算是一个近似绝热过程, 故其内部温度没有变化, 出口温度也没有变化。旋风分离器在工况 I 壁面降温时, 其内部温度场变化较大。沿着 Z 轴方向从上到下温度逐渐降低, 在底部形成一个低温区; 在径向方向上, 在壁面附近温度最低, 温度沿着半径向中心先增大后降低。出口平均温度为 416°C , 低于试验值, 其原因在于壁面等温假设条件与实际相比有误差, 实际壁面不是等温的, 但并不影响对其进行定性分析。

图 3 $X=0$ 截面温度场Fig. 3 Temperature field at $X=0$

(a) 工况 I (b) 工况 II

4.2 速度场比较

工况 I 温度场的特征是旋风分离器中气体特有的流动规律造成的。筒体段 $Z = -200 \text{ mm}$ 截面与 $X=0 \text{ mm}$ 截面相交的轴线 (Y 轴) 上切向速度 V_t 、轴向速度 V_z 、径向速度 V_r 和温度 T 的分布规律如图 4 所示。在图 4 中可以看出, 筒体段切向速度 V_t 呈现出强制涡和准自由涡组合的特征, 可以分为内旋流和外旋流; 轴向速度 V_z 呈现周边下行流、中心上行流特征; 径向速度 V_r 呈现径向向心流动特征。

图 4 $Z = -200 \text{ mm}$ 截面上 Y 轴三维速度 V_t 、 V_z 、 V_r 和温度 T 的分布Fig. 4 Distribution of 3-D velocity V_t , V_z and V_r at $Z = -200 \text{ mm}$ and temperature T

气体进入到旋风分离器以后, 壁面附近的气体与壁面接触发生热交换。由于此处气体处于外旋下行流中, 气体螺旋向下运动, 气体的温度逐渐降低, 在旋风分离器底部气体温度达到最低。气体下行过程中, 部分气体一直沿着器壁螺旋向下运动到旋风分离器底部转向沿着中心线螺旋向上运动, 即中心上行流。同时, 另一部分气体沿着径向进入到中心上行流中。此时旋风分离器径向流和中心上行流温度不同, 径向流温度高, 中心上行流温度低, 它们之间存在着温差, 发生热交换, 形成了中心低温区。切向速度决定了气体与壁面间的传热系数, 同时也对分离性能有很大影响。

两种工况下旋风分离器的切向速度如图5所示,从图5中可以明显地看到,降温后的工况I中的切线速度有所减小。模拟结果显示,两种工况下旋风分离器进口气体体积流量相同,均为 $0.025\text{ m}^3/\text{s}$,而出口气体体积流量分别为: $Q_{\text{I}} = 0.02\text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{\text{II}} = 0.025\text{ m}^3/\text{s}$,气体体积流量的减小是降温导致气体密度增加所致。

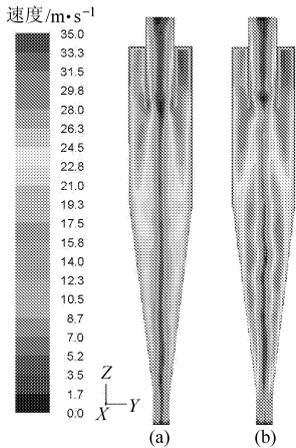


图5 $X=0$ 截面上的切向速度

Fig. 5 Tangential velocity field at $X=0$

(a) 工况 I (b) 工况 II

4.3 密度场比较

两种工况下旋风分离器 $X=0\text{ mm}$ 截面的密度如图6所示,从图6中可以明显地看到,在工况I降温后,气体密度明显增加,其分布与图3温度场相对应。特点是沿着轴向向下随着温度的降低密度逐渐增加,在入口处密度最小,在底部密度最大;沿着径向方向向内,随着温度的先增后降,密度也出现先降后增的趋势。密度的增加,导致了旋风分离器内部气体体积的减小,从而造成了速度的降低;同时也造成了气体压力的降低。

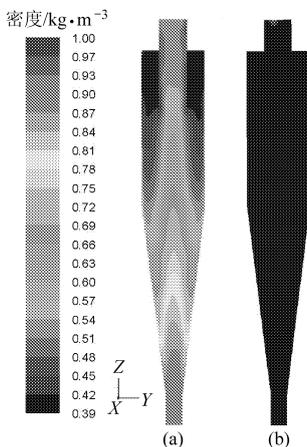


图6 $X=0$ 截面上的密度

Fig. 6 Density field at $X=0$

(a) 工况 I (b) 工况 II

4.4 压力场比较

旋风分离器的压降是衡量其性能的又一个指标,数值模拟结果表明,工况I时,壁面降温的旋风分离器压降 $\Delta p_{\text{I}} = 574\text{ Pa}$;工况II时,旋风分离器压降 $\Delta p_{\text{II}} = 518\text{ Pa}$,降温导致压降增加了 56 Pa 。这是由于工况I对旋风分离器进行了降温,其内部气体在运动过程中发生了热量损失。

测试试验用焦油分离器中含有4个并联的旋风分离器,每个旋风分离器的测试压降平均为 $\Delta p'_{\text{I}} = 601\text{ Pa}$ 、 $\Delta p'_{\text{II}} = 553\text{ Pa}$ 。试验压降与数值模拟压降相比较,这是由于数值模拟的压降为气相压降,而试验测试压降为气液两相流压降,气体携带液滴运动会损失能量,故两相流压降试验值略高。

4.5 分离效率与流场的关系

旋风分离器分离效率可以用切割粒径 d_{p50} 来衡量。旋风分离器切割粒径表示具有50%概率被捕集的粒径,切割粒径越小则旋风分离器的分离效率越高。气体密度与颗粒密度相比可忽略,由平衡轨道模型计算得到切割粒径^[11]

$$d_{p50} = \sqrt{\frac{9\mu V_r D_e}{\rho_p V_i^2}} \quad (2)$$

式中 d_p ——液滴颗粒粒径, m

μ ——气体粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$

D_e ——排气管直径, mm

ρ_p ——液滴颗粒的密度, kg/m^3

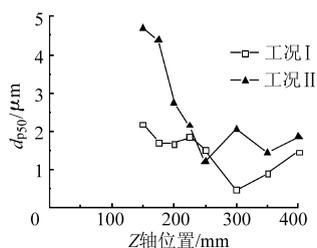
由于结构尺寸固定,所以式(2)中的 D_e 不变,温度变化不大的情况下对液体密度 ρ_p 影响较小,此处可以忽略 ρ_p 的变化。这样影响旋风分离器分离性能的参数就剩下气体粘度、气体的径向速度和切向速度。

气体粘度与温度的关系为^[8,10]

$$\mu = 1.76 \times 10^{-5} (T/273.15)^{0.68} \quad (3)$$

由式(3)可以看出,气体粘度随着温度的降低而减小。结合式(2),切割粒径随着气体粘度的减小而减小,也就是说,降低温度有利于减小切割粒径,提高分离效率。

将模拟计算得到的速度分量代入式(2)可以计算出切割粒径,不同Z轴CS面计算得到的切割粒径如图7所示。从图7中可以看出,在升气管入口附近,工况II的切割粒径较大,是因为该工况下气体体积流量较大,在升气管入口附近沿着径向流动的气体速度较大,导致短路流,因此切割粒径相对较大。其他区域切割粒径相差不大,说明降温虽然导致流动速度的降低,但是对分离效率的影响较小,而且减小了短路流。

图7 切割粒径 d_{p50} Fig. 7 Cut point diameter d_{p50}

另外,旋风分离器内温度的降低,有利于气体中焦油组分的冷凝,同时增加了冷凝液滴的粘度,有利于降低液滴间的聚并以及液滴与壁面的粘附^[12-13],更有利于焦油液滴的分离和回收。

5 结论

(1)根据焦油冷凝易分离的特点设计了一台同时具有冷却降温 and 高效分离功能的焦油分离器,试验结果表明,壁面降温提高了旋风分离器对焦油的

回收率。

(2)通过 Fluent 软件对焦油分离器有无冷却降温两种工况进行了数值模拟,结果表明:壁面降温对其内部的温度场影响明显,这是气体运动传热的结果。旋风分离器内气体温度随着周边气流下行温度逐渐降低,随着中心气流上行而逐渐升高,在径向呈现驼峰状分布。

(3)壁面冷却降低了旋风分离器中气体的温度,同时增大了气体的密度,降低了气体粘度,有利于减小切割粒径。同时,降温有助于气态焦油的冷凝,降温增加焦油液滴的粘度,增加液滴聚并和粘附,有利于提高分离效率,但同时也增大了旋风分离器的压降。

(4)设计的焦油分离器作为生物质气化气的一级分离器,将气体温度降低了 155℃,要将 600℃ 的气化气冷却至常温需要多级冷却串联使用。同时,强化旋风分离器的传热也有重要的研究意义。

参 考 文 献

- Buran B, Butler L, Currano A, et al. Environmental benefits of implementing alternative energy technologies in developing countries [J]. Applied Energy, 2003, 76(1~3): 89~100.
- 王素兰, 张全国. 生物质气化焦油净化装置的设计与研究[J]. 可再生能源, 2007, 25(1): 29~31.
Wang Sulan, Zhang Quanguo. Design and study on the purifier of biomass gasification system [J]. Renewable Energy Resources, 2007, 25(1): 29~31. (in Chinese)
- 李大中, 王卉. 稻秆气化焦油催化裂解脱除过程模型改进与优化[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 109~112.
Li Dazhong, Wang Hui. Improving and optimizing the LS-SVM model of the rice straw gasification tar removal process by catalytic cracking [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 109~112. (in Chinese)
- 郭飞强, 董玉平, 董磊, 等. 主动配气下生物质气化焦油热裂解特性试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 135~138.
Guo Feiqiang, Dong Yuping, Dong Lei, et al. Tar thermal cracking in biomass gasifier under active air distribution [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 135~138. (in Chinese)
- 李大中, 武英杰, 单志伟. 木块气化过程焦油联合脱除工况优化[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 97~102.
Li Dazhong, Wu Yingjie, Shan Zhiwei. Conditions optimization for tar combined removal in the woodblock gasification technological process [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 97~102. (in Chinese)
- 付双成, 袁惠新, 王宁. 用于生物质气化可燃气体脱除焦油的分离方法和装置: 中国, 201010540221. X[P]. 2010-11-11.
Fu Shuangcheng, Yuan Huixin, Wang Ning. Separation method and apparatus for the removal tar in biomass gasification combustible gas: CN, 201010540221. X[P]. 2010-11-11. (in Chinese)
- GB/T 12208—2008 人工煤气组分与杂质含量测定方法[S]. 2008.
GB/T 12208—2008 Test methods of components and impurities of the manufactured gas[S]. 2008. (in Chinese)
- 万谷军, 孙国刚, 魏耀东, 等. 温度和压力对旋风分离器内气相流场的综合影响[J]. 动力工程, 2008, 28(4): 579~584.
Wan Gujun, Sun Guogang, Wei Yaodong, et al. The combined effect of temperature and pressure on gas flow field in cyclone separator [J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(4): 579~584. (in Chinese)
- 钱付平, 章名耀. 温度对旋风分离器分离性能影响的数值研究[J]. 动力工程, 2006, 26(2): 253~257.
Qian Fuping, Zhang Mingyao. Numerical study of the influence of temperature on separation performance of cyclone separators [J]. Journal of Power Engineering, 2006, 26(2): 253~257. (in Chinese)
- 万谷军, 魏耀东, 薛晓虎, 等. 温度对旋风分离器内颗粒浓度分布影响的模拟[J]. 燃烧科学与技术, 2008, 14(6): 562~568.
Wan Gujun, Wei Yaodong, Xue Xiaohu, et al. Simulation of influence of temperature on solids concentration distribution in cyclone separator [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2008, 14(6): 562~568. (in Chinese)
- 霍夫曼 A C, 斯坦因 L E. 旋风分离器——原理、设计和工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- 金向红, 金有海, 王建军, 等. 气液旋流器的分离性能[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2009, 33(5): 124~128.
Jin Xianghong, Jin Youhai, Wang Jianjun, et al. Separation performance of gas-liquid cyclone separator [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2009, 33(5): 124~128. (in Chinese)
- Escure C, Vardelle M, Fauchais P. Experimental and theoretical study of the impact of alumina droplets on cold and hot substrates [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2003, 23(2): 185~221.