

双层滤料颗粒床除尘器预热过程的仿真研究

陶初炯, 杨国华*, 朱永锋, 肖贵慧, 原光辉, 刘 鹏

(宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315832)

摘要: 颗粒床除尘器在脱除含尘热解煤气粉尘前需要进行预热工作, 从而避免因携带的焦油冷凝造成设备损坏无法工作. 为研究此过程, 采用 FLUENT 软件对一个大型颗粒床除尘器的预热过程进行数值模拟. 该除尘器壳体内径 4.8 m, 高度 22 m, 壳体内沿垂直中心线上安装 6 个内径 3.4 m、高 1.8 m 的过滤床. 模拟结果表明, 当预热气在过滤床流速为 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 壳体内壁面上下最大温差为 76.9°C , 除尘器从 10°C 加热至 500°C 需要 98 880 s. 本次模拟采用的阶跃式分段预热制度使除尘器壳体内壁面上下温度差较小, 减小了因温度不均匀造成的材料变形, 模拟中的滤料和壳体温度及预热所需的时间也可给实际的工程应用提供参考.

关键词: 颗粒床除尘器; 预热过程; 阶跃式分段制度; 数值模拟

中图分类号: X964

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2020) 03-0040-05

煤热解是把煤加热到 $450\sim 650^\circ\text{C}$, 然后将煤分解产生的挥发性物质从煤中提取出来加以利用的一种技术^[1]. 含有粉尘的热解煤气与一般的含尘燃烧烟气不同, 容易出现液相凝结、炭化结焦等现象, 因此对后续除尘净化系统的要求很高^[2], 其中颗粒床过滤除尘技术是脱除含尘的高温热解煤气的有效方法. 颗粒床除尘器用耐高温的颗粒介质作为滤料, 以达到净化气体的目的^[3], 其中双层滤料颗粒床是由上粗下细、上轻下重的两层固体颗粒滤料组成^[4]. 过滤时, 含尘气体先经过粗粒径的上层滤料进行粗除尘, 再经过细粒径的下层滤料进行精除尘^[5]. 清灰时, 反吹气流由下而上, 使两层滤料共同流化, 带走捕获的微细粒子, 清灰后, 两层滤料恢复原状^[6]. 其除尘机理和一般的过滤式除尘器相同, 被截留的粉尘易发生团聚, 反吹清灰吹出的尘粒最终沉降在除尘器底部灰斗^[7].

双层滤料颗粒床除尘器内布置有多个双层滤料过滤床, 如图 1 所示, 自上而下布置有 6 个双层滤料过滤床. 含有粉尘的热解煤气在引风机作用下从上方进气口进入, 粗大粉尘在沉降室中沉降,

较细粉尘进入中心布置的双层滤料过滤床进行过滤, 每个过滤床连接一个排风支管, 干净气体通过每个排风支管汇集到总管道, 送入后续工艺^[8]. 双层滤料过滤床清灰时, 对应的干净气体气阀关闭, 反吹阀门打开, 反吹气流由下向上经布风板进入双

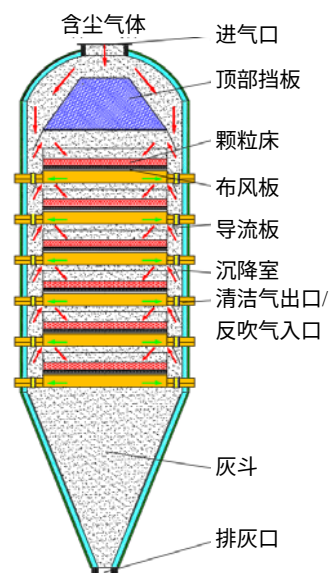


图 1 双层滤料颗粒床除尘器

收稿日期: 2019-09-03.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家高技术研究发展计划 863 项目 (2008AA05Z205); 浙江省新苗人才计划项目 (2018R405077); 宁波大学大学生科研创新计划重点项目 (2018SRIP1729).

第一作者: 陶初炯 (1993-), 女, 浙江余姚人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 能源利用与环境保护. E-mail: 281578993@qq.com

*通信作者: 杨国华 (1961-), 男, 浙江嵊州人, 博士/教授, 主要研究方向: 能源利用与环境保护. E-mail: yangguohua@nbu.edu.cn

层滤料过滤床, 使滤料成流化状态, 把过滤时截留在颗粒层内的灰尘反吹到沉降室, 因团聚形成的粗大粉尘沉降进入灰斗, 剩余的细小粉尘随气流再返回其他过滤床^[9]。

煤焦油是煤热解的重要产物之一, 是一种具有刺激性臭味褐色或黑褐龟粘稠状的液体^[10]。焦油被高温煤气携带, 如果在输运过程中冷凝下来, 容易在管道内壁及其他设备上附着, 可能会对设备造成腐蚀和堵塞, 也给设备运行安全带来不利影响^[11]。因此双层滤料颗粒床除尘器在脱除含尘的高温热解煤气时, 首先需要除尘器进行预热, 使除尘器内各部分温度(尤其是滤料及内壁面的温度)达到焦油汽冷凝温度以上, 避免含焦油汽的热解煤气进入冷态的除尘器, 以避免出现焦油冷凝情况, 使除尘器无法工作。由于除尘器设备过大, 用实验的方法进行研究投资巨大, 而数值模拟研究方法也具备很可靠的实用性^[12], 因而本文借 FLUENT 软件, 对颗粒床除尘器的预热过程进行仿真模拟。

1 颗粒床除尘器预热过程的仿真模拟

1.1 仿真模型

模拟颗粒床除尘器壳体内径 4.8 m, 壳体总高度 22 m, 壁面厚度 16 mm, 顶部气体入口直径 1.5 m。外保温层总厚度 180 mm, 由内到外依次为硅酸铝针刺毯(80 mm)、气凝胶绝热毯(20 mm)以及高温玻璃棉(80 mm)。除尘器内沿垂直中心线上安装 6 层过滤床, 过滤床内径 3.4 m, 高 1.8 m。过滤床内滤料分为 2 层, 上层滤料为空心珠, 堆积密度 $317.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 导热系数 $0.35 \text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$, 比热容 $1.20 \text{ kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$, 厚度 300 mm; 下层滤料为宝珠砂, 堆积密度 $1770 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 导热系数 $0.5 \text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$, 比热容 $0.92 \text{ kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$, 厚度 45 mm。颗粒床除尘器的整体模型如图 2(a)所示, 为了研究过滤床内上下层滤料及除尘器壳体内壁面的温度, 在除尘器模型内设置有温度观测点, 如图 2(b)所示。图 2(b)中的除尘器局部结构即为图 2(a)中实线框内的部分, A_{xU} ($x=1, 2, 3, 4, 5, 6$)表示各过滤床层上层滤料(Upper Layers)的平均温度; A_{xL} ($x=1, 2, 3, 4, 5, 6$)表示各过滤床层下层滤料(Lower Layers)的平均温度; B_x ($x=1, 2, 3, 4, 5, 6$)表示对应各层过滤床所在位置除尘

器壳体内壁面的平均温度。

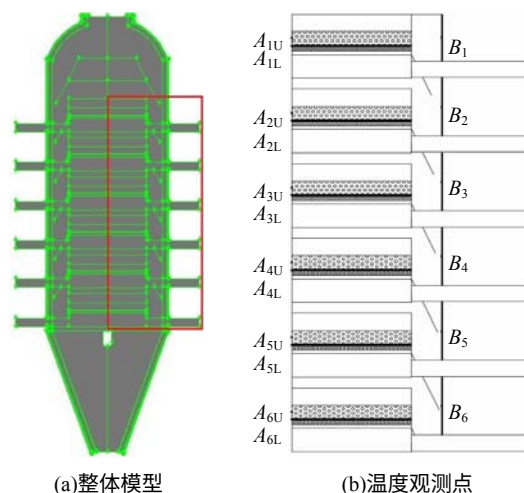


图2 颗粒床除尘器几何模型

1.2 模拟方法

采用向颗粒床除尘器中通入荒煤气燃烧后烟气的方法对其进行预热, 并通过在烟气中通入一定量空气来调节其温度, 从而达到所需的预热气温度。在预热时, 为防止颗粒床除尘器与预热气温差过大而造成的热变形, 预热气的温度采用分阶段阶跃式升高。环境温度为 10°C , 初始预热气温度为 200°C , 每隔 18000 s 升高 100°C ; 当加热进行至 18000 s 时, 预热气温度升至 300°C ; 36000 s 时升至 400°C ; 54000 s 时升至 500°C ; 72000 s 时升至 600°C 。当对应第 6 层过滤床所在位置的除尘器壳体内壁面温度(即 B_6 温度)达到 500°C 时, 认为除尘器内部各处温度已经达到焦油冷凝温度之上, 预热停止。预热气流量为除尘器处理气流量的 $1/3$, 即预热气在过滤床的流速为 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 而除尘器工作时, 各过滤床的平均过滤风速为 $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。除尘器灰斗上部设有抽气循环, 循环量为预热气或冷却气流量的 5% 。

选择标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟预热气的湍流流动。标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型由 Launder 等^[13]于 1972 年提出, 与其他湍流模型相比, 对于二维简单的充分发展湍流问题更易于收敛^[14]。选择组分运输模型模拟烟气的多种成分, 并用多孔介质模型模拟过滤床的滤料层。采用流固耦合传热仿真方法求解颗粒床除尘器各过滤床滤料及壳体内壁面的温度分布。方程式采用离散、隐式、非稳态求解, 压力速度耦合采用 SIMPLEC 算法, 方程离散采用二阶

迎风格式. 模拟方法主要参考自文献[15]. 计算结束后, 将所设置温度观测点的温度数据导入 Origin 软件, 绘制温度随时间变化的曲线图.

1.3 边界条件

(1)入口. 烟气从颗粒床除尘器上部的进气口通入, 设置为质量入口, 流量为 $5.712 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 湍流强度设置为 4%. (2)出口. 烟气的出口为两侧的清洁气出口, 共有 12 个, 简化认为 12 个速度相同的出口, 湍流强度设置为 5.5%. (3)壁面. 颗粒床除尘器内流固耦合交界面均设为壁面, 滤料层设为可逃逸边界, 壳体内壁面设为反弹边界.

2 滤料温度变化的数值模拟结果与分析

2.1 滤料温度变化

图 3 显示的是各过滤床上层滤料与下层滤料在预热过程中的温度变化曲线. 从图 3 中可知, 各过滤床滤料的温度变化规律相近: 各过滤床的上层滤料升温速度皆快于下层滤料; 滤料温度在每个加热阶段的初期均迅速上升随后趋于平稳; 越至下层过滤床, 每个加热阶段初期滤料温度上升的坡度越小, 整个加热阶段的升温速度越均匀. 从第 1 层过滤床到第 6 层过滤床的变化过程中, 上下层滤料的升温速度逐层下降. 造成这样上下滤料层温差的原因主要是预热气从除尘器顶部入口进入, 并分别流经各过滤床及其排气管流出, 使除尘器沉降室内的预热气流量越往下越小, 加上除尘器的散热, 使预热气温度越往下越低, 因而滤料层温度也会从上往下依次降低.

2.2 上下滤料层温度差变化

为研究预热时上下过滤床滤料层之间的温度差变化, 图 4 绘制了第 1 层过滤床上层滤料与第 6 层过滤床上层滤料, 即 A_{1U} 与 A_{6U} 在第 1 个至第 5 个预热阶段的温度差变化的曲线图.

从图 4 中可知, 由于预热气从除尘器上部进入, 自上而下依次经过各个过滤床, 位于上部过滤床的滤料层会因先接触到高温预热气而使其温度迅速升高, 与位于下部过滤床未能及时接触到高温预热气的滤料层产生一定的温度差, 且该温度差在短时间内极速上升, 并在各个预热阶段都达到一定峰值. 在第 1 至第 5 预热阶段, A_{1U} 与 A_{6U} 温度差峰值分别为 81.2、66.9、71.4、79.4、88.84 °C. 随

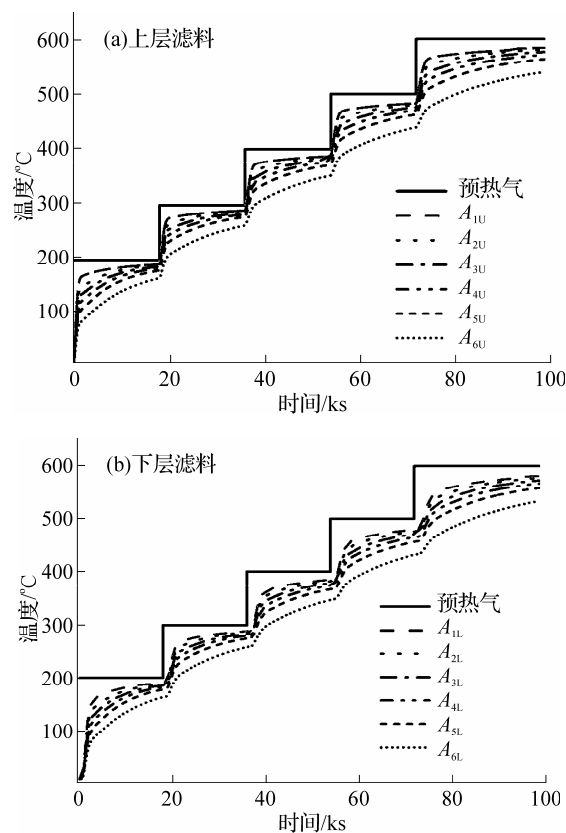


图 3 各过滤床上下层滤料温度变化曲线图

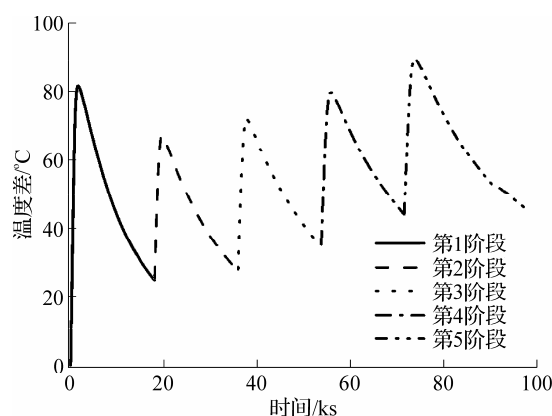


图 4 A_{1U} 与 A_{6U} 在预热过程中的温度差

着预热气逐渐充满整个除尘器, 位于下部过滤床的滤料层也充分接触到了高温预热气, 上下过滤床滤料层间的温度差也逐渐减小. 由于预热气温度自上而下不断减小, 上下过滤床滤料层之间的温度差无法被彻底消除, 但在各个预热阶段结束时, 此温度差都保持在较小值. 当 t 分别为 18 000、36 000、54 000、72 000 s 时, A_{1U} 与 A_{6U} 温度差分别为 24.8、27.5、34.7、43.8 °C. 而当时间进行到 98 880 s 时, 此时除尘器因被加热到合适工作温度而停止

预热, 此时 A_{1U} 与 A_{6U} 温度差也仅为 44.6°C 。

3 壳体内壁面温度变化的数值模拟结果与分析

3.1 壳体内壁面温度变化

图5显示的是对应各层过滤床所在位置, 除尘器壳体内壁面在预热过程中的温度变化曲线。

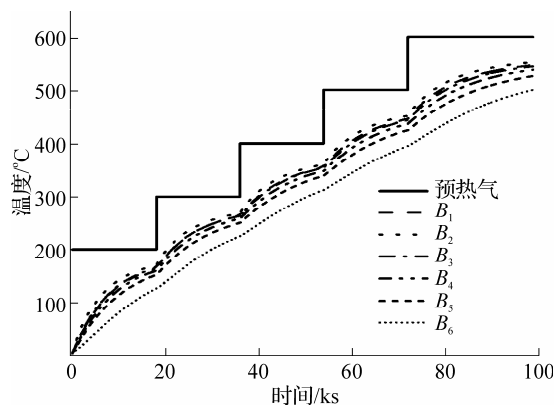


图5 壳体内壁面温度变化曲线图

从图5得知, B_1 至 B_6 的温度变化规律相近, 越至下层, 各加热阶段初期温度上升的坡度越小, 至第6层过滤床所在位置对应的除尘器壳体内壁面升温曲线(即 B_6)已趋于一条直线。与滤料层温度变化规律类似, 壳体内壁面的温度会沿着除尘器中心线往下不断降低, 这是由于预热气从除尘器上部进入后, 造成其气流量和温度从上往下依次减少和降低。当 t 为 98 880 s 时, 对应第6层过滤床所在位置的除尘器壳体内壁面温度(即 B_6)达到 500°C , 此时可认为除尘器内部各处温度已达到焦油的冷凝温度之上, 即可预热停止, 除尘器可通入高温热解煤气进行后续的除尘工作。

3.2 上下壳体内壁面温度差变化

由于除尘器壳体内壁面会因材料的热胀冷缩而造成变形, 为了研究上下壳体内壁面的最大温度差, 图6绘制了对应第1层过滤床所在位置的壳体内壁面与对应第6层过滤床所在位置的壳体内壁面, 即 B_1 与 B_6 在第1至第5个预热阶段的温度差变化的曲线图。

图6中可以得知, 预热过程中上下壳体内壁面温度差变化规律与上下过滤床滤料层温度差的变化规律相似, 在各个预热阶段初期均是迅速上升, 达到某一峰值后逐渐下降。当 t 分别为 18 000、36 000、54 000、72 000、98 880 s 时, B_1 与 B_6 的温

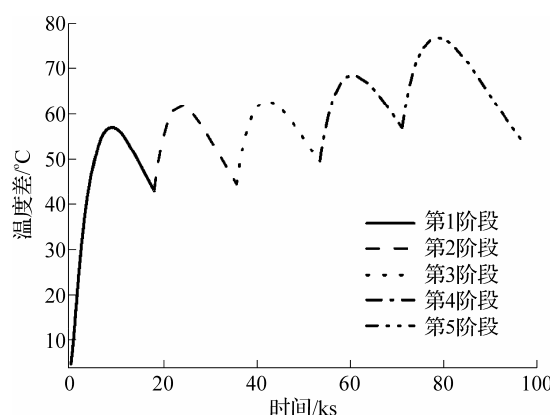


图6 B_1 与 B_6 在预热过程中的温度差

度差分别为 42.9、43.2、48.0、55.7、 51.6°C 。 B_1 与 B_6 在第1至第5个预热阶段的最终温度差分别为 62.0°C 、 63.8°C 、 63.5°C 、 68.6°C 、 76.9°C 。可见由于采用阶跃式分段预热, 除尘器壳体内壁面上下温差较小, 减小了因不均匀预热造成的热变形和热应力。

4 结论

(1)第1层过滤床上层滤料与第6层过滤床上层滤料在第1至第5预热阶段的最终温度差分别为 24.8°C 、 27.5°C 、 34.7°C 、 43.8°C 、 44.6°C , 温度差较小; 温度差峰值分别为 81.2°C 、 66.9°C 、 71.4°C 、 79.4°C 、 88.84°C , 各阶段峰值也保持在可接受范围内。

(2)对应第1层过滤床所在位置的壳体内壁面与对应第6层过滤床所在位置的壳体内壁面在第1至第5预热阶段的最终温度差分别为 42.9、43.2、48.0、55.7、 51.6°C ; 最大温度差分别为 62.0°C 、 63.8°C 、 63.5°C 、 68.6°C 、 76.9°C , 各阶段最终温度差和最大温度差都较小。

(3)在预热过程中, 当预热气在过滤床中的流速为 $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 第6层过滤床所在位置的除尘器壳的体内壁面温度从 10°C 加热至 500°C 需要 98 880 s。

(4)本次模拟采用的分阶段阶跃式的预热制度使除尘器壳体内壁面上下温差较小, 减小了因不均匀预热或冷却造成的热变形和热应力; 模拟中的滤料和壳体温度及预热所需的时间也可给实际的工程应用提供参考。

参考文献:

[1] 崔阳. 粉煤热解技术的研究现状及展望[J]. 能源化工,

- 2018, 39(2):33-38.
- [2] 白效言, 张飏, 王岩, 等. 低阶煤热解关键技术问题分析及研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1):192-198.
- [3] 夏兴祥. 高温除尘技术综述[J]. 化工机械, 2000, 27(1):47-552.
- [4] 杨国华, 周江华, 舒海平, 等. 双层滤料颗粒床过滤除尘新方法的研究[J]. 动力工程, 2005, 25(6):891-894.
- [5] 杨国华. 双层滤料床过滤除尘试验研究[C]//中国动力工程学会. 中国动力工程学会第三届青年学术年会论文集. 西安, 2005.
- [6] 姚志伟, 刘鹏, 朱永锋, 等. 双层滤料颗粒床与金属纤维毡梯级过滤特性[J]. 环境工程学报, 2019, 13(3):708-715.
- [7] Tian S, Yang G H, Li Z, et al. Cascade filtration properties of a dual-layer granular bed filter[J]. Powder Technology, 2016, 301:545-556.
- [8] Xiao G H, Yang G H, Yang Q, et al. Effect of filter layer thickness on the filtration characteristics of dual layer granular beds[J]. Powder Technology, 2018, 335:344-353.
- [9] Hu F X, Yang G H, Ding G Z, et al. Experimental study on catalytic cracking of model tar compounds in a dual layer granular bed filter[J]. Applied Energy, 2016, 170: 47-57.
- [10] 葛冬冬. 热解炉煤粉预热入炉的关键问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [11] 石振晶, 夏芝香, 方梦祥, 等. 淮南烟煤热解及焦油析出特性[J]. 燃烧科学与技术, 2014, 20(1):58-64.
- [12] 刘栋栋, 付海明, 陈军, 等. 旋风除尘器流场及浓度场实验与模拟[J]. 环境工程学报, 2010, 4(9):2057-2064.
- [13] Launder B E, Spalding D B. Lectures in mathematical models of turbulence[M]. London: Academic Press, 1972.
- [14] 任志安, 郝点, 谢红杰. 几种湍流模型及其在 FLUENT 中的应用[J]. 化工装备技术, 2009, 30(2):38-40; 44.
- [15] 唐家鹏. ANSYS FLUENT 16.0 超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016:33-34.

Simulation of preheating of dual-layer granular bed filter for gas dust removal

TAO Chujiong, YANG Guohua*, ZHU Yongfeng, XIAO Guihui, YUAN Guanghui, LIU Peng
(Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315832, China)

Abstract: To avoid the equipment being damaged and malfunctioned due to the tar condensation, the granular bed filter should be preheated before being used for removing the dust contained in the pyrolysis gas. Such preheating process of a large granular bed dust collector is simulated by FLUENT software. The shell inner diameter of the dust collector is 4.8 m and the height is 22 m. Six filter beds with inner diameter of 3.4 m and height of 1.8 m are installed along the vertical center line in the shell. The simulation results show that when the flow rate of the preheated gas in the filter bed is $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, the maximum temperature difference between the upper and lower surface of the shell is 76.9°C . It takes 98 880 s for the dust collector to be heated from 10°C to 500°C . The stepped preheating system adopted in this simulation makes the temperature difference between the upper and lower sides of the inner wall of the dust collector shell smaller, which reduces the material deformation due to uneven temperature. The temperature of filter and shell in the simulation and the time required for preheating can also be used as a reference for practical engineering applications.

Key words: granular bed filter; preheating process; step type segmentation system; numerical simulation

(责任编辑 章践立)