

文章编号:1671-8879(2018)04-0119-08

沥青搅拌设备烘干筒参数对骨料温升的影响

张晨光¹,焦生杰¹,谢立扬¹,翟资雄²,顾海荣¹

(1. 长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室,陕西 西安 710064;

2. 福建南方路面机械有限公司,福建 泉州 362021)

摘 要:为了提高烘干筒的传热效率,以 LB4000 型沥青搅拌设备的烘干筒为研究对象,在分析烟气流体、固态骨料以及烘干筒壁之间辐射、对流、接触多种传热过程耦合作用的基础上,针对料帘区域建立了一维轴向传热模型,采用 4 阶 Runge-Kutta 算法分工况对模型进行了数值求解;分析叶片圆周数量和烘干筒转速对骨料温升的影响,采用基于 Eulerian-Eulerian 算法的离散元-流体力学耦合仿真 (EDEM-FLUENT) 对烘干筒的传热过程进行了数值模拟,并对传热模型进行验证。研究表明:骨料进料率和料帘换热面积是影响骨料温升的主要因素,料帘特性对烘干筒传热效率有重要影响,平均每增加 1 m^2 料帘换热面积,骨料的最终加热温度升高约 $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$;叶片圆周数量由 15 片增加到 20 片,有利于增大料帘料量,加大换热面积,骨料最终加热温度明显升高,且骨料进料率越小温升幅度越大;提高烘干筒转速可增大料帘料量,但同时会缩短骨料在筒内的滞留时间,当烘干筒回转角速度为 0.8 rad/s 时,料帘换热效率与骨料在筒内滞留时间的匹配最佳,骨料最终加热温度最高,增大或减小烘干筒转速均会对骨料温升产生不利影响;在优化烘干筒结构参数,提高传热效率的同时,应避免因料帘与烟气换热过于充分而造成排烟温度过低,对后续的引风除尘系统带来不利影响。

关键词:机械工程;沥青搅拌设备;烘干筒;参数优化;EDEM-FLUENT 耦合仿真;传热模型

中图分类号:U415.52

文献标志码:A

Influence of rotary dryer parameters on aggregates temperature rise in asphalt mixing plant

ZHANG Chen-guang¹, JIAO Sheng-jie¹, XIE Li-yang¹, ZHAI Zi-xiong², GU Hai-rong¹

(1. Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Fujian South Highway Machinery Co. Ltd.,

Quanzhou 362021, Fujian, China)

Abstract: To improve heat transfer efficiency of rotary dryer, based on the rotary dryer of LB4000 series asphalt mixing plant and the analysis of coupling effect of heat radiation, convection and contact transfer processes between flue fluid, solid aggregates and drum wall, one-dimension axial heat transfer model was established for aggregates curtain area, the model was solved by the fourth order Runge-Kutta method to analyze the influence of the blade circumference and rotational speed of rotary dryer on aggregate temperature rise, based on the EDEM-FLUENT. The results show that aggregates feed rate and heat transfer area of aggregates curtain are the main factors affecting the aggregates heating

收稿日期:2017-10-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51408046)

作者简介:张晨光(1985-),男,山东聊城人,工程师,工学博士研究生,E-mail:cgzhang2010@chd.edu.cn.

temperature, the characteristic of aggregates curtain has an important influence on the heat transfer efficiency of rotary dryer with an average increase of 1 m^2 heat transfer area, the aggregates heating temperature is raised by about $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$. The increase of blade circumference from 15 to 20 is beneficial to the increase the amount of aggregates curtain, the area of hear transfer, finale heating temperature of aggregates, and the smaller the aggregates feed rate, the higher the temperature rise increase rotational speed of rotary dryer can increase the amount of aggregates curtain, but also can shorten the residence time of them in the drum, and when the rotational speed is $0.8\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, the heat transfer efficiency of aggregates curtain is matched perfectly with the residence time of aggregates, in the drum aggregates heating temperature is the highest, so that increasing or decreasing the rotational speed will both have an adverse effect on the aggregates temperature rise, while optimizing the rotary dryer parameters and improving the heat transfer efficiency, it should be avoided that heat transfer between aggregates curtain and gas is too full to cause the low exhaust gas temperature, which will lead to adverse effects on the following dust-removal system. 2 tabs, 8 figs, 26 refs.

Key words: mechanical engineering; asphalt mixing plant; rotary dryer; parameter optimization; coupled EDEM-FLUENT simulation; heat transfer model

0 引言

加热滚筒广泛应用于化工、农业、冶金、交通等工业领域,是高温加工固体物料的重要设备,其工作原理通常是滚筒一端布置燃烧器,燃烧器工作产生高温烟气,同时固体物料通过回转着的圆筒容器不断被抛撒翻滚,以其暴露的表面与掠过的烟气进行传热传质而达到快速加热升温的目的^[1]。沥青搅拌设备烘干筒属于叶片式加热滚筒的一种,烘干筒的结构和工作参数是影响骨料加热速率的重要因素,合理的结构设计和参数选择对缩短骨料的加热时间和降低燃料消耗具有十分重要的意义^[2-3]。

针对回转式加热滚筒的传热研究,前人做了大量工作。Boateng 等在综合一维轴向模型和二维截面径向模型的基础上,提出了回转窑准三维传热模型,其中一维模型确定自由空间和料床内的轴向温度分布,并作为二维模型的边界条件来预测横截面内料床和筒壁的径向温度梯度,该模型对后续多位学者的研究具有启迪作用^[4-6];Le Guen 等建立了描述叶片式加热滚筒内部物料颗粒与烟气进行热交换的计算模型,预测物料的温度变化趋势,据此提出了提高滚筒热效率,优化滚筒长度的方法^[7-9];Chaudhuri 等主要采用离散元(DEM)仿真对煅烧窑内物料颗粒的运动和传热过程进行了模拟,分析了滚筒转速、叶片形状、叶片数量等参数对物料升温速度的影响^[10];谢立扬等分区域建立了烘干筒的传热模型,通过试验得出模型的计算偏差为 $5\%\sim 19\%$,并论证了一维轴向传热模型在叶片式加热滚筒研究

中的适用性^[11];吴静等针对回转窑建立了壁面与颗粒物料之间的传热系数模型,并进行了多工况对比试验,证明了模型精度满足工程计算的要求,提供了重要参考价值^[12];李旋等利用计算流体力学仿真(FLUENT)软件对沥青混合料加热滚筒的温度场进行了建模仿真,主要研究了螺旋叶片对加热均匀性和效率的影响,但 FLUENT 对离散密相流仿真的局限性限制了研究的进一步深入^[13-14]。综上,目前研究主要集中在建立传热模型或搭建模拟试验台,但大部分模型或试验台都是针对所研究的问题和特定类型的加热滚筒,进行了相应的简化或假设,因此研究结论的普适性存在疑问。随着计算机技术的发展,将离散元与流体场相结合,对其进行传热仿真已成为可能。为此,本文通过建立烘干筒料帘区域的传热模型,确定影响骨料加热温度的因素,基于离散元-流体力学耦合仿真(EDEM-FLUENT)对传热过程进行数值模拟,为烘干筒的结构优化和节能提供借鉴。

1 烘干筒传热模型

为了便于研究,本文选取 LB4000 型沥青搅拌设备烘干筒作为典型对象进行建模。烘干筒主要用于对级配骨料进行烘干和加热,以保证沥青混合料的路用性能。在烘干筒料帘区的内壁圆周装有平行于筒轴线的叶片,烘干筒回转过程中,在提料叶片的作用下,形成料帘,增大了骨料与烟气的接触表面积。烘干筒内级配骨料的烘干和加热主要是利用逆流烟气与料帘的对流换热来完成的,如图 1 所示。

由于烘干筒安装时保持一定的倾斜角度,通常为 $3^\circ \sim 5^\circ$,因此,叶片的扬料和抛撒作用会不断促使骨料向卸料端移动^[15]。

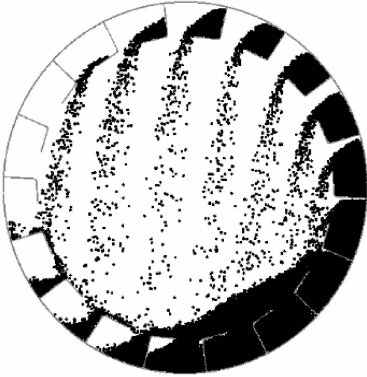


图1 骨料在烘干筒内形成料帘

Fig. 1 Aggregates curtain in rotary dryer

烘干筒内部的传热过程属于流固共轭传热学的范畴,涉及烟气流体与固态骨料之间对流、辐射、接触多种传热方式^[16]。因而为了研究烘干筒的传热机理,必须研究料帘骨料、料床骨料、烟气以及烘干筒壁之间的耦合传热关系、传热途径及其相互影响。

1.1 一维轴向传热模型

建立烘干筒料帘区的一维轴向传热模型。将烘干筒按单位轴向长度划分微元计算体,微元计算体内的骨料、烟气作为独立的控制体。在某一微元计算体内,建立烟气、骨料等的能量平衡式,以其结果输出作为下一微元计算体的条件输入,并沿烘干筒轴向进行迭代计算,得出烟气、骨料在整个烘干筒长度范围内的温度变化。为此,提出以下假设条件:

- (1) 烘干筒处于稳态运行条件;
- (2) 微元计算体内的骨料(包含料帘骨料和料床骨料)、筒壁、烟气的温度分布均匀,忽略各自内部的热交换;
- (3) 忽略各微元计算体间的轴向传热;
- (4) 筒壁内部没有净能量的积蓄。

根据图2中的能量传递过程,建立计算体内的能量守恒方程如下

$$\sum m_m c_m \frac{dT_m}{dz} = Q_{g \rightarrow mc} + Q_{g \rightarrow mb} + Q_{w \rightarrow mb} \quad (1)$$

$$\sum m_g c_g \frac{dT_g}{dz} = Q_{g \rightarrow mc} + Q_{g \rightarrow mb} + Q_{g \rightarrow w} \quad (2)$$

$$Q_{g \rightarrow w} = Q_{w \rightarrow e} + Q_{w \rightarrow mb} \quad (3)$$

式中: T_m 、 T_g 分别为骨料、烟气的温度(K); m_m 、 m_g 分别为骨料、烟气的质量流量(kg/s); c_m 、 c_g 分别为骨料、烟气的比热容(kJ/(kg·K)); $Q_{g \rightarrow mb}$ 、 $Q_{w \rightarrow mb}$ 分别为烟气对料床暴露层的传热量和筒壁对料床贴壁

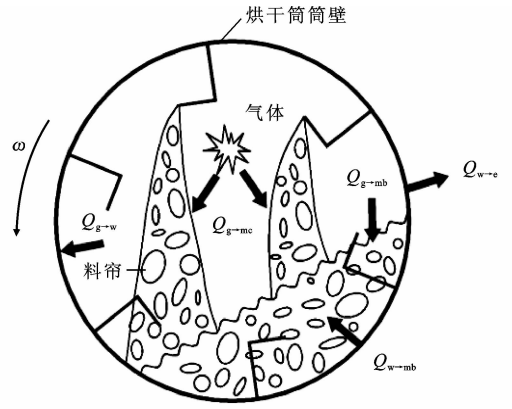


图2 能量传递守恒示意

Fig. 2 Diagram of energy transfer conservation

层的传热量; $Q_{g \rightarrow mc}$ 为烟气对料帘的传热量; $Q_{g \rightarrow w}$ 为烟气对筒壁的传热量; $Q_{w \rightarrow e}$ 为筒壁对环境空气的传热量。

相关研究表明,料床接受的热流量约为料帘热流量的15%^[17],因此,为简化计算,可忽略这一传热过程。将传热模型进行扩展,可得如下微分方程组

$$\sum m_m c_m \frac{dT_m}{dz} = \alpha_{gm} \dot{A}_m (T_g - T_m) \quad (4)$$

$$\sum m_g c_g \frac{dT_g}{dz} = \alpha_{gm} \dot{A}_m (T_g - T_m) + \alpha_{gw} \dot{A}_w \cdot (T_g - T_w) + \epsilon_{gw} C_0 \dot{A}_w \left[\left(\frac{T_g}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] \quad (5)$$

$$\alpha_{gw} \dot{A}_w (T_g - T_w) + \epsilon_{gw} C_0 \dot{A}_w \left[\left(\frac{T_g}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 \right] = Q_{w \rightarrow e} \quad (6)$$

式中: \dot{A}_m 为料帘骨料在烘干筒单位轴向长度上的对流换热面积(m^2); \dot{A}_w 为烘干筒壁在烘干筒单位轴向长度上的表面积; α_{gm} 为烟气与料帘的对流换热系数($W/(m^2 \cdot K)$); α_{gw} 为烟气与筒壁的对流换热系数($W/(m^2 \cdot K)$); ϵ_{gw} 为烟气与筒壁的导来黑度; C_0 为黑体辐射常数; T_w 为筒壁温度。

α_{gw} 可用Tscheng模型进行计算,该模型除了考虑烟气流速外,还充分考虑了回转角速度和骨料填充率对对流换热的影响^[18],即

$$\alpha_{gw} = 1.54 Re^{0.575} Re_w^{-0.292} k_g / D_e$$

式中: k_g 为烟气的导热系数($W/(m \cdot K)$); D_e 为烘干筒水力直径(m); Re 为雷诺数, $Re = \frac{v_g}{\mu_g} D_e$, v_g 为烟气流速(m/s), μ_g 为烟气运动黏度(m^2/s); Re_w 为回转雷诺数, $Re_w = \frac{\omega}{\mu_g} D_e^2$, ω 为烘干筒回转角速度(rad/s)。

烟气与筒壁的导来黑度 ϵ_{gw} 计算公式为

$$\epsilon_{\text{gw}} = \epsilon_{\text{g}} \epsilon_{\text{w}} [1 + \varphi_{\text{gw}} (1 - \epsilon_{\text{g}}) (1 - \epsilon_{\text{w}})] / [1 - (\varphi_{\text{gw}} (1 - \epsilon_{\text{g}}) (1 - \epsilon_{\text{w}}) + (1 - \varphi_{\text{gw}})) \cdot (1 - \epsilon_{\text{g}}) (1 - \epsilon_{\text{w}})]^{-1} \quad (7)$$

式中： ϵ_{g} 为烟气黑度； ϵ_{w} 为筒壁(钢板)黑度； φ_{gw} 为角系数， $\varphi_{\text{gw}} = \frac{\pi - \varphi/2}{\pi - \varphi/2 + \sin(\varphi/2)}$ ， φ 为料床填充角(rad)。

对烘干筒壁与环境空气的传热量 $Q_{\text{w} \rightarrow \text{e}}$ 计算，Labraga 等通过研究给出可借鉴的计算方法，其中包括筒壁外侧在自然对流和强制对流条件下与大气的对流换热系数以及筒壁的热辐射率^[19]。

烟气与料帘骨料的对流换热系数 α_{gm} 直接影响骨料加热速率，采用 Ranz-Marshall 模型^[20]，有

$$Nu = \frac{\alpha_{\text{gm}} d_{\text{m}}}{k_{\text{g}}} = 2 + 0.6 Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad (8)$$

式中： d_{m} 为骨料颗粒的当量直径(m)； Nu 为努塞尔数； Pr 为普朗特数， $Pr = \frac{c_{\text{g}}}{k_{\text{g}}} \nu_{\text{g}}$ ， ν_{g} 为烟气动力黏度(Pa·s)。

1.2 烘干筒物理模型

选择烘干筒的料帘区为建模对象，其结构参数及工况如表 1 所示。

表 1 烘干筒参数

Tab. 1 Parameters of rotary dryer

参数	参数值
长度/mm	5 500
直径/mm	2 750
倾角/(°)	4
回转角速度/(rad·s ⁻¹)	0.8
最大热骨料生产率/(t·h ⁻¹)	300
烟气质量流量/(kg·s ⁻¹)	6.65
烟气流速/(m·s ⁻¹)	4
烟气初始温度/℃	650
骨料当量直径/mm	8.1
料床填充角/(°)	110

建立烘干筒三维模型如图 3 所示。进料区长度 500 mm，等螺距排列 14 片螺旋导料板，螺旋角为 30°，作用是将冷骨料迅速向前推入料帘区。料帘区采用 5 排交错式排列的提料叶片，每排叶片长度为 1 000 mm，周向均匀排布 18 片，经过计算，在烘干筒单位长度内的料帘换热面积约为 50 m²。

1.3 传热模型求解

根据烘干筒物理模型参数，采用 4 阶 Runge-Kutta 算法对一维轴向传热模型进行数值求解^[21]。

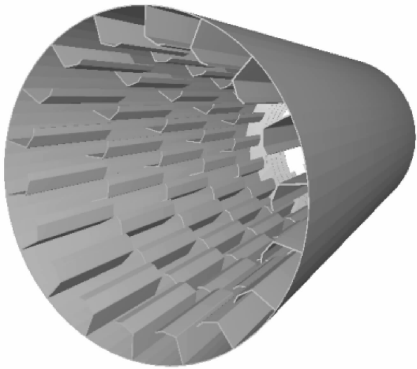


图 3 烘干筒三维模型

Fig. 3 3D-model of rotary dryer

为了研究骨料温升的影响因素，分别在 180、240、300 t/h 骨料进料率工况下，绘制骨料温度沿烘干筒轴向的变化曲线，如图 4 所示。

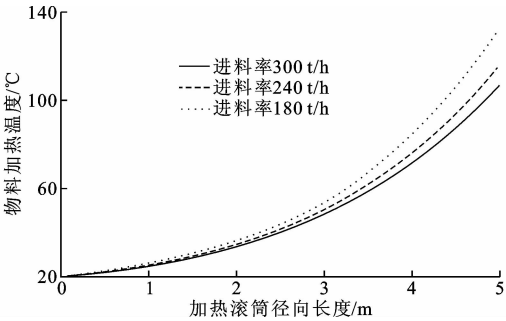


图 4 不同骨料进料率工况下的骨料温升曲线

Fig. 4 Temperature curves of aggregates under different aggregate feed rate cases

热骨料生产率考验烘干筒的作业能力，从图 4 可看出，随着骨料进料率的增加，骨料的最终加热温度有所降低，这与烘干筒的实际生产工况是相符的。进料率 240 t/h 工况下，骨料经过烘干筒加热，可以达到约 115 ℃；进料率增加至 300 t/h 时，骨料加热温度降至 106 ℃左右。可以预见：当进一步增加骨料进料率时，温度会进一步降低，从而无法满足骨料的烘干加热需要；当进料率降至 180 t/h，则骨料可以被加热至 130 ℃左右，此时处于低负载工况，可适当减小热源供应率。在模型求解过程中还发现，影响骨料升温速率的主要因素除了骨料的质量流量(进料率)外，还有料帘的对流换热面积，如图 5 所示。

在骨料进料率 240 t/h 工况下，分别对 40、50、60 m² 料帘换热面积进行传热模型求解。由图 5 可知，增大料帘换热面积，则骨料升温速率加快明显，在烘干筒单位长度内平均每增加 1 m² 料帘换热面积，骨料加热温度升高约 1.3 ℃，说明料帘与烟气的

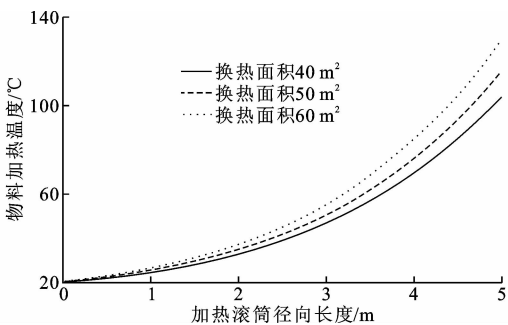


图 5 不同料帘换热面积工况下的骨料升温曲线
Fig. 5 Temperature curves of aggregates under different heat transfer area cases

对流换热过程对骨料的温升有显著影响。料帘换热面积是由料帘形态决定的,主要与提料叶片数量和烘干筒回转角速度等参数有关。为此,本文继续通过 EDEM-FLUENT 耦合仿真分析叶片数量和烘干筒回转角速度对骨料升温速率的影响。

2 烘干筒传热仿真

烘干筒传热的本质为旋转载荷作用下的气固两相流的传热问题。为提高仿真结果的准确度,本文采用离散元仿真软件(EDEM)与流体动力学软件 FLUENT 耦合的数值模拟方法。EDEM 实现物理模型的运动、骨料颗粒的生成及相关属性设置,FLUENT 模拟烟气流场与物理模型之间的动力耦合和传热耦合^[22-23]。

2.1 气固耦合控制方程

Eulerian-Eulerian 方法基于多相流框架,更适用于密相两相流问题(固相体积分数大于 10%),另外其可以加入离散相对连续相的作用力,包含动量和能量的交换。因此,耦合控制方程选用双欧拉模型,因为有固相的作用,在守恒方程中额外添加了一个相体积分数 θ 来修正。Eulerian-Eulerian 方法耦合控制连续性方程和 N-S 方程为^[24-25]

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\theta\rho_g)+\nabla(\theta\rho_g v_g)=0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\theta\rho_g v_g)+\nabla(\theta\rho_g v_g v_g)=-\theta\nabla p+ \\ \nabla\tau_g+\theta\rho_g g-S \end{cases} \quad (9)$$

式中: ρ_g 为烟气密度(kg/m^3); t 为时间(s); ∇p 为压力梯度(Pa/m^{-1}); τ_g 为应力张量; g 为重力加速度; S 为动量交换源项, $S=\sum_{i=1}^n(F_d)_i/V_i$, $(F_d)_i$ 为骨料颗粒 i 受到的拽力(N), V_i 为 FLUENT 网格单元的体积(m^3)。

2.2 参数设定

本研究在 PROE 软件中建立包含所有特征的

烘干筒三维模型,将其分别导入 ICEM 和 EDEM 软件中。利用 ICEM 生成 FLUENT 可识别的网格文件,在 FLUENT 中进行相关流体参数的设置;在 EDEM 中进行骨料颗粒和筒体模型参数的设置,如表 2 所示。

表 2 主要仿真参数
Tab. 2 Main simulation parameters

接触模型 ^[26]	Hertz-Mindlin
导热系数/ $(\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1})$	1.7
颗粒比热容/ $(\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1})$	0.88
颗粒密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 850
颗粒切变模量/ $(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	1.92×10^{10}
颗粒泊松比	0.25
颗粒间恢复系数	0.3
颗粒间静摩擦因数	0.5
颗粒间滚动摩擦因数	0.3
拽力模型 ^[26]	Freestream Equation
离散相-连续相传热模型	Ranz-Marshall
辐射传热系数	0.8
湍流强度/%	3.26
水力直径/m	2.75

3 仿真结果与分析

采用 EDEM-FLUENT 耦合仿真计算流程为:FLUENT 对流场进行初始化,并通过加载用户自定义函数(UDF)控制文件实现与 EDEM 的耦合连接。在每个时间步长中,FLUENT 根据连续相(烟气)运动模型迭代计算至收敛,并将流场结果传递给离散相(骨料颗粒)。EDEM 根据离散相接触模型和离散相-连续相传热模型分别对骨料颗粒的受力和温度变化进行求解并与 FLUENT 交换更新后的数据,以此循环计算骨料颗粒和烟气的升温 and 运动状态。仿真过程如图 6 所示。

3.1 提料叶片数量对骨料加热温度的影响

在烘干筒传热仿真过程中,监测每完成次迭代计算后的烘干筒出口料温,当骨料温度趋于稳定时,停止计算,根据工况参数选择的不同,收敛时间通常为 150~200 s。为了研究提料叶片数量对骨料加热温度的影响,在骨料进料率 180、240、300 t/h 工况下,分别对叶片圆周数量为 15、18、20 片的烘干筒模型进行仿真运算,得到的骨料最终加热温度曲线如图 7 所示。

由图 7 可知,在不同骨料进料率工况下,随着提料叶片数量的增加,骨料的最终加热温度升高,这与之之前关于增大料帘对流换热面积可以提高骨料加热

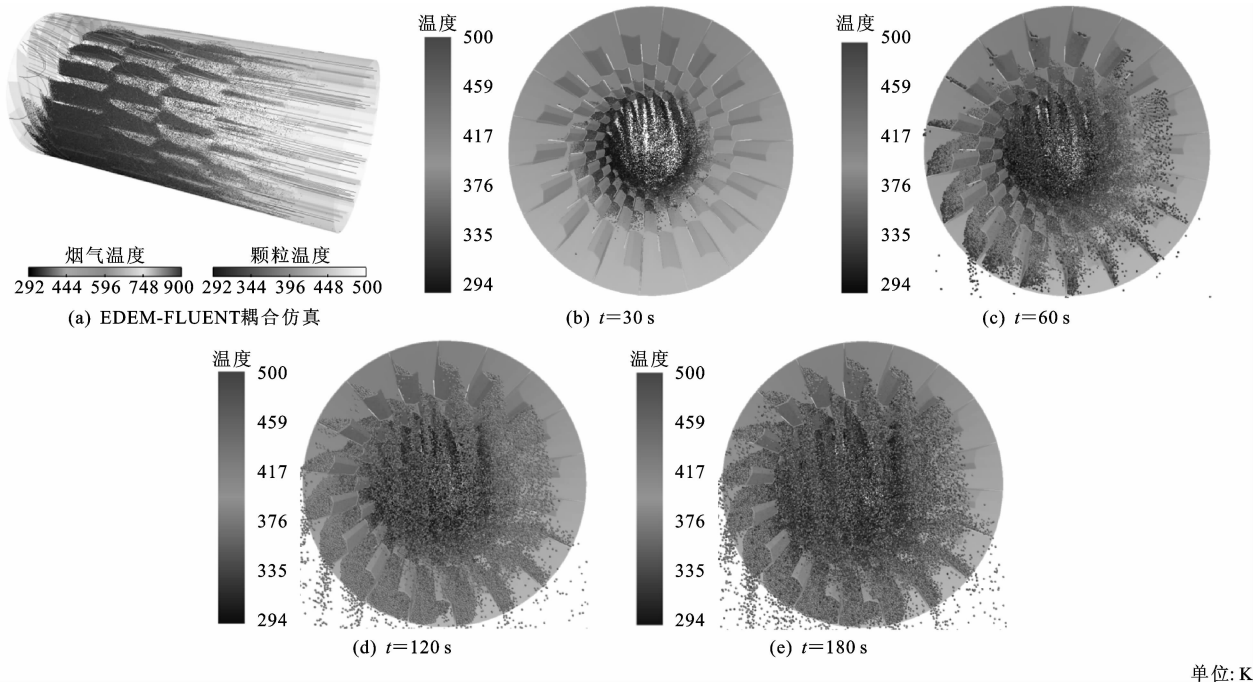


图 6 烘干筒传热仿真过程及结果

Fig. 6 Process and results of heat transfer simulation for rotary dryer

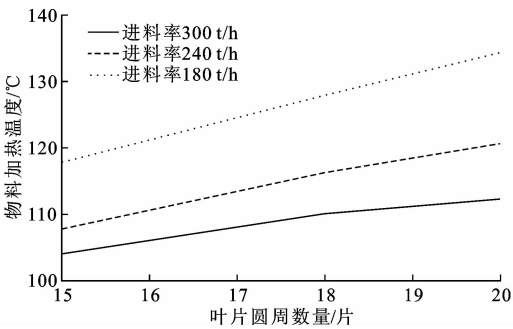


图 7 不同叶片数量工况下的骨料加热温度

Fig. 7 Heating temperatures of aggregates under different blade number cases

温度的结论是相符的。因为叶片的圆周数量越多,则骨料颗粒被提起来的概率越大,总提料量和抛撒料量越多,则料帘中的料量越大,可提高骨料与烟气的对流换热效率,从而提高骨料加热温度。分析数据同时可知,骨料进料率越小,则提料叶片的数量对骨料加热温度的影响越明显。例如:在 180 t/h 工况下,叶片数量由 15 片增加到 20 片,骨料加热温度增加幅度约为 18℃,平均每增加 1 片叶片,料温增加 3.6℃;而在 240 t/h 和 300 t/h 工况下,随着叶片数量由 15 片增加到 20 片,料温分别增加了 13℃和 8℃。另外,根据 FLUENT 仿真结果可知,在 300 t/h 时,提料叶片 20 片工况下,出口烟气温度最低,平均约为 90.4℃,说明该工况下,烟气与骨料的换热效率最高,如果继续增加叶片数量,虽然有利于

提高骨料温度,但会导致出口烟气温度进一步降低,从而增加后续除尘器负担,在布袋除尘器内部易形成结露,影响除尘效果。因此,针对本文的烘干筒模型,为保证大进料率工况下的骨料加热温度,提料叶片数量宜选择为 20 片。

3.2 烘干筒回转角速度对骨料加热温度的影响

在骨料进料率为 180、240、300 t/h 工况下,分别对回转角速度为 0.6、0.8、1 rad/s 的烘干筒模型进行仿真运算,得到的骨料最终加热温度曲线如图 8 所示。由图 8 可知,在不同骨料进料率工况下,当烘干筒回转角速度由 0.6 rad/s 增大到 0.8 rad/s 时,骨料加热温度均有所提高。这是因为适当提高烘干筒回转角速度,可以使料帘料量增加^[2],强化了料帘骨料与烟气的对流换热过程,骨料加热温度有所提高,但这种趋势在大进料率工况(300 t/h)下不明显。因为增大烘干筒回转角速度,同时会使骨料在烘干筒内的滞留时间缩短,尤其在大进料率工况下,料床料量所占比重大,增大回转角速度,会明显缩短料床骨料的有效传热时间。因此,当烘干筒回转角速度继续由 0.8 rad/s 增加到 1 rad/s 时,料温呈现下降趋势。综合考虑不同骨料进料率工况下的料温变化趋势,0.8 rad/s 的烘干筒回转角速度取值较为合理。

在烘干筒叶片数量 18 片,回转角速度 0.8 rad/s 工况下,不同进料率 180、240、300 t/h 的骨料最终加

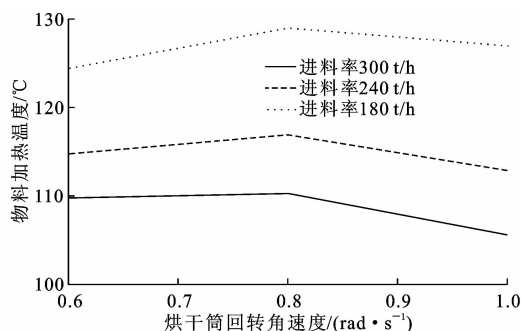


图8 不同烘干筒回转角速度工况下的骨料加热温度

Fig. 8 Heating temperatures of aggregates under different rotational speed cases

热温度仿真值分别为 128.8 °C、116.8 °C、110.3 °C。对比图 4 的传热模型求解结果可知:在相同工况下,骨料加热温度的模型计算值与仿真结果基本相符,二者偏差约为 5%~10%,满足工程计算要求。

4 结 语

(1)根据沥青搅拌设备烘干筒的传热机理,针对料帘区建立了一维轴向传热模型。通过模型求解,分析了影响骨料温升的主要因素。随着骨料进料率的加大,骨料最终加热温度会随之降低;平均每增加 1 m² 料帘换热面积,骨料加热温度升高约 1.3 °C,说明料帘特性对烘干筒传热效率有重要影响。

(2)采用基于 Eulerian-Eulerian 算法的 EDEM-FLUENT 耦合仿真对烘干筒的传热过程进行了模拟,分别研究了提料叶片数量和烘干筒回转角速度对骨料加热温度的影响。增加叶片数量,可增大料帘料量,有利于提高骨料加热温度,且骨料进料率越小则骨料最终加热温度的增加幅度越大;另外,当烘干筒回转角速度为 0.8 rad/s 时,料帘换热效率与骨料在筒内滞留时间的匹配最佳,骨料加热温度最高,增大或减小烘干筒回转角速度均会对骨料的加热效率产生不利影响。

(3)烘干筒采用合理的结构和参数能有效提高传热效率,在保证出料温度的同时降低能量消耗。但如果料帘密度过大,烟气与骨料的传热过于充分,会导致排烟温度过低,为后续除尘带来不利影响。

(4)对比相同工况下烘干筒传热模型的计算值和仿真结果,得到两者的骨料加热温度偏差约为 5%~10%,其主要是因为传热模型使用了一些假设条件及引用了部分经验数据,带来一定局限性和不确定性。后续工作需要对于烘干筒传热机理进行更深入的研究。

参考文献:

References:

- [1] AJAYI O O, SHEEHAN M E. Design loading of free flowing and cohesive solids in flighted rotary dryers [J]. Chemical Engineering Science, 2012, 73 (19): 400-411.
- [2] 郭永亮. 搅拌设备烘干筒叶片对骨料加热特性影响研究[D]. 西安:长安大学, 2013.
GUO Yong-liang. Factor research of flight in rotary dryer of the asphalt mixing equipment to aggregate heating properties[D]. Xi'an:Chang'an University, 2013.
- [3] PEINADO D, DE VEGA M, GARCÍA-HERNANDO N, et al. Energy and exergy analysis in an asphalt plant's rotary dryer [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(6/7): 1039-1049.
- [4] BOATENG A A, BARR P V. A thermal model for rotary kiln including heat transfer within the bed [J]. Journal of Heat and Mass Transfer, 1996, 39 (10): 2131-2147.
- [5] BOATENG A A, BARR P V. Modeling of particle mixing and segregation in the rotary kiln [J]. Journal of Chemical Engineering Science, 1996, 51 (17): 4167-4181.
- [6] BOATENG A A. Boundary layer modeling of granular flow in the transverse plane of a partially filled rotating cylinder [J]. Journal of Multiphase Flow, 1998, 24(3): 499-521.
- [7] LE GUEN L, HUCHET F, TAMAGNY P. Drying and heating modeling of granular flow: Application to mix-asphalt processes [J]. Journal of Applied Mechanics, 2011, 4(2): 71-80.
- [8] LE GUEN L, HUCHET F, DUMOULIN J, et al. Convective heat transfer analysis in aggregates rotary drum reactor [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 54(1): 131-139.
- [9] LE GUEN L, PITON M, HENAUT Q, et al. Heat convection and radiation in flighted rotary kilns: A minimal model [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2017, 95(1): 100-110.
- [10] CHAUDHURI B, MUZZIO J, TOMASSONE M S. Experimentally validated computations of heat transfer in granular materials in rotary calciners [J]. Powder Technology, 2010, 198(1): 6-15.
- [11] 谢立扬, 张晨光, 刘立强, 等. 烘干热滚筒表面传热过程与数值计算 [J]. 中国公路学报, 2016, 29 (3): 151-158.
XIE Li-yang, ZHANG Chen-guang, LIU Li-qiang,

- et al. Numerical calculation and process of heat transfer through surface of drying drum[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(3): 151-158.
- [12] 吴 静, 李选友, 陈宝明, 等. 大颗粒低填充率外热式回转窑传热系数模型的构建[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13): 256-262.
- WU Jing, LI Xuan-you, CHEN Bao-ming, et al. Development of heat transfer coefficient model for external heated rotary kiln with low filling large particles[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(13): 256-262.
- [13] 李 旋, 马登成, 杨士敏. 沥青混合料烘干热滚筒温度场仿真及质量分析[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(9): 98-117.
- LI Xuan, MA Deng-cheng, YANG Shi-min. Simulation on temperature field and analysis on quality of heating roller of asphalt mixture[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2014, 42(9): 98-117.
- [14] 李 旋, 马登成, 杨士敏. 加热滚筒参数对沥青混合料加热效率影响的仿真分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2016, 36(2): 120-126.
- LI Xuan, MA Deng-cheng, YANG Shi-min. Simulation analysis on the influence of heating roller parameters on asphalt mixture heating efficiency[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2016, 36(2): 120-126.
- [15] 谢立扬, 王 雪, 张晨光. 沥青搅拌设备烘干筒物料颗粒运动分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(10): 57-60.
- XIE Li-yang, WANG Xue, ZHANG Chen-guang. Analysis on material particle motion in drying drum of asphalt mixing plant[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(10): 57-60.
- [16] 李金平, 皇甫艳芳, 叶 敏. 基于流固共轭的沥青骨料烘干筒热力学仿真研究[J]. 中国工程机械学报, 2015, 13(4): 329-335.
- LI Jin-ping, HUANGFU Yan-fang, YE Min. Thermodynamical simulation on asphalt aggregate drying canister based on fluid-solid conjugation[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2015, 13(4): 329-335.
- [17] 黄志刚. 转筒干燥器中颗粒物料流动和传热传质过程的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- HUANG Zhi-gang. Study on particulate materials flow and heat and mass transfer in rotary dryers[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004.
- [18] 张志霄, 池 涌, 李水清, 等. 回转窑传热模型与数值模拟[J]. 化学工程, 2003, 31(4): 27-31.
- ZHANG Zhi-xiao, CHI Yong, LI Shui-qing, et al. Axial heat-transfer model and numerical simulation for rotary kiln[J]. Chemical Engineering (China), 2003, 31(4): 27-31.
- [19] LABRAGA L, BERKAH T. Mass transfer from a rotating cylinder with and without crossflow[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(10): 2493-2499.
- [20] BYRON BIRD R, STEWART W E, LIGHTFOOT E N. Transport Phenomena[M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2002.
- [21] 李庆扬. 数值分析[M]. 5版. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- LI Qing-yang. Numerical analysis[M]. 5th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [22] QIU L C, WU C Y. A hybrid DEM/CFD approach for solid-liquid flows[J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(1): 19-25.
- [23] 顾 强, 张世豪, 安晓红, 等. 基于 FLUENT-EDEM 耦合的爆炸抛投特性研究[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(5): 611-616.
- GU Qiang, ZHANG Shi-hao, AN Xiao-hong, et al. Research on throw characteristics of rock debris explosion based on coupled FLUENT-EDEM[J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(5): 611-616.
- [24] 施重驹, 张 宪, 钟 江, 等. 基于多相流耦合的热风杀青过程与杀青机结构优化研究[J]. 机电工程, 2015, 32(8): 1050-1055.
- SHI Zhong-ju, ZHANG Xian, ZHONG Jiang, et al. Study on de-enzyme process and structure optimization of tea hot-air cylinder dryer based on multiphase flow theories[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(8): 1050-1055.
- [25] 陈福振, 强洪夫, 高巍然. 气粒两相流传热问题的光滑离散颗粒流体动力学方法数值模拟[J]. 物理学报, 2014, 23(63): 74-90.
- CHEN Fu-zhen, QIANG Hong-fu, GAO Wei-ran. Numerical simulation of heat transfer in gas-particle two-phase flow with smoothed discrete particle hydrodynamics[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 23(63): 74-90.
- [26] FERNANDEZ X R, NIRSCHL H. Simulation of particles and sediment behaviour in centrifugal field by coupling CFD and DEM[J]. Chemical Engineering Science, 2013, 94(5): 7-19.