

生物质部分替代焦粉的烧结过程温度场模拟仿真

张安焯¹，陈贺²，王东²，吕和武³，仪垂杰¹

(1.青岛港湾职业技术学院智能制造学院，山东青岛266011；2.青岛理工大学机械工程学院，山东青岛266520；3.山东国舜建设集团有限公司，山东济南250307)

摘要：针对烧结杯试验具有较好的模拟性，基于烧结机理和Fluent软件对烧结过程温度场进行模拟仿真，并与红外热像仪在烧结杯外壁采集的温度图像进行比对，验证了仿真过程的准确性。进一步研究添加不同占比生物质燃料对烧结过程温度场的影响，仿真结果表明：添加生物质燃料使烧结速度变快，导致烧结料层燃烧带变宽，同时使燃烧带最高温度降低。研究结果对生物质部分替代焦粉的烧结实际生产具有指导作用。

铁
矿烧结过
程数学模型自20世纪70年代以来受到了很多关注。Muchi和Higuchi提出了第一个一维(1-D)模型^[1]，将烧结过程的二维稳态识别为3个不同的区域，分别为烧结矿区、燃烧高温区、烧结原料区；Young开发了1种一维数学模型^[2]，详细研究了烧结床中的传热和传质过程；Yoshinaga等研究了烧结机中的瞬态烧结过程和稳态过程^[3]；为了确定Ergun方程中压降和气体流量之间的关系，1个更全面的烧结模型由Curnmin^[4]等人提出，该模型通过1个由微分方程计算的反应因子和8个与矿石有关的反应来描述烧结过程，但在建模传热时，只考虑了对流，传导和辐射都被省略了；最近的烧结模型由Yang等人开发^[5]，该模型包括使用双助燃剂模型的辐射传热。

龙红明等人^[6]对烧结过程中气、固两相之间发生的热交换方式、物理化学变化等进行了详细研究与分析，开发了烧结过程热状态模型；中南大学范晓慧等人^[7]以烧结理论为基础，设计开发了烧结料层温度模拟系统；浙江大学赵加佩^[8]对铁矿烧结过程进行了详尽地数学描述，并详细介绍了烧结模型的关键子模型和数值求解方法。本文在以上研究基础上，引入生物质烧结作为烧结数值模拟仿真的研究对象，通过仿真与实验相结合的方式，研究添加生物质对烧结温度场的影响。

1 烧结杯试验

烧结杯试验主要是为了模拟一定烧结条件而进行的铁矿烧结试验，其试验装备如图1所示，主要是由烧结杯、点火装置、抽风装置组成。通过烧结杯试验，可进行铁矿烧结新原料、新工艺的研究，用以提高烧结矿的产量和质量。烧结杯试验是在完全模拟实际生产条件下进行铁矿烧结，其配料方案、烧结原料的中和时间、混匀时间、制粒时间等均与实际生产条件保持一致。区别于烧结机连续生产的特点，烧结杯通过DSC系统可实现烧结主要参数的检测和控制，使烧结过程“可视化”，具有较好的模拟性，便于研究人员对烧结过程建立相关数学模型，并进行仿真分析。

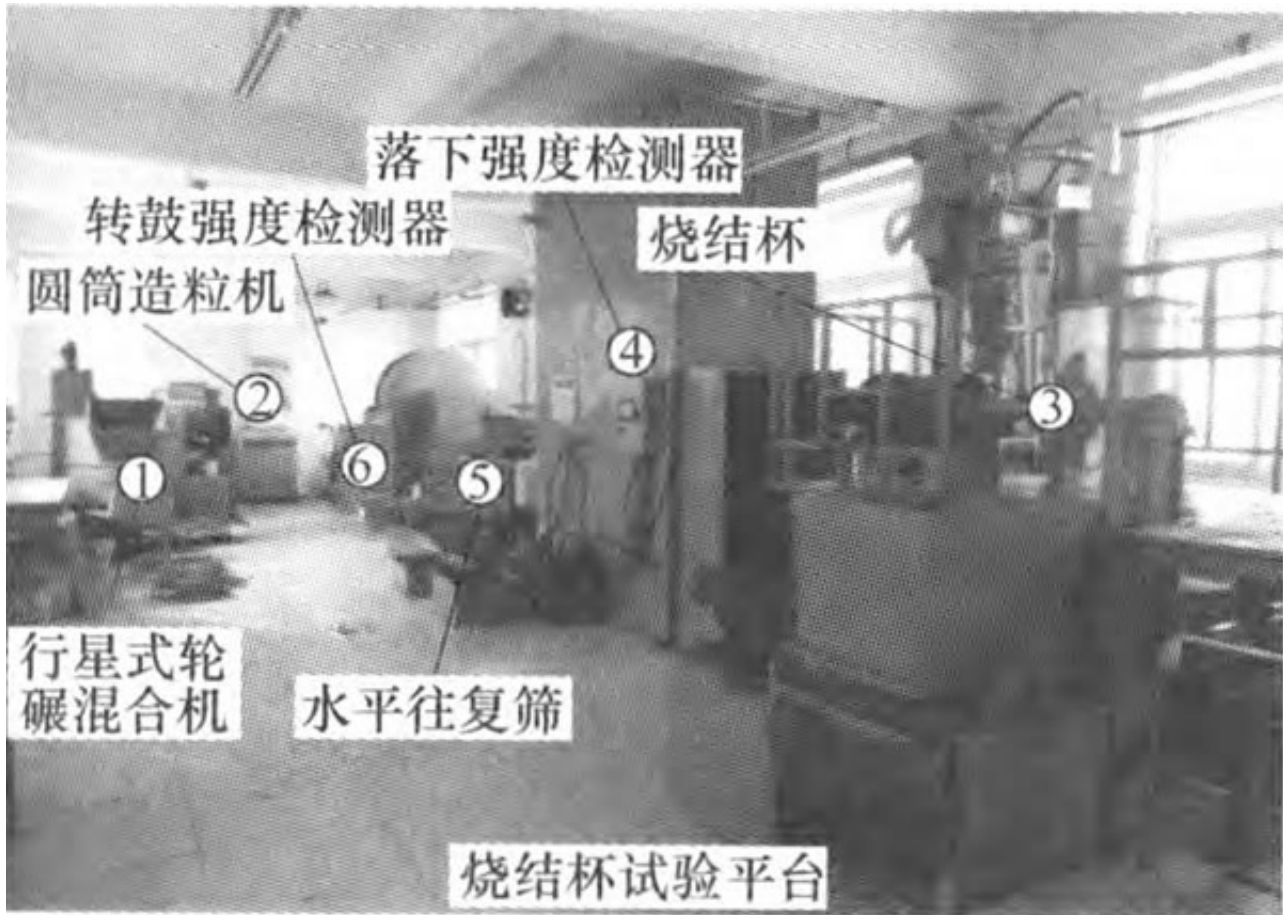


图 1 青钢烧结杯试验相关装备

2 烧结杯模型建立

2.1 网格划分

以青钢烧结杯实验室中的烧结杯为原型，将尺寸为 $300\text{mm} \times 700\text{mm}$ 圆柱体的几何模型作为计算区域，因为烧结杯的模型结构较为简单，具有明显的几何特征，在ICEM软件中采用非结构化网格对计算区域进行网格划分。网格模型如图2所示，共有837900个单元，2537325个面，861792个节点。将划分好网格的烧结杯模型导入Fluent软件中，选择维度为“3D”、精度为“双精度”，并设置网格质量不存在负体积。

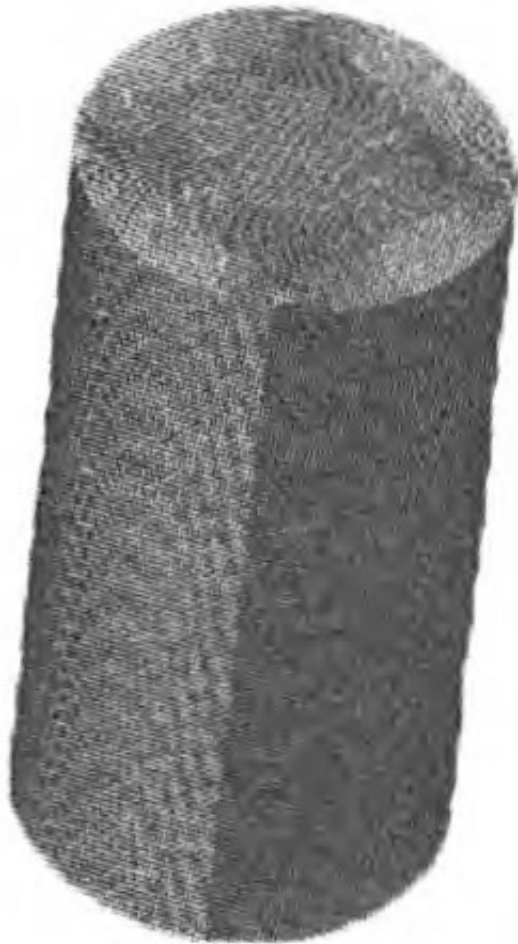


图 2 烧结杯网格模型

2.2 物料定义及化学反应机理设置

2.2.1 定义烧结物料

模拟所用物料的配比及其化学成分均取自青钢实际生产现场，而实际配料方案中含有多种不同的矿粉、燃料、溶剂，对仿真模型进行了合理简化：只考虑巴混粉1种矿粉、焦粉和不同替代占比的生物质木炭构成混合燃料、生石灰粉1种溶剂，其配料方案如表1所示。在Fluent软件的“材料面板”中按配比创建巴混粉、生石灰粉、焦粉、生物质木炭组成的混合料，其中比热容等中间参数以实测值为准。

表 1 烧结混合料配比(质量分数) %

项目	巴混粉	生石灰粉	焦粉	生物质木炭
100% 焦粉	88.610	8.050	3.340	0.000
80% 焦粉 + 20% 生物质木炭	88.610	8.050	2.672	0.007
60% 焦粉 + 40% 生物质木炭	88.610	8.050	2.004	1.336
40% 焦粉 + 60% 生物质木炭	88.610	8.050	1.336	2.004

2.2.2 设置化学反应机理

根据对化学反应模型的分析，利用反应动力学方程中各时间段反应物和生成物的消耗速率，在Fluent软件中分别将 O_2 、 CO_2 、 CO 、 SO_2 、 H_2 的生成消耗速率以源项的形式添加到组分运输方程，并通过“UDF”定义方程表达式，然后在气固能量方程中进行计算。选取烧结反应过程中对反应速率影响较大的主要化学反应，忽略次要化学反应，如表2所示。烧结过程中的矿物融化调用“Solid Mixture=Melt Mixture”命令，矿物凝固调用“Melt Mixture=Solid Mixture”命令。

表 2 烧结过程发生的主要化学反应

反应名称	化学反应方程式
焦炭的燃烧	$2C + O_2 = 2CO$
CO 的氧化	$2CO + O_2 = 2CO_2$
石灰石的分解	$CaCO_3 = CaO + CO_2$
水分蒸发	$H_2O(l) = H_2O(g)$
水分冷凝	$H_2O(g) = H_2O(l)$
Fe ₂ O ₃ 的还原	$Fe_2O_3 + 3CO = 2Fe + 3CO_2$
Fe 的氧化	$2Fe + 3O_2 = 2Fe_2O_3$

2.3边界条件的参数设定

2.3.1压力入口边界条件的设定

烧结入口处的操作压力为大气压，入口边界上的压力为表压，该边界值指相对于操作压力的大小，因此压力入口边界值设为0。由于烧结过程分为3个阶段：点火、保温和抽风烧结阶段。设定：0 t 120s为点火阶段，入口温度 $T_s=1386K$ ，抽风负压为9kPa；120s t 160s为保温阶段，入口温度 $T_s=786K$ ，抽风负压为11.5kPa；160s t为抽风烧结阶段，入口温度 $T_s=300K$ ，抽风负压为11.5kPa。其他参数如水力直径和湍流强度分别测定，烧结杯仿真模型属于规则圆管流动，其水力直径即烧结杯直径为0.3m；湍流强度，表示流体的波动速度与平均速度的比值，即流体在抽风负压下横向串流的能力，由经验公式（1）给出：

$$I = \frac{u'}{\bar{u}} = 0.16(R_e)^{-1/8} \quad (1)$$

式中： I 为湍流强度； R_e 为雷诺数； u' 为流体波动速度，m/s； \bar{u} 为流体平均速度，m/s。

对烧结杯入口处的风速进行测定， $u' = 5.32$ m/s，计算时 $R_e = 101\ 012$ ，得出湍流强度为 3.8%。

2.3.2 压力出口边界条件的设定

烧结出口处的压力随烧结阶段的不同而改变，当处于点火阶段时为 9kPa，当处于烧结阶段时为 11.5kPa。设定 0 t 120s 为点火阶段，出口温度 $T_f = 300$ K；120s t 160s 为保温阶段，出口温度 T_f 逐渐升高，取其平均值 $T_f = 453$ K，抽风负压为 11.5kPa；160s t 为抽风烧结阶段，出口温度同样不断升高，取其平均值 $T_f = 628$ K，抽风负压为 11.5kPa。在抽风烧结阶段结束时，烧结出口瞬时温度 $T_f > 800$ K，取其多组实验的平均值 $T_f = 825$ K。水力直径和湍流强度的值与入口处相同，分别为 0.3m、3.8%。

2.3.3 壁面边界条件的设定

分析烧结杯中的流体流动为不存在压力梯度、不存在绕流和弯曲流动、具有高雷诺数，因此采用标准壁面函数处理方法。

2.3.4 多孔介质条件的设定

烧结过程的料层收缩现象主要诱因：料层在高温熔融状态下液相受重力向下部料层浸润，此过程仅发生在料层燃烧带。料层收缩影响烧结料多孔介质模型的孔隙率和平均当量粒径，烧结数值建模的混合料层孔隙率计算公式^[9]：

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{4(1 - \varphi_0)}{5}(\beta_0 - \beta) - \frac{\lambda(1 - \varphi_0)}{1 - \lambda} + V_c \frac{d_{c_1} - d_{c_0}}{d_{c_1}} \quad (2)$$

式中： φ 为混合料层的孔隙率，%； φ_0 为烧结反应之前的混合料孔隙率，%； β_0 为烧结反应之前的料层颗粒形状系数，取值 0.85； β 为烧结反应中的料层颗粒形状系数，取值见式(3)； λ 为计算单元内的收缩率，%，取值见式(4)； V_c 为燃料颗粒体积， mm^3 ； d_{c_1} 为燃料颗粒粒径， mm ； d_{c_0} 为混合料颗粒平均当量直径， mm 。

$$\beta = 0.6 + \frac{T_s - 1473}{1600} \quad (3)$$

式中： T_s 为固相平均温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

$$\lambda = \frac{T_s - 1473}{400} \lambda_t \quad (4)$$

式中； λ_t 为料层总收缩率，%，取经验值 15%。

将多孔介质分为两层，上层为烧结混合料层，下层为铺底料层，多孔介质计算区域内部的部分参数如表 3 所示。

表 3 多孔介质部分参数

项目	粒径 /mm	孔隙率 /%	粘性阻力 系数	惯性阻力 系数
上层	0.003	0.35	6.00×10^8	56 000.0
下层	0.013	0.60	6.89×10^5	937.5

因为烧结过程机理复杂且其仿真计算量较大，故采用SIMPLEC算法来提高计算速度；烧结杯模型网格类型为非结构四面体网格，该网格质量较佳，而采用二阶迎风格式求解方法，可提高模型精度和稳定性。

3 仿真结果分析

3.1 常规烧结料层温度场模拟

将常规烧结所用的参数代入烧结杯计算模型中，基于有限元体积法求解完成后，采用Fluent软件强大的后台处理功能对求解出的数据进行图像化显示和处理。整个常规烧结过程持续20min左右，选择混合料在烧结杯烧结过程中200、600、1000s时刻的温度仿真云图如图3所示。

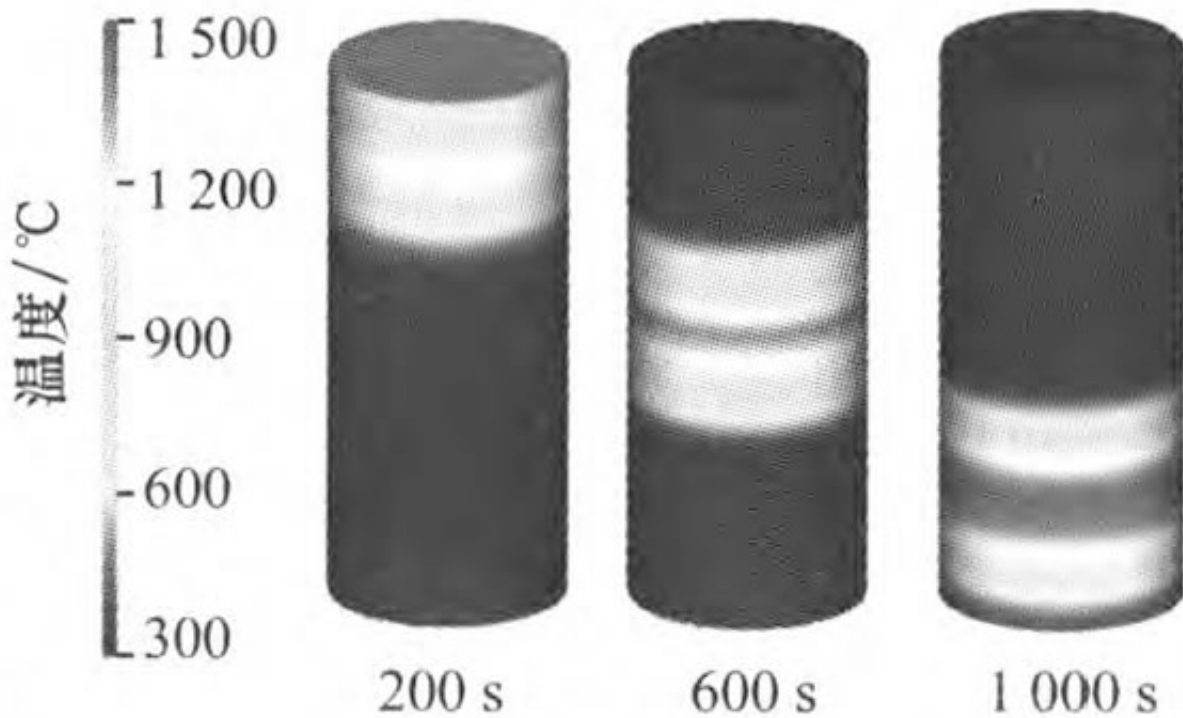


图3 常规烧结料层温度仿真云图

从图3可看出：在抽风烧结的作用下，随着时间的推移，烧结过程自上而下进行，表现为烧结料层最高温度（烧结燃烧带）在烧结杯中的位置逐渐向下移动，且烧结燃烧带的厚度不断增大，导致烧结料层的最高温度不断升高，且最高温度可达到1500℃左右。

为了验证仿真过程的准确性，在烧结杯实验室进行常规烧结试验，实际烧结过程如图4所示；利用红外热像仪采集到的烧结料层温度场如图5所示。发现烧结料层实际温度场与仿真温度场的变化趋势相吻合，亦呈现出烧结料层燃烧带厚度增加、料层最高温度不断升高的趋势，验证了烧结过程温度场模拟仿真的正确性。

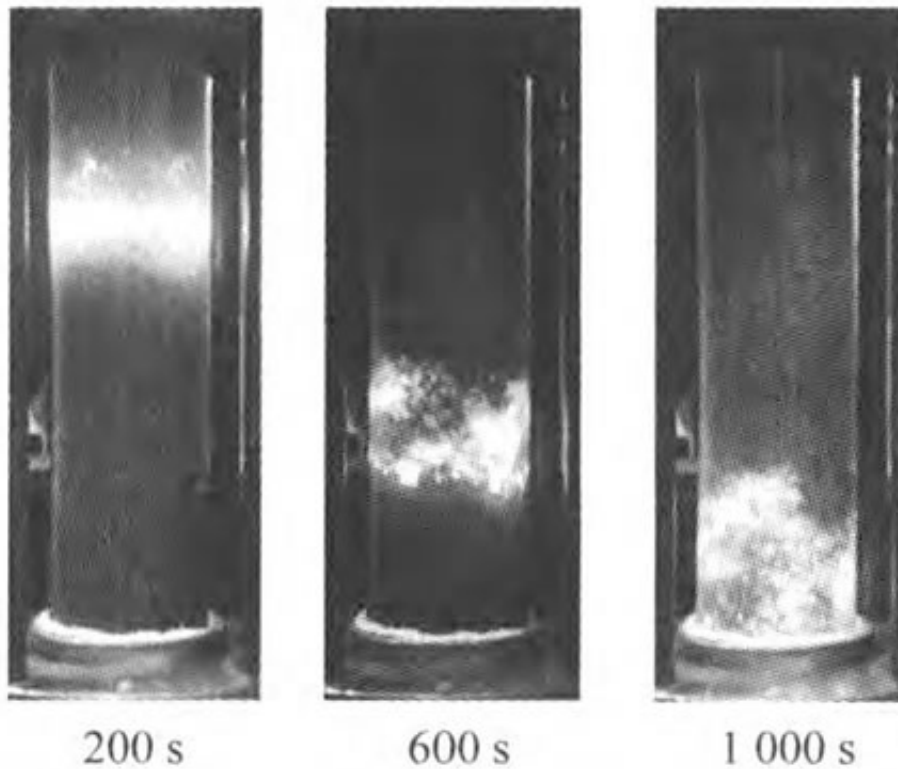


图 4 烧结杯实际烧结过程

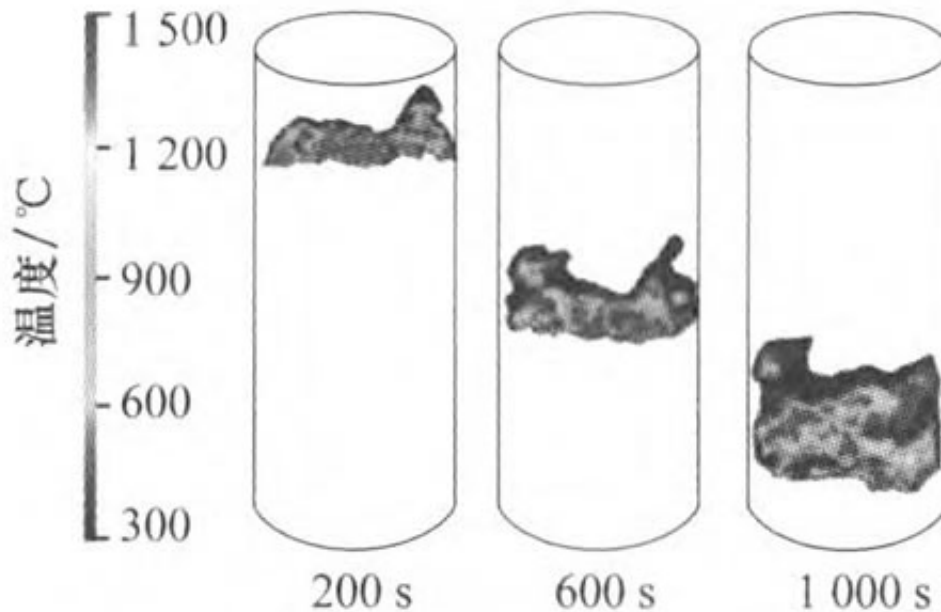


图 5 红外热像仪采集到的烧结料层实际温度场

3.2 生物质烧结料层温度场模拟

将不同占比的生物质木炭替代焦粉燃料所用的参数代入烧结杯计算模型中，求解完成后，得到的温度仿真云图如图6所示。从图6可看出：不同占比的生物质木炭替代焦粉燃料后，随着生物质燃料占比的提高，烧结料在200、600、1000s时刻处的燃烧带厚度逐渐增大，但在每个时刻处的最高温度却逐渐降低。

理论分析认为烧结燃烧带厚度增大的主要原因是生物质木炭与焦粉相比燃烧性好，燃烧速率快，导致烧结燃烧前沿速率变快，进而导致整个烧结燃烧带厚度变宽。烧结料层最高温度逐渐降低是因为燃烧速率快，烧结料层的传热速率会低于烧结料层的燃烧速率，导致燃烧产生的热量并未完全传递给烧结料层，便在抽风状态下被冷风带走，故烧结燃烧带的料层温度逐渐降低。

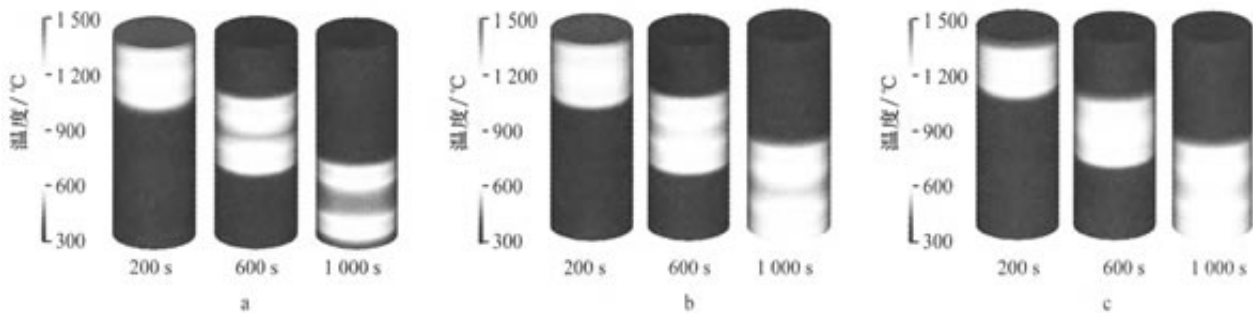


图6 不同占比生物质木炭替代焦粉的料层温度仿真云图

a—20%生物质木炭替代焦粉；b—40%生物质木炭替代焦粉；c—60%生物质木炭替代焦粉

4结论

- (1) 基于有限元体积法对烧结料层温度场进行模拟仿真，对比模型仿真结果和红外热成像仪的实际检测结果，验证了烧结杯温度场模拟仿真的正确性。
- (2) 对3组生物质燃料部分代替焦粉的烧结过程温度场进行仿真分析，结果表明：随着生物质燃料替代占比的提高，烧结料层中的燃烧带厚度逐渐增大，料层最高温度却逐渐降低。
- (3) 研究结果对生物质燃料部分代替焦粉的烧结实际生产具有一定的指导作用。

参考文献

- [1] I. Muchi, J. Higuchi. Theoretical analysis on the operation of sintering[J]. Tetsu-to-Hagané, 1997, 56(3): 371 - 378.
- [2] R. W. Young. Dynamic mathematical model of iron ore sintering process[J]. Ironmaking & Steelmaking, 1997, 6(4): 321 - 328.
- [3] M. Yoshinaga, T. Kubo. Approximate simulation model for sintering process[J]. The Sumitomo Search, 1978, 29(4): 1 - 12.
- [4] M. J. Cumming, J. A. Thurlby. Thermal implications of phase transformations during induration of iron ore pellets produced from hematite[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2005, 45(11): 1 561 - 1 566.
- [5] W. Yang, C. Ryu, S. M. Choi, et al. Mathematical model of thermal processes in an iron ore sintering bed[J]. Met. Mater. Int., 2004, 10(5): 493 - 500.
- [6] 龙红明. 铁矿石烧结过程热状态模型的研究与应用[D]. 长沙:中南大学, 2007.
- [7] 范晓慧, 彭坤乾, 陈许玲, 等. 铁矿石烧结料层温度模拟模型[J]. 矿冶工程, 2012, 32(2): 67 - 70.
- [8] 赵加佩. 铁矿石烧结过程的数值模拟与试验验证[D]. 杭州:浙江大学, 2012.
- [9] 张小辉. 基于燃料分层分布的烟气循环烧结工艺仿真与优化[D]. 长沙:中南大学, 2013.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/163399.html>