



三叶型回转窑温度场及影响因素的数值模拟

陈作炳, 项 勤, 印世杰, 张 杰

(武汉理工大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 采用三维建模软件 Pro/E 建立三叶型回转窑内部流场三维模型, 运用计算流体动力学(CFD)流体仿真分析软件 Fluent, 设置边界条件, 选用非预混燃烧模型、离散相模型求解窑内温度分布情况, 通过对一次风速、一次风温、叶片倾斜角、二次风速、油喷射角度各影响参数进行分析对比。结果表明: 当处于 50~60 m/s 的一次风速, 200 °C 的一次风温, 150 m/s 的二次风速, 旋流叶片角度为 30° 左右, 喷油角度 15° 时窑内能得到理想的温度分布, 研究结果为三叶型回转窑设计制造和工程应用提供参考依据。

关键词: 三叶型回转窑; 陶粒; 燃烧; 数值模拟

中图分类号: TH16; TH6 文献标志码: A

文章编号: 1008-5548(2017)06-0006-05

Numerical simulation of temperature field and influence factors of three leaves rotary kiln for ceramsite

CHEN Zuobing, XIANG Qin,

YIN Shijie, ZHANG Jie

(School of Mechanical and Electronic Engineering,
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Pro/E was used to build the model of fluid area of the three leaves rotary kiln, and CFD (computational fluid dynamics) fluid simulation software Fluent was used, the boundary conditions were set, and the non-premixed combustion model and discrete phase model were chosen to simulate the temperature distribution, the kiln temperature distribution curve was drawn. Through the analysis of the influence parameters such as primary wind speed, air temperature, swirl vane angle, secondary wind speed, oil injection half angle, the results showed that the primary wind speed in the 50-60 m/s and the temperature in 200 °C is more appropriate; and suitable swirl vane angle is about 30°, the secondary wind speed in the 150

m/s is more appropriate. When the fuel injection angle is 15°, it has better effect. The results of the analysis provide the reliable basis for the 3 leaves rotary kiln design processing and engineering applications.

Keywords: three leaves rotary kiln; ceramsite; combustion; numerical simulation

有机废弃物和污泥可用来制备陶粒, 制备陶粒需要经过混合均化、烘干预热、焙烧成型、降温冷却 4 步工艺, 其中焙烧成型是整个工艺流程的关键过程, 也是最为复杂的反应过程^[1]。焙烧成型过程包含热量传递、烟气与陶粒料球的运输、窑内燃料和陶粒生料的化学反应等一系列过程。陶粒烧制完成的温度大约为 1 050 °C^[2]。

本课题以污泥陶粒^[3-4]为例对烧胀型陶粒的焙烧过程进行分析。污泥掺量与烧胀温度是影响污泥陶粒烧胀性能的重要参数^[5]。烧胀陶粒的焙烧成型必须满足两个条件: 一是料球在膨胀温度下能够产生适当的黏度和表面张力; 二是熔融的玻璃相在陶粒内部化学反应生成气体的作用下膨胀^[6]。而这两个条件都跟焙烧温度有关。当适量气体膨胀逸出时, 熔融玻璃相的黏性与表面张力抑制气体从中逸出, 两种力的相互作用, 使得陶粒达到很好的膨胀效果, 从而形成高质量的烧胀陶粒^[7]。三叶型回转窑是制备陶粒的关键设备, 而窑内温度的分布情况直接影响着陶粒的制备以及陶粒产品的质量, 故此针对三叶窑内温度场及其影响因素展开研究。

1 数值模型

1.1 物理模型

以三叶型陶粒回转窑作为研究对象, 其结构图如图 1 所示。筒体的内径为 2.2 m, 长度为 18 m。回转窑的转速设定为 2 r/min, 转速可以根据陶粒生产的产量和质量的需要进行适当调节, 调节范围为 1~3 r/min。

三叶型陶粒回转窑在传统回转窑的基础之上, 内部装有 3 列相互搭接的圆弧形耐热合金内衬叶片结构, 通过自身内部圆弧以及外部伸出筒体部分螺栓进

收稿日期: 2016-07-22, 修回日期: 2017-09-23。

第一作者简介: 陈作炳(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为建材装备及其控制技术, 节能环保技术及其应用研究。

通信作者简介: 项 勤(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为先进制造工艺及装备研究。Email: 575165031@qq.com。

行固定 ,物料总是填充三叶型截面的 3 个叶片中的一个 ,物料截面的填充率约为 12%。物料平均每 10 s 翻转一次 ,同时暴露在外的物料表面更新一次。这种结构有利于陶粒生料在回转窑内部的均匀焙烧 ,而且物料与筒体内部热气流换热面积增大 ,有效提高了陶粒焙烧效率 ,相比于一般的回转窑有更好的保温节能性能。

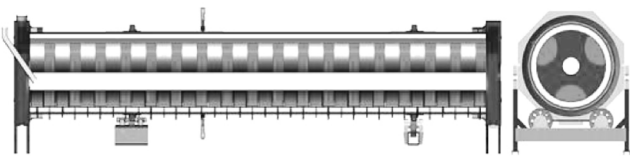


图 1 三叶型回转窑结构图
Fig. 1 Structure chart of 3 leaf kiln

目前对燃烧装置的研究方法主要是数值模拟^[8] ,通过 Pro/E 建立经过简化的三叶型陶粒回转窑内部流场三维模型 ,燃烧器伸入窑内部 0.8 m 处 ,相互搭接的内衬结构进行平滑简化处理。为降低模型复杂度 ,减小计算量 ,引入简化假设 :1)过程为稳态 2)气体为理想气体 3)忽略少量粉料颗粒对三叶窑内流场、温度场的影响。

燃油燃烧器主要由燃油喷嘴和调风器组成^[9] ,选用压力旋流雾化喷嘴 ,调风器选用轴向固定叶片式调风器 ,调风器具体结构形式以及旋风过程简化 ,运用局部柱坐标系对燃烧器风口进风设置相应的直流和旋流。

窑头部分由于燃烧器模型几何结构复杂 ,采用通过结构网格加上中心 O 型网格对其进行网格划分 ,并对燃烧器处的网格进行局部加密 ,以控制关键部位的计算精度。后面大部分窑体区域通过 T 型网格对齐进行结构网格划分 ,并对中心部位进行加密处理。

1.2 计算模型

三叶型陶粒回转窑窑头燃烧器喷油燃烧 ,需要先将燃油雾化成为小液滴 ,再与空气混合进行燃烧^[10-12] ,因而喷出的油雾采用离散相模型 ,射流源选择 Fluent 软件中自带的压力旋流雾化喷嘴模型使油雾化。其中油滴的张力和黏度设置成随温度变化的函数。燃烧之前没有使油滴和空气进行混合 ,因而油雾与空气的燃烧为非预混燃烧 ,可以选择非预混燃烧模型对燃烧进行模拟。因为三叶型陶粒回转窑进出口处烟气流速比较大 ,所以导致雷诺数很大 ,为湍流流动 ,可选择标准 $k-\varepsilon$ 模型作为内部流场的湍流模型^[13-14] ,辐射传热模型选择 P1 辐射传热模型。

1.3 边界条件

在三叶型陶粒回转窑中 ,中心一次空气由风机提供的经过加热的自然空气 ,外围二次风采用陶粒冷却设备出来的高温空气。空气入口因为质量流量一定 ,而入窑温度也为一定值 ,因而可以选取速度入口为入口边界条件。一次风考虑旋流对火焰稳定性的影响 ;二次风入口也设定为速度入口。燃油采用压力旋流雾化喷嘴作为射流源。出口采用压力出口 ,窑尾负压为-200 Pa。边界条件如表 1 所示。

表 1 边界条件
Tab. 1 Summary table of boundary conditions

边界条件	边界类型	参数值	水力直径/m	湍流强度/%	温度/℃
一次风	速度入口/(m·s ⁻¹)	60	0.18	3.2143	150
二次风	速度入口/(m·s ⁻¹)	150	0.06	3.634	350
出口	压力出口/Pa	200	1.09	4.344	25

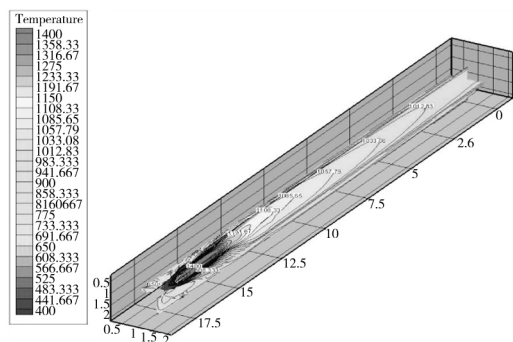
1.4 材料特性

三叶型陶粒回转窑采用燃料油作为主要燃料。为降低模型计算复杂度 ,将燃油组成简化为主要化学组成为 C₁₆H₃₄ 的有机成分 ,假设陶粒生料混合物料物性为常数定值^[15] ,即污泥密度 $\rho_p=1\ 300\ \text{kg/m}^3$,比热容为 $C_p=2\ 641.5\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}$ 。

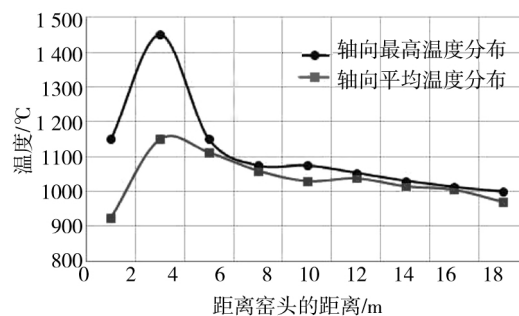
2 结果与分析

根据所建立模型和设置参数 ,将 Fluent 分析计算结果导入 Tecplot 进行后处理。研究窑内轴向温度分布 ,首先对计算模型后处理 ,观察沿窑轴中心温度分布。窑内轴向温度计算结果如图 2a 所示。燃烧器设置在窑头部分 ,如图 2a 中温度较高的红色区域。陶粒生料球从窑尾进入 ,向窑头行进过程中温度逐渐升高。根据截面温度大小绘制窑沿轴温度分布曲线如图 2b 所示 ,深色部分表示截面上最高温度的分布曲线 ,浅色部分表示有效的截面温度 ,即截面主要温度分布区域的算术平均值。由图 2 可以看出 ,焙烧段长度约为 7 m 左右 ,满足焙烧过程的需要。

窑入口一、二次风风速、风温、喷油量大小、燃油压力大小、入口风速旋流大小等相关参数的设置都会对火焰形状以及窑内温度分布情况产生影响 ,在此对其进行对比分析 ,图 3—6 为不同参数条件对窑内部轴向温度分布的影响。一次风温和一次风速对窑轴向平均温度分布的影响见图 3。



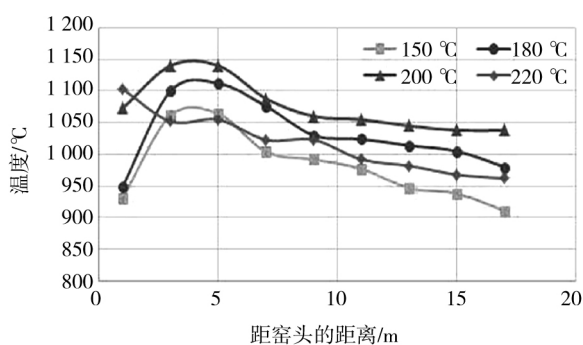
a 模拟计算结果



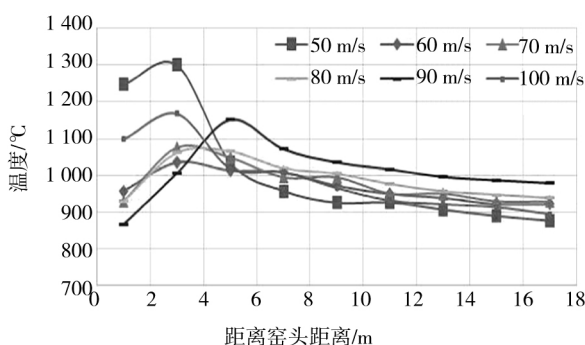
b 温度分布曲线

图 2 窑内轴向温度分布

Fig. 2 Axial temperature distribution of 3 leaf kiln



a 一次风温



b 一次风速

图 3 一次风温和一次风速对窑轴向平均温度分布的影响

Fig. 3 Average temperature distribution based on different primary wind temperature and different primary wind speed

由图 3a 可以看出,一次风温适度增大(150~200 °C)时,窑内整体温度相应提升,窑内的有效烧成温度段变长,有利于减少燃油的消耗量,同时也有利于增加窑内焙烧段的长度和焙烧时间。但是过高的一次风温(超过 220 °C),会使得燃油燃烧集中在窑头部分,高温火焰过于靠近燃烧器会缩短燃烧器寿命,同时燃料燃烧的总行程变短,导致物料焙烧不够充分,影响陶粒的烧成。

由图 3b 可以看出,随着一次风速的增大,窑头燃烧器部分温度逐渐降低,这是因为一次风增大,能到而缩短燃烧器寿命;同时随着窑一次风速的增加(50~90 m/s),窑内整体温度呈现出逐渐升高的趋势,因为一次风速的增加能促进风油混合,使得燃烧更为迅速充分,从而提高窑内整体温度。但进一步增大窑内风速至 100 m/s 时,窑内温度又显现出下降的趋势,因为一次风毕竟属于“冷风”,温度在 150~220 °C 相比于燃烧产生的高温烟气的温度较低,在满足燃油充分混合及燃烧的基础上,进一步增大一次风速只会作为“冷风”对窑炉进行冷却,因此可适当增大一次风速,但不宜过高,超过 90 m/s 将起到相反的作用。二次风速对窑轴向平均温度和最高温度分布的影响见图 4。

由图 4 可以看出,二次风速越大,窑内的温度反而越低。这是因为窑头燃烧器的配风不仅考虑了燃油所需要的空气量,还考虑了物料在窑内焙烧过程所需要的空气量,因而随着窑二次风速增大,窑内温度有所降低也属于正常。关键应该注重窑内焙烧段的长度,以满足焙烧陶粒的温度要求,同时考虑火焰形状对窑工作状况的影响。二次风速对窑边界最高温度分布的影响如图 5 所示。

由图 5a 可知,风速在 130~150 m/s 时,能达到焙烧温度和焙烧窑长的需求,过高的焙烧温度反而不利于生成良好质量的陶粒产品。二次风速较低时,窑边界温度较高,即二次风速过低时无法“束缚”住火焰,从而使火焰刚度受到影响。故应该适当提高二次风速,一来满足窑内物料焙烧所需要的风量要求,二来能够稳定火焰形状,防止边界部分温度过高或发生“扫窑皮”的现象,从而缩短窑内衬结构部分寿命。

二次风速过小,可能导致“红窑”状况的发生,如图 5b 所示,三叶窑内衬更靠近火焰中心区域,因此对火焰的偏烧尤为敏感,偏烧严重会极大影响窑内衬寿命,因而有必要在合理范围内采用较大的二次风速。

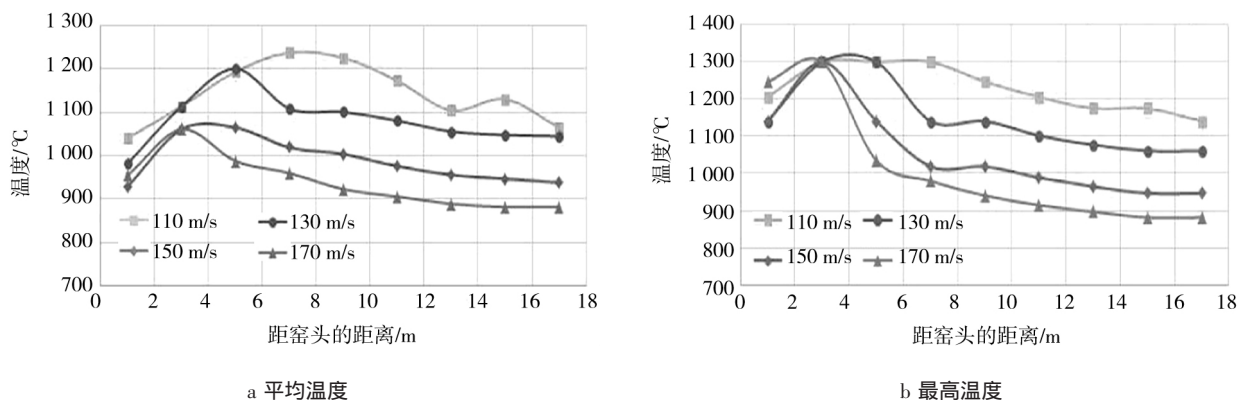


图4 二次风速对窑轴向平均温度和最高温度分布的影响

Fig. 4 Average temperature and maximum temperature distribution based on different secondary wind speed

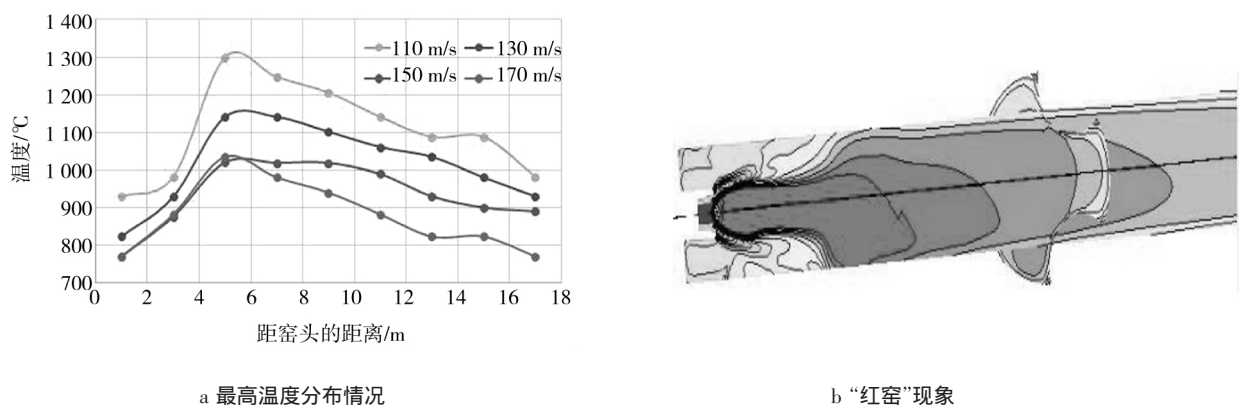


图5 二次风速对窑边界最高温度分布的影响

Fig. 5 Maximum temperature distribution based on different secondary wind speed

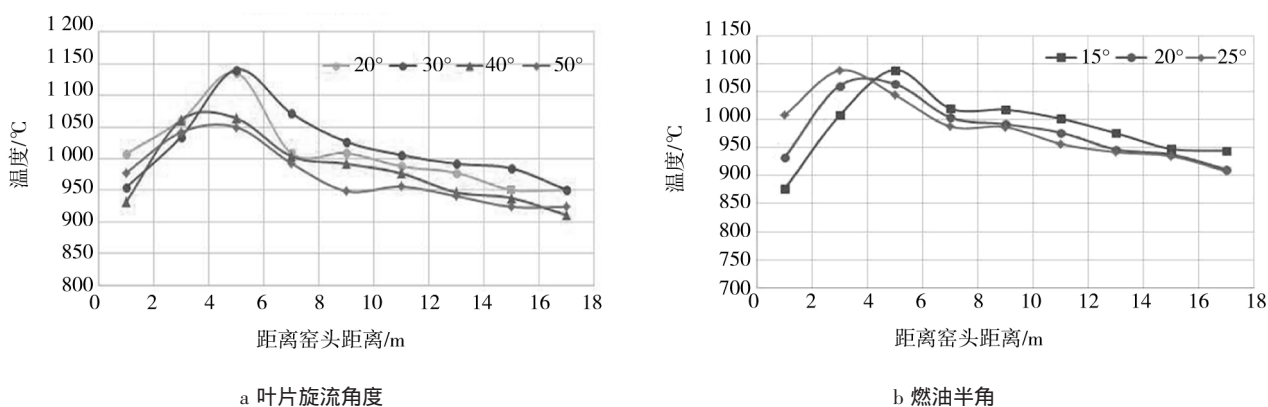


图6 叶片旋流角度和燃油喷射半角对窑内部轴向平均温度分布的影响

Fig. 6 Average temperature distribution based on different swirl vane angle and different oil injection half angle

图6为叶片旋流角度和燃油喷射半角对窑内部轴向平均温度分布的影响。

由图6a可以看出,随着叶片旋流角度的增加(20~30°),刚开始窑内整体温度有所提升,因为这个

阶段叶片旋流角度的增加能够很好地促进风油混合,从而使油雾燃烧更为充分;当继续增大一次叶片旋流角度时(30~50°),整体温度反而有所降低,因为叶片旋流角度过大会导致一次风轴向方向速度不够,从而

影响一次风行程,导致窑中后段窑温不升反降,因此叶片旋流角度应选用 30° 。

由图 6b 可以看出,随着油喷射半角的增大,窑头处温度也会逐渐升高,这是因为大的油喷射半角会使燃油过早与温度较高的二次风接触,从而在窑头不远处即能着火燃烧;同时,随着燃油喷射半角的增加,窑内整体温度有所下降,这是因为燃油量一定的情况下,喷射半角的增大会缩短油喷射行程,从而在远离窑头的位置油气较少,不能形成较高的温度,导致陶粒焙烧段长度不足。

燃油喷射半角越小,燃油喷射越远,远离窑头,从而降低窑头温度,保护燃烧器,除此之外还能提升窑内温度,节省燃料;当燃油喷射半角小于 15° 时会使得火焰变得细长,火焰被约束在中心轴线附近,使得窑内温度降低,不利于窑内物料的受热焙烧。因此综合考虑窑内整体温度以及火焰形状确定 15° 为合适的燃油喷射半角。

3 结论

应用 Fluent 软件,采用非预混燃烧模型和 P1 辐射换热模型,对三叶型陶粒回转窑的燃料燃油在炉内的燃烧过程进行了数值模拟,得到了窑内的流场、沿主轴温度场分布情况,并对模拟结果进行分析。

模拟结果表明:三叶型陶粒回转窑内部,燃油燃烧形成的温度场与陶粒烧制所需要的窑内温度分布情况相契合;由模拟得到的参数对比分析结果可以得到,回转窑合适的一次风温为 200°C ,一次风速为 $50\sim 60\text{ m/s}$,二次风速为 150 m/s ,旋流叶片角度为 30° ,油喷射半角为 15° ,在该条件下温度场分布最有利于陶粒焙烧成型。研究结果为实际生产过程提供指导,同时也可以对窑内温度进行实时监控和调整,使得窑内温度分布情况满足陶粒焙烧的要求,并实现节

能降耗。

参考文献(References):

- [1] WANG C, CHEN X X, DANG C, et al. Preparation of ceramsite from C&D waste and baiyunebo tailings[J]. Procedia Environmental Sciences, 2016, 31(2):211-217.
- [2] 严曲烈,王渊,杨久俊,等.城市污泥-玻璃粉轻质陶粒制备及性能研究[J].硅酸盐通报,2016,35(3):970-974.
- [3] 章金骏.污泥烧制陶粒的技术路径与控制因子研究[D].杭州:浙江大学,2012.
- [4] 翁焕新,章金骏,曹彦圣,等.污泥陶粒的性能与烧制工艺[J].浙江大学学报(工学版),2011,45(10):1877-1883.
- [5] 罗晖,钱觉时,陈伟,等.污水污泥页岩陶粒烧胀特性[J].硅酸盐学报,2010,38(7):1247-1252.
- [6] 刘景明,陈立颖,宋存义,等.由化工脱水污泥烧制陶粒[J].北京科技大学学报(自然科学版),2008,30(10):1090-1094.
- [7] QIN J, CUI C, CUI X Y, et al. Preparation and characterization of ceramsite from lime mud and coal fly ash[J]. Construction and Building Materials, 2015, 95(6):10-17.
- [8] 陈作炳,钟勇.窑头四风道燃烧器冷态流场数值模拟[J].机械设计与制造,2011(2):206-208.
- [9] 郝勇,刘建忠,张保生,等.关于不同燃烧器结构对回转窑窑内流场影响的试验研究[J].现代机械,2007(5):1-3.
- [10] 包堂堂,胡宗杰,胡俊超,等.基于超声雾化的柴油/汽油混合燃料液滴群燃烧特性[J].吉林大学学报(工学版),2013,43(4):903-908.
- [11] 刘建全,孙保民,张广才,等.1000 MW 超超临界旋流燃烧锅炉稳燃特性数值模拟与优化[J].中国电机工程学报,2012,32(8):19-27.
- [12] 柳伟杰,葛冰,江之鉴,等.低旋流多喷嘴燃烧器性能试验[J].上海交通大学学报(自然科学版),2016,50(4):545-550.
- [13] 尹传琦,孔建益,汤勃,等.含钕页岩回转窑燃烧器数值模拟研究[J].机械设计与制造,2014(6):91-93.
- [14] 张文学,郭彩,武建新.三次风速对煤粉燃烧器燃烧效率的影响[J].热力发电,2015,44(4):39-43.
- [15] 彭寿,陈淑勇,王芸,等.玻璃微珠球化炉流场及粉料球化数值模拟研究[J].硅酸盐学报,2016,44(7):1-6.