

# 外热式蒸压转炉内部结构 对脱硫石膏传热效果的仿真

朱桂华\*, 王建业, 徐洪威, 柳颖娇, 巴 赛, 彭南辉

(中南大学机电工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:**提出了3种不同的扬料加热器结构, 截面结构分别为正三角形、A型直角三角形及B型直角三角形, 仿真模拟分析了此3种扬料加热器结构下脱硫石膏的速度场、温度场、温度稳定时间及平均温升效率。并将模拟结果与试验数据进行对比。结果表明, 在相同条件下, A型直角三角形扬料加热器的扬料效果与加热效果优于其余2种扬料加热器结构。

**关键词:**加热器; 脱硫石膏; 外热式; 传热; 数值模拟; 温度; 转炉

中图分类号: TQ177.3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2018)02-0210-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2018.02.051

## Simulating effect of internal structure of external heated rotary autoclave on heat transfer of FGD gypsum

ZHU Gui-hua\*, WANG Jian-ye, XU Hong-wei, LIU Ying-jiao, BA Sai, PENG Nan-hui

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Through analysis, three different kinds of lifting heater structure are proposed, with cross-sectional structure being regular triangle, A-type right triangle and B-type right triangle respectively. The flue gas desulfurization (FGD) gypsum's velocity field, temperature field, temperature stabilization time and average heating efficiency under these three lifting heater structures are separately simulated and analyzed. The simulation results are compared with the experimental data. It is found that under the same conditions, the lifting effect and heating effect of the A-type right triangle lifting heater are better than those of the other two kinds of lifting heaters.

**Key words:** heaters; FGD gypsum; external heated type; heat transfer; numerical simulation; temperature; rotary autoclave

$\alpha$ 型半水石膏, 又称高强石膏, 分子式  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ , 可由脱硫石膏 (FGD gypsum) 或者天然石膏 (分子式  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) 在一定温度、压力及饱和水蒸汽条件下脱去附着水及  $3/2$  个结合水得到。目前,  $\alpha$ 型半水石膏的制取设备有2大类: 卧式、立式蒸压法反应釜和液相法反应釜, 但该2类设备生产周期长, 能耗高, 而且不能直接以脱硫石膏作为原料。湖南某环保公司于2015年设计出干法脱硫石膏制备  $\alpha$ 石膏蒸压转炉中试设备, 该设备集升温、降温、转晶、干燥和进料、出料各道工艺于一体, 既能以天然石膏为原料, 也可以工业副产石膏为原料。生产工艺简单, 生产效率高, 节能环保, 是目前生产  $\alpha$ 型半水石膏投资最省、成本最低的新型工艺设备。

然而, 该类设备作为一种新型设备, 正处于实验阶段, 所得  $\alpha$ 石膏产品质量并不稳定, 对转炉腔内部结构也未进行深入研究, 所设计的正三角形扬料加热器结构几乎是凭主观想象得到, 没有理论依据。

外热式蒸压转炉的扬料及加热效果是干法脱硫石膏制备  $\alpha$ 石膏的关键因素之一, 而其内部结构对扬料及加热效果起到了重要作用。Henein等<sup>[1]</sup>针对颗粒在无构件回转炉窑内的运动, 将其分为6种形态: 滑移 (Slipping)、塌落 (Slumping)、滚落 (Rolling)、泻落 (Cascading)、抛落 (Cataracting) 和离心 (Centrifuging) 运动。Boateng等<sup>[2]</sup>认为滚落状态是表层物料从高端持续滚落至低端, 而下层物料由于与壁面接触并与壁面同步运动, 即与壁面不产生相对运动, 从而使物料在横截面内形成旋转运动, 而不产生轴向运动。滚落状态被认为是工程实践中的理想设计工况。目前, 对于内热式炉窑传热的研究成果较多, Chaudhuri等<sup>[3]</sup>、Herz等<sup>[4]</sup>、陈文仲等<sup>[5]</sup>、张志宵等<sup>[6]</sup>、马爱纯等<sup>[7]</sup>对内热式炉窑传热机理有所研究。沈祥智等<sup>[8]</sup>对外热回转窑内的物料热解进行了相关研究, 而外热式炉窑内部结构对加热效果研究成果还未见发表。

收稿日期: 2017-08-31; 修回日期: 2017-12-13

基金项目: 湖南省科技计划重点资助项目 (2014SK2020)

作者简介: 朱桂华 (1962-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为机电一体化及环保设备, 通讯联系人, 838227939@qq.com。

利用脱硫石膏干法生产 $\alpha$ 石膏用的外热式蒸压转炉中试设备模型,扬料加热器结构为正三角形。脱硫石膏粉末有一定堆积角,而扬料加热器的扬料面倾斜角度直接影响物料在炉内的扬料高度,即影响扬料效果,进而影响物料加热效果,正三角形扬料加热器扬料面角度为 $60^\circ$ ,本文中设置A型直角三角形扬料加热器结构(直角边位于旋转方向的正向),扬料面角度达到 $90^\circ$ ,理论上扬料高度高于正三角形扬料加热器结构,具有更好的扬料加热效果,同时设置B型直角三角形扬料加热器结构(直角边位于旋转方向的反向)作为对比,利用仿真所得的结果,分析得到其中最佳扬料加热器结构,以期指导扬料加热器的优化设计。

## 1 数值模拟

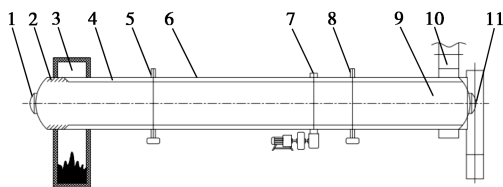
### 1.1 几何模型

主要技术指标如下。

脱硫石膏:粒度 $d=26\ \mu\text{m}$ ;密度 $\rho=2\ 300\ \text{kg}/\text{m}^3$ ;比热容 $800\sim 1\ 000\ \text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;填充率为 $30\%\sim 40\%$ 。

转炉规格及运行参数:内径 $D=\Phi 500\ \text{mm}$ ;长度 $L=7.2\ \text{m}$ ;正常工作温度为 $110\sim 150^\circ\text{C}$ ,模型设置温度 $126.85^\circ\text{C}$ ,即绝对温度 $400\ \text{K}$ ;转速 $\omega=2\ \text{r}/\text{min}$ ;热源为热油或电加热管;内部结构形式,扬料加热器数量为14个,绕炉体中心轴线均匀分布于炉体内壁,扬料加热器高度 $h=0.13D$ 。

设备系统布局如图1所示,炉体结构如图2所示,三角形空心腔体为扬料加热器。本文中对蒸压转炉内部结构轴向中心截面( $l=1.44\ \text{m}$ 处)进行几何建模,模拟用的3种不同结构下的炉腔结构如图3所示,截面形状分别为正三角形(Regular triangle)、A型直角三角形(Right triangle A)及B型直角三角形(Right triangle B),3个模型高度相同,且保持加热面积均等。在炉体中心下竖直距离分别为100、140、180 mm处设置温度监测点 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 。



1—进口封头;2—进料端;3—供热室;4—加热器;  
5—机架;6—炉体;7—动力装置;8—机架;9—出料端;  
10—尾气收集装置;11—出口封头

图1 外热式蒸压转炉设备布局

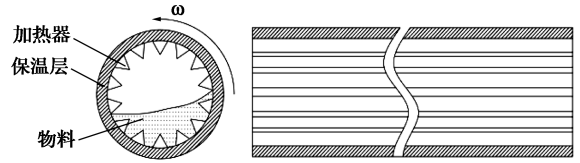


图2 外热式蒸压转炉炉体结构

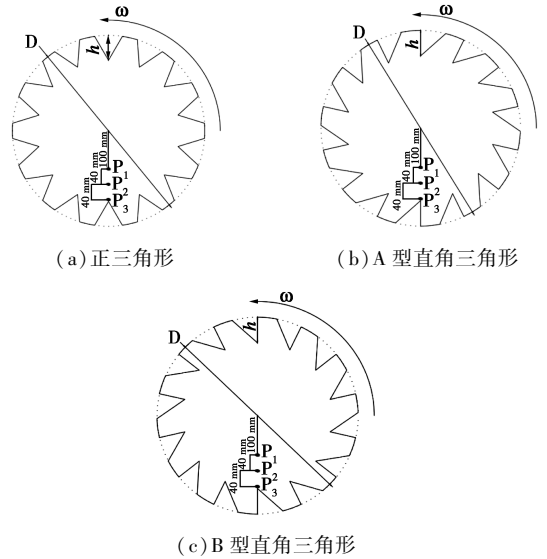


图3 3种不同扬料加热器下的炉腔结构

### 1.2 计算模型

外热式蒸压转炉炉腔内有脱硫石膏粉末及空气,属于气固两相模型。由于脱硫石膏粉末颗粒粒径为 $26\ \mu\text{m}$ ,远小于炉腔内径 $500\ \text{mm}$ ,所以固相粉末颗粒满足连续特性的连续模型,其中Pain等<sup>[9]</sup>利用双流体模型研究了气固两相的运动,并得到气固两相的流动特性。由于本文中主要考虑物料加热情况,存在明显温度场,故需考虑能量方程。

第 $q$ 相质量守恒方程:

$$(\partial/\partial t)(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q u_q) = 0 \quad (1)$$

第 $q$ 相动量方程:

$$(\partial/\partial t)(\alpha_q \rho_q u_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q u_q u_q) = -\alpha_q \nabla P_q + \alpha_q \rho_q g - \beta_{qp}(u_q - u_p) + \nabla \cdot (\alpha_q \tau_q) \quad (2)$$

能量方程:

$$\partial(\rho T)/\partial t + \text{div}(\rho v T) = \text{div}[(k/C_p) \text{grad} T] + S_T/C_p \quad (3)$$

### 1.3 网格划分及边界条件

2D模型导入Workbench Mesh软件进行流体域网格划分,使用三角形Triangles网格进行划分,为使仿真更接近于真实,将转炉炉腔的流体计算域分为外围扬料动区域与内芯静区域,两区域交互面进行网格对接处理,其中动区域为 $D=300\ \text{mm}$ 与壁面所形成的环形区域,绕中心旋转,静区域则为 $D=300\ \text{mm}$ 内圆区域,保持静止。

流体计算域内不考虑物料及空气的增加与减少。物料受重力、壁面摩擦、扬料加热器旋转推力及空气流动影响。设置窑体壁面及扬料加热器两加热壁面为运动壁面,对扬料加热器两加热壁面定义恒温 400 K。

### 1.4 模拟求解方法

外热式蒸压转炉对脱硫石膏加热有 2 种途径:一是窑体内壁传输热量至气膜层再传至物料颗粒,二是窑体内壁与物料颗粒之间的直接辐射传热。其中,直接辐射传热系数占比高于前者,是总传热系数的主要构成部分<sup>[10]</sup>。所以,为达到最佳的加热效果,需要物料在流动过程中与壁面接触机会均等,物料形成循环流动状态,底层随壁面向正方向流动,上层逐层反向回流。一方面,物料间充分的交互运动能反映出扬料效果,也间接反映了物料加热效果;另一方面,物料温度表征直接反映加热效果。本文中应用 fluent 17.0,选用欧拉多相流<sup>[11]</sup>模型和标准  $k-\epsilon$  湍流模型,定义第一相为空气,第二相为脱硫石膏粉末颗粒,对气固两相流运动进行模拟,模拟设置瞬态过程,压力-速度耦合方法选用 SIMPLE 算法,差分格式采用二阶迎风。监测第二相温度情况,得到温度上升情况及稳定时间。

## 2 结果与讨论

### 2.1 速度矢量

在炉腔内,由于壁面转动使得物料及空气产生一定速度,图 4 为截面内物料及空气的运动矢量图,由图 4 可知,堆积于炉腔下部的物料在截面内运动,底层随壁面向正方向流动,上层形成反向回流,形成循环

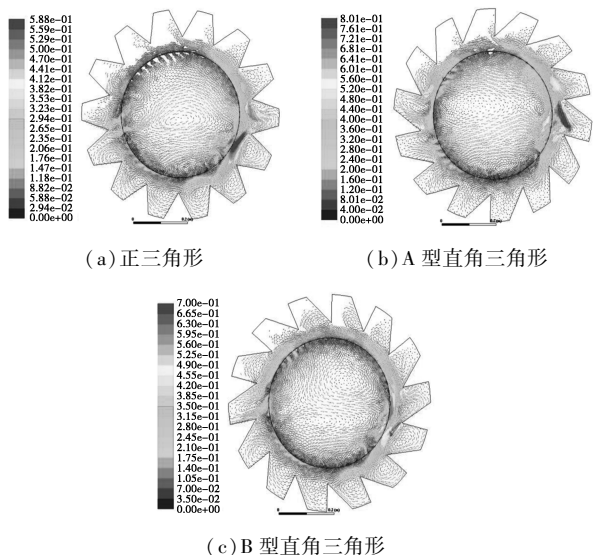


图 4 速度矢量图

流场,中间层物料运动速度较小,而在相邻两扬料加热器之间的空间内也形成了独立的漩涡循环流场。由图还可知,A 型直角三角形扬料加热器结构下物料速度明显大于其他 2 种,而且所形成的循环流场更为明显,扬料流动效果好。

### 2.2 温度场分布

由于外热式转炉的热量是由外而内传递,所以在整个加热过程中呈现炉腔温度始终低于炉壁温度<sup>[12]</sup>。图 5 为不同时刻 3 种结构下的温度分布云图。

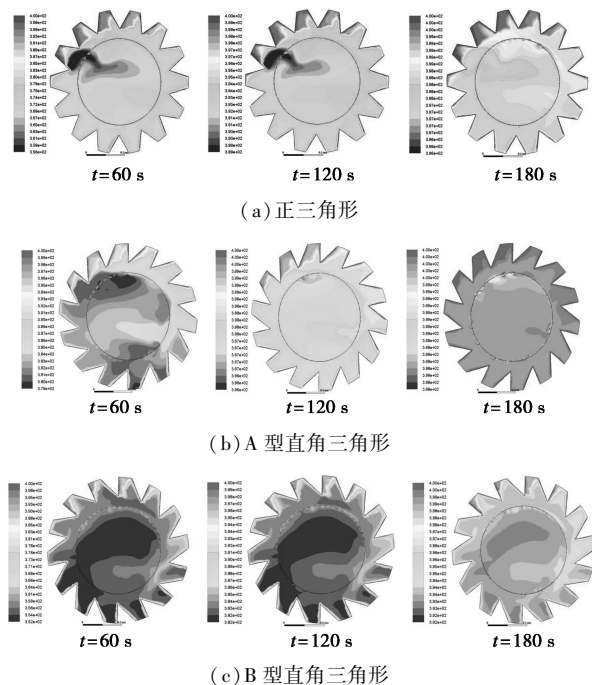


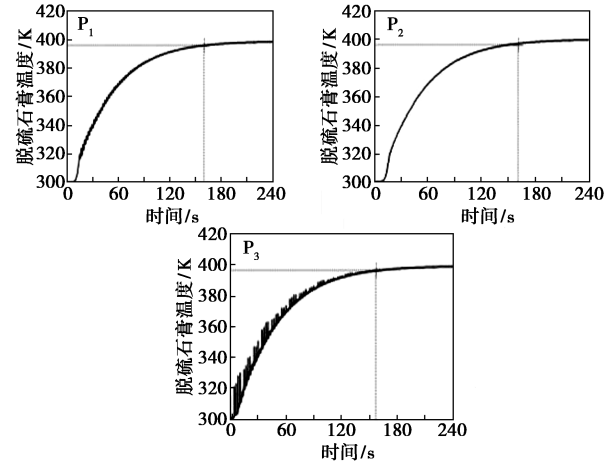
图 5 不同加热时间物料温度场分布

可见 3 种不同扬料加热器结构下所产生温度场均表现为炉壁高于内部,且物料覆盖区的炉壁高温区域面积明显小于空气填充区高温区域面积,这是由于物料直接从炉壁吸收辐射热而造成的,这也证实了本文中之前所提及的直接辐射传热是总传热系数的主要构成部分。由图还可见,A 型直角三角形扬料加热器结构下温升速度快,且在 180 s 时温度基本达到稳态,在 180 s 时正三角形扬料加热器结构下的各区域温差也较小,但 3 个时刻下的温差均大于 A 型直角三角形扬料加热器,而在 180 s 时 B 型直角三角形扬料加热器结构下的各区域温差还很大,远没有达到恒温稳态。A 型直角三角形扬料加热器结构下物料的加热速度快,加热效果好。

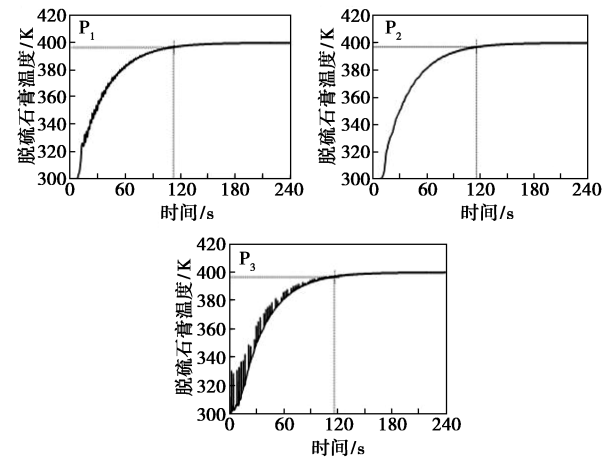
### 2.3 温度稳定时间

在炉腔物相范围内的 3 个不同高度的定点  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  进行温度监测,得到 3 点的物料温度随时间

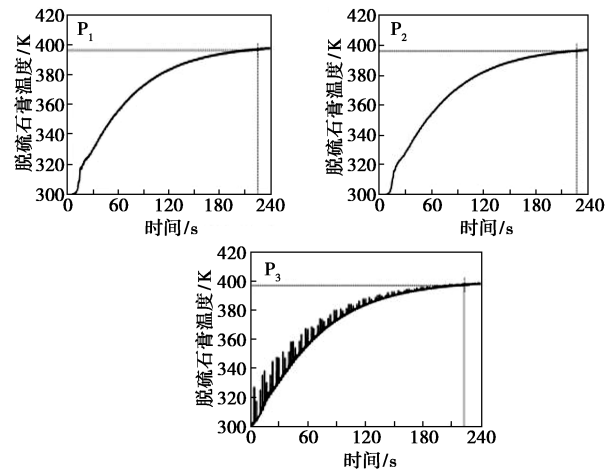
变化散点图如图6所示,同一结构下的3点温升情况互不相同,不同结构下的同一点的温升情况也有所差别。监测点 $P_3$ 在加热前期出现明显温度波动,是因为 $P_3$ 点位于临近加热器壁面,受加热器所处位置影响较大,当加热器在旋转过程中接近于 $P_3$ 点时



(a) 正三角形



(b) A型直角三角形



(c) B型直角三角形

图6 不同监测点脱硫石膏温度

造成温度骤升,远离后温度回落,直到下一个加热器旋转接近形成一个温度升降循环,也即图中所产生的温度波动。

本文中以监测温度达到397 K时为温度稳定时间,由图6可得到不同结构下不同监测点的物料温度稳定时间,如表1所示。

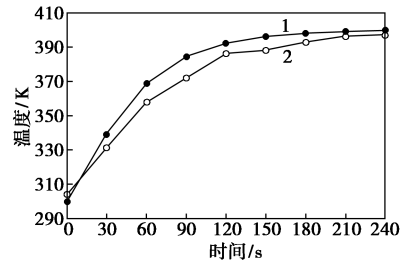
表1 3种扬料加热器结构不同监测点的温度稳定时间 $s$ 

结构类型	$P_1$	$P_2$	$P_3$
正三角形	159	160	156
A型直角三角形	112	115	116
B型直角三角形	225	226	222

由表1可知,A型直角三角形扬料加热器结构下,温度稳定时间低于其余2种结构。

## 2.4 模拟结果与试验对比

试验设备模型为正三角形扬料加热器的蒸压转炉,在炉腔初始状态下在壁面安装无线热电偶测温探头监测物料内部温度,转速为2 r/min,每隔30 s读取一次温度值,读取时间为一个旋转周期,是为了使监测时物料完全覆盖探头以确保监测相为物料。物料内部温度随时间变化的模拟值与试验值如图7所示。



1—数值模拟值;2—试验测量值

图7 物料温度变化的模拟值与试验值比较

从图7可以看出,数据模拟结果与试验数据基本吻合,但存在一定误差:模拟初始温度低于试验值,除初始温度外其余时刻模拟温度均高于试验值。导致误差产生的原因主要有:①试验时的室温高于模拟默认初始温度300 K,导致模拟初始温度低于试验值。②实际加热时壁面温度无法立即升至恒温,另外,试验时物料有水蒸汽蒸发,带走部分热量,都可能导致模拟温度高于试验值。③试验所用仪器存在一定误差也可能导致试验结果的误差。

## 2.5 平均温升速率

温升速率简化数学模型<sup>[13]</sup>:

$$P_h - P_d = C_s(dT_l/dt) = C_s v_l \quad (4)$$

式中,  $P_h$  为加热器加热功率, W;  $P_d$  为散失热功率, W;  $P_h - P_d$  为有效加热功率, W;  $C_s$  为加热器的等效热容量, J, 其影响因素主要包括发热体、物料和中间传热介质的热容量;  $T_i$  为物料温度, K;  $v_i$  为物料温升速率, K/s,  $v_i = dT_i/dt$ 。

由式(4)可知, 有效加热功率与温升速率呈正比, 即同等情况下温升速率越高, 有效加热功率越大。

通过计算得到不同扬料加热器情况下物料平均温升速率如表 2 所示。由表 2 可得, A 型直角三角形扬料加热器下物料的平均温升速率大于其余 2 种, 平均温升速率是正三角形扬料加热器的 1.38 倍, 是 B 型直角三角形扬料加热器的 1.96 倍, 也即 A 型直角三角形扬料加热器的蒸压转炉有效加热功率大于其余 2 种。

表 2 物料平均温升速率 K/s

结构类型	A 型		B 型
	正三角形	直角三角形	直角三角形
平均温升速率	0.613	0.848	0.432

### 3 结论

采用气固两相流模型, 运用 Fluent 软件分别针对正三角形、A 型直角三角形及 B 型直角三角形 3 种扬料加热器结构下外热式蒸压转炉对脱硫石膏的扬料及加热效果进行模拟, 通过对比脱硫石膏速度场、温度场、温度稳定时间及平均温升效率, 得到以下结论。

(1) 转炉研究模型转速在 2 r/min 情况下, 炉腔内物相形成与转动方向相同的速度循环流场, 且在 A 型直角三角形扬料加热器情况下的物料速度最大, 速度循环流场最明显, 扬料效果优于正三角形扬料加热器及 B 型直角三角形扬料加热器。

(2) 同等加热温度及加热面积的情况下, A 型直角三角形扬料加热器中物料在 180 s 时温度基本达到稳态, 各区域温差也较小, 而在 180 s 时其余 2 种结构下的各区域温差还较大, 没有达到稳态。

(3) 同等加热温度及加热面积的情况下, 3 种不同扬料加热器情况下脱硫石膏达到设定的 397 K 温度所需时间: A 型直角三角形扬料加热器 < 正三角

形扬料加热器 < B 型直角三角形扬料加热器。

(4) A 型直角三角形扬料加热器情况下脱硫石膏的平均温升速率大于其余 2 种, 平均温升速率是正三角形扬料加热器的 1.38 倍, 是 B 型直角三角形扬料加热器的 1.96 倍, 也即 A 型直角三角形扬料加热器有效加热功率大于其余 2 种, 加热效果最佳。

### 参考文献

- [1] Henein H, Brimacombe J K, Watkinson A P. Experimental study of transverse bed motion in rotary kilns [J]. Metallurgical Transactions B, 1983, 14(2): 191-205.
- [2] Boateng A A, Barr P V. Modeling of particle mixing and segregation in the transverse plane of rotary [J]. Kiln Chem Eng Sci, 1996, 51: 4167-4181.
- [3] Chaudhuri B, Muzzio F J, Tomassone M S. Experimentally validated computations of heat transfer in granular materials in rotary calciners [J]. Powder Technology, 2010, 198(1): 6-15.
- [4] Herz F, Mitov I, Specht E, et al. Influence of operational parameters and material properties on the contact heat transfer in rotary kilns [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(25/26): 17941-17948.
- [5] 陈文仲, 王春华, 田远航, 等. 回转窑热工状况影响参数的数值模拟 [J]. 化工学报, 2011, 62(1): 47-52.
- [6] 张志宵, 池涌, 李水清, 等. 回转窑传热模型与数值模拟 [J]. 化学工程学报, 2003, 31(4): 27-31.
- [7] 马爱纯, 周子民, 孙志强, 等. 氧化铝熟料窑内一维传热模型 [J]. 冶金能源, 2004, 23(1): 23-26.
- [8] 沈祥智, 严建华, 池涌, 等. 聚乙烯在连续给料外热式回转窑内的热解研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 126-132.
- [9] Pain C C, Mansoorzadeh S, De Oliverira C R E. A study of bubbling and slugging fluid beds using the two-fluid granular temperature model [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2001, 27: 527-551.
- [10] 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.
- [11] 刘永兵, 陈纪忠, 阳永荣, 等. 环管反应器内传热过程的数值模拟 [J]. 高校化学工程学报, 2010, 24(1): 41-46.
- [12] 李水清, 李爱民, 严建华, 等. 生物质废弃物在回转窑内热解研究——I. 热解条件对热解产物分布的影响 [J]. 太阳能学报, 2000, 21(4): 333-340.
- [13] 李万国, 付永领, 祁晓野. 大温升速率加热器的全补偿复合控制 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(5): 639-643. ■