

# 中央扩散式喷嘴颗粒分布特性的冷模实验

艾元方<sup>1</sup>, 孙彦文<sup>1</sup>, 陈红荣<sup>1</sup>, 刘安明<sup>2</sup>

(1. 中南大学 能源科学与工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 金隆铜业有限公司, 安徽 铜陵 244021)

**摘 要:** 针对闪速冶炼过程出现的反应慢和大滞后等问题, 建立中央扩散式精矿喷嘴冷模实验装置, 研究喷嘴出口附近区域颗粒分布均匀性随工艺风和分散风流量的变化规律. 结果表明: 反应塔内颗粒分布均匀性可调, 分散风使颗粒沿水平方向分散, 工艺风使颗粒聚集于反应塔喷嘴正下方区域; 分散风和工艺风动量比决定塔内颗粒分布均匀性, 动量比越小颗粒越聚集于反应塔喷嘴正下方区域; 动量比可将实验范围内各工况颗粒分布均匀性特征指标——颗粒质量偏析函数拟合为指数函数; 在颗粒适度分散前提下, 喷嘴分散风流量增加倍数和投料速度增加倍数、工艺风流量增加倍数相同.

**关 键 词:** 中央扩散式喷嘴; 颗粒分布; 动量比; 偏析函数; 炼铜闪速炉

中图分类号: TF 811

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2014)04-0543-05

## Cold Model Experiment for Particles Distribution of CJD Burner

AI Yuan-fang<sup>1</sup>, SUN Yan-wen<sup>1</sup>, CHEN Hong-rong<sup>1</sup>, LIU An-ming<sup>2</sup>

(1. School of Energy Science & Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Jinlong Copper Co. Ltd., Tongling 244021, China. Corresponding author: AI Yuan-fang, E-mail: yfai@csu.edu.cn)

**Abstract:** To solve the problems such as more awkward reaction way and large performance delay in the flash smelting process, a cold model experiment device of a CJD (central jet distributed) burner for flash smelting furnace was set up, and the change of particles dispersion near the burner with the process air and the distribution air was studied. The results showed that the particles dispersion leaving from the burner can be regulated. The particles disperse along the horizontal direction under distribution air, and concentrates in the central area under tower by process air. The momentum ratio can affect particles distribution directly, and the smaller it is, the particles are more concentrated in the central area under tower. Within the scope of experimental data, the mass segregation function, which means particles distribution uniformity index, can be fitted as the nonlinear exponential function with momentum ratio. In the case of moderate particles dispersion, the increasing multiples of distribution air are the same as that of loading rate and that of process air.

**Key words:** CJD burner; particles distribution; momentum ratio; segregation function; copper flash smelter

精矿喷嘴是炼铜闪速炉关键部件. 近期工业实践发现, 闪速炉投料量提高到一定程度时, 易出现下“生料”、氧利用率低等炉况不正常现象. 此时, 理解喷嘴出口区气粒混合和颗粒分布随主控操作参数的变化规律, 确定喷嘴主控操作参数工艺风、分散风流量调节方向, 是科学正确调整炉况的前提. 喷嘴控制的反应塔内冶炼过程具有影响因素多、反应慢、呈非线性、大滞后等多重特

性<sup>[1]</sup>. 生产实际中反应塔内温度高、内部反应剧烈复杂, 无法对其直接测量或用肉眼观察. 冷模实验是研究反应塔内粒子运动和分布状况的一种有效方法. Koh 等<sup>[2]</sup>建立镍闪速炉冷模实验装置, 研究发现精矿粉通过分散锥后高度集中流动, 主要分布于喷嘴正下方中心区域. Zhou 等<sup>[3]</sup>用高速摄影仪进行了精矿喷嘴下料偏析实验研究, 发现喷嘴下料方式影响颗粒预分布的均匀性, 进而影响

反应塔内颗粒分布的均匀性. 随着计算流体力学技术的发展, 数值模拟成为主要研究方法. Solnordal 等<sup>[4]</sup>采用 CFX4.1 软件仿真发现, 连续相和粒子运动均位于反应塔中心. Sasaki 等<sup>[5]</sup>仿真发现, 颗粒呈弥散状均匀向外分散于反应塔内, 气粒混合区为喷嘴分散锥下面一个较宽区域. Higgins 等<sup>[6]</sup>仿真发现, 颗粒粒径、工艺风入炉角度等影响反应塔内颗粒聚集和分布状况. Nagai 等<sup>[7]</sup>研究发现粒子入炉前流化有助于粒子掺混到工艺风气流而随工艺风流动而流动. 陈卓等采用 Fluent 6.3 仿真发现, 颗粒均匀弥散分布于整个反应塔内<sup>[8]</sup>. 显然, 这些研究侧重点不同, 结果存在差异, 都没有系统解释塔内颗粒分布规律性. 掌握反应塔内粒子分布规律, 可延长反应塔内衬寿命、降低烟尘率, 促使冶炼反应完全和提高氧气利用率. 中央扩散式精矿喷嘴技术由国外引进, 国内外很少见到喷嘴气粒混合和颗粒分布特性研究报告. 考虑实际闪速炉高温辐射区大, 内部颗粒运动过程复杂, 现场测试和观察比较困难, 但喷嘴出口附近区域颗粒和气流温度低, 采用常温闪速炉喷嘴实验模型装置研究颗粒分布规律在一定程度上能反映实际反应塔内颗粒分布规律. 本文搭建反应塔模型仅为 1/3 塔高的上部区域, 实验研究喷嘴出口附近区域颗粒分布随其主要操作因素(工艺风、分散风)的变化规律, 为增大投料量闪速冶炼(高强度闪速冶炼<sup>[9]</sup>)喷嘴操作参数优化以形成高颗粒浓度高效反应区<sup>[10]</sup>和挖掘喷嘴生产潜能提供理论依据.

## 1 实验装置

中央扩散式精矿喷嘴结构如图 1 所示, 从内向外依次为中央氧、分散风、精矿粉、工艺风. 工艺风通道入口呈倒锥形, 且入口面积可调, 工艺风提供了精矿反应的大量氧化剂; 中央氧可以补充反应过程中氧的不足; 精矿粉颗粒在分散锥和径向分散风作用下, 射流混入工艺风气流, 在气流和颗粒混合下落的过程中完成化学反应.

如图 2 所示, 中央扩散式精矿喷嘴闪速炉冷模实验装置包括下料系统、供风系统、精矿喷嘴和反应塔. 下料系统由给料仓、转速电机和刮板机及下料管组成, 4 个料斗(高出反应塔顶 3.68 m)中的颗粒分别由 4 个减速电机(减速比可调)控制的刮板给料装置连续落入下料管, 下料管呈十字型布置, 为保证颗粒进入反应塔前无偏析, 4 个减速电机由同一开关控制, 同时开启和关闭. 供风系

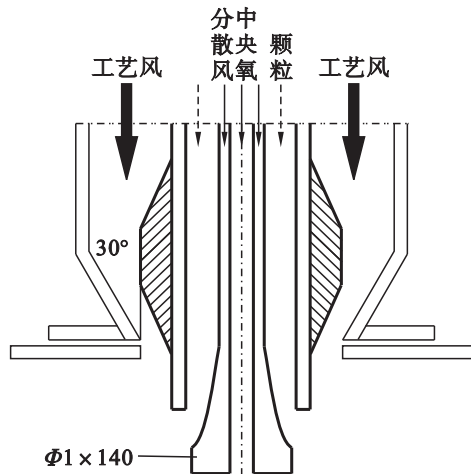


图 1 中央扩散式喷嘴  
Fig. 1 CJD burner

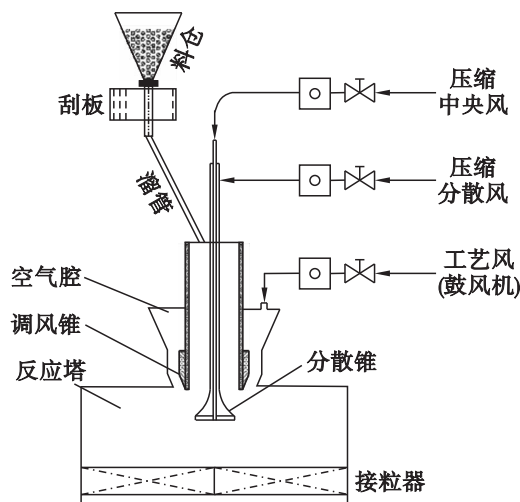


图 2 实验装置  
Fig. 2 Experimental installation

统包括工艺风、分散风和中央氧供给装置, 其中工艺风由鼓风机提供, 经涡街流量计送入环形工艺风通道, 分散风和中央氧由空压机提供, 经涡街流量计后分别进入喷嘴分散风管和中央氧管. 结合金隆铜业有限公司闪速炉以几何比 1:5 计算所得模型反应塔直径为 1.1 m, 取几何比计算高度的上 1/3 区域, 即  $h$  为 0.778 m, 其出口与接粒器相连. 分散锥底圆直径为 72 mm, 塔顶内壁面高出冷却水套底面高度为 40 mm, 高出分散锥底圆面高度为 85 mm. 接粒水平面各接粒区大小和位置分布见图 3, 中心圆直径与喷嘴工艺风边界对应. 喷嘴位置决定了中心空间范围内颗粒分布较多, 因此第二环直径设计较大, 其外三环按照半径逐级递增方式设计, 为减小颗粒在接粒袋搜集过程对反应塔内流场和压力的影响, 接粒袋设计为 350 mm 的长度作为气粒分离的过渡段(实验发现此设计非常有效, 避免了气粒分离时对接粒面上流场和压力的影响). 气粒两相混合物在接

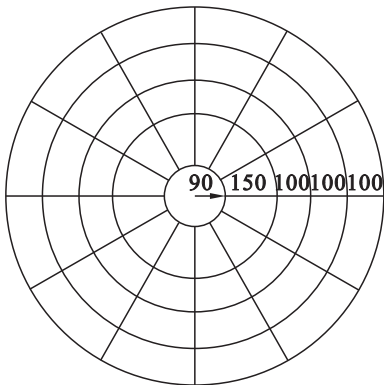


图 3 接粒区域划分  
Fig. 3 Zones for receiving particle

粒袋中进行气固分离,颗粒被捕集在接粒袋中,气体经接粒袋微孔溢出.

每次实验过程首先调节各风流量参数,待其稳定后同时开启 4 个给料电机,下料 5 s 后同时关闭. 实验考虑给料速度、工艺风和分散风流量 3 个参数,研究反应塔内颗粒分布规律. 实验仪器如表 1 所示,实验设定中央氧为 60 Nm<sup>3</sup>/h(N 为标准状态),颗粒真实密度为 2.7 t/m<sup>3</sup>,筛分结果见表 2,质量平均粒径为 132 μm.

2 结果和讨论

2.1 数据处理

用颗粒质量偏析函数和塔中心区域颗粒质量分数表征颗粒分布均匀性.

颗粒质量偏析函数  $\sigma$  定义式为

表 1 测试仪器  
Table 1 Test instruments

序号	仪器设备	型号	测试对象	精度
1	涡街流量计	LU125	工艺风流量	±1% ,0.5 ~ 1 级
2	涡街流量计	LU40	分散风流量	±1% ,0.5 ~ 1 级
3	涡街流量计	LU25	中央风流量	±1% ,0.5 ~ 1 级
4	泰勒筛网	74 ~ 250 μm	颗粒粒径	
5	电子台秤	A1 - 31K	颗粒质量	±0.2 g

表 2 石英沙粒径分布  
Table 2 Distribution of sand particles

颗粒粒径/μm	0 ~ 75	75 ~ 80	80 ~ 96	96 ~ 109	109 ~ 120	120 ~ 150	150 ~ 180	180 ~ 250
质量分数/%	5.11	1.71	5.47	19.74	25.07	31.16	8.50	3.24

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\zeta_i - 1)^2}.$$
 (1)

式中:  $\zeta_i = x_{m_i}/x_{s_i}$ ,为第  $i$  接粒区比面密度,无量纲;

$x_{m_i} = m_i / \sum_{i=1}^n m_i \times 100\%$ ,为第  $i$  接粒区颗粒质量分

数; $x_{s_i} = s_i / \sum_{i=1}^n s_i \times 100\%$ ,为第  $i$  接粒区面积分数;

$m_i, s_i$  分别为第  $i$  接粒区颗粒质量和面积; $i = 1$  为喷嘴下方反应塔中间  $R \leq 90$  mm 接粒单元格; $n$  为接粒网格总数量.

颗粒质量偏析函数  $\sigma$  实质为比面密度均方差.  $\sigma = 0$  表示颗粒质量均匀分布, $\sigma$  数值越大,颗粒质量分布越不均匀.

塔下方颗粒质量分数  $x_1$  计算式为

$$x_1 = m_1 / \sum_{i=1}^n m_i.$$
 (2)

定义分散风与工艺风入口动量比  $K$  的计算式为

$$K = (m_d v_d) / (m_p v_p) = (\rho_d V_d v_d) / (\rho_p V_p v_p).$$
 (3)

式中: $m_d$  为分散风质量; $m_p$  为工艺风质量; $v_d$  为分散风风速; $v_p$  为工艺风风速; $\rho_d$  为分散风密度; $\rho_p$  为工艺风密度; $V_d$  为分散风流量(Nm<sup>3</sup>/h); $V_p$  为工艺风流量(Nm<sup>3</sup>/h). 计算  $K$  需要入口面积,而模型中分散风孔由 140 个  $\phi 1$  mm 均匀分布离散细圆孔组成,工艺风射流为圆锥状聚焦轴向射流,内、外径分别为 0.1,0.146 m.

2.2 结果与讨论

投料速度为 3.64 t/h 时,变化工艺风和分散风流量,颗粒比面密度分布如图 4 所示,图中填充颜色说明颗粒比面密度大小.

图 4 中比密度为无量纲量. 显然,每一列和每一行的数据都呈规律性分布. 当工艺风流量为 1 410 Nm<sup>3</sup>/h 时,随着分散风流量的增大,颗粒比面密度中心区颜色由深变浅,说明颗粒由中心聚集状态逐渐开始向外扩散. 可以确定,分散风对颗粒的扩张作用明显,且分散风流量越大,颗粒扩散作用越显著,分布到近壁区域颗粒越多. 当分散风流量为 140 Nm<sup>3</sup>/h 时,随着工艺风流量的增加,颗

粒比密度由扩张状态向中心聚拢,说明颗粒被强大的工艺风气流密封在其内部空间,使颗粒更多地聚集于反应塔中心区域,且工艺风流量越大,颗粒聚集的程度越强. 从图 4 中 4 个角落的工况可知,要保证颗粒的分布尽量均匀,必须在大的工艺风条件下匹配大的分散风,或者小的工艺风条件下有小的分散风与之匹配.

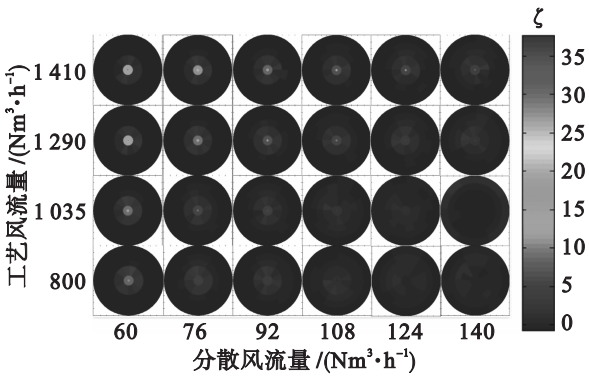


图 4 颗粒比面密度分布云图  
Fig. 4 Chromaticity diagram of mass distribution for particles

喷嘴位于反应塔顶中心,因此,正常条件下喷嘴参数控制的颗粒分布以中心多外壁区域少为主要特征,但随参数的变化,中心颗粒质量分数的减少使得外壁区域颗粒增多,此时,中心颗粒质量分数越小,外壁区域颗粒越多,实验结果的误差就越大,即中心质量分数很小时可能会有较大误差,而中心质量分数较大时实验结果误差极小. 由图 4 可知,外壁区区域颜色均为深蓝色,即颗粒分布较少,因此实验误差较小. 按照式(1)整理图 4 的颗粒比面密度,得到颗粒质量偏析函数  $\sigma$ ,如图 5 所示.

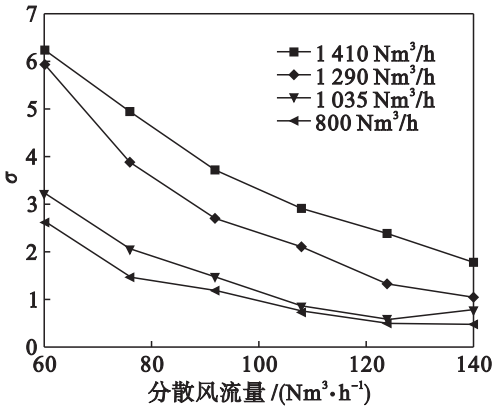


图 5 喷嘴正下方中心区颗粒质量分数曲线  
Fig. 5 Contour lines of particle mass fraction in the central region under nozzle

由图 5 可知,对于不同工艺风条件,随分散风流量增加  $\sigma$  逐渐减小,颗粒更多地分散到外周区域,分布逐涉均匀. 对于不同的分散风条件,随着

工艺风流量的增加, $\sigma$  逐渐增大,即喷嘴正下方中心区颗粒逐渐聚集,被工艺风限制在其内部空间运动,颗粒分布不均. 因此,合适的分散风和工艺风动量配比是反应塔内颗粒分布均匀的关键.

文献[4]报道的颗粒集中于塔中心区域分布和文献[5,8-9]报道的颗粒在塔内均匀分布现象都是有可能存在的,取决于工艺风流量和分散风流量的相对大小,在工艺风流量相同条件下取决于分散风流量的大小. 在喷嘴操作参数设置和优化中,强调“小分散风”时颗粒集中于反应塔中心区域分布,强调“大分散风”时颗粒均匀分布于反应塔内腔空间区域. 分散风使颗粒沿水平方向自塔中心向外分散,与文献[9]研究结论一致.

分散风和工艺风的相对大小直接决定了塔内颗粒分散结果,因此采用分散风和工艺风动量比可研究不同投料量时的颗粒分布特性. 整理出的  $\sigma$  与  $K$  关系如图 6 所示, $x_1$  与  $K$  关系如图 7 所示.

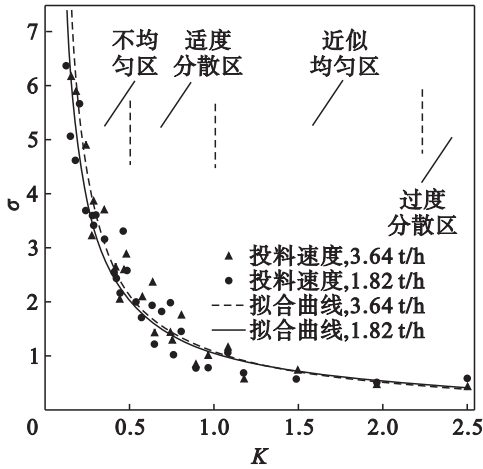


图 6  $\sigma$  与  $K$  的关系及拟合曲线  
Fig. 6 Relation between  $\sigma$  and  $K$  and its fitting curves

由图 6 可知, $K \ll 1$  时,工艺风起主要作用.  $K$  增大, $\sigma$  迅速减小.  $K$  越小, $\sigma - K$  曲线斜率越大,说明此时分散风流量增大可以明显改善颗粒分布.  $K \gg 1$  时,分散风起主要作用,颗粒分布均匀,曲线平滑,即分散风流量增大不能明显改变颗粒分布状况,反而增加分散风生产成本. 按照  $K$  大小,可将颗粒分布分为 4 区:①不均匀区,塔中心颗粒聚集太多,颗粒分布严重不均;②适度分散区,塔中心区域稍多、四周适度分散;③近似均匀区,颗粒分布近似均匀, $\sigma$  和  $x_1$  均随  $K$  增大而缓慢减小;④过度分散区,塔中心区域颗粒数量极少,近塔壁区域颗粒数量极多,颗粒运动受到工艺风、分散风和塔壁反弹的综合作用. 颗粒分布 4 区界限可以依据气粒混合均匀性确定. 中心聚焦型工艺风射流随行程增加会发生衰减扩散,另外还



需保护塔壁免受颗粒冲刷. 实际冶炼操作中, 喷嘴主控参数调整到颗粒分布处于适度分散区. 颗粒分布处于不均匀区时, 气粒混合明显不均匀, 会出现下生料和氧利用率低等问题. 颗粒分布处于近似均匀区时, 颗粒分布均匀性变化不大, 但分散风生产成本增加. 颗粒分布处于过度分散区时, 反应塔壁使用不安全, 并且分散风生产成本高.

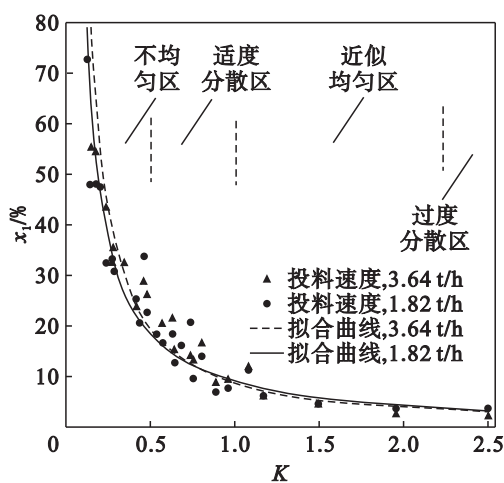


图7  $x_1$  与  $K$  的关系及拟合曲线  
Fig. 7 Relation between  $x_1$  and  $K$  and its fitting curves

在实验工况范围内,  $x_1$  变化规律与  $\sigma$  变化规律一致, 随分散风和工艺风动量比增加都是单调下降.  $K$  值确定, 则对应的  $\sigma$  和  $x_1$  也随之确定,  $\sigma$  和  $x_1$  存在关联性, 即用  $\sigma$ ,  $x_1$  中一个即可表征颗粒分布均匀性状况.

用最小二乘法归纳分析获得的众多离散点数据, 可得到图6实线和虚线所示的  $\sigma$  和  $K$  之间函数关系式为  $\sigma = 1.031K^{-0.95}$  (投料速度 3.64 t/h) 和  $\sigma = 1.048K^{-1.02}$  (投料速度 1.82 t/h), 图7实线和虚线所示的  $x_1$  和  $K$  之间函数关系式为  $x_1 = 0.09K^{-1.03}$  (投料速度 3.64 t/h) 和  $x_1 = 0.89K^{-1.15}$  (投料速度 1.82 t/h). 显然, 图6中2条  $\sigma$  曲线和图7中2条  $x_1$  曲线均近似重合, 说明投料速度变化不能引起颗粒分布均匀性特征指标的明显变化, 即工艺风和分散风综合作用决定了颗粒运动和位置, 颗粒流运动取决于连续相气流运动, 和文献[5]研究结论一致. 投料量和工艺风氧化剂配比要满足冶炼反应所需的化学当量比要求, 即投料速度增加倍数和工艺风氧化剂流量增加倍数相同. 这样, 在相同颗粒分布均匀性和工艺风含氧浓度前提下, 分散风流量增加倍数应和投料速度增加倍数相同, 分散风流量增加倍数偏小则导致因塔中心区域颗粒聚集增多而出现“下生料”等故障.

### 3 结 论

1) 中央扩散式喷嘴颗粒分布均匀性可调, 分散风能使颗粒沿水平方向分散, 工艺风能使颗粒聚集于塔中心区域, 实验工况范围内投料速度不能改变颗粒分布状况. 大分散风流量或小工艺风流量有助于颗粒均匀分布于反应塔内腔空间, 小分散风流量或大工艺风流量促使颗粒集中于塔中心区域分布.

2) 分散风和工艺风动量比直接决定塔内颗粒分布均匀性. 分散风和工艺风动量比越小, 颗粒越聚集于反应塔喷嘴正下方区域. 冶炼操作中喷嘴主控参数应调整到颗粒适度分散区.

3) 分散风和工艺风动量比可将实验范围内各工况颗粒分布均匀性特征指标——颗粒质量偏析函数拟合为指数函数.

4) 高强度闪速冶炼时应增大分散风供应能力. 在相同颗粒分布均匀性前提下, 分散风流量增加倍数和投料速度增加倍数、工艺风流量增加倍数相同.

### 参考文献:

- [1] Mei C, Zhou J M, Peng X Q, et al. Simulation and optimization of furnaces and kilns for nonferrous metallurgical engineering[M]. Berlin: Springer, 2010: 221 - 232.
- [2] Koh P T L, Jorgensen F R A, Elliot B J. Solids falling in flash furnace burner concentrate chutes[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2007, 83(3): 81 - 88.
- [3] Zhou P, Yao Y J, Ai Y F, et al. Grey correlation analysis of factors influencing maldistribution in feeding device of copper flash smelting[J]. *Journal of Central South University*, 2012, 19(7): 1938 - 1945.
- [4] Solnordal C B, Jorgensen F R, Koh P T L, et al. CFD modeling of the flow and reactions in the Olympic Dam flash furnace smelter reaction shaft[J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2006, 30(11): 1310 - 1325.
- [5] Sasaki Y, Mori Y, Hattori Y, et al. Prediction of combustion phenomena in flash smelting furnace for production enhancement using a mathematical model[C]//Advanced Processing of Metals and Materials. Beijing, 2006: 545 - 559.
- [6] Higgins D R, Gray N B, Davidson M R. Simulating particle agglomeration in the flash smelting reaction shaft[J]. *Minerals Engineering*, 2009, 22(14): 1251 - 1265.
- [7] Nagai K, Takebayashi M, Sasai S. Development of the Sumitomo type combustion accelerated concentrate burner[C]//The 12th International Flash Smelting Congress. Shanghai, 2008: 146 - 155.
- [8] Chen Z, Wang Y X. Simulation study of intensified flash smelting process[C]//Copper 2010. Hamburg, 2010: 1313 - 1323.
- [9] 刘安明. 金隆闪速炉高热负荷生产实践[J]. *铜业工程*, 2011, 107(1): 38 - 42.  
(Liu An-ming. Running practice of high thermal load in Jinlong flash furnace[J]. *Copper Engineering*, 2011, 107(1): 38 - 42.)
- [10] Chen H R, Mei C. Operation optimization of concentrate burner in copper flash smelting furnace[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2004, 16(3): 382 - 386.