综合利用

钢渣粒化喷嘴气体射流数值模拟及冷态试验

李俊国[1], 曾亚南[1], 韩志杰[2], 龙 跃[1], 邢宏伟[1], 张玉柱[1]

(1. 河北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063009; 2. 唐山钢铁股份有限公司, 河北 唐山 063016)

摘 要: 液态钢渣粒化是对其显热进行回收的关键, 因此需要设计出合理的气体喷嘴结构形式和布置形式, 从而有利于渣滴在下落过程中凝固形壳。利用 Fluent软件对不同结构气淬喷嘴的气体射流流场进行数值模拟, 与冷态试验结果相比较, 结果表明: laval型组合式喷嘴具有射流集中、扩张程度较低的特点, 适于对液态钢渣进行气淬粒化。不同马赫数喷嘴射流在喷嘴出口前融合的距离分别为 250、265、300 mm, 形成流速较为均匀的气体射流, 利于钢渣的稳定飞行; 随着马赫数增加, 出口气体流速随之增加, 出口气体温度逐渐降低, 有利于渣粒冷却。

关键词: 钢渣; 粒化; 拉瓦尔型喷嘴; 流场; 数值模拟
中图分类号: TF748.2; X 757 文献标识码: A 文章编号: 1004-7638(2010)04-0086-06

Numerical and Cold Simulation on Gas Jet of Nozzle for Steel Slag Granulation

Li Junguo[1], Zeng Yanan[1], Han Zhijie[2], Long Yue[1], Xing Hongwei[1], Zhang Yuzhu[1]

(1. College of Metallurgy and Energy, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009, Hebei, China; 2. Tangshan Iron and Steel Co., Ltd., Tangshan 063016, Hebei, China)

Abstract Granulation of liquid steel slag is the key process during heat recovery. The structure of gas nozzles and their layout should be designed to ensure solidification of slag drops before they falling to the ground. The flow field of gas jet with different structure was simulatd by Fluent software, and the simulation result was compared with that of cold model test. It was concluded that the combined laval-nozzle could provide concentrated and lower-expansion gas jet, and utilized to granulate liquid steel slag by gas quenching. The gas jet out of the combined laval-nozzle could be syncretized and stabilized at 250, 265 and 300 mm, repectively, when the Mach numbers of laval-nozzl were 1.0, 1.4 and 1.75. Consequently, the liquid steel slag could be granulated to drop and fly steadily when these combined laval-nozzle was utilized. The gas jet velocity at exit increased with the increase of Mach numbers of nozzle. Moreover, the gas jet temperature at exit declined, which could be beneficial to cooling slag drops.

Key words steel slag; granulation; laval nozzle; flow field; numerical simulation

收稿日期: 2010-06-16
基金项目: 973专项资助项目 (2008CB617602); 国家科技支撑计划资助项目 (2008BAE67B02)
作者简介: 李俊国 (1971-), 男, 河北滦南人, 副教授, 博士, 主要从事炼钢新工艺和冶金资源综合利用技术研究。

0　引言

近年来, 我国钢铁行业得到迅猛发展。2008 年, 我国粗钢产量 5.02亿 t, 转炉渣产生量约 6 000 万 t。钢渣温度高, 其物理热 1.7 GJ/t, 相当于每吨渣 60 kg标煤左右, 是目前钢铁企业唯一没有进行回收利用的高品质余热资源。干法处理工艺是对钢渣余热进行回收和尾渣高附加值综合利用的先进工艺, 国内外研究者也进行了大量的研究和探索工作。目前, 干法处理工艺主要包括风淬法、滚筒转鼓法和转杯 (或转碟)离心粒化法[1-3], 但由于各种方法都存在一些需要克服的问题, 目前尚没有建立一种真正实现工业化的装置。在进行液态钢渣显热回收的过程中, 由于熔渣和固态渣的导热率较低, 为了保证液渣粒化后不会粘结, 需要给予渣滴足够的冷却强度使其凝固形壳, 从而为钢渣显热回收创造条件。因此, 对液渣进行粒化时需要设计出合理的气体喷嘴结构形式和布置形式, 从而保证渣滴或凝固后的高温固态渣粒保持一定的飞行距离。而渣粒飞行过程的关键在于气淬喷嘴能够提供高速的气体射流, 并具有合理的气体流场分布规律[4]。因此, 本研究采用 Fluent软件对不同结构形式的气淬喷嘴的射流气体流场进行数值模拟, 与理论计算得到的气体射流的特征参数进行比较, 优化气淬喷嘴的结构和布置形式, 最后通过中试条件的冷态模拟试验对其合理性进行验证。

1　气体射流数学模型的建立

1.1　物理模型的建立

试验中喷嘴采用 laval型气体喷嘴, 拉瓦尔型喷嘴马赫数 (M)分别为 1.0、1.4、1.75, 喷嘴气体流量为 30 Nm^3 /min, 喷嘴出口直径分别为 7.2、7.6、5.6 mm。

1.2　喷嘴气体射流数值模拟假设条件

1) 计算区域采用空气为填充气体, 为单相流场。且空气为理想气体, 不忽略流体粘性。

2) laval内连接处光滑, 可忽略摩擦。

3) 根据 laval管喷嘴的特性, 采用 $k-\varepsilon$模型。

4) 外流场区间采用开放式。

1.3　控制方程

采用迪卡尔坐标系下轴对称稳态可压缩流动的控制方程形式[5]。其通用方程:

$$\frac{\partial(\rho f)}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho u f)=\mathrm{div}(\Gamma\,\mathrm{grad} f)+S$$

式中, f 为通用变量, 可以代表 u、v、w、T, 等求解变量; Γ 为广义扩散系数; S 为广义源项。

1) 连续方程

$$f=1;\ \Gamma=0,\ S=0$$

2) 动量方程

$$f=u_i;\ \Gamma=\mu,\ S=-\frac{\partial p}{\partial x_i}$$

3) 能量方程

$$f=T;\ \Gamma=\frac{k}{c_p};\ S=0$$

式中, u、v、w 分别代表坐标轴方向的速度; ρ为密度; T 为温度; μ为粘性系数; p 为压力; k 为流体的传热系数; c_p 是比热容。

4) 标准化 $k-\varepsilon$模型

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k-\rho\varepsilon$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+\frac{C_{1\varepsilon}}{k}G_k-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$k=\frac{\overline{u_i'u_i'}}{2}=\frac{1}{2}\left(\overline{u'^2}+\overline{v'^2}+\overline{w'^2}\right)$$

$$\varepsilon=\frac{\mu}{\rho}\overline{\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_k}\right)\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_k}\right)}$$

$$G_k=\mu_t\overline{\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\right)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\right)}\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon}$$

式中, G_k是由于平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项; $C_{1\varepsilon}$、$C_{2\varepsilon}$为经验常数, 取值分别为 1.44、1.92; σ_k、σ_ε 分别是与湍动能 k 和耗散率 ε对应的 Prandtl数, 取值分别为 1.0、1.3; C_μ 取值 0.09。

1.4　边界条件

1) 采用压力入口边界条件: 入口压力分别对应为 0.20、0.25、0.51 MPa, 环境压力为一个大气压;

2) 温度为周围环境温度, 取 300 K;

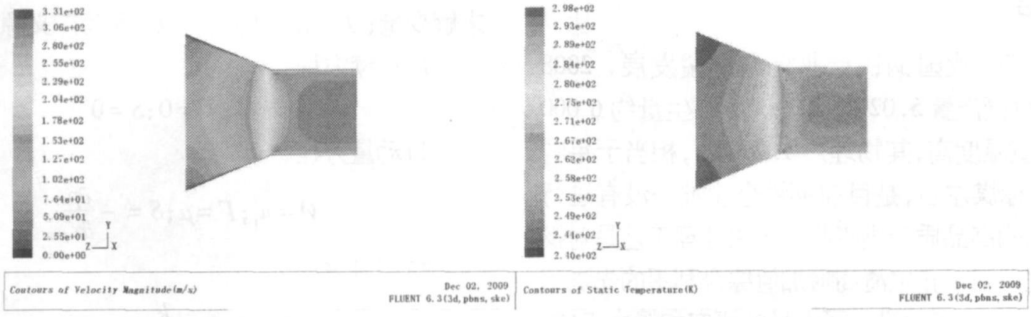
3) 计算采用分离隐式稳态格式求解, 湍流模型选择标准的 $k-\varepsilon$模型, 采用 simple压力修正算法对速度和压力进行耦合计算;

4) 根据实际情况调节松弛因子。

2　喷嘴气体射流数值模拟结果与分析

2.1　喷孔内气体流场和温度场

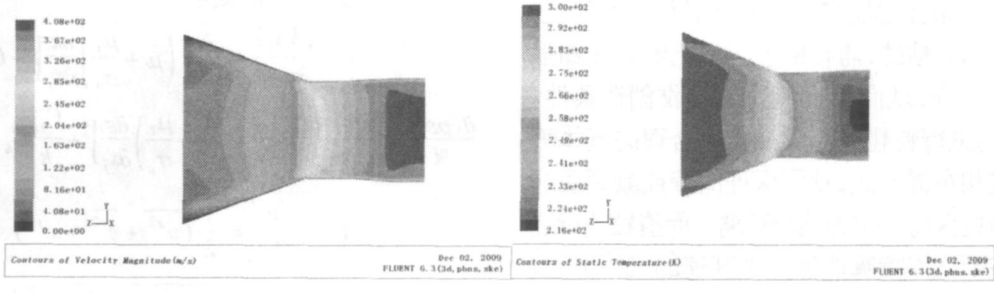
$M=1.0$、$M=1.4$和$M=1.75$的拉瓦尔型喷孔内气体流场和温度场如图 1~图 3所示。



(a) 流场　　(b)温度场

图1　$M=1.0$ 喷孔内气体流场和温度场

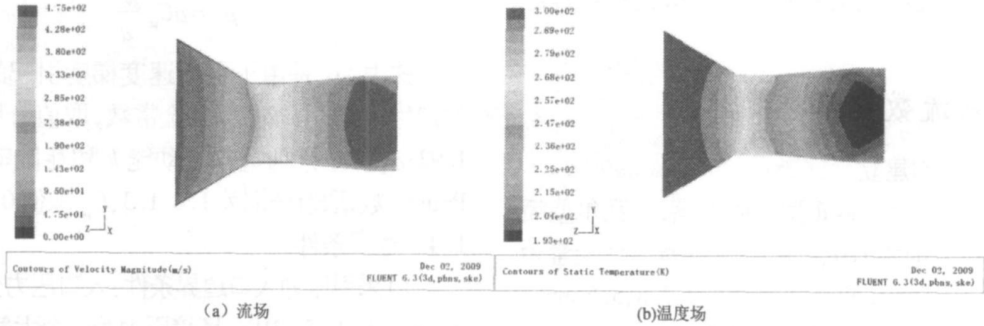
Fig. 1　Gas flow field and temperature field in $M=1.0$ single nozzle



(a) 流场　　(b)温度场

图2　$M=1.4$ 喷孔内气体流场和温度场

Fig. 2　Gas flow field and temperature field in $M=1.4$ single nozzle



(a) 流场　　(b)温度场

图3　$M=1.75$ 喷孔内气体流场和温度场

Fig. 3　Gas flow field and temperature field in $M=1.75$ single nozzle

根据不同喷嘴内气体流场和温度场的数值模拟,可以确定各喷嘴出口处气体流速和温度,结果如表 1所示。根据气体动力学函数表可以计算出各喷嘴出口气体温度。马赫数为 1.0、1.4和 1.75时,T/T_0 值分别为 0.833 33、0.718 39和 0.620 16,由此可计算出喷嘴出口气体温度分别为 250.0、215.5、186.0 K。再根据(1)和(2)式可计算出喷嘴出口气体音速和出口气体流速。出口气体温度和出口流速的计算值一并列入表 1。

$$a=\sqrt{KRT} \tag{1}$$

$$v=Ma \tag{2}$$

式中,T 为出口气体温度;a 为出口音速;v 为出口流速;K 为比热比,1.4;R 为气体常数[6]。

表 1　喷嘴内气体射流流场数值模拟和理论计算结果

Table 1　Numerical simulation and theoretical calculateion results of gas jet flow field in nozzle

喷嘴结构形式	出口气体流速 /(m·s^{-1})			出口气体温度 /K		
	模拟值	理论计算值	相对偏差 /%	模拟值	理论计算值	相对偏差 /%
M = 1.0	318	317	0.3	251.4	250.0	0.6
M = 1.4	408	412	1.0	215.6	215.5	0
M = 1.75	475	478	0.6	193.0	186.0	3.8

由表 1可见, 与理论计算相比, Fluent软件模拟计算值误差较小, 相对偏差均小于 5%, 可见 Fluent软件模拟具有很高的可信度。模拟结果来看, 在 0.20 MPa时, M = 1.0型喷嘴出口气体流速可达到 318 m/s, 随着马赫数增加, 出口气体流速随之增加, 出口气体温度逐渐降低。

2.2　单孔喷嘴气体射流流场模拟

M = 1.0、M = 1.4和 M = 1.75拉瓦尔型喷嘴气体射流的流场模拟结果如图 4~图 6所示。

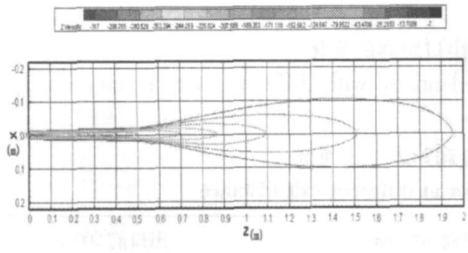


图 4　M = 1.0 型喷嘴气体射流流场

Fig. 4　Flow field of gas jet out of M = 1.0 single nozzle

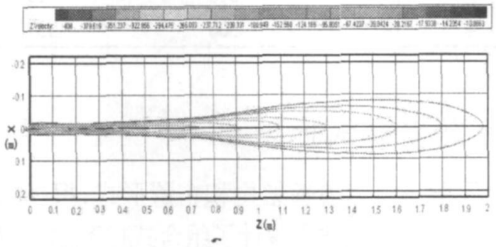


图 5　M = 1.4 型喷嘴气体射流流场

Fig. 5　Flow field of gas jet out of M = 1.4 single nozzle

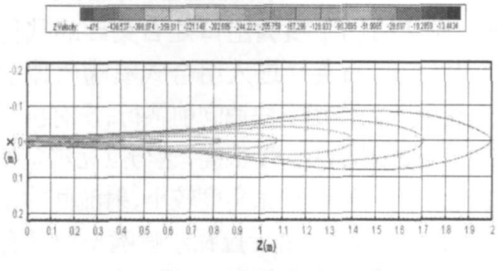


图 6　M = 1.75 型喷嘴气体射流流场

Fig. 6　Flow field of gas jet out of M = 1.75 single nozzle

根据各喷嘴单孔气体射流流场模拟结果, 可确定射流核心段长度, 结果列于表 2。通过吴凤林等[7]提供的射流核心段长度的计算公式, 可以计算出射流核心段长度, 计算结果一并列入表 2。

$$\frac{L_s}{d_e} = 19.33M_e - 17.348M_e^2 + 6.55M_e^3 \qquad (3)$$

式中, L_s为射流段长度, mm; d_e为喷孔出口直径; M_e为喷嘴马赫数。

由表 2可见, 各喷嘴单孔射流气体核心段长度的模拟值与理论值相近, 可以利用 Fluent软件模拟各喷嘴射流气体的核心段长度和射流气体流场。

表 2　射流核心段长度

Table 2　Length of core segment of gas jet

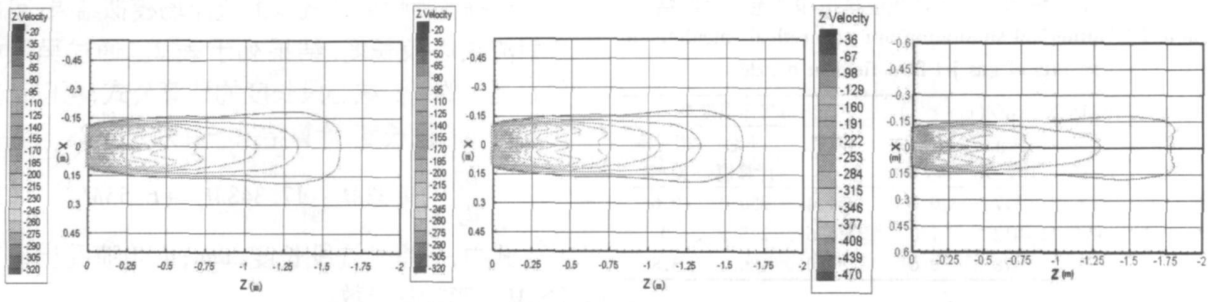
喷嘴类型	模拟值 /mm	理论计算值 /mm	相对偏差 /%
M = 1.0	0	0	0
M = 1.4	80	83.85	4.6
M = 1.75	115	104	10.6

2.3　组合式喷嘴气体射流流场

单孔喷嘴提供的射流难以满足对渣流粒化, 因此需要将多个拉瓦尔型单孔组合成组合式喷嘴提供具有一定宽度的气体射流。由 M = 1.0、M = 1.4和 M = 1.75拉瓦尔孔组成的组合式喷嘴气体射流流场如图 7(a)(b)(c)所示。由图 7可见, 不同马赫数喷嘴气体射流具有相似的射流特点。多股气流从喷嘴出口流出后, 即从其内侧开始混合。由于混合后的气体射流中部卷入气体量比外侧卷入的气体量少, 内侧气流速度衰减较慢, 而外侧气流速度衰减较快, 因此, 组合式喷嘴气体射流逐渐融合成单股射流, 射流的最大速度点逐渐偏离单股气流的几何中心线, 而趋向于喷嘴的几何中心线[8]。由于各组合式喷嘴的单个喷嘴间的夹角为 0°, 而且单个喷嘴间距较小, 因此射流较集中, 能够为渣流提供较高的动能。

气体射流速度的稳定性对液渣粒化起着至关重要的作用, 因此对组合式喷嘴气体射流流速随出口距离的变化进行分析, 如图 8所示。由图 8可以看出, 各组合式喷嘴气体射流在喷嘴出口前融合的距离分别为 250、265、300 mm, 形成流速较为均匀的气体射流, 能够对液态渣流进行稳定的气淬粒化。

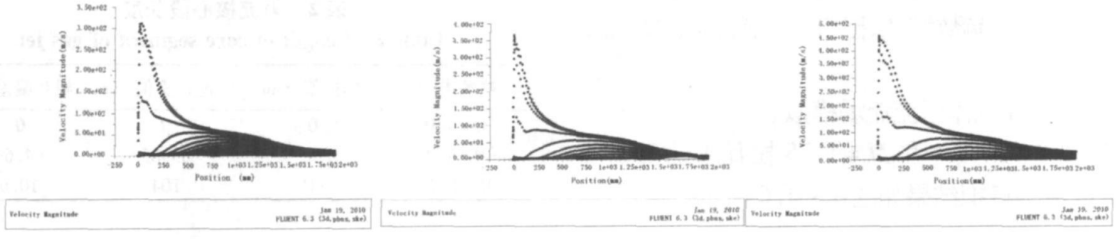
为了更好地了解组合式喷嘴气体射流横向宽度的变化特点, 根据气体射流流场的模拟结果, 可以分析喷嘴出口不同距离处气体射流的宽度和射流平均速度, 结果列于表 3。



(a) M=1.0　　(b)M=1.4　　(c)M=1.75

图7　组合式喷嘴气体射流流场

Fig. 7　Flow field of gas jet out of multi-assembled-nozzle



(a) M=1.0　　(b)M=1.4　　(c)M=1.75

图8　组合式喷嘴气体射流流速随出口距离的变化

Fig. 8　Velocity change of gas jet of multi-assembled-nozzle with different exit distance

表 3　喷嘴出口不同距离处射流宽度和射流平均速度

Table 3　Width and average velocity of gas jet at different exit distance

喷嘴类型	喷嘴宽度 / mm	出口前 100 mm		出口前 300 mm		出口前 500 mm	
		射流宽度 /mm	射流速度 /(m·s^{-1})	射流宽度 /mm	射流速度 /(m·s^{-1})	射流宽度 /mm	射流速度 /(m·s^{-1})
M = 1.0	180	255	204	304	120	315	84
M = 1.4	180	270	230	300	140	340	115
M = 1.75	180	246	300	280	182	300	137

由表 3可见,拉瓦尔型喷嘴气体射流宽度增加并不明显,同时随着距喷嘴出口距离的增加,射流宽度增加值较小,说明拉瓦尔型喷嘴射流集中度较高,并且射流出口速度大,具有较高的冲击动能。比较马赫数不同的喷嘴射流宽度,由于各喷嘴的出口直径不同,其中马赫数为 1.4喷嘴出口直径最大,因此其射流宽度较其他两种喷嘴的射流要宽,这说明拉瓦尔型喷嘴的出口直径对射流气体的扩张程度影响显著。

由表 3也可看出,不同马赫数喷嘴气体射流在不同距离处的流速差别较大,随着马赫数增加,相同距离处气体射流流速显著增加,这也说明超音速气流衰减速率较慢的特点,提高马赫数,能够显著提高向液态渣流提供的冲击动能,从而有利于液渣粒化。

3　冷态模拟试验

为了验证气体喷嘴结构和布置形式,根据喷嘴射流流场模拟研究结果设计了组合式拉瓦尔型气体喷嘴,通过中试条件的冷态模拟试验来验证其合理性。试验采用与钢渣密度相近的不同粒径的石英砂进行,石英砂经溜槽流出,进入组合式喷嘴的气体射流区域。图 9给出了喷嘴出口处石英砂的飞行状况,由图 9可见,石英砂进入组合式喷嘴气体射流后,在高速氮气流作用下快速向前飞行,没有出现散射现象,石英砂射流集中度很高,这与拉瓦尔型喷嘴气体射流速度衰减慢、扩张角度较小,射流间的相互抽引较小有关。同时,由于拉瓦尔喷嘴出口具有较大的初始速度,射流高度集中,使得石英砂获得较大初动能,砂射流高度集中而不发生偏离。

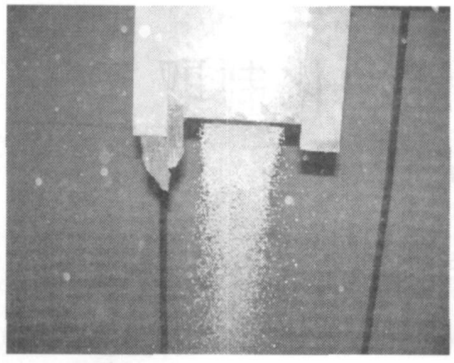


图 9　喷嘴出口处石英砂飞行轨迹

Fig 9　Flying trace of quartz particles at nozzle exit

图 10　石英砂落地点

Fig 10　Falling point of quartz particles

拉瓦尔型喷嘴射流集中程度也能够从石英砂落地点可以体现出来, 如图 10所示。由图 10可见, 石英砂散落非常集中, 呈现出“箭头”的形式, 大部分砂粒都散落于该箭头之外, 箭头内几乎没有散落的砂粒, 由此可以推断, 箭头形成的“曲线”应为砂粒下落后落地点的“边缘曲线”。由于不同喷嘴形成的射流扩张程度不同, 石英砂落地点的“边缘曲线”形式有所不同。经过对“边缘曲线”的测量可以发现, 在氮气流量相同的条件下, 马赫数越高, 渣粒飞行的距离越远、落地后“箭头”宽度越窄。这说明冷态模拟试验结果与数值模拟结果相吻合, 随着马赫数增加, 喷嘴气体射流流速增加, 对石英砂颗粒的冲击动能越大, 石英砂飞行的距离越远; 随着马赫数增加, 喷嘴气体射流扩张程度降低, 石英砂横向扩张程度减弱, 落地后的宽度越窄。由此可见, 采用 Fluent软件对喷嘴气体射流的流场模拟能够指导气体喷嘴的优化设计, 拉瓦尔型气体喷嘴更适于对液态钢渣的气淬粒化。

4　结论

采用 Fluent软件对拉瓦尔型喷嘴气体射流流场进行模拟, 理论计算和冷态试验验证表明: Fluent软件对喷嘴气体射流的流场模拟能够指导气体喷嘴的优化设计, 得到如下结论:

1)与理论计算相比, Fluent软件模拟的拉瓦尔型喷嘴出口气体流速和温度的误差较小; 随着马赫数增加, 出口气体流速随之增加, 出口气体温度逐渐降低。

2)马赫数 1.0、1.4和 1.75喷嘴气体射流核心段长度的模拟值分别为 0.80、115 mm, 与理论计算值相近。

3)不同马赫数的组合式喷嘴气体射流在喷嘴出口前融合距离分别为 250、260、300 mm, 为了稳定地对液态渣流进行气淬粒化, 喷嘴距离渣流的距离最好分别大于 250、260、300 mm。

4)冷态模拟试验结果表明, 拉瓦尔型喷嘴喷吹的石英砂流具有射流集中、扩张程度较低的特点, 适于对液态钢渣进行气淬粒化。

参考文献

[1]　Pickering S J, Hay N, Roylance T F, *et al*. New process for dry granulation and heat recovery from molten blast- furnace slag [J]. Ironmaking and Steelmaking, 1982, 12(1): 14- 20.

[2]　Featherstone W B, Holliday K A. Slag treatment improvement by dry granulation[J]. Iron and Steel Engineer, 1998, 75(7): 42 - 46.

[3]　Mayumi Y, Koichi F, Tatsuhiko S, *et al*. Dry granulation and solidification of molten blast furnace slag[J]. Transaction ISIJ, 1982, 22(11): 823- 829.

[4]　Zhang Xiaofeng. Study on the flow patterns of comminuting process in a superfin pulverizer[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
(张晓峰. 超微粉碎过程粉碎腔流场的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.)

(下转第 97页)

4 结论

1)根据盐酸浸出母液中铁、硅、铝、钙、镁等物质存在形态及作用机理, 采取调溶液 pH 值, 添加除杂剂等方法, 实验室获得 $w_{SiO_2} \leqslant 16.7 \times 10^{-6}$、$w_{CaO} < 5 \times 10^{-6}$、$w_{MgO} < 5 \times 10^{-6}$、$w_{Al_2O_3} < 10 \times 10^{-6}$的纯净溶液, 净化除杂切实可行。

2)除硅最佳工艺参数为: 温度 70 ℃、pH 值 2.5、搅拌速度 400 r/min、$Fe(OH)_3$用量占总铁量的 1.0%; 除钙镁最佳工艺参数为: 溶液 pH 值 3.8、反应温度 60 ℃、搅拌速度 400 r/min、NaF加入理论反应量的 1.2倍; 除铝最佳工艺参数为: 溶液 pH 值 4.8、反应温度 80 ℃、搅拌速度 250 r/min。

3)净化后溶液焙烧可获得软磁铁氧体用氧化铁粉, 其质量可达到软磁用氧化铁粉标准 SJ/T10383-1993YHT2水平。

参考文献

[1] Office of Panzhihua Resource Utilization. Collections of scientific research reports of Panzhihua resource comprehensive utilization - extracting titanium process technology[R]. Panzhihua, Sichuan. 1986.
(攀枝花资源综合利用办公室. 攀枝花资源综合利用科研报告汇编之四—提钛工艺技术 [R]. 四川 攀枝花. 1986.)

[2] Wang Yanhua. Research on recovery of synthetic rutile leaching liquor[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2008, 29(3): 35-40.
(王彦华. 人造金红石浸出母液回收处理方法研究 [J]. 钢铁钒钛, 2008, 29(3): 35-40.)

[3] Pan He lin, Chen Ping. Research on the silica dispersions and silica sol properties[J]. Journal of Coating material Industry, 1997, (1): 12-14.
(潘鹤林, 陈 平. SiO_2分散体及硅溶胶性能研究 [J]. 涂料工业, 1997(1): 12-14.)

[4] Liang Yingjiao. Physical chemistry[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1995.
(梁英教. 物理化学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995.)

[5] URUSHO G. Neues regeneration sverfahren fur salzaure[J]. Stahl u Eisen, 1983, 103: 33-35.

[6] Hu Xien. Use extraction plate pickling methods. China Patent, CN88109147[P]. 1990-05-02.
(胡熙恩. 利用萃取法处理钢板酸洗废液的方法: 中国专利, CN88109147[P]. 1990-05-02.)

[7] Dong Gui, Wang Lunfan. Several hydrochloric acid wastes processing methods[J]. Journal of Angang technology, 1992(4): 9-12.
(董贵, 王仑蕃. 几种盐酸废液处理方法的比较 [J]. 鞍钢技术, 1992(4): 9-12.)

[8] Huang Guizhu. Test method for non-ferrous metallurgy[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1988: 56-89.
(黄桂柱. 有色冶金试验方法 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988: 56-89.)

[9] HU Xichun, Shao Zejian, Xu Youcheng, *et al*. Sodium bicarbonate water with lime removal of calcium and magnesium in our plant research and application[J]. Journal of China Well and Rock Salt, 1994(6): 28-30.
(胡西纯, 邵则建, 许友成, 等. 硝水采用石灰碳铵法除钙镁在我厂的研究与应用 [J]. 中国井矿盐, 1994(6): 28-30.)

编辑　杨冬梅

(上接第 91页)

[5] Wang Fujun. Computational fluid dynamics analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 7-13.
(王福军. 计算流体动力学分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 7-13.)

[6] Fan Guangqian. Metallurgic cell design[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994: 123-124.
(范光前. 冶金单元设计 [M]. 北京. 冶金工业出版社. 1994: 123-124.)

[7] Wu Fenglin. Some research results of oxygen lance efflux[J]. Energy for Metallurgical Industry, 1989, 8(3): 47-52.
(吴凤林. 氧枪射流的一些研究结果 [J]. 冶金能源, 1989, 8(3): 47-52.)

[8] Yuan Zhangfu, Pan Yifang. Oxygen lance for technology steelmaking[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007: 73-75.
(袁章福, 潘贻芳. 炼钢氧枪技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 73-75.)

编辑　余文华