# ● 装备技术 Equipment Technology ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.09.025

# 135 t 钢包下水口结构优化

邓诗云<sup>1</sup>,王学武<sup>1</sup>,张 华<sup>2</sup>,方 庆<sup>2</sup>

(1. 贵州正业工程技术投资有限公司,贵州贵阳 550000; 2. 武汉科技大学 钢铁冶金及资源利用教育部重点实验室,湖 北 武汉 430081)

摘 要:针对某钢厂 135 t 钢包下注法浇注过程中铸流发散,钢液纯净度降低的问题,优化设计了下水口结构,数值 模拟了钢包浇注时下水口内钢液-气两相流行为,对比了浇注开口度分别为 100%、70%、30%情况下,出下水口钢液流 动状态。结果表明:钢包水口开口度较大时,使用优化的下水口容易形成束流流出,流动平稳,钢液速度较小,且钢液与 气相的接触时间减短,有利于提高钢液纯净度和下水口使用寿命。

关键词:钢包下水口;结构优化;开口度;流动状态

中图分类号: TF775

文章编号:1000-8365(2019)09-0981-04

# Structure Optimization Design of Ladle Shroud in 135 t Ladle

DENG Shiyun<sup>1</sup>, WANG Xuewu<sup>1</sup>, ZHANG Hua<sup>2</sup>, FANG Qing<sup>2</sup>

(1. Zhengye Engineering & Investment Incorporation Limited, Guiyang 550000, China; 2. Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

**Abstract**: Aiming at the problem that the casting flow diverged and the purity of molten steel decreased in the pouring process of 135t ladle in a steel workshop, the structure of the ladle shroud nozzle was optimized and designed. The liquid-gas phase of the ladle shroud nozzle was simulated numerically. The flow state of molten steel at the outlet and outlet under the conditions of 100%, 70% and 30% pouring openings was compared. The results show that when the opening degree of ladle shroud nozzle is large, the optimized nozzle is easy to form beam outflow, the flow is stable, the velocity of molten steel is small, and the contact time between molten steel and gas phase is reduced, which is beneficial to improve the purity of molten steel and the service life of the ladle shroud nozzle.

Key words: ladle shroud nozzle; structure optimization; opening coefficient; flow condition

文献标识码:A

目前模铸仍然是许多特殊钢采用的浇铸方式 之一,随着二次精炼技术的发展,现代炼钢工艺已 能生产出超低[O]、超低[N]等纯净钢,而模铸过程钢 液的保护浇注就显得尤为重要。氩封保护现已成为 防止钢液二次氧化的基本手段。许多相关研究工作 者<sup>[14]</sup>从下水口耐火材料材质和增大下水口管壁厚 度来防止钢液污染和提高通量钢包下水口使用 寿命。

某炼钢厂135 t 钢包模铸过程中,出下水口注流频繁发生发散现象,钢液发生增氧、增氮情况,下水口使用寿命较短。本研究借鉴连铸中间包长水口和结晶器水口的相关研究<sup>[56]</sup>,应用数值模拟方法,优

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51774217)

作者简介:邓诗云(1992-),湖北天门人,硕士,助理工程师.主 要从事连铸优化设计数值模拟研究方面的工作. 电话:13476090982,E-mail:276801183@qq.com 化钢包下水口结构,以提高模铸过程注流钢液质量 和下水口使用寿命。

本文在原下水口方案基础上进行了简易的结构 优化设计,并建立数学模型对两种方案进行了模拟 对比分析。

# 1 数学模型建立

### 1.1 基本假设

浇铸过程钢液从钢包水口流出是一个复杂多相 流运动,建立模型时做出假设:

(1)气、液两相均为稳定且不可压缩的黏性 流体。

(2)运动过程中不发生任何化学反应。

(3)忽略钢液温度及浓度对流场的影响。

#### 1.2 控制方程

钢包长水口内钢液、气相之间存在明显界面,属 于互不相溶的多相流动,故可采用 VOF 多相流模 型<sup>[7]</sup>来描述流体流动,以及各相界面运动。对于不可

收稿日期: 2019-06-03

压缩多相流体运动,各相密度保持不变,VOF 模型 中第 i 相的体积分数为 *a*<sub>i</sub> 且在每一个计算区域内满 足各相的体积分数之和为 1,即:

$$\sum_{i=1}^{n} \alpha_{i} = \alpha_{air} + \alpha_{steel} = 1$$
 (1)

在计算区域每一个单元体内各物性参数利用各 相体积分数加权平均方式计算得到,如密度和粘度:

$$\rho_{m} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_{i} \rho_{i}, \ \mu_{m} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_{i} \mu_{i}$$
(2)

(1)VOF多相流模型的表达式如下。 连续性方程<sup>[8]</sup>:

$$\frac{1}{\rho_{i}} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_{i} \rho_{i}) + \nabla \cdot (\alpha_{i} \rho_{i} \nu_{m}) = S_{\alpha_{i}} + \sum_{i=1}^{n} (m_{ij} - m_{ji}) \right]$$
(3)

式中, $m_{ij}$ 为第 i 相流向第 j 相的质量; $m_{ji}$ 为第 j 相流 向第 i 相的质量; $S_{\alpha}$ 为源项,此计算中为零; $\vec{\nu}_{m}$ 为混 合流体的速度矢量。

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho_{\rm m}\,\dot{\nu}_{\rm m})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{\rm m}\,\vec{\nu}_{\rm m}\dot{\nu}_{\rm m})$$
  
=-  $\nabla p + \nabla \cdot \left[ \mu_{\rm m} \left( \nabla \vec{\nu}_{\rm m} + \nabla \vec{\nu}_{\rm m}^{\rm T} \right) \right] + \rho_{\rm m}\,\vec{g} + \vec{F}$  (4)

式中, $\rho_{m}$ 、 $\mu_{m}$ 分别通过对各相密度、粘度加权平均计算得到;式(4)中动量源项 $\vec{F}$ 为钢/气相间界面张力,其由式(5)计算得到<sup>9</sup>:

$$\vec{F} = \sum_{\text{parisij}, i < j}^{2} 2\sigma_{ij} \frac{\alpha_i \rho_i k_j \,\nabla \,\alpha_j + \alpha_j \rho_j k_i \,\nabla \,\alpha_i}{\rho_i + \rho_j} \tag{5}$$

式中, $\sigma_{ij} = (\sigma_i^2 + \sigma_1^2 - 2\sigma_i\sigma_j\cos\theta)^{\frac{1}{2}}$ 为界面张力系数;  $\sigma_i 和 \sigma_j 为钢和气相的表面张力; k_i 和 k_j 分别为$ 曲率。

(2)中间包内各相流体流动湍流复杂,湍流模型 采用标准的 *k-e* 双方程表示。

湍流动能 k 方程<sup>[8]</sup>:

$$\frac{\partial(\boldsymbol{\rho}_{\mathrm{m}}\boldsymbol{k})}{\partial t} + \nabla \cdot \partial \left( \boldsymbol{\rho}_{\mathrm{m}} \stackrel{\rightarrow}{\boldsymbol{\nu}_{\mathrm{m}}} \boldsymbol{k} \right) = \nabla \cdot \left( \frac{\boldsymbol{\mu}_{\mathrm{t,m}}}{\boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{k}}} \nabla \boldsymbol{k} \right) + \boldsymbol{G}_{\mathrm{K,m}} \boldsymbol{\rho}_{\mathrm{m}} \boldsymbol{\varepsilon}$$

$$\tag{6}$$

湍流耗散 ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho_{\rm m}\,\varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho_{\rm m} \overset{\rightarrow}{\nu}_{\rm m} \varepsilon\right)$$
$$= \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{\rm t,m}}{\sigma_{\varepsilon}} \nabla \varepsilon\right) + \frac{\varepsilon}{k} \left(C_{1\varepsilon} G_{\rm K,\varepsilon} - c_{2\varepsilon} \rho_{\rm m} \varepsilon\right)$$
(7)

其中, $\mu_{t,m} = \mu_m + \rho_m c_\mu k^2 / \varepsilon$ ,  $G_{k,m} = \mu_{t,m} \left( \nabla \vec{\nu}_m + \nabla \vec{\nu}_m^T \right) / \nabla \vec{\nu}_m$ 。 模型中经验常数采用 Launder 和 Spalding 的 推荐值 [10]: $c_{1e}=1.43$ ; $c_{2e}=1.93$ ; $c_{\mu}=0.09$ ; $\sigma_{k}=1.00$ ;  $\sigma_{e}=1.30_{\circ}$ 

# 1.3 边界条件

(1) 钢液入口设为速度入口,入口处湍流动 能 k=0.01μ<sup>2</sup><sub>inlet</sub>,耗散率 ε=2k<sup>1.5</sup>/d<sub>inlet</sub>,其中μ<sub>inlet</sub>为入口 钢液流速,d<sub>inlet</sub>为钢包上水口入口内径。其中,速度 入口通过浇铸流量和上水口内径计算得到。

(2)出口(模具下端面)给定压力出口,设定入口 压强为标准大气压。

(3)自由表面(模具上端面)给定压力入口,设定 入口压强为标准大气压。

(4)壁面采用无滑移边界,近壁面采用标准壁面 函数法处理。

# 1.4 计算模型及参数

某钢厂 135 t 钢包包壁倾角 2.7°,钢包深度 3 333 mm,钢液深度 2 675 mm,熔池底部直径 2 313 mm。在原直通型下水口基础上,设计了收缩 型下水口优化方案,如图 1 所示。本模型分为内径不 同三段,上段为钢包上水口和滑动水口,中段为钢包 下水口,下端为钢套内。浇铸初始,钢包内为钢液相, 其它均为气相。



图 1 钢包原水口(左)和优化水口(右)结构示意图 Fig.1 Ladle shroud schematic diagram of original (left) and optimization (right)

其中, 计算采用的浇铸工艺参数和流体的物性 参数如表1。

#### 表1 浇铸的主要工艺参数和物性参数 Tab.1 Main process parameters and physical parameters of casting

or custing			
工艺		物性	
参数	值	参数	值
入口内径 /mm	50	钢液密度 /(kg/m³)	7 000
下水口内径 /mm	40	钢液粘度 /Pa·s	0.006 5
浇铸开口度(%)	30, 70, 100	气相密度 /(kg/m³)	1.225
钢包容量 /t	135	气相粘度 /Pa·s	1.79×10 <sup>-5</sup>

采用非稳态计算 PISO 算法, 浇铸过程采用 VOF 多相流模型和 *k-ε* 湍流模型进行求解, 计算模 型采用六面体结构网格。计算时压力、密度、动量、湍

# 2 计算结果及分析

# 2.1 钢包下水口开口度 100%

钢包下水口开口度 100%的情况下,钢包下水口结构优化前后速度云图和湍动能云图如图 2 和图 3 所示。



图 2 优化前后水口速度云图 Fig.2 Ladle shroud velocity nephogram of riginaloptimization and optimization





由图 2 和图 3 可知,优化前后,出水口钢液均 为束流。优化方案钢液出出水口后的湍动能较优化 前钢液的湍动能有较为明显的减小。原方案钢包下 水口钢液速度较大,约为 4 m/s,且有明显的层流边 界层,说明水口壁对钢液的阻碍作用明显,钢液对 水口有较大的冲刷力;而优化方案钢包下水口钢液 速度相对较小且速度大小均匀分布,约为 3.5 m/s, 钢液对下水口的冲刷力相对较小,也有利于保证钢 液的纯净度和下水口的使用寿命。

# 2.2 钢包下水口开口度 70%

钢包下水口开口度 70%的情况下,钢包下水口 结构优化前后速度云图和稳定流动状态如图 4 和 图 5。



图 4 优化前后水口速度云图 Fig.4 Ladle shroud velocity nephogram of original and optimization



图 5 优化前后水口稳定流动状态 Fig.5 Ladle shroud steady flow condition of original and optimization and optimization

由图 4 和图 5 可知,原方案钢包下水口的速度为 4.5 m/s 左右,而优化方案钢包下水口的速度为 2.4 m/s 左右。原方案钢包下水口出口处钢液散乱, 钢包下水口中的的钢液存在明显偏流,而优化方案 钢包下水口钢液形成柱流平稳流出。

原方案钢包下水口开口度 70%的情况下,形成 明显偏流,且在钢包下水口出口处无法形成柱流,随 着浇铸继续进行,钢包下水口出口处会不断混入气 相,钢包下水口持续形成钢液偏流,且持续接触气 相,同时因为偏流的形成,钢包下水口中钢液速度增 大,钢液对钢包下水口的冲蚀力也随之增大。另一方 面偏流对钢包下水口的冲蚀力分布极不均匀,从而 导致钢包下水口因某一部分侵蚀严重而无法使用, 造成钢包下水口材料的浪费。

优化方案钢包下水口开口度 70%的情况下,容 易形成柱流平稳流出。开浇初期,钢包下水口会存在 部分气相,但随着浇铸的继续进行,钢包下水口中的 气相会随着钢液流出水口,最终钢包下水口会形成 完整的钢液柱流而平稳流出。

在钢包下水口开口度 70%的情况下,优化方案 钢包下水口容易形成柱流平稳流出,相比原方案,钢 液流出平稳,钢包下水口中钢液速度较小,钢液对 钢包下水口冲蚀力较小,同时避免了钢液与气相 的混合浇铸,有利于保证钢液洁净度,提高产品 质量。

# 2.3 钢包下水口开口度 30%

钢包下水口开口度 30%的情况下,钢包下水口 结构优化前后速度云图和稳定流动状态如图 6 和 图 6。



图 6 优化前后水口速度云图 Fig.6 Ladle shroud velocity nephogram of original and optimization



图 7 优化前后水口稳定流动状态 Fig.7 Ladle shroud steady flow condition of original and optimization

由图 6 和图 7 可知,在钢包下水口开口度 30% 的情况下,优化方案钢包下水口开口面积比原方案 开口面积稍大,钢包下水口中钢液流速比原方案稍 小,但钢液流动状态与原方案相近,钢包下水口中 钢液形成明显偏流,钢液与气相接触面积大,出口 处钢液散乱。此情况下优化方案对下水口钢液流动 状态优化效果较小。

# 3 结论

(1)当钢包下水口开口度为100%时,优化方案钢包下水口钢液速度相对较小且速度大小均匀分布,钢液对下水口的冲刷力相对较小,也有利于保证钢液的纯净度和下水口的使用寿命。

(2)当钢包下水口开口度为 70%时,优化方案 钢包下水口容易形成柱流平稳流出,钢液与气相接 触时间短,钢液速度较小,有利于提高钢液洁净度, 保障产品质量,延长钢包下水口使用寿命。

(3)当钢包下水口开口度为 30%时,钢包下水 口中钢液流速比原方案稍小,但钢液流动状态与原 方案相近,钢包下水口中钢液形成明显偏流,出口处 钢液散乱。此情况下优化方案对下水口钢液流动状 态优化效果较小。

(4)本文优化方案水口结构简单,易于制作,在 水口全开浇铸和水口大开口度的情况下,优化效 果明显,有利于提高钢液纯净度和延长下水口使用 寿命。

## 参考文献:

- [1] 刘冰,方莹,于建宾. 铸钢用高通量复合水口的开发 [J]. 耐火与 石灰, 2012, 37(5): 13-14.
- [2] 张渝, 谭键. 钢包下水口断裂分析及改进措施[J]. 重庆科技学院 学报(自然科学版), 2009, 11(1):13-16.
- [3] 魏合意,安亚存.钢包下水口的性能优化[J].耐火材料,2015,49 (2):366-377.
- [4] 王志强, 雷中兴, 易碧辉, 等. 以刚玉质下水口回收料为骨料的钢
   包下水口用浇注料及其制备方法:中国, CN103613398A[P].
   2014:3~5.
- [5] Zhang H,Fang Q, Deng S, et al. Multiphase flow in a five-strand tundish using trumpet ladle shroud during steady - state casting and ladle change-over [J]. Steel Research International, 2019, 90 (3): 1800497.
- [6] Zhang J, Yang S, Li J, et al. Large Eddy Simulation on Flow Structure in a Dissipative Ladle Shroud and a Tundish [J]. ISIJ International, 2015, 55(8):1684-1692.
- [7] Zhang H, Fang Q, Luo R, et al. Effect of Ladle Changeover Condition on Transient Three-Phase Flow in a Five-Strand Bloom Casting Tundish [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2019, 50(3): 1461-1475.
- [8] Solorio-Diaz G, Morales R D, Palafox-Ramos J, et al.Modeling the effects of as wirling flow on temperature stratification of liquid steel and flotation of inclusions in a tundish [J].ISIJ International, 2005, 45(8): 1129-1137.
- [9] Morales R D, Garcia-Hernandez S, de Jesus Barreto J, et al. Multiphase flow modeling of slag entrainment during ladle change-over operation[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47 (4): 2595-2606.
- [10] Kumar A, Mazumdar D, Koria S C. Modeling of fluid flow and residence time distribution in a four-strand tundish for enhancing inclusion removal[J]. ISIJ international, 2008, 48(1): 38-47.