

· 试验研究 ·

合金钢连铸中间包流场的数值模拟和应用

王硕明

朱立光 刘志国

(东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004)

(河北理工大学冶金能源学院, 唐山 063009)

梁 玫

(石家庄钢铁公司技术中心, 石家庄 050031)

摘 要 采用 CFD(Computational Fluid Dynamics)软件 PHOENICS 对石家庄钢铁公司合金钢连铸 40 t 中间包流场进行了数值模拟, 将影响钢水流动的一道挡墙的中包结构优化成一挡渣墙一坝结构。应用结果表明, 采用优化结构后, 轴承钢 180 mm × 220 mm 铸坯中的平均 $T[O]$ 由优化前的 14.8×10^{-6} 降至 9.3×10^{-6} , $> 50 \mu\text{m}$ 的夹杂物含量由 0.38 mg/kg 降至 0.15 mg/kg。

关键词 连铸 中间包 流场 数值模拟 应用

Application and Numerical Simulation of Molten Steel Flow Field in Tundish for Alloy Steel Billet Concasting

Wang Shuoming

(School of Materials and Metallurgy, Northeast University, Shenyang 110004)

Zhu Liguang and Liu Zhiguo

(School of Metallurgy and Energy, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009)

Liang Mei

(Technology Center, Shijiazhuang Iron and Steel Co, Shijiazhuang 050031)

Abstract The numerical simulation of molten steel flow field in a 40 t tundish for alloy steel billet concasting at Shijiazhuang Iron and Steel has been carried out using Computational Fluid Dynamics (CFD) software PHOENICS to modify the one weir structure which influence molten steel flowing to improved one weir and one dam structure. The results of application showed that after using improved structure the average $T[O]$ in 180 mm × 220 mm cast billet of bearing steel decreased to 9.3×10^{-6} from 14.8×10^{-6} using original structure and the amount of size $> 50 \mu\text{m}$ inclusion decreased to 0.15 mg/kg from 0.38 mg/kg.

Material Index Concasting, tundish, Flow Field, Numerical Simulation, Application

随着转炉流程的合金钢产量不断扩大和对其质量要求较高, 同时由于转炉生产节奏快, 精炼周期受限制, 所以许多企业更加重视把中间包作为提高钢液纯净度的有效手段。合金钢连铸大多为中小“T”型中间包, 一方面中间包空间小, 另一方面合金钢浇注温度低, 所以一般合金钢中间包内只设置了一道挡渣墙, 通过挡墙上水口的分布、位置、角度的改变, 试图改善钢液流动状态, 促进夹杂物上浮, 以便提高钢液纯净度。研究结果与生产实际表明, 只在中间包内设一道挡渣墙结构的形式不尽合理, 中间包净化钢液的功效较低。

通过采用大型 CFD 软件 PHOENICS, 对上述中间包单挡渣墙流动控制以及优化后流动控制的模拟, 得到的相应的速度场、压力场, 进而对其结构进行了改进, 经生产实践调整, 取得了较好的效果。

1 研究方法

运用流体动力学软件 PHOENICS 分析研究浇铸过程中钢液的基本流动问题。钢液在中间包内的流动处于第二自模化区 ($Re > 5000$) 的黏性流, 即可视为等温稳态不可压缩流动, 采用修正后的 Navier-Stokes 方程和 κ - ϵ 双方程建立数学模型, 求解流场的手段按真实流体精确数值解法。通过软件建模、求解和分析, 确定中间包挡渣墙和挡渣坝的位置、高低^[1]。求解出最佳的流场和容器结构, 使中间包成为一个能使钢液中夹杂物上浮和去除最大可能的反应器, 最终起到对现场操作的指导作用。

2 模拟结果讨论

2.1 原设计中间包流场缺陷

优化前,石钢生产中采用加一道环型挡墙的中间包如图 1(a)所示。其设想依靠挡墙上孔洞的尺寸、分布、仰角等来控制中间包内流场形态,通过模拟计算得到如下结果:

(1) 渣面不稳定。原中间包流场为了形成钢液向上的流股实现夹杂物上浮,挡渣墙所开设的孔洞距离液面近且仰角度很大。因此使上层钢液很活跃,不利于稳定渣面,易形成渣子回流,造成钢水二次污染。并使得底部区域形成死区,尤其是孔洞下面靠近挡渣墙附近,死区几乎占据了 70% 以上的区域。

(2) 贯穿流比较明显。由于无挡渣坝,从孔洞流出的钢液形成较强的贯穿流,中间包内钢水死区较大,不利于均匀钢液成分和钢液温度,这使得中间包有效容积变小,钢水停留时间实际上变短,夹杂物上浮机会大为减小。

(3) 流场不稳定。由于夹杂物的上浮靠挡渣

墙孔洞向上仰角实现,实际生产中浇几炉钢后孔洞仰角即被钢液冲平,流场不稳定,脱除夹杂物的效果很差。

2.2 优化后中间包流场分析

2.2.1 中间包结构的改变

优化后的中间包结构如图 1(b)所示,在挡墙外面,架设一道拱形坝。所有孔洞角度都采用水平角度,降低孔洞高度。孔洞采用水平角度,就避免了因钢液侵蚀而引起角度变化,避免了因角度变化引起的大幅度流场变化。同时,因为降低了孔洞高度,钢液流经孔洞后要流过挡渣坝,相当于增长了钢液流动的路径,延长了钢液的平均停留时间,有利于夹杂物的上浮以及钢液成分和温度的均匀。

2.2.2 优化后的流场

计算部分结果如图 2 所示,模拟计算得到如下结果。

综合各切面流场模拟结果表明:

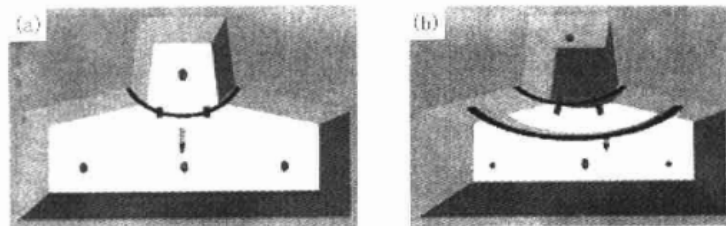


图 1 架设一道挡墙的中间包内型(a)和优化后一道挡墙一道坝的中间包结构(b)示意图
Fig. 1 Schematic of inner shape structure of one weir (a) and improved one weir and on dam (b)

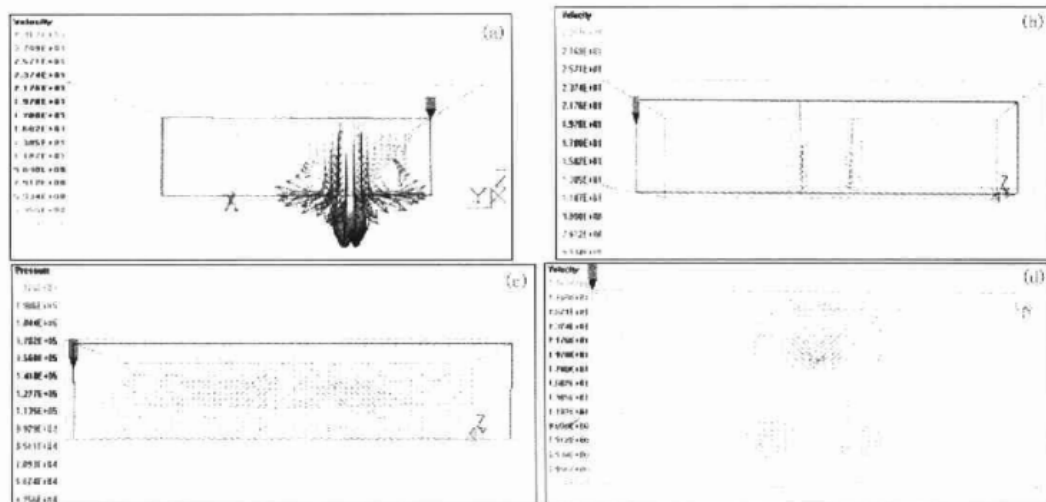


图 2 ZY 切面钢包水口处(a), XZ 切面中间包挡墙间(b), XZ 切面近前墙附近区域(c)和 XY 切面钢液表面(d)的速度矢量图

Fig. 2 Velocity vectorgraph on ZY section at nozzle of ladle (a), XZ section between weir and dam (b), XZ section at region bear front wall (c) and XY section on surface of molten steel (d)

(1) 上层和前部区域的钢液流动比较平缓,有利于保持钢液液面稳定,避免了夹杂物二次卷入,利于夹杂物的上浮、吸收,避免了钢水成分和温度的波动;

(2) 挡墙间区域钢液较活跃,有利于均匀钢液成分及温度,大大减少了死区,并且不会对液面造成影响;

(3) 钢液在流动过程中有明显均匀的上冲趋势,有利于钢液中夹杂物的上浮和吸收;

(4) 流速较快的区域集中在挡墙内部区域和坝与挡墙间的区域,有效的避免了贯穿流的产生与发展;

(5) 由于孔洞的降低,增加挡渣坝也大大的加长了钢液流动路径,使得钢液平均停留时间延长,有利于夹杂物的上浮和吸收,也有利于钢液成分和温度的均匀;

(6) 整个区域没有明显的贯穿流和死区,既均匀了钢水温度和成分,也有利于夹杂物的上浮和吸收;

(7) 综合 ZY 切面和 XZ 切面的流场可以看出,钢流经中间包坝流出到各水口的时间大致相同,ZY 切面钢液向上冲的趋势比较陡,而 XZ 切面靠后壁区域的钢液则是接近平行方向流出,钢液到达各个水口的距离时间大致相等,使得各个水口的钢液成分尤其是温度相一致,对于连铸操作是十分有利。

3 中间包结构优化

中间包结构优化的应用生产条件为:

(1) 工艺流程:45 t 复吹转炉-LF-VD-40 t 中间包-连铸;

(2) 连铸:连铸机为 3 机 3 流渐进矫直弧形连铸机,铸机半径:R12 m/16 m/32 m;

(3) 铸坯断面:180 mm × 220 mm;工作拉速:0.9 ~ 1.5 m/min;

(4) 铸机具有结晶器电磁搅拌功能。

模拟研究表明,如坝与墙之间的距离加大、坝增高,从流场优化角度讲有好的趋势。但实际生产中发现,这样坝体积显著增大,一方面耐火材料消耗、中间包钢液包底会增加;另一方面,更为重要的是坝体积增大的同时中间包内衬表面积大大增加。由于合金钢浇注温度明显降低,尽管

中间包内衬在开浇前进行了充分烘烤,考虑了开浇第 1 包钢液温度的升高,但仍有造成开浇时钢水在中间包内冻死的情况发生。从这个角度讲,坝越低、坝距挡渣墙越近,钢液冻死的可能性越小。但模拟研究和生产实际表明,这样钢流对坝的冲刷加剧,流场优化效果变差。

综合考虑,将挡渣墙与坝,坝与水口之间的直线距离之比设定为 1/0.6 ~ 1/0.8,坝高与中间包液面高度之比为 3/5,拱高与坝高之比为 1/3,孔洞中心高度距离冲击面一般为 150 ~ 180 mm。这样不但杜绝了开浇时钢水在中间包内冻死的情况发生,而且取得了夹杂物在中间包内充分上浮的最好效果。

4 应用结果

以轴承钢为例,在轴承钢生产过程中,优化前中间包 T[O] 平均值为 20.2×10^{-6} ,铸坯中 T[O] 平均值为 14.8×10^{-6} ,大于 50 μm 大型夹杂物为 0.38 mg/kg。经优化及其它工作的共同努力中间包 T[O] 平均值为 12.1×10^{-6} ,铸坯中 T[O] 平均值为 9.3×10^{-6} ,大于 50 μm 大型夹杂物为 0.15 mg/kg。显微夹杂体积率为 0.031%,其中小于 5 μm 夹杂占 90%,5 ~ 10 μm 占 9%,10 ~ 50 μm 夹杂占 1%。

5 结语

通过以上的数值模拟、生产调整,将合金钢中小型方坯 T 型中间包挡渣结构确定为一墙一坝形式,克服了单一挡渣墙的不足,得到了合理的中间包流场,使钢水中夹杂物在中间包内充分上浮,达到净化钢液的效果。运用其优化结果于实际生产中,中间包大中型夹杂物脱除率达 60% ~ 70%,显微夹杂物脱除率 30% ~ 50%。

参考文献

- 1 Spalding D B. PHOENICS Manual TR200. London: CHAM Ltd, 1984: 1 ~ 42

王硕明(1955-),男,教授,1982年矿冶学院毕业,从事钢冶炼和连铸研究。工作单位:河北理工大学冶金能源学院,063009。