

中间包双挡渣墙对冷镢钢 Q10B21-C 夹杂物去除工艺实践

郭 健 和红杰 韩清连 卢登攀
(邢台钢铁有限责任公司炼钢厂, 邢台 054027)

摘 要 对邢钢中间包弧形挡渣墙进行优化和引进双挡渣墙工艺。使用前对双挡渣墙中间包进行数值模拟, 发现双挡渣墙有利于夹杂物的控制。使用中间包双挡渣墙 148 炉次的生产数据表明, B 类夹杂物最大级别由 3.0 级降为 0.5 级, D 类夹杂物评级最高由 1.5 级降到 0.5 级, D_s 类夹杂物最高判定级别由 3.0 级降为 0.5 级。夹杂物不合格比例由原 7.67% 降至 0。

关键词 冷镢钢 数值模拟 夹杂物 中间包 双挡渣墙 工艺实践

Process Practice of Removing Inclusions in Cold Heading Steel Q10B21-C by Double Slag Retaining Walls in Tundish

Guo Jian, He Hongjie, Han Qingliang and Lu Dengpan
(Steelmaking Plant, Xingtai Iron and Steel Corp Ltd, Xingtai 054027)

Abstract The arc slag retaining wall in tundish at Xingsteel is optimized and the process of double slag retaining walls is introduced. The numerical simulation of the double slag retaining walls in tundish is carried out before use, and it is found that the double slag retaining walls are beneficial to control inclusions. The production data of 148 heats with using double slag walls in tundish show that the max rating of B inclusions decreases from 3.0 to 0.5; that of D inclusions decreases from 1.5 to 0.5; and that of D_s inclusion decreases from 3.0 to 0.5; the unqualified rate of inclusion decreases from 7.67% to 0.

Material Index Cold Heading Steel, Numerical Simulation, Inclusion, Tundish, Double Slag Retaining Wall, Process Practice

高端的冷镢钢主要用于汽车行业, 随着公司高端冷镢钢的推广和认证, 高端冷镢钢非金属夹杂物的要求越来越严格。非金属夹杂物对钢的强度、塑性、断裂韧性、切削、疲劳、热脆以及耐腐蚀等性能都有很大影响^[1]。钢中夹杂物一般分为外来性夹杂物和内生性夹杂物两种^[2]。自从 20 世纪 80 年代加拿大多伦多大学 McLean 教授提出“中间包冶金”以来, 很多研究成果已经陆续应用到实际连铸生产实践中。例如, 中间包结构设计、流动控制技术、水口吹氩、通道式感应加热等。近年来, 随着中间包冶金功能进一步扩大, 在中间包内安装控流装置, 例如挡墙、坝、湍流控制器、气幕挡墙等, 改善钢液在中间包内流动特性, 提高钢液中非金属夹杂物的去除率已经成为冶金工作者的共识^[3-5]。国内一些生产冷镢钢的厂家, 尤其是汽车使用的高端冷镢, 钢逐步将中间包冶金作为一项重要的工艺管控手段, 旨在生产出高洁净度的钢材。邢钢为提高夹杂物控制水平, 在 2019 年引进了双挡渣墙工艺。本文主要研究中间包挡墙对高端冷镢钢 Q10B21-C 的夹杂物去除

作用。Q10B21-C 是一种汽车用冷镢钢, 成分要求见表 1; 该钢对夹杂物要求严格, 具体要求如表 2 所示:

2019 年 1~5 月份邢钢冷镢钢 Q10B21-C 初检夹杂物不合格为 933.55 t, 夹杂物复检不合格改判共 167 t, 全部为 B 类和 D 类以及 D_s 类夹杂物, 详见表 3。每改判 1 t 损失 1 800 元以上, 损失较大。

1 双挡渣墙数值模拟

1.1 数学模型

以 5# 连铸机中间包为原始模型, 建立了中间包分析模型, 利用 Ansys 模拟分析软件, 研究中间包内弧形挡渣墙与双挡渣墙的钢液流场和夹杂物排除率。本文取 1/2 模型为研究对象, 两种挡渣墙下的中间包模型, 具体如图 1 所示。

从图 1 可见, 弧形挡渣墙中间包在浇铸区设置

表 1 冷镢钢 Q10B21-C 的成分要求/%

C	Si	Mn	P	S	Cr	B
0.18~0.23	≤0.10	0.70~0.90	≤0.030	≤0.030	≤0.20	0.0008~0.0030

表 2 Q10B21-C 冷镢钢夹杂物要求/级

Table 2 Cold heading steel Q10B21-C inclusion level requirements/rating

A	B	C	D	Ds
≤2.0	≤1.0	≤0.5	≤1.5	≤1.5

表 3 冷镢钢 Q10B21-C 夹杂物级别不合格炉次统计

Table 3 Statistic of inclusion rating unqualified heats of cold heading steel Q10B21-C

日期	班别	生产线	牌号	夹杂物初检情况	炉号	夹杂物复检情况	数量/t
1月17日	乙	五	Q10B21-C	B2.0	241807545	B2.0	3.87
1月20日	乙	五	Q10B21-C	B2.5	241808641	B2.5	52.574
1月20日	乙	五	Q10B21-C	B2.0	241808642	B2.0	11.388
2月08日	乙	五	Q10B21-C	B2.0	241900992	B1.5	1.851
2月08日	丁/甲	五	Q10B21-C	B2.0	241900989	B1.5	7.829
2月08日	丁	五	Q10B21-C	B2.5	241900992	B1.5	9.824
4月28日	丁	三	Q10B21-C	B2.0	241903016	B3.0	23.396
5月20日	丙	五	Q10B21-C	Ds3.0	241903086	Ds3.0	34.993
5月03日	丙/丁	五	Q10B21-C	Ds2.0	241903083	B2.0	21.272
合计							167

的夹杂物颗粒进行数值模拟,钢水中夹杂物初始数量取 1000 个进行模拟研究。夹杂物排除率按去除的夹杂物个数占夹杂物总数比率计算(夹杂物从入口释放,速度与钢液相同,钢液的自由表面设置为捕获界面,中间包壁面设置为自由碰撞界面,即夹杂物达到自由液面时被覆盖剂吸收,碰到中间包壁面时弹回,只有夹杂物进入各流出口时记录夹杂物进入钢液的数量,夹杂物总数量减去进入铸坯的数量再与总数量的比值就是夹杂物排除率)。

本文分别计算了不同粒径大小的夹杂物在两种模型下的夹杂物排除率状况,其流线运动轨迹示意图和不同粒径夹杂物在两种模型下的排除率状况,分别如图 2、图 3 和图 4 所示:

为充分考察两种挡渣墙模式对夹杂物去除行为的影响,在工艺制度不变的情况下,对不同夹杂物初始粒径在两种挡渣墙下的去除情况进行了模拟分析,模拟结果由图 5 所示,从图 5 中可以看出,当采用双挡渣墙时,夹杂物粒径小于 50 μm 时浇铸过程夹杂物排除率明显高于弧形挡渣墙中间包模型,对于粒径超过 100 μm 的夹杂物,两种模式的排除率基本相同。

从对比两种挡渣墙对夹杂物

的去除效果来看,双挡渣墙比弧形挡渣墙在尺寸小于 100 μm 的夹杂物控制上有明显的优势,夹杂物去除

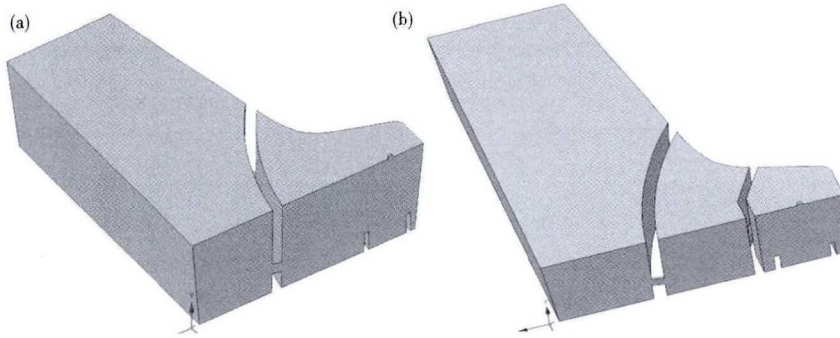


图 1 (a)弧形挡渣墙(b)双挡渣墙的中间包模型

Fig. 1 Tundish models with arc slag retaining walls (a) and double slag retaining walls (b)

一个弧形导流隔墙,在隔墙上取中间和两边一共 3 个导流孔,以便于钢液能够顺利到达各流浇铸区。双挡渣墙中间包在浇铸区设置一个弧形导流隔墙,在隔墙上取中间和两边一共 3 个导流孔,以便于钢液能够顺利到达各流浇铸区,在梯形挡渣墙两侧面上各取一个孔,使钢液先流入到两个挡渣墙中间,再进入浇铸区。

1.2 夹杂物的运动轨迹和去除

中间包中夹杂物的主要来源包括内生夹杂和外来夹杂,内生夹杂包括钢包下渣和耐火材料侵蚀,外来夹杂包括二次氧化产物等。因此,提高中间包钢液中夹杂物的排除率提高钢液纯洁度的重要措施。

钢液中夹杂物尺寸一般在 1 ~ 100 μm ,尺寸大于 100 μm 的夹杂物容易上浮去除,在钢液中很少残留。因此,对在 0.7 m/s 拉速下,10 ~ 100 μm 粒径

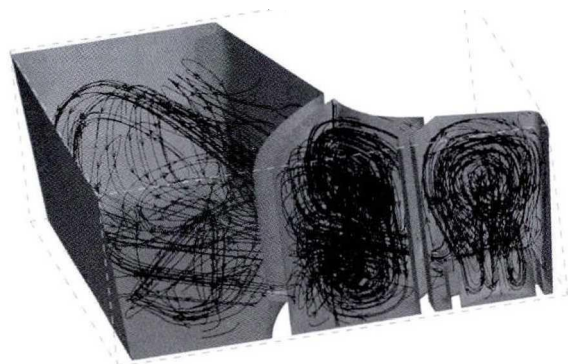


图 2 双挡渣墙中间包模型流线分布示意图

Fig. 2 Distribution diagram of flow line in tundish model with double slag retaining walls

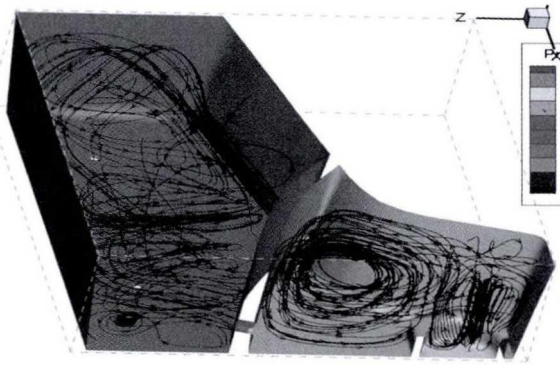


图 3 弧形挡渣墙中间包模型流线分布示意图

Fig. 3 Distribution diagram of flow line in tundish model with arc slag retaining wall

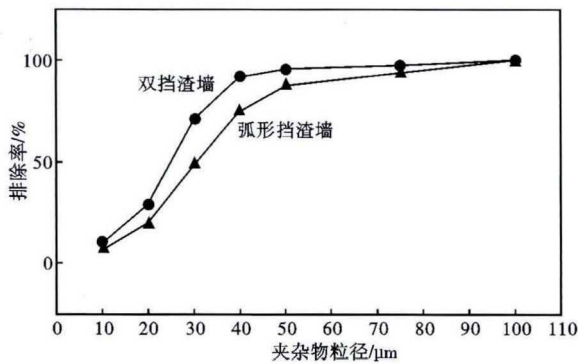


图 4 双挡渣墙和弧形挡渣墙中间包模型夹杂物排除率分析图

Fig. 4 Analysis diagram of inclusion exclusion removal rate in tundish mode with double slag retaining walls and arc slag retaining wall

率高 15% ~ 30%。

2 双挡渣墙现场试验检验

从数值模拟的结果来看,双挡渣墙对小于 100 μm 的夹杂物有良好的去除效果,以模拟数据为依据,我厂开始组织安装双挡渣墙中包,并在高端冷镦钢 Q10B21-C 进行试验,炉号 241906523。试验炉次轧制成盘条后,取样对夹杂物面积指数和数量指数进行评价,具体如表 4 所示。

从夹杂物的面积指数和数量指数来看,相比于弧形挡渣墙,双挡渣墙夹杂物面积指数由 18.07 μm²/mm²

表 4 双挡渣墙和弧形挡渣墙中间包钢中夹杂物检验结果

Table 4 Examination results of inclusion in steel by tundish with double slag retaining walls and arc slag retaining wall

工艺	钢种	炉号	扫描总面积/mm ²	夹杂物总面积/μm ²	夹杂物总数量/个	夹杂物面积指数 S	夹杂物数量指数 N
双挡渣墙	Q10B21-C	241906523	250.48	3420.66	292	13.65	1.17
弧形挡渣墙	Q10B21-C	241906395	247.46	4473.62	364	18.07	1.47

注:夹杂物面积指数 S = 夹杂物总面积(μm²)/扫描总面积(mm²);夹杂物数量指数 N = 夹杂物总数量(个)/扫描总面积(mm²)。

表 5 双挡渣墙和弧形挡渣墙夹杂物评级水平对比/级
Table 5 Comparison of inclusion rating levels by double slag retaining wall and arc slag retaining wall/rating

序号	双挡渣墙	弧形挡渣墙
1	A1.0 D1.0	A0.5 D1.0
2	A1.0 B0.5 D1.0	A0.5 D1.0 D0.5e
3	A0.5 D1.0	A1.0 D1.0 Ds1.0
4	A0.5 B1.5 D1.0	A0.5 D1.0 Ds3.0
5	A0.5 D1.0	A1.0 D1.0 D0.5e
6	A0.5 D1.0	A0.5 D1.0
7	A0.5 D1.0	A0.5 D1.0 Ds0.5
8	A0.5 D1.0	A0.5 D1.0
9	A1.0 D1.0	A0.5 D1.0
10	A0.5 D1.0	A1.0 D1.0 Ds3.0

降低到 13.65 μm²/mm²,夹杂物数量指数由 1.47 个/mm²降低到 1.17 个/mm²。从试验数据来看,夹杂物的面积指数和数量指数均得到有效降低,有利于夹杂物的控制。

同时,对两种挡渣墙生产的 Q10B21-C 钢按照国标进行夹杂物评级对比,试验了 10 炉次取样进行监控,具体夹杂物控制水平如表 5 所示:

从 10 炉次评级对比来看,双挡渣墙没有出现 Ds 类大颗粒夹杂物,弧形挡渣墙出现了 2 炉次 Ds3.0 级、1 炉次 Ds0.5 和 1 炉次 Ds1.0 级大颗粒夹杂物,说明双挡渣墙对夹杂物去除,尤其是大颗粒夹杂物的去除有良好的效果。

通过夹杂物面积指数、数量指数以及 Ds 类大颗粒夹杂物对比来看,双挡渣墙工艺都要优于弧形挡渣墙工艺,同时考虑夹杂物的偶然性,进行了批量试验,从大数据方面进行数据对比分析。

3 双挡渣墙批量使用以及生产数据对比分析

在 Q10B21-C 钢系列上开始推广使用双挡渣墙工艺,并在邢钢技术中心进行夹杂物检验,具体数据对比如下:

从夹杂物级别上分析,该工艺的 B 类、D 类以及 Ds 类夹杂物级别均呈下降趋势,具体如图 5(a)(b)和(c)。

弧形挡渣墙工艺生产的 Q10B21-C 系列钢种 191 炉次,B 类夹杂物最高为 3.0 级。使用双挡渣墙生产了 Q10B21-C 系列 148 炉次,B 类夹杂物最高评级为 0.5 级。使用双挡渣墙以后,B 类夹杂物判定级别出现大幅降低趋势。

弧形挡渣墙生产 Q10B21-C 系列钢种 191 炉次,D 类夹杂物评级最高为

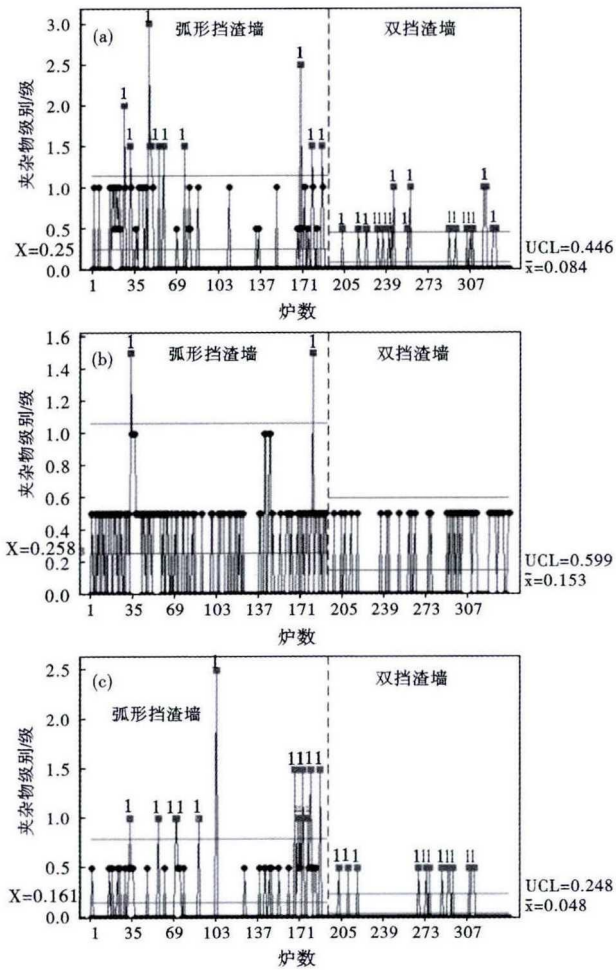


图5 弧形挡渣墙(左)和双挡渣墙(右)B类(a),细D类(b)和Ds类(c)夹杂物级别对比

Fig. 5 Comparison of B-type (a), fine D type (b) and Ds type (c) inclusion rating between by arc slag retaining wall (left) and double slag retaining walls (right)

1.5级。使用双挡渣墙生产Q10B21-C系列148炉次,D类夹杂物级别最高评级为0.5级。从数据来看,使用双挡渣墙以后,D类夹杂物判定级别出现大幅降低趋势。

弧形挡渣墙生产Q10B21-C系列钢种191炉次,Ds类夹杂物最高为3.0级。使用双挡渣墙生产Q10B21-C系列148炉次,Ds类夹杂物级别最高评级为0.5级。从数据来看,使用双挡渣墙以后,Ds类夹杂物判定级别出现大幅降低趋势。

使用双挡渣墙以后,从B类、D类以及Ds类夹杂物级别来看,夹杂物级别出现明显的下降趋势。

4 效果对比

从2019年6月份开始陆续使用双挡渣墙,使用双挡渣墙以后,由于夹杂物不合格造成的改判大幅下降。Q10B21-C和GSCM435-C钢系列夹杂物不合格比例由2019年1月份的7.67%逐步将低到0,并且连续6个月的改判量为0,夹杂物控制水平得到大幅提升。

5 结论

(1)从数值模拟数据来看,小于 $100\ \mu\text{m}$ 夹杂物双挡渣墙工艺去除效果明显,夹杂物去除率提高15%~30%;

(2)从扫描数据来看,双挡渣墙工艺夹杂物面积指数由 $18.07\ \mu\text{m}^2/\text{mm}^2$ 降低到 $13.65\ \mu\text{m}^2/\text{mm}^2$,夹杂物数量指数由 $1.47\ \text{个}/\text{mm}^2$ 降低到 $1.17\ \text{个}/\text{mm}^2$ 。

(3)从10炉次评级对比来看,双挡渣墙没有出现Ds类大颗粒夹杂物,弧形挡渣墙出现了2炉次Ds3.0级、1炉次Ds0.5和1炉次Ds1.0级大颗粒夹杂物。

(4)使用双挡渣墙工艺生产148炉次,B类夹杂物最高评级由3.0级降为0.5级,D类夹杂物评级最高由1.5级降到0.5级,Ds类夹杂物最高判定级别由3.0级降为0.5级。

参考文献

- [1]莫根源,严斌,犹公.非金属夹杂物对P91钢管分层缺陷的影响[J].理化检验(物理分册),2015,51(4):267-267.
- [2]吕建刚,肖李鹏.钢中非金属夹杂物及其金相检验[J].理化检验(物理分册),2015,51(4):229-233.
- [3]Mazundar D, Guthrie R I L. The Physical and Mathematical Modeling of Continuous Casting Tundish Systems[J]. ISIJ International, 1999, 39(6):524-547.
- [4]Chattopadhyayk, Isacm, Guthrie R I L. Physical and Mathematical Modeling of Steelmaking Tundish Operations; a Review of the Last Decade (1999-2009)[J]. ISIJ International, 2010, 50(3):331-48.
- [5]Sahai Y. Tundish Technology for Casting Clean Steel: A Review[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47(4):2095-2106.

郭 键(1972-),男,炼钢厂厂长,2008年北京科技大学(本科)毕业,炼钢工艺研究。E-mail:921407273@qq.com

收稿日期:2020-04-20