

· 工艺技术 ·

100 t BOF-LF-CC 流程冶炼 10B21 钢的工艺优化

宋万平 贾旭岗 梁世勇

(安阳钢铁股份有限公司, 安阳 455004)

摘要 针对 10B21 钢($\% : 0.19 \sim 0.22\text{C}, \leq 0.08\text{Si}, 0.8 \sim 1.0\text{Mn}, \leq 0.020\text{P}, \leq 0.020\text{S}, 0.010 \sim 0.040\text{Al}, 0.001 \sim 0.005\text{B}$)冶炼过程中钢液硅含量超标、可浇性差、铸坯角裂的问题,通过生产数据和夹杂物分析、铸坯低倍检验得出,LF 白渣后,渣中 SiO_2 被 Al 还原,造成 $[\text{Si}]$ 超标;钢中 Al_2O_3 在水口蓄积降低 10B21 钢的可浇性,凝固过程氮化硼和氧化硼在晶界析出,易使铸坯产生角裂。通过提高转炉终点 $[\text{C}]$ 为 $0.10\% \sim 0.14\%$,出钢温度 $1640 \sim 1660\text{ }^\circ\text{C}$,转炉铝铁加入量由 1.82 kg/t 降至 1.36 kg/t ,LF 精炼铝铁加入量由 2.8 kg/t 降至 1.6 kg/t ,喂钙量由 1.23 kg/t 增至 2.05 kg/t ,添加微量固氮元素 Ti,优化连铸工艺等措施后,钢液中 Si 含量- $[\text{Si}] \leq 0.08\%$ 比例从 65.62% 提高到 89.50% ;单个中间包连浇炉数从 4 炉提高到 12 炉;铸坯角裂得到有效控制,正品铸坯收得率由 88.23% 提高至 97.64% 。

关键词 100 t BOF-LF-CC 流程 10B21 钢 增硅 钢液可浇性 角裂

Process Optimization for Steel 10B21 Steelmaking by 100 t BOF-LF-CC Flowsheet

Song Wanping, Jia Xugang and Liang Shiyong
(Anyang Iron and Steel Co Ltd, Anyang 455004)

Abstract According to the issues for the steel 10B21 ($\% : 0.19 \sim 0.22\text{C}, \leq 0.08\text{Si}, 0.8 \sim 1.0\text{Mn}, \leq 0.020\text{P}, \leq 0.020\text{S}, 0.010 \sim 0.040\text{Al}, 0.001 \sim 0.005\text{B}$) during steelmaking process including silicon content in liquid going beyond the limit of standard, poor castability and exiting cracked corner of cast billet, with analysis on production data and inclusions in steel, and cast billet macro-examination, it is obtained that after LF white slagging, the SiO_2 in slag is reduced by Al led to $[\text{Si}]$ going beyond the limit; the castability of steel 10B21 decreases by Al_2O_3 in liquid depositing in nozzle, and during casting solidification process the boron nitride and oxide precipitate at grain boundary causing cast billet cracked corner. With using the process measures including increasing BOF end $[\text{C}]$ to $0.10\% \sim 0.14\%$, controlling tapping liquid temperature $1640 \sim 1660\text{ }^\circ\text{C}$, decreasing BOF aluminium iron adding amount from 1.82 kg/t to 1.36 kg/t , decreasing LF refining aluminium iron adding amount from 2.8 kg/t to 1.6 kg/t , increasing feeding calcium amount from 1.23 kg/t to 2.05 kg/t , adding micro fixed nitrogen element Ti and optimizing casting process, the ratio of $[\text{Si}] \leq 0.08\%$ increases from 65.62% to 89.50% , single tundish continuous-continuous casting heats in crease from 4 heats to 12 heats and the casting bloom cracked corner is effectively controlled, and the yield of qualified cast billet increases from 88.23% to 97.44% .

Material Index 100 t BOF-LF-CC Flowsheet, Steel 10B21, Silicon Increment, Liquid Steel Castability, Cracked Corner

10B21 是一种低碳含硼冷镦钢,主要用于生产 10.9 级高强度紧固件,用来制作发动机连杆螺栓、缸盖螺栓以及摩托车用高强度螺栓,其它还有 10B28、10B33 等。此类钢在 $900 \sim 1100\text{ MPa}$ 的强度范围内的耐延迟断裂性能、摩擦因数相当于或优于 SCM435 钢。钢种加入硼可改善钢的冷变形能力,加入质量分数为 $0.0005\% \sim 0.0035\%$ 的硼,能弥补因降碳而造成的强度和淬透性的损失。

河南省安阳钢铁股份有限公司(以下简称安钢)从 2010 年 3 月开始生产 10B21 含硼冷镦钢。但在试验初期,生产过程存在以下问题:钢液硅含量超标;钢液的可浇性差,每次只能生产 4 炉;铸坯存在角裂缺陷。为了提高生产效率和产品质量、降低生

产成本,安钢从 2011 年 9 月开始对 BOF→LF→CC 流程冶炼 10B21 钢的问题进行了重点攻关。

1 化学成分和工艺流程

10B21 钢的内控化学成分要求如表 1 所示,冶炼的工艺流程为:100 t 顶底复吹转炉→LF 精炼→6 机 6 流 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 方坯连铸机。转炉终点控制 $[\text{C}]$ 在 $0.08\% \sim 0.12\%$;出钢温度 $1620 \sim 1650\text{ }^\circ\text{C}$;出钢过程加入石灰和萤石造渣,加入 1.5 kg/t 铝脱氧;出钢过程二次挡渣。LF 进行造白渣脱氧,后期喂入钙线进行夹杂物变性处理,弱搅拌后将钢包吊往连铸平台。连铸过程全程保护浇铸,浇铸过程保持拉速恒定。

表 1 10B21 钢内控化学成分要求 / %

Table 1 Requirement for within control of chemical composition of steel 10B21 / %

C	Si	Mn	P	S	Al	B
0.19 ~ 0.22	≤ 0.08	0.80 ~ 1.00	≤ 0.020	≤ 0.020	0.010 ~ 0.040	0.001 ~ 0.005

表 2 转炉终点,白渣后和钙处理后炉渣成分 / %

Table 2 Ingredient of slag at BOF end, after white slag and calcium treatment / %

工序	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	P ₂ O ₅	S	TFe
转炉终点	12.78	45.24	2.29	6.07	3.49	1.520	0.067	15.35
白渣后	6.49	56.56	14.94	3.03	0.34	0.074	0.582	1.14
钙处理后	7.21	61.44	14.13	3.11	0.41	0.031	0.601	0.40

2 存在的问题分析

2.1 钢液硅含量超标

钢水中硅含量主要来自两方面,一是加合金时带入,二是渣中 SiO₂ 被还原。冶炼 10B21 钢时主要使用高碳锰铁,且加入量较少。因此合金带入的硅含量很少,钢水中硅含量增加主要是由于渣中 SiO₂ 被 Al 还原所致。根据氧势图^[1]分析,Al 可以将熔渣中 SiO₂ 的 Si 还原出来,在操作不良时会造成 Si 成分超标。表 2 给出了 2012 年 9 月冶炼 20 炉钢的各工序炉渣成分平均值。由表 2 可知,LF 白渣操作后炉渣中的(SiO₂)由 12.78% 降低至 6.49%。

渣中 SiO₂ 主要来自转炉渣,由转炉出钢过程下渣引起,下渣量直接决定渣中(SiO₂)含量。实际生产中可依据回磷量对转炉下渣量进行判断评估。图 1(a)给出了实际生产的 60 炉 10B21 钢液回磷量与增硅量的关系。从图 1(a)中可以看出,随着回磷量的增加,钢液增硅量也在增加。因此减少转炉下渣

量可以减少钢液增硅量。

在实际转炉出钢预脱氧和精炼炉造白渣过程中,需要加入铝类合金进行脱氧处理。由于转炉钢液初始氧含量的不稳定,白渣后钢液中的铝也偏差较多。而钢液增硅主要是因为渣中 SiO₂ 的 Si 被 Al 还原。钢液中的 Al 与 SiO₂ 按下式进行反应:

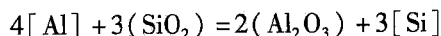


图 1(b)给出了实际生产的 140 炉白渣后铝成分与增硅量的关系。从图 1(b)中可以看出,随着白渣后钢液铝成分的升高,钢液增硅量也在增加。因此应该适当降低白渣后钢液铝成分,减少 Al 还原渣中 SiO₂ 的时间。

2.2 钢液可浇性差

采用 BOF→LF→CC 流程生产 10B21 钢,转炉和精炼炉需要加入铝进行脱氧处理,脱氧后就会产生大量的 Al₂O₃ 夹杂物。同时在钢液烧铸过程中,由于保护浇铸效果不良,造成钢水吸氧,钢液中的铝也会被氧化为 Al₂O₃ 夹杂物。Al₂O₃ 等夹杂物在浇铸过程中随钢液迁移至上水口位置,在塞棒控流作用下,钢液发生分流,分流区域钢液紊流特别频繁,使 Al₂O₃ 烧结、沉淀在上水口内壁形成附着初始层^[2,3]。Al₂O₃ 与钢液之间的润湿角较小,水口内壁形成网状 Al₂O₃ 结瘤物传热较快,使得水口内壁处钢液温度降低,进一步促进 Al₂O₃ 附着和沉积,造成浸入式水口结瘤,严重时造成连铸生产中断,因此 10B21 钢液的可浇性较差。图 2 为 10B21 钢液和铸坯中发现的典型夹杂物 Al₂O₃,尺寸为 5 ~ 10 μm。

10B21 钢液在浇铸过程中,发生二次氧化后,造成中间包 Al 成分损失,N 含量升高。从 10B21 浇铸数据可以看出在浇铸过程中 Al 成分平均损失为 0.011%,N 含量平均升高 23 × 10⁻⁶。

2.3 方坯铸坯存在角裂

图 3(a,b)为工艺优化前 10B21 铸坯表面和横剖分析结果,从分析结果可以看到,铸坯角部存在细小裂纹,裂纹宽度小于 1 mm,而且振痕处裂纹较深。

10B21 属于中碳含硼冷墩钢,钢中需要加入微量的硼。硼在钢中可以提高钢的淬透性、提高钢的高温强度和强化晶界,然而硼合金化易诱

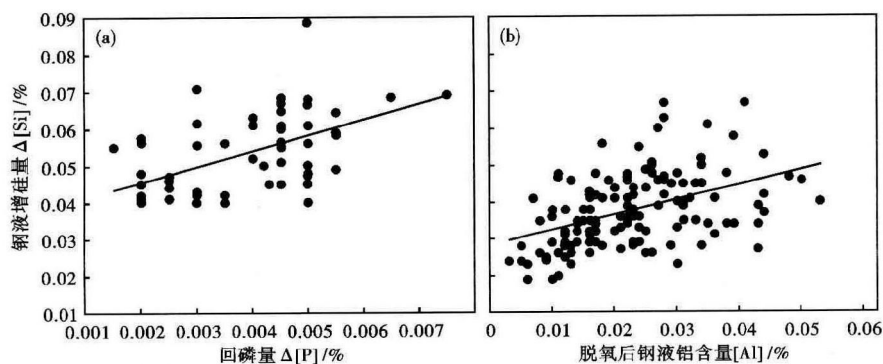


图 1 回磷量(a)和脱氧后铝成分(b)对钢液增硅量的影响

Fig. 1 Effect of rephosphorization amount (a) and aluminium content in steel after deoxidation (b) on increment of silicon content in steel

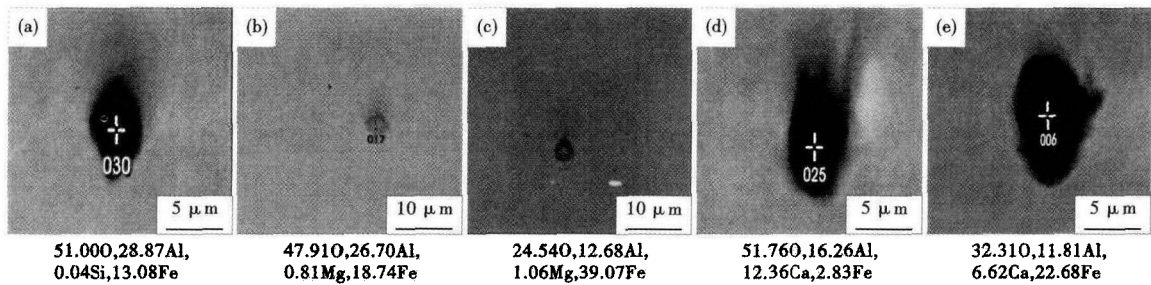


图 2 10B21 钢典型夹杂物的 SEM-EDS 的形貌和分析:(a)钙处理前;(b)钙处理后;(c)弱搅拌后;(d)中间包;(e)铸坯
Fig.2 Morphology and analysis of typical inclusions in steel 10B21, SEM-EDS: (a) before calcium treatment; (b) after calcium treatment; (c) after soft stirring; (d) tundish; (e) casting billet

发晶界析出和脆化,生产中易产生铸坯角裂问题。钢中存在的硼可用下式表示^[4]:

$$B_{全} = B_{固溶} + B[Fe_3(CB)] + B[Fe_{23}(CB)_6] + B(BN) + B(BO_x)$$

式中: $B_{固溶}$ -固溶硼; $B(BN)$ 、 $B(BO_x)$ -氮化硼和氧化硼中的硼,亦称酸不溶硼; $B[Fe_3(CB)]$ 、 $B[Fe_{23}(CB)_6]$ -硼相。

酸不溶硼的产生是由于

炼钢过程中脱氧与固氮不足引起的,对于钢的淬透性无益,又称无效硼。 $B[Fe_3(CB)]$ 铁硼渗碳体和 $B[Fe_{23}(CB)_6]$ 铁硼酸化合物统称为硼相, $B_{固溶}$ 、 $B[Fe_3(CB)]$ 及 $B[Fe_{23}(CB)_6]$ 中的硼为酸溶硼。若钢中硼含量过多,在钢中易产生硼相,对于钢的性能产生不利影响。凝固过程析出的 BN 和 BO_x 在奥氏体晶界致密分布,此时收到拉应力产生位错,析出物与晶界之间会形成细微空洞,当许多空洞形核后,随应力的不断施加,这些空洞会长大,长大到一定程度和空洞之间彼此接触聚合连接成一条线,形成晶间裂纹^[5],造成晶界脆性,铸坯在矫直时产生边裂纹。而在连铸二冷水冷却不均时,铸坯角裂现象更为严重。

3 改进措施

(1)生产计划调整:生产 10B21 钢种要求转炉出钢口小于 180 次,并严禁安排在高硅钢后面生产。

(2)转炉终点控制:提高终点的 C-T 双命中率;提高转炉终点碳含量,降低钢水初始氧含量,控制 $[C] = 0.10\% \sim 0.14\%$;提高转炉出钢温度,控制在 $1\ 640 \sim 1\ 660\ ^\circ\text{C}$ 。

(3)转炉脱氧制度:依据钢水氧含量计算铝脱

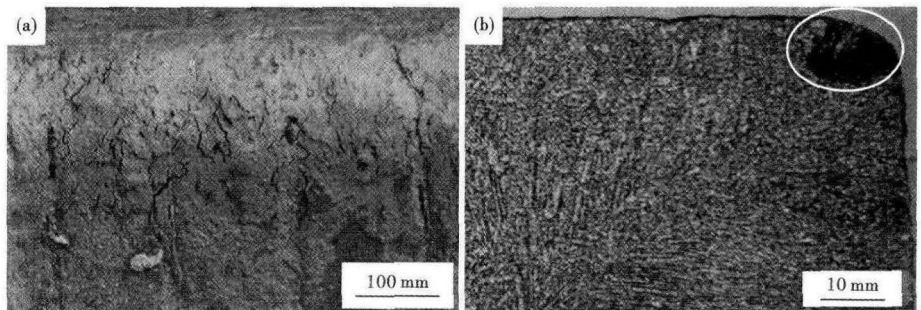


图 3 工艺优化前 10B21 铸坯表面角裂(a)和低倍组织角裂(b)形貌
Fig.3 Morphology of surface cracked corner (a) and macrostructure cracked corner (b) of cast billet of steel 10B21 before process improvement

氧合金加入量,要求对转炉初始钢液进行弱脱氧处理,保证钢水适量氧活度。氩站控制吹氩强度,避免大氩气搅拌。

(4)LF 操作改进:①增加钢液顶渣量,将转炉和精炼炉渣料控制在 1 000 kg 左右;②改进造白渣操作,增加扩散脱氧剂使用量,限制 Al 脱氧剂加入量;③提高喂线速度,增加钙铁线喂入量;④依据钢包深度计算夹杂物上浮时间,将软搅拌时间延长至 15 min 以上;⑤将钢水过热度提高到 $30\ ^\circ\text{C}$ 以上。

(5)加入固氮元素:优化脱氧工艺,先以含 Ti 脱氧剂固 N,然后加入硼铁微合金化,减少自由 N 与 B 的结合。控制硼铁合金加入量,降低 B 富余量。通过减少酸不溶硼和硼相,降低铸坯裂纹倾向。表 3 和表 4 分别给出了工艺优化前后加入脱氧剂量、喂钙线量、 $[Ti]$ 和精炼渣组成对比结果。

表 3 工艺优化前后铝铁、钙线加入量和 $[Ti]$ 统计结果
Table 3 Statistic results of Al-Fe, calcium wire and $[Ti]$ before and after process improvement

工艺	铝铁加入量/($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)		喂钙线量/ ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	钢液 $[Ti]$ / %
	转炉	LF 精炼		
优化前	1.82	2.8	1.23	-
优化后	1.36	1.6	2.05	0.042

(6) 优化连铸工艺: 做好水口、中间包保护浇铸, 减少非稳态浇铸时间; 适当降低连铸冷却水量, 提高铸坯矫直区温度; 严格检查二冷区喷嘴堵塞情况, 保证二冷区冷却均匀; 限制连铸拉速; 做好保护浇铸。

4 应用效果

4.1 硅含量得到有效控制

通过对 BOF → LF → CC 流程优化, 自 2013 年 4 月起, 10B21 钢液 Si 含量得到有效控制。表 5 给出了工艺优化前后主要指标统计结果。从表 5 可以看出, 工艺优化后, 10B21 钢液 [Si] 平均控制在 0.06%, [Si] ≤ 0.08% 的比例由 65.62% 提高到 89.50%。

表 4 工艺优化前后精炼渣组成/%

Table 4 Ingredient of refining slag before and after process improvement / %

工艺	TFe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	P ₂ O ₅	S
优化前	1.14	6.49	14.94	56.65	3.03	0.42	0.074	0.582
优化后	1.79	9.15	11.73	62.87	3.57	0.49	0.074	0.638

表 5 工艺优化前后主要指标统计结果

Table 5 Statistic results of main indexes before and after process improvement

工艺	样本数	[Si]/%	[Si] ≤ 0.08% 比例/%	连浇炉数	铸坯收得率/%
优化前	70	0.05 ~ 0.10 (0.07 均值)	65.62	4	88.23
优化后	60	0.04 ~ 0.09 (0.06 均值)	89.50	12	97.64

4.2 连浇炉数得到提高

安钢通过控制 10B21 钢液夹杂物的数量和形态, 钢水可浇性得到提高, 浇铸过程絮流和换水口现象明显减少。由表 5 可知, 10B21 连浇炉数稳定在 12 炉, 铸坯收得率由 88.23% 上升到 97.64%。

4.3 铸坯表面质量得到明显改善

通过对 10B21 钢液进行固氮处理、稳定硼成分和优化连铸工艺后, 铸坯表面质量得到明显改善, 角部裂纹完全消除。图 4(a, b) 分别为工艺优化后铸坯表面和低倍分析结果。

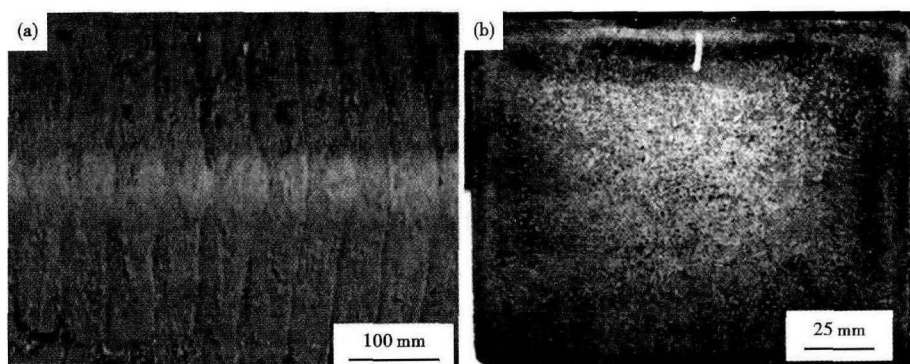


图 4 工艺优化后 10B21 铸坯表面形貌 (a) 和组织形貌 (b)

Fig. 4 Morphology of surface (a) and macrostructure (b) of cast billet of steel 10B21 after process improvement

5 结论

(1) LF 白渣操作后, 炉渣中的 (SiO₂) 由 12.78% 降低至 6.49%, 渣中 SiO₂ 被 Al 还原, 造成 Si 超标。

(2) 造成 10B21 钢液可浇性差的主要原因是钢中的 Al₂O₃ 夹杂物在水口蓄积。

(3) 生产 10B21 钢时, 由于脱氧和固氮不足, 生成氮化硼和氧化硼, 凝固过程中在晶界析出, 容易使铸坯产生角裂。因此含硼钢通常需要用 Al 脱氧, 用 Ti 固氮。

(4) 通过提高转炉终点 [Ti]、降低转炉和 LF 铝铁加入量, 添加微量 Ti, 优化连铸工艺等措施后, 钢液 [Si] 平均控制在 0.06%, [Si] ≤ 0.08% 的比例由 65.62% 提高到 89.50%。连浇炉数稳定在 12 炉, 合格正品铸坯收得率由 88.23% 上升到 97.64%。

参考文献

- [1] 黄希. 钢铁冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
- [2] 郭平, 成永久, 刘伟. 包钢小方坯连铸过程中的水口堵塞[J]. 包钢科技, 2006, 32(1): 19-21.
- [3] 龚坚, 王庆祥, 周辉. 浸入式水口堵塞机理[J]. 连铸, 2001(2): 4-7.
- [4] 贺信来. 硼在钢中的分布[J]. 金属学报, 1977, 13(4): 235-245.
- [5] 孙永喜, 李法兴, 张君平, 等. 冶炼硼钢控制硼含量的工艺实践[J]. 特殊钢, 2013, 34(4): 33-35.

宋万平(1975-), 男, 硕士(北京科技大学), 高级工程师, 2005 年鞍山科技大学(本科)毕业, 冶金基础工艺研究和技术监督管理工作。E-mail: swp4321@126.com

收稿日期: 2015-04-17