

提高含硼钢中有效硼收得率的生产实践

Production Practice of Improving the Effective Boron Yield in Boron Containing Steel

供稿|魏巍¹, 李虹², 张静¹, 郭小爽¹ / WEI Wei¹, LI Hong², ZHANG Jing¹, GUO Xiaoshuang¹

内容导读

含硼钢是一类重要的微合金化钢种。通过在钢中添加微量硼元素即可显著提升钢材的淬透性,这一特性使硼成为替代钼、铬、镍等贵重金属合金的经济型选择。然而,硼元素化学性质活泼,在炼钢过程中极易与钢液中的氧、氮结合,形成氧化物或氮化物夹杂,从而丧失其提高淬透性的功能。如何确保加入的硼以“有效态”存在于钢材中,是含硼钢生产的技术核心。为了提高含硼钢中有效硼的收得率,为实际生产提供数据指导,本文确定含硼钢 Ti、N、B 等成分较优的控制范围。研究认为重点关注精炼过程的脱氧、炼钢全程的控氮、成分调整时 B 的加入时机、连铸过程防止二次氧化,并将 $w(\text{Ti})/w(\text{N})$ 控制在 7~9、 $w(\text{B})/w(\text{N})$ 控制在 0.4~0.6。转炉出钢要求出钢 [C] 质量分数为 0.08%~0.12%, LF 精炼使用碳化硅每吨钢 5~6 kg 进行扩散脱氧,实现钢水 [O] 质量分数 $\leq 0.0010\%$ 。真空脱气炉 (VD) 处理保持时间 12~15 min,达到良好的脱氮效果,实现钢水 [N] 质量分数 $\leq 0.0050\%$ 。VD 真空处理后依次加入 Al 线、Ti 线、Ca 线 (T[O] 质量分数 $\leq 0.0010\%$ 可不加),最后加入铝板包裹的硼铁,可减少在加入硼铁过程中 B 元素的损失,从而提高有效硼的收得率,充分发挥 B 元素提高钢材淬透性的作用。

对于含硼钢而言,微量的硼 (B) 便可显著提高钢材的淬透性,可代替钼 (Mo)、铬 (Cr)、铌 (Nb)、钒 (V) 等贵重金属合金元素,从而降低合金成本。含硼钢作为一种特殊钢材,在机械、建筑、汽车、核工业等领域得到广泛应用^[1]。有研究认为^[2-5],B 在钢中通常以固溶硼 (B_s)、氧化硼 (B_2O_3)、氮化硼 (BN)、铁硼渗碳体和硼酸铁化合物等形式

存在,其中 B_2O_3 和 BN 为酸不溶硼, B_s 、铁硼渗碳体和硼酸铁化合物为酸溶硼。通常认为 B 提高淬透性的机理与一般的合金元素不同,其在钢中溶解度很小, B_s 可偏聚在奥氏体晶界,填充晶界缺陷,降低晶界能,从而抑制铁素体在奥氏体晶界形核,降低铁素体形核率,起到增加奥氏体稳定性、提高钢材淬透性的作用。起到提高端淬作用的 B 为有效

作者单位: 1. 辽河石油职业技术学院, 辽宁 盘锦 124103; 2. 石钢京诚装备技术有限公司, 辽宁 营口 115000

硼，酸溶硼并不完全等效于有效硼。含硼钢中的 B 元素极为活泼，易与钢中残留的 O、N 反应，生成 B_2O_3 、BN 夹杂物而失效。钢水中 Ti、Al、B 与 N 反应的顺序为 $Ti > Al > B$ ，即 Ti 优先于 Al 与 N 反应、Al 优先于 B 与 N 反应。因此，影响含硼钢中有效硼含量的主要因素包括钢中总 B 含量、N 含量、Ti 含量，钢水的脱氧脱氮效果，以及 Ti、Al、B 等成分的加入顺序和时机等^[6-9]。

为了保证含硼钢的性能以及钢水纯净度，要求钢包精炼炉（LF）精炼过程必须实现良好的脱氧效果，应保证钢水中酸溶铝的质量分数 $\geq 0.020\%$ ，这不但可以实现良好脱氧，还可以保护钢中的钛（Ti），从而间接固定氮，减少 B 与 N、O 的反应^[10]。同时连铸过程进行保护浇注，以避免钢水二

次氧化，保证铸坯 T[O] 质量分数 $\leq 0.0010\%$ 。此外，若采用电炉工艺流程生产含硼钢，钢液中 N 含量普遍较高，B 元素基本全部与 N、O 结合成化合物，B 增加钢淬透性的作用将受到一定程度的抑制^[11]。采用转炉流程生产含硼钢，因钢水中 N 含量、O 含量较低，可以提高 B 元素的收得率。

含硼钢的生产

以“转炉（100 t）→LF 精炼（120 t）→真空脱气炉（VD）真空处理（120 t）→连铸（ $\phi 600$ mm）”工艺流程生产含硼钢为例，某含硼钢端淬要求 1.5 mm 点处端淬值为 HRC 50~54，9 mm 点处端淬值为 HRC 48~54，20 mm 点处端淬值为 HRC 46~53。成分设计（表 1）及冶炼过程控制要点如下。

表 1 设计成分（质量分数）

%

项目	C	Si	Mn	P	S	Als	Al	Cr
标准	0.32~0.36	0.15~0.35	1.25~1.50	≤ 0.020	≤ 0.010		0.020~0.040	0.30~0.40
内控	0.32~0.34	0.26~0.30	1.40~1.45	≤ 0.015	≤ 0.005	≥ 0.020	0.025~0.035	0.35~0.38
项目	Ti	B	Ni	Mo	H	O	N	
标准	0.020~0.050	0.0008~0.0030	≤ 0.25	≤ 0.05	≤ 0.00015	≤ 0.0010	≤ 0.0070	
内控	0.035~0.040	0.0023~0.0028	≤ 0.10	0.03~0.05	≤ 0.00012	≤ 0.0008	≤ 0.0060	

转炉生产工艺及相关参数

要求转炉的铁水质量占比为 82%~88%，废钢质量占比为 12%~18%，使用厂内自产优质废钢。转炉吹炼前，需将转炉炉口、炉帽附近的转炉渣清理干净；若在吹炼过程发生炉渣喷溅，必须对炉帽附近残留的炉渣进行二次清理，避免炉渣落入钢包影响钢水成分，保证炉帽清理干净无残渣后方可出钢。转炉冶炼全程每吨钢加入白灰 20~30 kg、轻烧白云石 18~25 kg、石灰石 30~40 kg； O_2 消耗量为 45~50 m^3/t ， N_2 消耗量为 20~35 m^3/t ，供氧时间 14~17 min，转炉冶炼周期 35~45 min。转炉出钢要求：出钢 [C] 质量分数 0.08%~0.12%，出钢 [P] 质量分数 $\leq 0.015\%$ ，出钢温度控制在 1600~1630 $^{\circ}C$ 。转炉吹炼终点应实现钢水成分和钢水温度的双命中，避免钢水过氧化，为 LF 精炼过程脱氧创造有利条件，保证成品 T[O] 质量分数 $\leq 0.0010\%$ 。转炉出钢时间 3~6 min，出钢过程依次加入钢砂铝、铬铁合金、硅锰合金、锰铁合金、白灰、精炼预熔渣，并全程严禁下渣。

LF 精炼生产工艺及相关参数

LF 到位后，根据精炼炉渣熔化情况及流动性，加入白灰、精炼预熔渣进行造渣及渣系调整。保证 LF 精炼时间 60~80 min，白渣保持时间 ≥ 15 min。LF 精炼过程中使用碳化硅进行扩散脱氧，每吨钢用量控制在 5~6 kg，以保证良好的脱氧效果。LF 过程钢包底吹氩气，氩气流量控制在 300~800 L/min，同时保证氩气消耗量在 0.2~0.3 m^3/t ，使钢包具有良好的透气性，为钢包内的钢水提供良好的搅拌，促进钢水脱氧脱硫、成分调整、均匀温度、夹杂物上浮等冶金目的的实现。在 LF 精炼过程中，要求按目标成分进行合金含量的调整。

VD 生产工艺及相关参数

VD 处理（真空度 ≤ 67 Pa）保持时间 12~15 min，VD 过程氩气流量控制在 150~500 L/min，氩气消耗 0.04~0.06 m^3/t ，每吨钢蒸汽消耗 20~25 kg。VD 破空后，按每吨钢 1.0~1.5 kg 加预熔钢包覆盖剂。考虑残余的 Al 含量，按钢包内钢水质量分数的 0.040% 喂

入 Al 线, 进一步进行脱氧。软吹 3 min 使成分均匀后, 按钢包内钢水质量分数的 0.040% 喂入 Ti 线进行固氮, 以提高有效硼的收得率。因 LF 精炼过程脱氧良好, 当钢水 T[O] 质量分数 $\leq 0.0010\%$ 时, 可不进行钙处理。再次软吹 3 min 后, 按目标加入铝箔(或铝板)包裹的硼铁调整 B 含量。成分调整后继续进行软吹, 软吹时间 15~30 min, 软吹时控制氩气流量 ≤ 17 L/min, 以促进夹杂物充分上浮。

连铸生产工艺及相关参数

连铸过程需进行氩气保护浇注, 钢包禁止下渣, 中包满包浇注。连铸转包时中包余钢量应 ≥ 26 t, 浇注结束时钢包剩余钢水量应 ≥ 5 t, 结晶器液面波动控制在 ± 3 mm。连铸拉速控制在 0.22~0.24 m/min, 结晶器水量为 3100~3300 L/min, 比水量为 0.09~0.11 L/kg。采用结晶器电磁搅拌及末端电磁搅拌, 其中结晶器电搅电流 100~150 A、频率 2.0~2.5 Hz, 末端电搅电流 100~150 A、频率 7.0~8.0 Hz。连铸中包过热控制在 20~30 °C, 连铸浇次铸坯头坯切割量 ≥ 1500 mm, 尾坯切割量 ≥ 3000 mm。铸坯下线后堆冷, 下线温度 ≥ 600 °C, 拆垛温度 ≤ 100 °C。连铸过程中应保证钢水液面平稳、无卷渣, 保护浇注正常, 严格控制大包中包余钢量, 严禁下渣, 以确保铸坯低倍及表面质量良好。

产品质量及检测情况

成分设计及成品成分

含硼钢生产中, 保证有效硼的收得率、提高产

品的淬透性, 其重点在于产品成分的设计、精炼过程的脱氧、炼钢全程的控氮以及成分调整时 B 的加入时机。

有研究表明^[12], 有效硼的质量分数控制在 0.0005%~0.0030% 对提高含硼钢淬透性的效果最佳。为了保证有效硼的收得率, 通常在 LF 精炼、VD 处理后, 钢水 [O] 质量分数 $\leq 0.0010\%$, [N] 质量分数 $\leq 0.0050\%$ 时调整 B 含量。先加入 Al 线进一步脱氧, 产生少量脱氧产物 Al_2O_3 ; 再加入 Ti 线以固定氮, 反应产物为 TiN; 为了保证钢水流动性, 可加入少量 Ca 线, 与 Al_2O_3 反应生成 $7Al_2O_3 \cdot 12CaO$, 若钢水前期脱氧效果良好, [O] 质量分数 $\leq 0.0010\%$ 可不喂 Ca 线; 最后加入硼铁, 调整 B 含量。加入硼铁时需使用铝箔(或铝板)包裹, 以保证硼铁加入钢水内部, 同时避免其被氧化, 减少 B 的损失, 从而提高有效硼的收得率。

含硼钢的成分设计应适当提高 Al 含量及 Ti 含量, 保证良好的脱氧和固氮作用; 同时 B 质量分数 $\leq 0.0030\%$, 有利于控制生产成本。LF 精炼过程使用碳化硅进行扩散脱氧, 控制 [O] 质量分数 $\leq 0.0010\%$, 同时保证钢水中足够的 Al 含量。真空处理结束 VD 破空后, 依次喂入 Al 线、Ti 线、Ca 线(T[O] 质量分数 $\leq 0.0010\%$ 可不加)调整成分, 起到进一步脱氧、固氮、保证钢水流动性的作用, 然后再插入包裹铝箔(或铝板)的硼铁。转炉、LF 精炼、VD 真空处理全程底吹氩气, 连铸过程做好氩气保护浇注, 避免钢水二次氧化及吸氮。采用上述工艺实际生产 3 炉含硼钢成品, 成分检测结果见表 2。

表 2 成品成分 (质量分数)

样品	C	Si	Mn	P	S	Als	Al	Cr	Ti	B	Ni	Mo	H	O	N
1 [#]	0.32	0.30	1.43	0.013	0.003	0.025	0.026	0.36	0.035	0.0024	0.01	0.03	0.00007	0.00063	0.00419
2 [#]	0.32	0.26	1.44	0.012	0.002	0.029	0.030	0.38	0.040	0.0025	0.01	0.04	0.00010	0.00066	0.00446
3 [#]	0.33	0.29	1.41	0.015	0.002	0.030	0.031	0.37	0.038	0.0026	0.01	0.03	0.00009	0.00071	0.00489
平均	0.32	0.28	1.43	0.013	0.002	0.028	0.029	0.37	0.038	0.0025	0.01	0.03	0.00009	0.00067	0.00451

提高有效硼收得率的注意事项

在钢中可起到提高端淬作用的 B 为有效硼, B 与 O、N 反应后生成的 B_2O_3 、BN 等夹杂物无法起到提高端淬的作用。由于钢水中 [O] 质量分数较低(通常 $\leq 0.0010\%$), 因此钢水中的 [N] 对有效硼收得率有

较大影响。张涛等^[13]研究认为, 提高 $w(Ti)/w(N)$ 是—保证含硼钢性能经济而有效的方法, 当含硼钢中 $w(Ti)/w(N)=4$ 时, 有效硼收得率稳定。陈继林等^[14]研究认为, 含硼钢中 $w(Ti)/w(N)$ 的临界值为 6, 超过临界值后增加 Ti 含量或降低 N 含量, 对进一步提高

有效硼收得率作用不明显。彭胜等^[2]研究认为,含硼钢中B元素的加入量与钢中N含量有关,一般 $w(\text{B})/w(\text{N})$ 宜控制在0.5~2.5,最佳值为0.6~0.8。

经生产实际验证,本文认为将 $w(\text{Ti})/w(\text{N})$ 控制在7~9、 $w(\text{B})/w(\text{N})$ 控制在0.4~0.6,可实现良好的脱氧、固氮作用,从而稳定保证有效硼的收得率,充分发挥B提高淬透性的作用。

含硼钢高倍和低倍检测情况

VD处理(真空度 $\leq 67\text{ Pa}$)保持时间12~15 min,可有效降低钢水N含量。VD破空后依次喂入Al线、Ti线、Ca线(T[O] 质量分数 $\leq 0.0010\%$ 可不加),然后加入硼铁。成分调整后软吹15~30 min,以促进夹杂物充分上浮。连铸浇注过程进行氩气保护浇注,钢水过热度控制在20~30℃,稳定拉钢速度,严格控制结晶器液面波动,保证大包中包余钢量,禁止下渣,从而保证良好的钢水纯净度和连铸坯低倍质量。随机挑选3炉钢样,分别按照《钢中非金属夹杂物含量的测定 标准评级图显微检验法》(GB/T 10561—2023)、《优质结构钢连铸坯低倍组织缺陷评级图》(YB/T 153—2015)标准进行检

测,结果如表3所示。高倍检测显示,D类细系 ≤ 1.0 级、D类粗系 ≤ 0.5 级,偶见A类、B类0.5级夹杂,无C类、DS类夹杂。彭峰等^[15]研究认为,当含硼钢中 T[O] 质量分数 $\leq 0.0010\%$ 时,夹杂物等级可控制在细系 ≤ 1.0 级、粗细 ≤ 0.5 级,与本文结果基本一致。但应注意的是,本文认为钢水 T[O] 质量分数 $\leq 0.0010\%$ 仅为VD后是否可以喂入Ca线的参考,无法作为衡量非金属夹杂物的标准;若VD、连铸过程控制不当,即使钢水可以达到 T[O] 质量分数 $\leq 0.0010\%$,但并不意味着非金属夹杂物等级和钢水纯净度达到理想水平。采用本文工艺生产的 $\phi 600\text{ mm}$ 连铸坯,在连铸坯上随机任取2块厚度约50 mm低倍片,检测其低倍质量,仅存在1.0级中心疏松,无其他缺陷,实物低倍情况如图1所示。

力学性能及探伤情况

通过设计合理的产品成分,保证LF精炼过程脱氧效果,稳定控制炼钢全程N含量,并在VD处理后遵循先调整Al含量、Ti含量,后加入B的合金化顺序等关键工艺,同时稳定控制冶炼、浇注全流程的操作细节,可保证含硼钢良好的力学性能。随机

表3 非金属夹杂物及低倍检测结果

样品	A类		B类		C类		D类		DS类	中心疏松	其他缺陷
	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系			
1 [#]	0	0.5	0.5	0	0	0	1.0	0.5	0	1.0	无
2 [#]	0	0	0.5	0	0	0	1.0	0.5	0	1.0	无
3 [#]	0.5	0	0	0	0	0	0.5	0.5	0	1.0	无

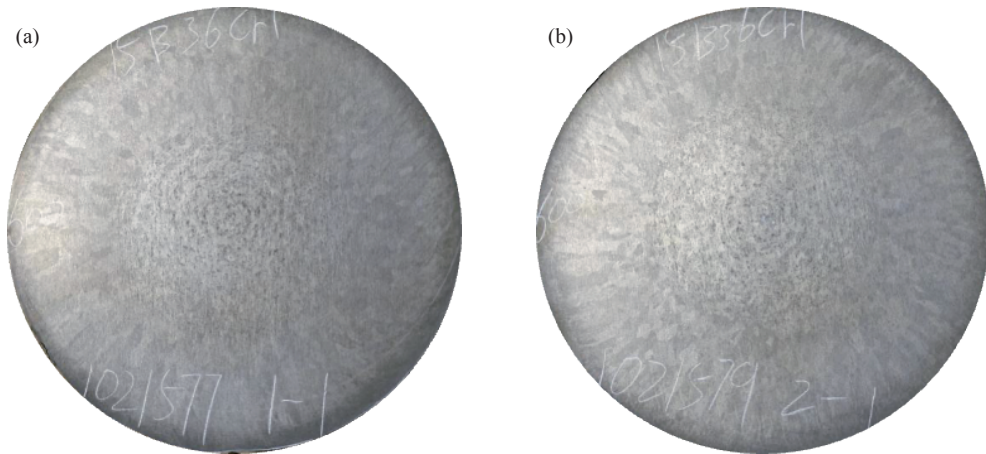


图1 $\phi 600\text{ mm}$ 连铸坯低倍:(a)实例1;(b)实例2

挑选 3 炉钢样，分别按照《金属材料 拉伸试验 第 1 部分：室温试验方法》（GB/T 228.1—2021）、《钢淬透性的末端淬火试验方法（Jominy 试验）》

（GB/T 225—2006）标准检测实物力学性能，结果如表 4 所示。其中检测了 J1.5、J9、J20 端淬值，即距端部 1.5、9、20 mm 处的硬度值。

表 4 力学性能

样品	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%	断面收缩率/%	端淬值, HRC		
					J1.5	J9	J20
1 [#]	1003	904	13.5	63	54.0	52.0	50.0
2 [#]	1029	926	13.5	63	53.0	50.5	47.0
3 [#]	989	894	14.0	65	53.0	51.0	49.5

结束语

（1）提高含硼钢的淬透性，重点在于产品成分的设计、精炼过程的脱氧、炼钢全程的控氮以及成分调整时 B 的加入时机；同时应重点关注炼钢生产过程细节管控，做好精炼脱氧、VD 高真空脱氮、连铸过程防止二次氧化。

（2）VD 真空处理后应确保钢水 [O] 质量分数 $\leq 0.0010\%$ 、[N] 质量分数 $\leq 0.0050\%$ ，再依次加入 Al 线、Ti 线、Ca 线（T[O] 质量分数 $\leq 0.0010\%$ 可不加），加入铝箔（或铝板）包裹的硼铁，可减少在加入硼铁过程中 B 元素的损失，保证有效硼的收得率。

（3）将 $w(\text{Ti})/w(\text{N})$ 控制在 7~9、 $w(\text{B})/w(\text{N})$ 控制在 0.4~0.6，可实现良好的脱氧、固氮作用，使含硼钢有效硼收得率保持在较高水平，充分发挥 B 元素提高钢材淬透性的作用。

参考文献

- [1] 田志强, 刘建磊, 张晨光, 等. 酸溶硼含量对低碳钢组织性能的影响. 河北冶金, 2019(3): 20
- [2] 彭胜, 彭其春, 范丹萍, 等. 硼微合金化中碳钢生产试验研究. 炼钢, 2014, 30(1): 34
- [3] 刘涛, 陈永峰, 王东兴, 等. 含硼钢铸坯表面裂纹缺陷控制. 连铸, 2022(5): 62
- [4] 王畅, 于洋, 王林, 等. 硼元素添加对酸洗板氧化行为的影响.

中国冶金, 2022, 32(4): 94

- [5] 黄瑞, 赵四新, 黄宗泽. 硼对铬锰钼系含硼调质钢淬透性的影响. 钢铁研究学报, 2021, 33(5): 437
- [6] 靳燕, 刘莉, 韩春鹏. 含硼钢铸坯表面裂纹产生原因分析. 包钢科技, 2020, 46(4): 4
- [7] 胡娇, 梅峰, 冯长宝. 低碳含硼钢侧面裂纹形成原因及改进. 连铸, 2020(4): 60
- [8] 马立国, 郭大勇, 王秉喜, 等. 10B38 含硼冷镦钢的研制与开发. 特殊钢, 2024, 45(3): 10
- [9] 张梦远, 龙木军, 左小坦, 等. 低碳含硼钢方坯表面淬火工艺及组织演变. 材料热处理学报, 2021, 42(12): 93
- [10] 王允. 含硼钢硼含量控制技术研究与应用. 新技术新工艺, 2017(8): 1
- [11] 张迎春. 工程机械用非调质钢 15B36Cr 冶炼工艺探讨. 金属材料与冶金工程, 2013, 41(6): 41
- [12] 童志博, 彭其春, 沈冬冬, 等. 硼在钢中的作用及应用. 中国冶金, 2013, 23(5): 12
- [13] 张涛, 侯华兴, 陈军平, 等. Ti/N 对低碳贝氏体钢组织和力学性能的影响. 钢铁钒钛, 2011, 32(4): 22
- [14] 陈继林, 郭明仪, 刘振民, 等. 氮含量对含硼钢淬透性的影响. 轧钢, 2015, 32(4): 9
- [15] 彭峰, 李旭, 李博鹏, 等. 紧固件用 10.9 级 32CrB4 调质圆钢的开发. 特殊钢, 2024, 45(6): 8

作者简介: 魏巍 (1986—), 男, 辽宁省本溪人, 现工作于辽河石油职业技术学院。2014 年硕士毕业于河北联合大学冶金工程专业, 主要研究方向: 钢铁冶金及化工材料。获得授权国家发明专利 17 项、实用新型专利 3 项, 发表论文 18 篇。通信地址: 辽宁省营口市西市区财富公馆 1 号小区; E-mail: 393301678@163.com。