新型贝氏体钢冶炼工艺实践

随着我国铁路运输行业的发展，对钢轨及线路用辙叉的性能有了更高的要求。本厂研究了一种可用于铁路辙叉的新型钢种。钢中 H 含量较高会造成白点、裂纹，锻造过程中 H 原子沿晶体缺陷处扩散移动容易产生应力集中引起局部裂纹，严重危害钢材的机械性能。钢中 N 会引起钢材时效脆化，降低钢的冲击性能。而且 N、O 元素还会和钢中的合金元素形成大尺寸夹杂，不仅不能起到细晶强化、沉淀强化的作用，还容易在承受外力时引起尖角部位应力集中，引发裂纹萌生源，降低钢材性能。而贝氏体钢气体含量低，具有优越的性能，逐渐被用于铁路线路。本文针对气体含量要求低的贝氏体钢，进行了试验冶炼。

一、贝氏体钢冶炼工艺

如表 1 和 2 所示，贝氏体钢不仅对 S 元素、夹杂物要求严格，还对 O、N、H 等气体元素要求较高，其冶炼工艺为：电弧炉冶炼→LF 精炼→VD 精炼。主要通过 LF 精炼充分脱 S、O；VD 精炼脱 O、N、H 等气体元素，如何将钢液中 S、O、N、H 等元素控制到最低是重中之重。

表 1 贝氏体钢化学成分 *w*/%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
0.2~0.3	1.0~2.0	1.0~2.0	≤0.03	≤0.01	1.0~2.0	0.2~0.7	0.1~0.4	0.1~0.2

表 2 贝氏体钢气体含量

气体元素	O	H	N
目标成分	≤0.002%	≤0.000 1%	≤0.008%

(一)电弧炉冶炼工艺

氧化法是电弧炉炼钢的传统操作方法，采用氧化法冶炼贝氏体钢，以废钢作为原料，依次经过吹氧助熔、氧化期、还原期。电弧炉冶炼钢液中的 H 主要来源于受潮的原料，对添加的合金料进行烘烤，使用新打开包装的造渣剂避免其受潮，在一定程度上降低了电弧炉出钢后的 H 含量。并对烘烤时间及钢液中氢含量进行了实验验证，结果见表 3。根据表 3 统计结果来看，延长烘烤时间和烘烤温度均可降低钢液中初始 H 含量。

(二)LF 精炼工艺

LF 精炼重点在于精炼造渣。经电弧炉初炼的钢液流到钢包后，吊至 LF 精炼工位进行精炼，选用 CaO-SiO_2-Al_2O_3 三元渣系，其中 CaO 用于调整渣的碱度及进行脱硫反应，SiO_2 调整碱度及渣的黏度，Al_2O_3 降低渣的熔点，减少结壳现象的产生。针对不同渣系配比进行实验，LF 精炼工艺为：钢包进站→接通氩气管→降下电极化渣→补加石灰、还原剂→根据包样调整成分→测温取样→成分微调→大电压升温→钢包出站。

表 3 不同烘烤时间和烘烤温度下初始 H 含量 (mass fraction/10^{-6}%)

烘烤时间/h	2	3	4	5	6
200 ℃	10.8	9.4	8.6	8.1	7.9
300 ℃	9.6	9.3	8.5	7.6	7.5
400 ℃	9.1	8.6	8.3	7.5	7.5
500 ℃	8.9	8.4	7.9	7.2	6.9
600 ℃	8.6	8.3	7.5	7.3	7.0
700 ℃	8.7	8.3	7.6	7.5	6.9

LF 精炼的主要脱氧方式为扩散脱氧，通过向精炼渣加入还原剂硅钙粉，与渣中 FeO 反应，降低渣中FeO 含量，使其成为高碱度、高还原性的“白渣”(FeO+MnO＜0.5%)，因 FeO 的含量很低，钢液中的[O]和 FeO 自发向渣中扩散，达到降低钢液中氧含量的目的。

LF 精炼工艺可以造高碱度，低 FeO 并具有适宜温度的炉渣，为脱硫提供了良好的热力学条件；钢包底吹氩气搅拌，促进了钢液与渣之间的接触，加速了 S 在炉渣中的扩散，为脱硫提供了良好的动力学条件。LF 精炼过程中，通过钢液中的硫与精炼渣中的 CaO 反应生成 CaS 而达到脱硫的目的。脱硫反应式为：

$$FeS + CaO = CaS + FeO \quad (1)$$

进行了不同碱度渣系配比，对比了炉渣碱度对脱氧率和脱硫率的影响，通过表中数据可以看出，提高炉渣碱度可提升脱氧率和脱硫率，但是当炉渣碱度增加至 3 以上时，脱氧率、脱硫率未见明显提升。而且炉渣碱度过大会加剧钢包耐材的侵蚀，因此，将炉渣碱度控制在 3 左右为最佳。

(三)VD 真空处理工艺及优化措施

VD 处理的主要目的是降低钢液中的 N 和 H 含量。溶解在钢中的氢气会造成白点、裂纹。在锻造过程中，尺寸较小的氢原子沿晶体缺陷处扩散移动，聚集较多的氢原子释放较大应力，出现应力集中引起局部裂纹，严重危害钢材的机械性能。钢中 N 会引起钢材的时效脆化，降低钢的冲击性能，还会和钢中的 Ti、V、Al 形成氮化物夹杂，尺寸大多在 5 μm以上，不仅不能起到细晶强化、沉淀强化的作用，还容易在承受外力时引起尖

中国知网 https://www.cnki.net

角部位应力集中，引发裂纹萌生源，降低钢材性能。

冶炼过程中为降低钢液中 O 含量，对钢液进行 2 次加 Al 处理，分别是出钢前包底加入 Al 锭及精炼后喂 Al 丝处理。Al 处理可将钢液中 O 含量降到较低的水平，但是其脱氧产物 Al_2O_3 为硬质夹杂，轧制锻造过程中易断裂成为裂纹萌生源；另一方面，Al_2O_3 为高熔点氧化物，其容易在高温下析出，聚集在水口结瘤，影响后续浇注，因此需降低钢中 Al_2O_3 含量。Ca 作为强脱氧剂，对氧化物夹杂有着较强的改质效果，VD 处理后对钢液进行喂钙线处理，将钢液中存在较多的 Al_2O_3 夹杂改质成为低熔点低密度的 $CaO·Al_2O_3$ 夹杂，经过后续软吹进入到渣中，降低了钢液中残留的氧化物夹杂，提升了钢液纯净度。通过控制 Al 丝及 Ca 丝喂入量，对 VD 后钢中 O 含量进行了统计，结果见表 4。

根据表 4 可以看出，通过调整钢中 Al、Ca 的加入量，得到不同比例下脱氧率，根据这几炉实验记录可以得出，当铝钙质量比为 3:1 时，脱氧率最高；当铝钙质量比为 1:1 时，脱氧率最低。根据残留铝脱氧钢液进行钙处理中存在的几个主要反应如下：

$$2[Al]+3[O]=Al_2O_3(s) \quad (2)$$

$$[Ca]+[O]=CaO(s) \quad (3)$$

$$CaO(s)+6Al_2O_3(s)=CaO·6Al_2O_3(s) \quad (4)$$

$$CaO(s)+2Al_2O_3(s)=CaO·2Al_2O_3(s) \quad (5)$$

$$CaO(s)+Al_2O_3(s)=CaO·Al_2O_3(l) \quad (6)$$

$$12CaO(s)+7Al_2O_3(s)=12CaO·7Al_2O_3(l) \quad (7)$$

表4 Al、Ca喂入量对钢中氧含量的影响

编号	Al 丝质量 /kg	Ca 丝质量 /kg	Al:Ca 质量比	VD 前 O 含量/%	成品钢 O 含量/%
001	10	10	1:1	0.002 6	0.002 0
002	20	10	2:1	0.002 7	0.001 7
003	30	10	3:1	0.002 5	0.001 1
004	40	10	4:1	0.003 0	0.001 2
005	50	10	5:1	0.002 6	0.001 6
006	60	10	6:1	0.002 3	0.001 7

使用钙处理 Al 脱氧后的钢液，生成的夹杂物 $12CaO·7Al_2O_3$ 或 $CaO·Al_2O_3$ 密度较小，较容易上浮排出。结合上述几个反应，根据钙处理脱氧后形成不同脱氧产物来看，$12CaO·7Al_2O_3$ 中铝钙质量比为 3:4，$CaO·Al_2O_3$ 中铝钙质量比为 7:5，$CaO·2Al_2O_3$ 中铝钙质量比为 3:1，$CaO·6Al_2O_3$ 中铝钙质量比为 10:1，即钢中喂入钙丝量保持不变，逐渐增加 Al 的加入量，钢中脱氧产物变化依次为 $12CaO·7Al_2O_3 \rightarrow CaO·Al_2O_3 \rightarrow CaO·2Al_2O_3 \rightarrow CaO·6Al_2O_3$，为了尽可能降低钙铝复合夹杂物的数量，Al:Ca 质量比控制在 0.75~1.40 之间。

由表 5 和 6 可知，真空度和吹氩流量一定，随着低真空保压时间的延长，脱 H 率上升。真空度和真空时间一定，随着吹氩流量增大，脱 H 率上升。真空吹氩过程产生的氩气泡可以带走钢中的气体及夹杂物，理论上大氩气流量可以较好地脱除钢中气体，但是真空下大流量吹氩易使渣面剧烈翻腾，溢渣为后续清理带来麻烦，还可能损坏设备；另一方面，大流量吹氩会使钢液温度迅速下降，影响后续浇铸。

表5 真空保压时间与脱氢率的关系

序号	保压时间/min	保压真空度/Pa	吹氩流量 /(L·min⁻¹)	VD 前 H 含量/%	VD 后 H 含量/%	脱氢率 /%
1	16	20	15	0.000 81	0.000 17	79.00
2	18	20	15	0.000 76	0.000 13	82.89
3	20	20	15	0.000 79	0.000 12	84.81
4	22	20	15	0.000 88	0.000 12	86.36

表6 吹氩流量与脱氢率的关系

序号	吹氩流量 /(L·min⁻¹)	吹氩时间/min	真空度/Pa	保压时间/min	VD 前 H 含量/%	VD 后 H 含量/%	脱氢率 /%
1	10	25	20	20	0.000 75	0.000 18	76.00
2	15	25	20	20	0.000 85	0.000 16	81.18
3	20	25	20	20	0.000 82	0.000 13	84.15
4	25	25	20	20	0.000 77	0.000 10	87.00

试验中部分炉次出现 VD 处理温降速度过大，结合冶炼记录发现当天湿度相较其他较大，且此炉次 VD 抽真空速度较快，即湿度和抽气速度会增大 VD 过程中温降。结果见表 7，湿度越大，VD 处理过程温降越大。因此，在冶炼过程中应适当考虑湿度带来的温降影响。

表7 不同空气湿度下钢液温降

炉号	吹氩流量	空气湿度	温降 /(℃·min⁻¹)
1	50	20	3.0
2	50	25	3.5
3	50	31	3.8
4	50	41	5.0
5	50	45	5.2

二、结语

对比几炉 VD 处理脱氢率较低的渣面，发现其渣层流动性较差，VD 处理在保持钢液不出现溢渣，钢液剧烈沸腾的情况下，尽可能增大钢液与真空接触面积、时间能促进钢液气体的排出。精炼期间，渣层不宜过厚，保证渣层能正常埋弧最佳，对进入 VD 前的钢渣进行观察，及时补加萤石调整流动性，减少对 VD 脱气造成的不利影响。另外，分阶段由低到高调整吹氩流量，增加脱气效果。钢中存在的 Al_2O_3 对 H 有强烈的吸附作用，适当降低喂铝线的量可增加 VD 脱 H 效果。

吴海斌，李成浩，张阳阳，李　玺
（中铁宝桥集团，陕西 宝鸡 721006）

中国知网 https://www.cnki.net