

## 120 t BOF-LF-VD-CC 流程高品质重轨钢 U75V 的生产实践

王建锋 李德辉 郭朝军 张守伟

(河钢集团邯钢公司,邯鄲 056015)

**摘要** 通过对重轨钢 U75V 的生产过程进行取样分析,研究了实际冶炼过程中重轨钢夹杂物的演变规律和大型夹杂物的控制。研究表明:控制铝含量 $\leq 20 \times 10^{-6}$ ,精炼渣二元碱度 1.8~2.2,白渣保持时间 $\geq 15$  min,RH 真空度在 100 Pa 以下保持高真空时间 $\geq 15$  min,可使钢液中全氧含量降至 $10 \times 10^{-6}$ 以下,且铝含量不超过 $20 \times 10^{-6}$ ,轧材中基本消除 B 类和 D 类粗系夹杂,C 类夹杂完全塑性化;中间包钢水过热度按 25~35 °C 控制,中间包钢水平均停留时间 $(750 \pm 30)$  s,水口插入深度控制在 90~110 mm,结晶器液面波动 $\leq \pm 3$  mm 等措施,可去除钢水中的夹杂物。

**关键词** 重轨钢 U75V 洁净度 夹杂物

## Production Practice of High Quality U75V Heavy Rail Steel by 120 t BOF-LF-VD-CC Flowsheet

Wang Jianfeng, Li Dehui, Guo Chaojun and Zhang Shouwei  
(Handan Iron and Steel Company, Hesteel Group, Handan 056015)

**Abstract** Through the sampling analysis in the production process of U75V heavy rail steel, the inclusions evolution and control of large scale inclusions in heavy rail steel are investigated base on the samples taken during steelmaking process. The results show that the total oxygen content in molten steel can be reduced to less than  $10 \times 10^{-6}$  by controlling the aluminium content  $\leq 20 \times 10^{-6}$ , the binary basicity of refining slag 1.8~2.2, the white slag holding time  $\geq 15$  min, and the RH vacuum 100 Pa  $\geq 15$  min. The coarse inclusions of B and D are basically eliminated and the inclusions of C are completely plasticized in finished product, aluminium content less than  $20 \times 10^{-6}$ . With the overheat of tundish 25~35 °C, the average residence time of tundish steel  $(750 \pm 30)$  s, the depth of nozzle insertion 90~110 mm, and the fluctuation of mould liquid level  $\leq \pm 3$  mm, the inclusion in molten steel can be removed.

**Material Index** Heavy Rail Steel U75V, Cleanliness, Inclusion

为了保障列车高速、安全运行,铁路运输对钢轨材质洁净度提出更高要求,即钢中总氧含量 $< 20 \times 10^{-6}$ ,非金属夹杂物类别中 A 类 $\leq 2.5$  级,B、C、D 类 $\leq 1.5$  级,非金属夹杂物颗粒细小、分布均匀以及合适的夹杂物形态以保证高强度钢轨具有较好的韧性、塑性配合并可以进一步改善和提高钢轨的焊接性能<sup>[1-3]</sup>。智建国<sup>[4]</sup>等研究发现钢中的夹杂物对钢轨的耐磨性能具有显著影响,氧化铝类和硅酸盐夹杂物将导致钢轨核伤和局部剥离掉块。非金属夹杂物控制是高洁净度钢轨的核心问题<sup>[5]</sup>,标准要求钢轨探伤缺陷当量尺寸 $< \Phi 2$  mm 平底孔,尺寸异常大的硅酸盐类夹杂物也是引起钢轨超声波探伤不合格的主要原因之一<sup>[6]</sup>。

精炼过程中精炼渣的冶金性能及处理工艺对于降低钢中夹杂物的数量、控制夹杂物的形态具有关键作用,连铸工艺又是影响钢中大型夹杂物的重要控制环节。本文针对重轨钢 B、C 类夹杂物控制易偏标准上限、大型夹杂物控制不稳定的问题,在精炼

及连铸生产过程中通过现场取样分析,研究实际冶炼过程中重轨钢夹杂物的演变规律并探讨其控制方法,为钢中夹杂物的去除、控制以及合理制定炼钢工艺提高重轨钢冶金质量提供参考依据。

### 1 试验方案

试验用重轨钢的钢种为 U75V,生产工艺流程为:铁水预处理 $\rightarrow$ 120 t 顶底复吹转炉初炼 $\rightarrow$ 二次精炼(LF+RH) $\rightarrow$ 280 mm $\times$ 380 mm 大方坯连铸 $\rightarrow$ 连铸坯缓冷。转炉出钢采用滑板挡渣工艺控制渣层厚度 $\leq 50$  mm 并加硅铁和硅钙钡脱氧;LF 精炼进行造白渣处理,控制精炼渣合适二元碱度(1.8~2.2)及白渣保持时间 $\geq 15$  min,以此降低钢中氧、硫及夹杂物的含量。RH 真空处理进行脱气及成分、温度微调。采用大方坯连铸,以“恒拉速”、稳液面为手段,通过延长“稳态连铸时间”提高铸坯内部质量。

在精炼过程以及中间包取钢样及渣样,将钢样进行切割、粗磨、细磨抛光后制成金相试样,利用金

相显微镜及扫描电镜对夹杂物金相形貌观察,对典型夹杂物采用能谱分析其成分及含量。采用氧氮分析仪测定试样中氧和氮的含量,渣样采用 X 射线荧光光谱仪进行检测分析。

2 试验结果

2.1 精炼过程中钢水及精炼渣成分变化

从表 1 可以看出,LF 精炼前钢水氧含量达到  $20 \times 10^{-6}$ ,随着精炼的进行精炼渣中(FeO)降低至 1% 以下,渣碱度逐步降低稳定,钢中氧含量明显降低,LF 精炼后钢中氧含量降低到  $20 \times 10^{-6}$  以内,RH 真空精炼全氧继续降低至  $11 \times 10^{-6}$ 。LF 采用泡沫渣精炼,控制精炼吸氮,随着 RH 真空脱气和软吹氩处理,钢水中的氧和氮的含量得以降低。连铸工序是一个增氧、增氮的过程,通过保护浇注工艺可以保

证成品重轨中氧含量  $\leq 10 \times 10^{-6}$ ,氮含量  $< 35 \times 10^{-6}$ 。

2.2 精炼过程中夹杂物尺寸变化

图 1 为各阶段重轨钢中典型夹杂物形貌照片,重轨钢主要是利用硅锰脱氧,转炉出钢加入硅铁、锰铁、硅锰合金等脱氧剂后,夹杂物和钢液的环境是 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 体系,LF 精炼造渣后钢液、夹杂物和炉渣的体系平衡被打破,随着炉渣中的钙大量还原,MnO 炉渣逐渐转变为 CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 体系,夹杂物发生变性由于 MnO 降低,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和镁铝尖晶石上升。RH 精炼后形成低 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO 含量的塑性夹杂,其中大型夹杂完全上浮,小夹杂存在于钢中;中间包中基本消除 B 类和 D 类粗系夹杂,C 类夹杂完全塑性化。

表 1 重轨钢的精炼渣成分、碱度、气体含量  
Table 1 Composition, basicity and gas content of refining slag of heavy rail steel

工艺	精炼渣成分/%							R(CaO/SiO <sub>2</sub> )		气体含量/%	
	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S		[O]	[N]	
LF 进站	21.96	59.93	4.26	5.03	1.59	0.01	0.67	2.73	0.005 7	0.002 4	
LF 过程	25.52	54.56	7.48	7.81	1.08	0	0.47	2.14	0.002 1	0.003 1	
LF 出站	28.57	49.49	7.44	6.65	1.73	0	0.34	1.73	0.001 3	0.003 7	
RH 出站	25.51	49.65	9.02	8.17	0.83	0.04	0.43	1.95	0.001 1	0.002 7	

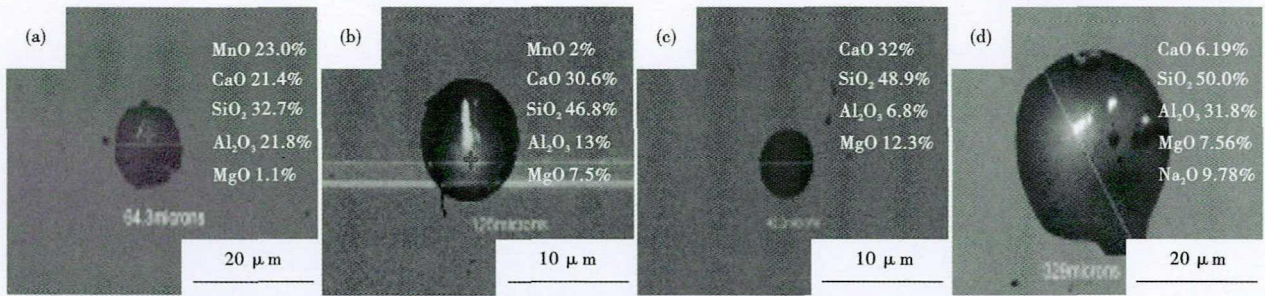


图 1 重轨钢中典型夹杂物形貌 (a)LF 过程;(b)LF 出站;(c)RH 出站;(d)中间包

Fig. 1 Morphology of typical inclusion in heavy rail steel at LF process (a),end LF (b),end RH (c) and tundish (d)

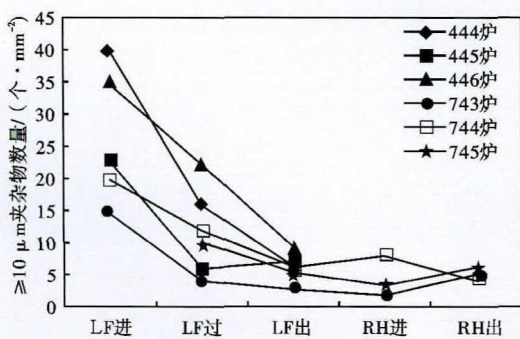


图 2 精炼过程中杂质数量变化(ds ≥ 10 μm)

Fig. 2 Change of inclusion number in refining process (ds ≥ 10 μm)

表 2 重轨的非金属夹杂物评级结果/级

Table 2 Heavy rail inclusion examination result/rating

项目	A类		B类		C类		D类		Ds
	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗	
最小值	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0	0
最大值	2.0	1.5	0.5	0.5	1.0	0.5	0.5	0	0.5

图 2 是精炼过程中夹杂物的数量变化,从转炉出钢后到 LF 阶段由于夹杂在不断的聚集和去除,因此数量减少较快,至 RH 虽然趋势减缓,但弱搅拌操作仍保证了夹杂数量从 LF 出站的 7 个/100 mm<sup>2</sup> (100 个视场中夹杂物个数)减少到 RH 终点的 5 个/100 mm<sup>2</sup>,成品重轨的非金属夹杂物评级结果见表 2。

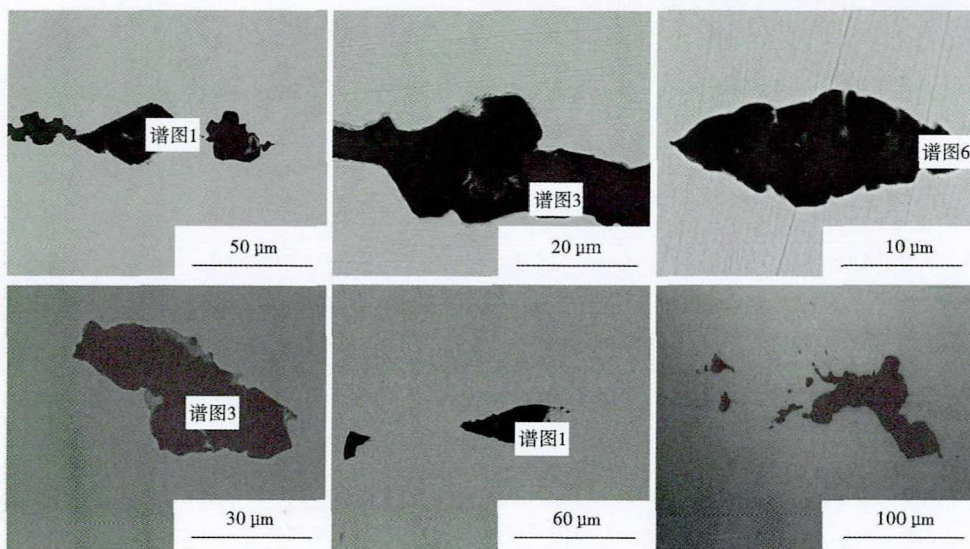


图 3 钢轨中典型大型夹杂物形貌  
Fig. 3 Morphology of typical large scale inclusions in rails

图 3 为重轨大型夹杂物形貌照片,钢轨中典型大型夹杂物成分见表 3,大型夹杂物主要分为两类。第一类为以夹杂物 A、夹杂物 D 及夹杂物 E 为代表的较为纯粹的镁铝尖晶石及  $Al_2O_3$  等不变形夹杂物在轧制后夹杂物出现断裂所形成。从形貌上观察此类夹杂物经过轧制后具有较为明显的棱角,宽度在  $50 \sim 600 \mu m$  不等,长度从  $100 \mu m$  到  $2 mm$  范围,含有较高的镁、铝元素具有典型的耐火材料侵蚀物特征,是由于高温钢水对中间包、水口等处耐火材料冲刷、侵蚀,在中间包和结晶器未能及时上浮而聚集在铸坯中心。

第二类夹杂物是以夹杂物 B、夹杂物 C 及夹杂物 F 为代表的基体为硅酸盐含有少量镁铝尖晶石的大颗粒夹杂物,部分含有 Na、K 等保护渣的成分,具有一定的变形能力,沿轧制方向有不同程度的延伸,均宽度在  $50 \sim 800 \mu m$  不等,长度从  $200 \mu m$  到  $5 mm$  范围,可能是二次氧化产物在浇注过程中与卷入的中间包覆盖剂或钢包渣及结晶器的卷渣形成的复杂相并具有低共熔点的混合产物。

表 3 钢轨中典型大型夹杂物成分

夹杂物	夹杂物主要成分	少量成分
A	$Al_2O_3$ -MgO	-
B	CaO-SiO <sub>2</sub> 、 $Al_2O_3$ -MgO	CaF <sub>2</sub>
C	CaO-SiO <sub>2</sub>	Zr
D	$Al_2O_3$ -MgO	CaO
E	$Al_2O_3$	-
F	CaO-SiO <sub>2</sub> - $Al_2O_3$	Na <sub>2</sub> O、K <sub>2</sub> O

### 3 讨论

#### 3.1 精炼过程夹杂物控制

钢中总氧量控制在  $20 \times 10^{-6}$  以下可以提高钢轨抗点状剥落性能,球形的复合夹杂物要避免脆性的  $Al_2O_3$  夹杂物,夹杂物尺寸应小于  $13 \mu m$ 。国内外研究一致确认,铝脱氧工艺是重轨钢中产生  $Al_2O_3$  脆性夹杂的主要原因,会对夹杂物控制产生不利影响<sup>[7-8]</sup>。重轨钢冶炼时,在转炉出钢采用滑板挡渣技术控制下渣

量,出钢时只用硅铁、锰铁或硅锰合金进行脱氧和合金化,根据终点钢水氧含量加入相应量的硅钙钡脱氧剂,从根本上消除  $Al_2O_3$  类夹杂来源;钙和钡等碱土金属具有强的脱氧能力,还能够形成低熔点化合物,对非金属夹杂物起到变性的作用。通过以上措施,可使钢水中的氧活度小于  $0.003\%$ 。在 LF 精炼过程中,采用重轨钢专用渣系,二元碱度控制在  $1.8 \sim 2.2$ ,控制渣中  $Al_2O_3$  含量形成能够吸附  $Al_2O_3$  夹杂的精炼渣,碳化硅、硅铁粉按加入量为  $100 \sim 200 kg$  分三批加入对炉渣和钢水进行脱氧进一步降低钢水中的含氧量提高了钢水的洁净度。RH 真空碳脱氧可以进一步降低钢液中溶解状态的氧含量,在真空度  $100 Pa$  由碳脱氧平衡曲线的理论公式可以计算出碳氧反应钢液中全氧含量最低值为  $500 \times 10^{-6}$ ,随着真空度的提高而降低,即碳脱氧能力增强。实践表明,真空度在  $100 Pa$  以下保持高真空时间  $\geq 15 min$  可使钢液中全氧含量降至  $10 \times 10^{-6}$  以下且铝含量不超过  $20 \times 10^{-6}$ ,同时氧化物夹杂的生成也发生了变化,从不利的脆性氧化铝变成细小硅酸盐夹杂。

#### 3.2 大型夹杂物的来源及控制措施

文献[9]研究表明,内生夹杂物颗粒细小,分布比较均匀且主要受炼钢系统影响,而连铸系统则主要影响钢轨内的大尺寸外来夹杂物。内生夹杂物对于重轨钢产品质量不构成特别严重的危害。钢轨中大尺寸外来夹杂物来源广泛,如与钢液接触的钢包、

中间包内衬等耐火材料的脱落及钢液的二次氧化等,其尺寸大、形状不规则、成分复杂、偶然性分布。钢中此类大型夹杂物数量虽少,但是作为潜在裂纹萌生源对钢轨疲劳破坏作用较大,影响行车安全<sup>[10]</sup>,因此应尽可能的减少它的存在。统计取样部位可以发现硅酸盐类复合夹杂物主要分布在钢轨轨腰,而含有 K、Na 等保护渣特征成分的夹杂物主要分布在轨头及轨底部位,证明结晶器卷渣是铸坯中夹杂物来源之一,此类夹杂物相对于轨腰部位更接近于钢轨的工作面,危害性更大。在浇铸过程中渣钢间剧烈混合,因为结晶器弯月面扰动、上回流形成漩涡的卷吸作用等因素,部分保护渣被卷入钢液中后被钢液中上浮的其他类型夹杂物捕获,从而形成大型的复合夹杂物<sup>[11-13]</sup>。重轨钢连铸生产采用浸入式水口为锆质,与钢水接触的其他耐火材料及辅料均不含锆,正常使用的水口会有一定的侵蚀量但不会对钢水质量造成影响,在浇铸过程中若钢液下降流股冲击过深,各类夹杂物未来得及上浮则被凝固坯壳捕获亦可形成大型夹杂物<sup>[14-15]</sup>。连铸大方坯中的非金属夹杂物分布较复杂,要得到高纯净度的钢水,连铸各阶段都须严格控制外来杂质对钢水

的污染,另一方面中间包过热度按 25 ~ 35 °C 控制,较高的钢水温度能提高钢水流动性,并促进夹杂物的上浮。控制中间包钢水平均停留时间(750 ± 30) s、水口插入深度控制在 90 ~ 110 mm,结晶器液面波动 ≤ ± 3 mm 等促进钢水中的夹杂物排出,以净化钢液提高铸坯质量<sup>[16-17]</sup>。

#### 4 结论

(1) 通过转炉高拉碳出钢、LF 造泡沫渣、RH 真空脱气和连铸保护浇注等工艺措施,可以保证钢中 [O] < 20 × 10<sup>-6</sup> 以内, [N] ≤ 40 × 10<sup>-6</sup>。

(2) 重轨钢中的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 脆性夹杂主要是由于采用铝脱氧工艺造成的,采用无铝脱氧工艺,轧材中可基本消除 B 类和 D 类粗系夹杂, C 类夹杂完全塑性化。

(3) 钢轨中大尺寸外来夹杂物主要来源于与钢液接触的钢包、中间包内衬等耐火材料的脱落、卷渣及钢液的二次氧化等,中间包过热度按 25 ~ 35 °C 控制,中间包钢水平均停留时间(750 ± 30) s、水口插入深度控制在 90 ~ 110 mm,结晶器液面波动 ≤ ± 3 mm 可以促进钢水中的夹杂物的去除。

#### 参考文献

- [1] 刘 浏. 如何建立高效低成本洁净钢平台[J]. 钢铁, 2010, 45(1): 1-10.
- [2] 周清跃, 王树青, 张银花, 等. 热处理钢轨若干问题的探讨[J]. 中国铁道科学, 2005, 26(1): 72-77.
- [3] 周清跃, 张银花, 陈朝阳, 等. 国内外钢轨钢研究及进展[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(6): 12-125.
- [4] 智建国, 陈爱梅. 重轨钢的洁净度控制技术[J]. 包钢科技, 2007, 33(6): 18-21.
- [5] 曾建华. 高洁净度钢轨钢的夹杂物控制技术[J]. 钢铁钒钛, 2007, 28(1): 48-52.
- [6] 杨 玉, 陈 昕, 金纪勇, 等. U75V 钢轨轨腰探伤不合原因的分析[J]. 钢铁, 2011, 46(2): 91-94.
- [7] 周德光, 罗伯钢, 曾 立, 等. 钢中氮的控制及其对质量的影响[J]. 炼钢, 2005, 21(1): 43-49.
- [8] 陈 永, 李桂军, 苟淑云. 提高重轨钢连铸大方坯质量的技术[J]. 钢铁钒钛, 2002, 23(4): 41-46.
- [9] 王晓元. 重轨钢中非金属夹杂物控制的研究[J]. 甘肃冶金, 2012, 34(3): 36-39.
- [10] 梁 旭, 周清跃, 张银花, 等. 钢轨中大尺寸外来夹杂物分析[J]. 钢铁, 2015, 50(5): 54-58.
- [11] 杨 玉, 庞兆夫, 陈 昕, 等. 连铸大方坯非金属夹杂物研究[J]. 炼钢, 2008, 24(2): 11-15.
- [12] 王建锋, 杨 森, 师艳秋, 等. 提高重轨钢钢包水口自开率的生产实践[J]. 河南冶金, 2016, 4(2): 51-53.
- [13] 段永卿, 王建锋, 郭朝军. 高碳铬轴承钢 GCr15 的生产实践[J]. 钢铁研究, 2016, 44(1): 50-54.
- [14] 孟劲松, 姜茂发, 朱英雄. 减少冷轧 IF 钢表面夹杂物的生产实践[J]. 钢铁, 2005, 40(12): 28-31.
- [15] 彭 冰. 重轨钢连铸技术的发展现状[J]. 武钢技术, 2009, 47(6): 58-64.
- [16] 刘 平, 智建国, 陈爱梅. 重轨钢的洁净度控制技术[J]. 包钢科技, 2007, 33(6): 18-21.
- [17] 李 峰. 重轨钢浇次第一炉钢冶金质量的研究[J]. 特殊钢, 2010, 30(2): 33-34.

王建锋(1979-), 男, 博士(2011年武汉科技大学), 高级工程师, 2003年河北理工学院(本科)毕业, 洁净钢冶炼及铸坯质量控制。E-mail: agwjf@163.com

收稿日期: 2019-12-23