

重轨冶炼过程非金属夹杂物的演变规律

张达先¹, 倪磊², 乔瑞栋², 麻晓光¹, 唐建平¹, 肖远悠³

- (1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司炼钢厂, 内蒙古 包头 014010;
3. 辽宁科技大学 材料与冶金学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要:通过对重轨工艺流程各环节取样,采用金相显微镜、扫描电镜—能谱分析方法,研究了冶炼过程中非金属夹杂物的形貌、组分和尺寸的变化。结果表明,冶炼过程中非金属夹杂物均为球状,其主要组分为 $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$,各组分含量比例随工艺环节有规律变化,尺寸随工艺环节推进逐渐减小,数量随工艺流程推进逐步减少。根据重轨冶炼过程中各工序夹杂物组分的变化规律,可以判断成品钢轨中夹杂物的主要来源。通过分析重轨中大尺寸夹杂物扫描电镜—能谱检测结果,可以推断重轨钢中大尺寸夹杂物是在连铸过程中由未上浮的脱氧产物和外来的夹杂物相结合组成的复合夹杂物。

关键词:重轨;工艺流程;夹杂物

中图分类号: TG115.21^{+3.3}

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2022)06-0015-04

Evolution Rules of Non-metallic Inclusions in Smelting Process of Heavy Rail

Zhang Da-xian¹, Ni Lei², Qiao Rui-dong², Ma Xiao-guang¹,
Tang Jian-ping¹, Xiao Yuan-you³

- (1. Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
2. Steel-making Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
3. School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, Liaoning, China)

Abstract: The changes of morphology, component and size for non-metallic inclusions in smelting process are studied with metalloscope and scanning electron microscope-energy spectrum analysis by sampling in each link of technological process of heavy rail. The results showed that the non-metallic inclusions in smelting process were spherical and their main components were $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ as well as the proportion of content for each component was changed regularly with technological links, sizes were decreased gradually and quantity was reduced with the advance of technological process. The main source of inclusions in rail could be judged according to the change laws of components for inclusions in each process of smelting process for heavy rail. It could be inferred that the large size inclusions in heavy rail

收稿日期: 2022-10-12

作者简介: 张达先(1988-),男,内蒙古包头市人,硕士,工程师,现主要从事夹杂物控制及稀土在钢中应用研究工作。

steel are compound inclusions composed of deoxidation product that is not upfloat combining with foreign inclusions during continuous casting process by analyzing the scanning electron microscope – energy spectrum detection results for large size inclusions in heavy rail.

Key words: heavy rail; technological process; inclusion

为保障列车运行安全,钢轨材质“高洁净度”的要求越来越严格。夹杂物是钢材中不可避免的一种冶金缺陷,钢轨中的夹杂物对其服役性能有不可忽视的影响。控制钢轨中夹杂物的级别,对提高钢轨使用寿命的作用显著,故而去除非金属夹杂物是提高重轨钢质量的主要途径之一^[1]。本文对重轨生产冶炼各工艺环节夹杂物的数量、尺寸、组分、来源进行分析和归纳,为重轨冶炼工艺的优化提供参考。

1 试验方案及检验方法

目前重轨的主要生产工艺流程为:铁水预处理脱硫→转炉→LF 精炼→VD 真空精炼→大方坯连铸^[2]。重轨钢采用无铝脱氧工艺,常用的脱氧剂是硅钙钡合金。为了研究夹杂物在冶炼过程中的变化规律,在脱氧合金化后、LF 处理出站后、VD 真空处

理出站后和中间包内取出固定规格的试样,试样规格为半径 25 mm、高度 10 mm 的圆饼状或半径 25 mm、高度 100 mm 的圆柱体^[3],所有试样规格相同。

试验过程中涉及样本炉数共计 13 炉,每炉对应取样工位取样 1—2 个。将试样按照炉号和取样工序进行编号,经磨制和抛光后,使用金相显微镜观察试样 100 mm × 20 mm 面积内的夹杂物尺寸和数量并统计分析,选出典型夹杂物^[4],并使用扫描电镜—能谱观察对典型夹杂物进行定性分析。

2 夹杂物检验结果和分析

2.1 各工序夹杂物尺寸和数量变化规律

重轨冶炼过程夹杂物均为球状。夹杂物的变化情况与结果分析如表 1 所示。

表 1 各工序夹杂物尺寸变化情况

取样工位	夹杂物尺寸范围 /μm	夹杂物数量(平均) /个	平均直径 /μm	现象说明
转炉出钢	13 ~ 100	2.3	56.0	钢中未加脱氧剂和合金,数量少,尺寸大。
脱氧合金化后	4 ~ 130	78.6	17.2	大量脱氧产物生成,部分夹杂物聚集长大,20 μm 以下夹杂物占比 80% 以上。
LF 处理出站后	4 ~ 130	22.7	22.9	大部分脱氧产物聚集长大,并上浮排出钢液,夹杂物数量大幅减少。
VD 处理出站后	7 ~ 75	10.7	18.5	夹杂物数量和尺寸减少。
中间包	6 ~ 53	7.3	17.0	夹杂物数量和尺寸进一步减少。

由表 1 可以看出,钢水中脱氧反应和夹杂物上浮主要在 LF 精炼工序前后发生。钢水经过 VD 处理和中间包放置过程夹杂物会进一步排出钢液,夹杂物平均尺寸逐步降低,但 20 μm 以上夹杂物依然存在。

从图 1 可以看出,钢液中夹杂物尺寸随工序推进而逐步减小,但平均尺寸在经过 LF 精炼处理后变化较小。钢液中夹杂物在脱氧合金化后数量最多,但大部分是小颗粒的脱氧产物,经过 LF 精炼处理后,大部分夹杂物上浮去除,在后续工序中夹杂物数量进一步减少。

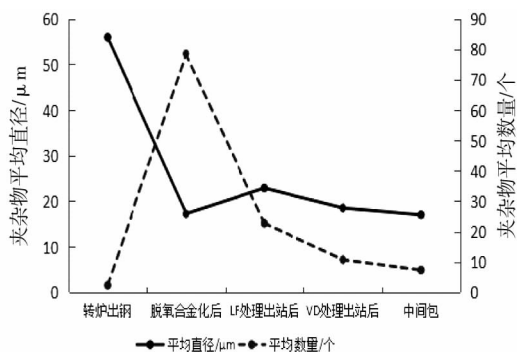


图 1 钢液中夹杂物平均数量和尺寸随工序变化情况

2.2 夹杂物成分随工序变化趋势

从6炉钢液中取样,对各工序不同尺寸的典型

夹杂物进行扫描电镜—能谱观察。典型夹杂物成分随工序变化情况见表2。

表2 不同工序夹杂物成分变化情况

取样工位	夹杂物尺寸 / μm	夹杂物主要成分(质量分数)/%							
		Si	Ca	Mg	Al	O	S	Mn	Ba
脱氧合金化后	35	12.36	19.40	2.06	27.14	35.85			3.18
	50	12.24	13.36	1.62	23.44	40.59		2.21	
	100	14.36	17.48	1.17	23.07	33.77		2.29	4.36
LF处理出站后	15	16.39	29.82	5.55	11.48	33.78	2.32		
	35	13.98	25.06	3.05	13.32	31.10	1.10		7.91
	75	12.14	23.60	5.99	4.06	26.97			4.02
VD处理出站后	20	17.53	34.91	6.02	7.16	32.80	1.57		
	35	15.44	37.12	5.99	5.14	30.99	5.32		
	50	13.96	35.10	6.06	5.80	21.72	6.77		
中间包	17	16.37	30.99	5.37	11.09	31.39	1.52		3.27
	40	24.85	29.19		1.09	39.50			
	53	13.35	8.71	8.36	9.52	39.39			

脱氧合金化后,夹杂物由于硅脱氧产生脱氧产物,使夹杂物中Si含量迅速上升,夹杂物中Ca含量较低,此时夹杂物中 $\omega(\text{Ca})/\omega(\text{Si})$ 平均值为1.29(波动范围1.09~1.57), $\omega(\text{Ca})/\omega(\text{Al})$ 平均值为0.68(波动范围0.57~0.76)。

经过LF精炼,大部分Si、Al脱氧产物上浮,夹杂物中Ca元素占比升高,Al元素占比降低,此时夹杂物中 $\omega(\text{Ca})/\omega(\text{Si})$ 平均值为1.85(波动范围1.79~1.94), $\omega(\text{Ca})/\omega(\text{Al})$ 平均值为3.40(波动范围1.88~5.81)。

经过VD真空处理后,夹杂物中Ca含量占比进一步升高,Al含量占比降低,夹杂物中 $\omega(\text{Ca})/\omega(\text{Si})$ 平均值为2.30(波动范围1.99~2.51), $\omega(\text{Ca})/\omega(\text{Al})$ 平均值为6.05(波动范围

4.88~7.22)。

到中包时,夹杂物中各元素含量变化情况复杂,小颗粒夹杂物成分特点符合LF精炼后钢液中夹杂物成分特点, $\omega(\text{Ca})/\omega(\text{Si})$ 平均值为1.89、 $\omega(\text{Ca})/\omega(\text{Al})$ 平均值为2.79,此时小颗粒夹杂物组分依然显示脱氧产物特征。在中间包内发现的大颗粒夹杂物中 $\omega(\text{Ca})/\omega(\text{Si}) = 0.65$ 、 $\omega(\text{Ca})/\omega(\text{Al}) = 0.91$ 或 $\omega(\text{Ca})/\omega(\text{Si}) = 1.17$ 、 $\omega(\text{Ca})/\omega(\text{Al}) = 26.78$,从组分上看夹杂物中Ca含量极低或Al含量极低,与前面工序中夹杂物均无法相匹配,此类夹杂物为开浇引流砂和耐材侵蚀脱落形成的复合夹杂物,所以呈现出组分复杂和尺寸大的特征。表3为各工序夹杂物中 $\omega(\text{Ca})/\omega(\text{Si})$ 、 $\omega(\text{Ca})/\omega(\text{Al})$ 平均值与波动范围情况。

表3 各工序夹杂物中 $\omega(\text{Ca})/\omega(\text{Si})$ 、 $\omega(\text{Ca})/\omega(\text{Al})$ 比值情况

项目	转炉出钢	脱氧合金化后	LF处理出站后	VD处理出站后	中间包(小颗粒夹杂物)
$\omega(\text{Ca})/\omega(\text{Si})$ 均值		1.29	1.85	2.30	1.89
$\omega(\text{Ca})/\omega(\text{Si})$ 波动范围		1.09~1.57	1.79~1.94	1.99~2.51	1.65~1.93
$\omega(\text{Ca})/\omega(\text{Al})$ 均值	1.16	0.68	3.40	6.05	2.79
$\omega(\text{Ca})/\omega(\text{Al})$ 波动范围	1.03~1.33	0.57~0.76	1.88~5.81	4.88~7.22	2.11~4.35

2.3 夹杂物尺寸与组分相关性分析

图2为夹杂物中各组分随工序变化情况,由图

2可以看出夹杂物中各组分在各工序的变化趋势。将图2与图1比较,可以发现冶炼过程中夹杂物尺

寸的变化规律与夹杂物中 Al 元素含量或 Al 和 Mg 元素含量之和的占比变化规律基本相同,与其他元素占比的变化规律不相符。这就说明,夹杂物的尺寸在各工序间的变化受夹杂物中 Al 元素含量或 Al 和 Mg 元素含量之和的占比影响。随着夹杂物中 Al、Mg 元素含量的减少,夹杂物的尺寸减小。

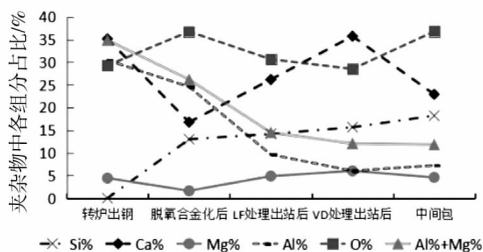


图 2 夹杂物中各组分随工序变化情况

图 3 为重轨中大尺寸夹杂物扫描电镜—能谱检测结果。图 3 (a) 夹杂物能谱分析结果 $\omega(\text{Ca})/\omega(\text{Si}) = 1.81$ 、 $\omega(\text{Ca})/\omega(\text{Al}) = 2.60$; 图 3 (b) 夹杂物能谱分析结果 $\omega(\text{Ca})/\omega(\text{Si}) = 1.42$ 、 $\omega(\text{Ca})/\omega(\text{Al}) = 26.69$ 。由此可以判断,该夹杂物是由脱氧产物和中间包外来夹杂物结合而产生的大尺寸夹杂物。对该夹杂物其他 4 个位置同样进行能谱分析,夹杂物中平均 Al 和 Mg 元素含量之和达到 13.37%,高于中间包夹杂物中 Al 和 Mg 元素含量之和的平均水平(11.80%)。这也说明,重轨钢中大尺寸夹杂物是在连铸过程中由未上浮的脱氧产物和外来的夹杂物相结合组成的复合夹杂物。

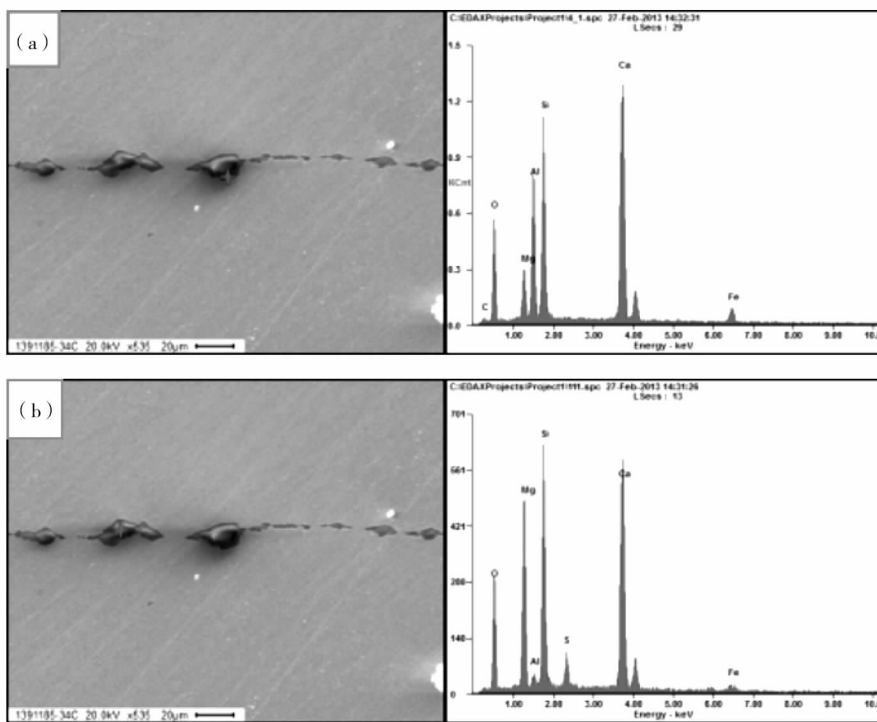


图 3 重轨中典型大尺寸夹杂物扫描电镜和能谱分析

3 结论

(1) 重轨钢冶炼过程随工序推进钢中夹杂物尺寸减小,数量减少。

(2) 重轨钢冶炼过程产生的夹杂物在各工序呈现出不同的组分特性。夹杂物的组分特性决定其尺寸,通常夹杂物中 Al、Mg 含量越高,夹杂物尺寸越大。

(3) 对重轨中大尺寸夹杂物进行分析,大尺寸夹杂物中 Al 和 Mg 元素含量之和高于中间包夹杂物中 Al 和 Mg 元素含量之和的平均水平;夹杂物中不同位置 Al 含量差异较大,说明重轨钢中大尺寸夹杂物是在连铸过程中由未上浮的脱氧产物和外来的夹杂物相结合组成的复合夹杂物。

(下转第 28 页)

表 10 批量化工业生产性能及标准要求

试验批次	屈服强度 R_{el}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率/%	冲击功平均值 $KV_2(-20\text{ }^\circ\text{C}, \text{全尺寸})/\text{J}$
3	534	663	24.0	240
	550	683	22.0	246
4	501	647	24.0	240
	528	656	25.0	232
5	509	638	24.0	212
	511	641	24.0	218
标准要求	≥ 460	550 ~ 720	≥ 17.0	≥ 34

4.4 小结

(1) 冶炼及连铸精确控制,管坯质量好;轧制控制精确,钢管轧态质量符合要求。

(2) 根据实验室得出的热处理制度结合生产实际,优化后的热处理制度切实可行,工艺参数应根据壁厚不同适当调整。

(3) 批量化生产无缝钢管性能表现优异,符合标准要求。

5 结论

(1) 根据 GB/T 8162—2018 标准成分要求,在选择淬火加回火热处理工艺条件下,钢种成分采用碳、硅、锰加适量细化晶粒微合金元素钛和钒,经实验室试验以及工业化试验,结果表明批量生产的高强 Q460 钢级结构管符合标准要求。

(2) 采用淬火加回火热处理工艺生产 Q460 钢级高强结构管,在标准要求范围内钢种各成分含量适当降低,可以有效降低碳当量,碳当量控制在 0.44 以下,为后续结构管焊接创造了良好条件。

(3) 经过淬火加回火工艺生产的 Q460 钢级高强结构管力学性能表现优异,同时具有很好的韧性表现,屈服强度不小于 500 MPa,抗拉强度不小于 620 MPa;断后伸长率不小于 20%; $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 下的平均纵向冲击值大于 180 J。

参 考 文 献

- [1] 何建中. 钢结构用钢及钢结构产品的发展与应用[J]. 包钢科技, 2018, 44(3): 1-8.
- [2] 彭在美. 2018 年中国钢管市场的预测与分析[J]. 焊管, 2018, 41(7): 6-13.
- [3] 陈香. Q460D 大直径厚壁高强度无缝钢管的研发[J]. 钢管, 2013, 42(1): 45-49.
- [4] 翟利平. GB/T 8162—2018《结构用无缝钢管》[J]. 钢管, 2019, 48(1): 75-77.
- [5] 刘中柱. 纯净钢及其生产技术[J]. 中国冶金, 1999, (4): 12-15.
- [6] 楚觉非. 工程机械用高强度结构用钢研究进展[J]. 江西冶金, 2013, 33(3): 4-7.
- [7] GB/T 8162—2018, 结构用无缝钢管[S].
- [8] 齐俊杰. 微合金化钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [9] 刘宗昌. 材料组织结构转变原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [10] 李素芹, 邹文正. 钢中残余有害元素对油井管质量的影响[J]. 特殊钢, 2003, 24(4): 31-33.
- [11] 印德俊. 钢中九害元素对钢的危害性及其对策[J]. 特殊钢, 1994, (1): 64-65.

(上接第 18 页)

参 考 文 献

- [1] 齐江华, 郑建国, 陈光友, 等. 重轨钢中大颗粒夹杂物的来源探讨[J]. 炼钢, 2017, 33(6): 62-66.
- [2] 樊志明, 杨吉春, 朱君, 等. 重轨钢中夹杂物的分析与控制[J]. 中国铸造装备与技术, 2021, 56(5): 75-78.
- [3] 刘越. 无铝脱氧重轨钢中 CASM 类夹杂物演变机制研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
- [4] 段光豪. 高速重轨钢 B 类夹杂物控制技术[J]. 武钢技术, 2017, 55(1): 23-25.