

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180420

抗疲劳应力钢中的夹杂物控制

康 伟¹, 金友林²

(1. 马钢(集团)控股有限公司办公室, 安徽 马鞍山 243003; 2. 马鞍山钢铁股份有限公司特钢公司, 安徽 马鞍山 243003)

摘 要: 为了有效控制抗疲劳应力钢中夹杂物危害, 通过对钢中典型有害夹杂物进行分析, 从脱氧工艺、精炼渣系、钙处理工艺、软吹工艺和连铸保护浇铸等方面进行了优化改进, 并取得相应效果。实现了钢中夹杂物有效控制, 钢中夹杂物形状主要以小尺寸球状和块状为主, 夹杂物成分主要以钙铝酸盐和 MnS 复合夹杂物为主, 夹杂物尺寸控制在 20 μm 以内, 其中 90% 以上夹杂物都控制在 7 μm 以内。

关键词: 夹杂物; 脱氧工艺; 精炼渣系; 保护浇铸

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2019)05-0027-05

Inclusions control in anti-fatigue stress steel

KANG Wei¹, JIN You-lin²

(1. General Office, Magang (Group) Holding Co., Ltd., Ma'anshan 243003, Anhui, China; 2. Special Steel Company of Ma'anshan Iron and Steel Co., Ltd., Ma'anshan 243003, Anhui, China)

Abstract: In order to effectively control the inclusion damage in steel with anti-fatigue stress, through the theoretical analysis of the typical harmful inclusions in the fatigue stress steel, some optimizations and improvements have been carried out from the aspects of deoxidation process, refining slag system, calcium treatment process, soft blowing process and casting protection in continuous casting etc, and the corresponding effects have been achieved. The effective control of inclusions in the steel is realized, the shape of inclusions is mainly small spherical and block-shaped, the inclusions are mainly composed of calcium aluminate and MnS composite inclusions, the inclusion size is controlled within 20 μm, of which more than 90% of the inclusions are controlled within 7 μm.

Key words: inclusion; deoxidation process; refining slag system; casting protection

抗疲劳应力钢广泛应用于轨道交通、汽车、能源及机械制造等行业, 其产品对强度、延伸、韧性及抗疲劳性能等性能指标有很高要求。该类钢中夹杂物控制水平直接影响到该产品性能指标, 因此对于抗疲劳应力钢中夹杂物有效控制至关重要^[1-7]。夹杂物危害程度与夹杂物种类、形状和尺寸密切相关。日本在钢中夹杂物研究取得了比较大成功, 一方面控制了夹杂物形貌尺寸, 另一方面控制了夹杂物组合形式, 很多产品中实现了塑性 MnS 类夹杂物包裹^[8-9]。本文以马钢抗疲劳应力钢工艺为研究对象, 针对原

工艺中存在问题, 从精炼渣系、软吹工艺以及连铸保护浇铸等方面进行了优化改进, 并对比分析了工艺改进后的控制效果。

1 冶炼工艺及方法

抗疲劳应力钢工艺流程为: 120 t EAF—LF 精炼—RH 真空处理—CCM。为了控制夹杂物, 在电炉终点控制、脱氧合金化工艺及 LF 精炼过程及连铸保护浇注控制方面进行优化和改进。抗疲劳钢主要成分见表 1。

表 1 抗疲劳应力钢代表钢种主要成分 (质量分数)

Table 1 Main component of typical steel grade of anti-fatigue stress steel %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Al
0.45~0.51	0.25~0.37	0.70~0.80	≤0.012	≤0.008	0.15~0.25	0.010~0.025

本研究对各工序进行统计分析和优化控制, 并对成品取样和借助 ASPEX 对夹杂物进行统计

和分析, 得出工艺改进和优化后的夹杂物控制效果。ASPEX 是一种改进的扫描电镜和能谱分析系

作者简介: 康 伟(1985—), 男, 大学本科, 工程师; E-mail: kwkw103@163.com; 收稿日期: 2018-11-06

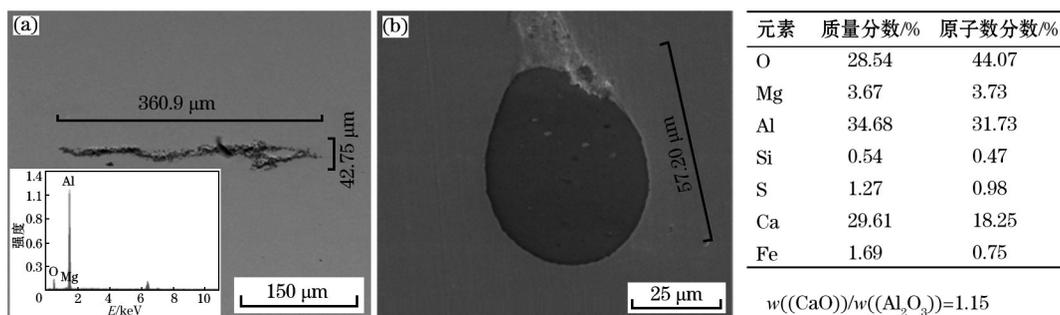
统,对试样表面进行夹杂物自动扫描检测和分析,并通过系统软件对夹杂物种类、尺寸及数量进行统计。

2 工艺改进前钢中夹杂物特征及危害

2.1 工艺改进前夹杂物特征

在工艺改进前,对抗疲劳应力钢轧制的产品进行取样,并进行夹杂物统计和分析如图 1 所示。分析发现,原工艺中存在两类有害夹杂物,直接影

响到该产品性能质量。(1)长条状 Al_2O_3 类夹杂物,如图 1(a)所示,夹杂物成分主要以 Al_2O_3 为主,尺寸一般超过 $200\ \mu\text{m}$; (2)球状钙铝酸盐类复合型夹杂物,如图 1(b)所示,夹杂物成分主要以 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ 复合型夹杂物为主,尺寸一般超过 $50\ \mu\text{m}$ 。以上两类夹杂物均为脆性夹杂物,对抗疲劳应力钢危害极大,其产品在服役过程中容易在夹杂物区域产生疲劳裂纹,需要通过工艺优化改进加以严格控制。



(a) Al_2O_3 类夹杂物; (b) 钙铝酸盐类夹杂物。

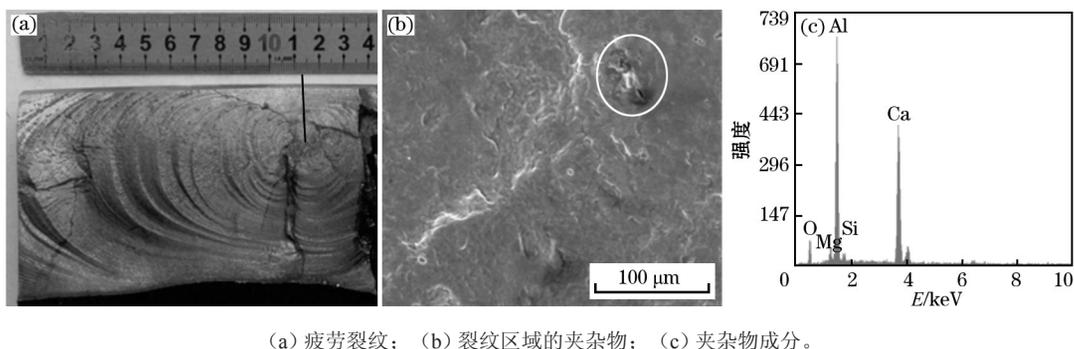
图 1 抗疲劳应力钢中典型有害夹杂物特征

Fig. 1 Characteristics of typical harmful inclusions in fatigue-resistant stress steel

2.2 抗疲劳应力钢中夹杂物危害

抗疲劳应力钢服役过程中因夹杂物导致的疲

劳裂纹特征如图 2 所示。由图 2 可见,疲劳裂纹裂纹源于夹杂物,夹杂物成分主要为含有少量钙的氧



(a) 疲劳裂纹; (b) 裂纹区域的夹杂物; (c) 夹杂物成分。

图 2 抗疲劳应力钢中服役过程中疲劳裂纹及其中夹杂物特征

Fig. 2 Fatigue cracks and its characteristics of inclusions in servicing anti-fatigue stress steel

化铝类夹杂物。

3 抗疲劳应力钢中夹杂物的控制措施

3.1 脱氧工艺控制

脱氧工艺直接影响到钢中 $w(\text{T}[\text{O}])$ 控制水平和夹杂物类型及尺寸。初炼炉冶炼终点钢水中溶解氧都较高,一般都在 $0.050\ 0\%$ 以上。根据冶金热力学和动力学条件,初炼炉出钢过程中采用铝脱氧,形成的脱氧产物为簇群状氧化铝夹杂,此类夹杂物容易上浮去除^[10]。

抗疲劳应力钢出钢过程采用“强铝”脱氧工艺,即一次性将钢中溶解氧降低到 $0.001\ 0\%$ 以下,有利于钢中夹杂物有效控制。针对抗疲劳应力钢中典型钢种,根据钢中成分特点和冶金热力学计算^[11-12],电炉终点钢水 $w(\text{C})$ 与钢水溶解氧和出钢加铝铁量之间的关系如图 3 和图 4 所示。出钢脱氧后钢水中 $w([\text{Al}]_s)$ 控制目标为 $0.030\% \sim 0.050\%$,生产实际中按图 3 加入铝铁脱氧后,钢水中 $w([\text{Al}]_s)$ 均能控制在目标范围。

3.2 精炼渣系控制

钢水精炼过程中精炼渣系的重要作用之一是

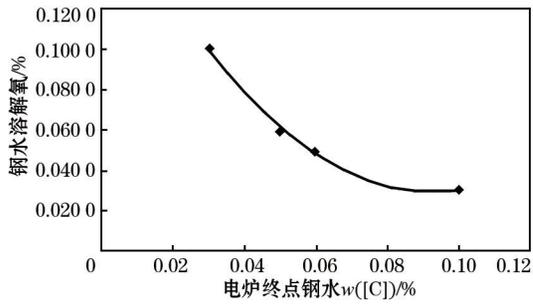


图3 电炉终点钢水 $w([C])$ 与钢水溶解氧关系
Fig. 3 Relationship between terminal $w([C])$ and dissolved oxygen of molten steel in EAF

吸附去除钢水中夹杂物,因此精炼渣系优劣对钢中夹杂物控制至关重要。对于抗疲劳应力钢合适精炼渣关键指标控制要求:碱度 $R \geq 4$, $w((CaO))/w((Al_2O_3)) = 1.5 \sim 2.2$, $w((FeO)) + w((MnO)) \leq$

1.0%。采取一定控制措施后 LF 精炼渣控制情况如图 5 所示,由图可见,精炼渣的碱度稳定控制在 5~8,精炼渣 $w((CaO))/w((Al_2O_3))$ 稳定控制在 1.5~2.2,精炼渣 $w((FeO)) + w((MnO))$ 稳定控制在 0.8% 以内,精炼渣系控制较好,渣系关键指标均控制在最佳状态合适范围,有利于夹杂物吸附和去除。

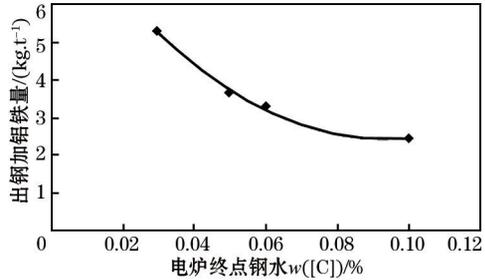
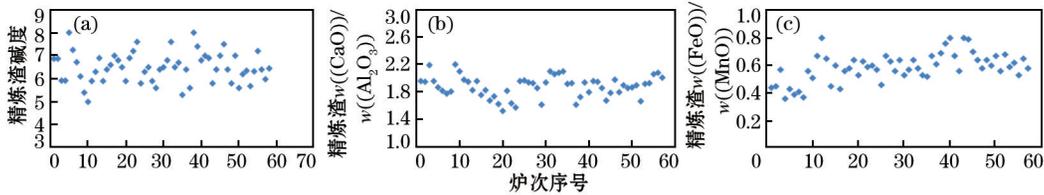


图4 电炉终点钢水 $w([C])$ 与出钢加铝量关系
Fig. 4 Relationship between terminal $w([C])$ and aluminum feeding amount of molten steel in EAF



(a) 精炼渣的碱度; (b) 精炼渣的 $w((CaO))/w((Al_2O_3))$; (c) 精炼渣 $w((FeO)) + w((MnO))$ 。

图5 LF 精炼渣控制效果

Fig. 5 Control effect of refining slag in LF

3.3 钙处理工艺控制

钙处理过程能够实现钢中残留的块状 Al_2O_3 夹杂的变性处理,将固态的块状 Al_2O_3 夹杂变成低熔点的液态钙铝酸盐(一般在精炼温度下,形成 $CaO \cdot Al_2O_3$ 、 $7CaO \cdot 12Al_2O_3$ 、 $3CaO \cdot Al_2O_3$ 都为液态),提高夹杂物去除效果,降低其危害程度^[13-14]。

钙处理的喂线量与钢中 $w(T[Ca])$ 的关系如图 6 所示。由图可见,在喂钙线量超过 2.0 m/t,钢中钙含量相对较为稳定且略有下降,表明钢中夹杂物变性效果较好,同时钢中钙铝酸盐类夹杂物得到了有效稳定控制。

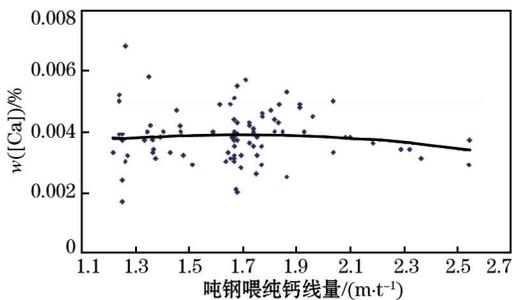


图6 钙处理工艺喂钙线量与钢水中关系
Fig. 6 Relationship between calcium feeding amount and in molten steel in calcium treatment process

根据生产数据统计,要实现较好的钙处理效果,纯钙线喂入量不能低于 2.0 m/t,同时喂线速度要求不低于 180 m/min。钙处理效果较好的钢中残留钙铝酸盐夹杂物特征和组成如图 7 所示。由图 7 可见,钙处理效果明显的夹杂物主要为球状钙铝酸盐类夹杂物,根据夹杂物组成判断夹杂物介于 $CaO \cdot Al_2O_3$ 和 $12CaO \cdot 7Al_2O_3$ 之间,在精炼温度下均为液态,容易聚集上浮去除。

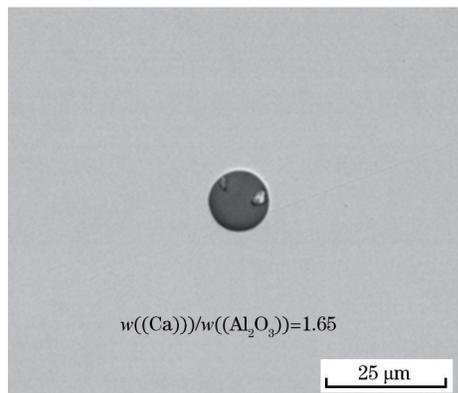


图7 钙处理效果明显的夹杂物特征
Fig. 7 Characteristics of inclusion with obvious calcium treatment effect

3.4 软吹工艺控制

软吹工艺能够促进钢中夹杂物聚集长大和上浮去除,通过对软吹工艺的气体流量以及软吹时间的优化改进,提高软吹工艺实际效果,促进夹杂物充分上浮去除。优化工艺后经过 15 min 软吹前后钢中 $w(\text{T[O]})$ 变化的对比如图 8 所示。由图 8 可见,软吹过程 $w(\text{T[O]})$ 都有所降低,软吹后 $w(\text{T[O]})$ 都能控制在 0.001 0% 以内,表明软吹工艺对夹杂物上浮去除效果明显。因此工艺要求,软吹工艺时间不低于 15 min。

3.5 连铸二次氧化控制

抗疲劳应力钢都为含铝钢,钢水在浇注过程中防止钢水二次氧化至关重要,直接影响到钢中夹杂物控制水平。针对连铸工艺特点,对连铸过程中密封和氩封进行了优化改进,同时对连铸中包的清洁、氩扫等操作进行了优化改进。连铸过程钢水中

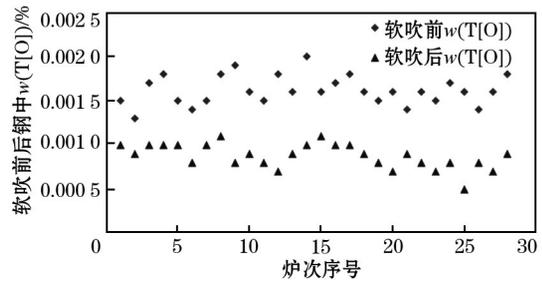
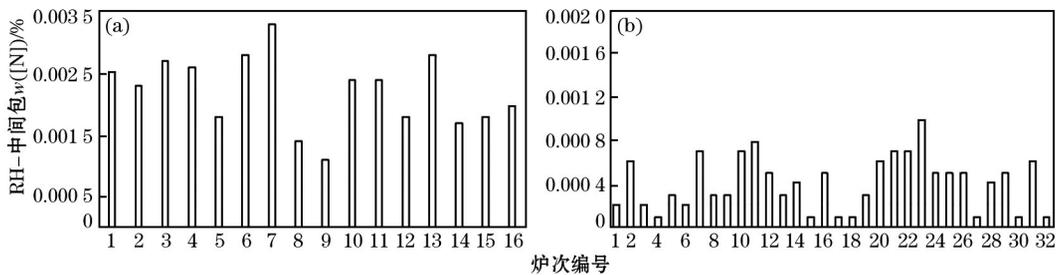


图 8 软吹前后钢中 $w(\text{T[O]})$ 变化
Fig. 8 $w(\text{T[O]})$ change in steel before and after soft blowing

氮质量分数变化能够间接反应钢水二次氧化程度,连铸保护浇注改进前后的钢水增氮情况如图 9 所示。由图可见,改进前连铸过程钢水增氮大多数都在 0.002 0% 以上,工艺改进后钢水增氮量都控制在 0.001 0% 以内,绝大多数在 0.000 5% 以内,改进后连铸保护浇注显著改善。



(a) 改进前; (b) 改进后。

图 9 改进前后 RH 中包 $w(\text{[N]})$ 变化

Fig. 9 Variation of $w(\text{[N]})$ in RH tundish before and after improvement

3.6 抗疲劳应力钢中夹杂物控制效果

工艺改进后钢中夹杂物类型特征有明显改变,夹杂物主要以钙铝酸盐和 MnS 复合夹杂物为主,其中钙铝酸盐 + MnS 复合夹杂物占 76%, MnS 类夹杂物占 18%, TiN 类夹杂物占 6%;而解剖国外代表先进水平的同类产品试样,其夹杂物类型主要以 Al_2O_3 和

MnS 复合夹杂物为主,其中 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MnS}$ 复合夹杂物占 80%, MnS 类夹杂物占 16%, TiN 类夹杂物占 4%。改进后夹杂物尺寸分布特征和国外先进水平比较见表 2。由表 2 可见,改进后夹杂物控制水平与国外先进水平相当,夹杂物尺寸都控制在 20 μm 以内,其中 90% 以上夹杂物都控制在 7 μm 以内。

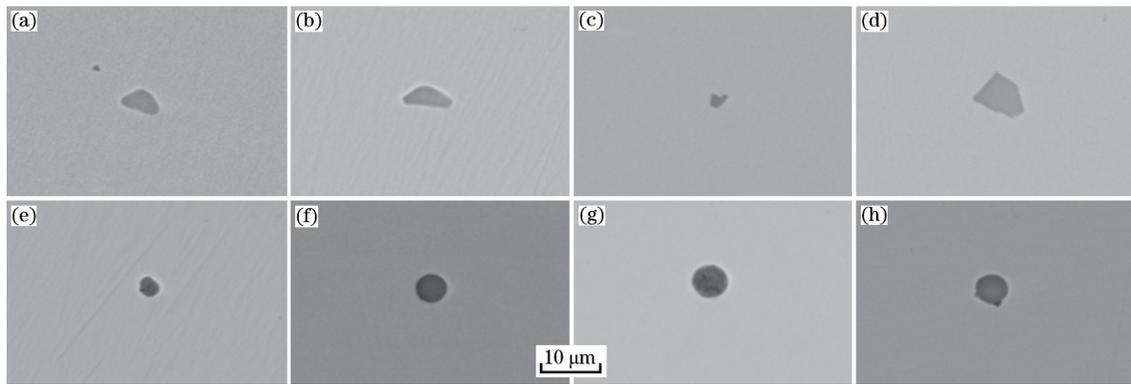
表 2 改进后夹杂物尺寸分布特征和国外同类钢种先进控制水平比较

Table 2 Comparison of size distribution characteristics of inclusions after improvement and advanced control level of similar foreign steel grades

钢种	夹杂物密度/ ($\text{个}\cdot\text{mm}^{-2}$)	夹杂物尺寸分布/%				
		1~3 μm	4~7 μm	8~15 μm	16~20 μm	>20 μm
国外同类钢	110	80.0	11.7	6.4	1.9	0
改进后	116	72.1	19.8	6.1	2.0	0

改进后钢中典型夹杂物特征如图 10 所示。由图可见,钢中残留夹杂物尺寸较小,形

状主要为球状或块状,对产品的性能危害相对较小。



(a)、(b) MnS; (c)、(d) TiN; (e)、(f) Al-Ca-Mg-Mn-S-O; (g)、(h) Al-Ca-Mg-Mn-S-O。

图 10 改进后抗疲劳应力钢中典型夹杂物特征

Fig. 10 Characteristics of typical inclusions in improved fatigue stress steel

4 结论

(1) 工艺改进前抗疲劳应力钢中存在长条状 Al_2O_3 夹杂物和大尺寸球状钙铝酸盐类夹杂物, 该类夹杂物是产品在服役过程中产生疲劳裂纹的裂纹源, 严重危害到产品的性能质量。

(2) 通过对钢中有害夹杂物分析, 从脱氧工艺、精炼渣系、钙处理工艺、软吹工艺以及连铸保护浇铸等方面进行了工艺研究, 并制定相应的改进措施, 各项过程质量指标取得了明显的改善。

(3) 通过工艺改进措施实施, 抗疲劳应力钢中夹杂物控制得到有效控制, 钢中夹杂物主要为钙铝酸盐和 MnS 复合夹杂物为主, 夹杂物尺寸均在 $20\ \mu\text{m}$ 以内, 其中 90% 以上控制在 $7\ \mu\text{m}$ 以内, 与国外同类产品先进控制水平在夹杂物类型和尺寸控制方面基本相当。

参考文献:

- [1] 刘铁牛, 杨文, 张立峰, 等. 帘线钢轧制和拉拔过程中夹杂物变形能力的研究[J]. 炼钢, 2018(2): 25. (LIU Tie-niu, YANG Wen, ZHANG Li-feng, et al. Investigation on the deformability of inclusions in tire cord steels during processes of hot-rolling and cold-drawing[J]. Steelmaking, 2018(2): 25.)
- [2] 安杰, 王哲, 李润霞, 等. 汽车齿轮钢 8620RH 的洁净度[J]. 中国冶金, 2016, 26(9): 33. (AN Jie, WANG Zhe, LI Run-xia, et al. Cleanliness of automobile gear steel 8620RH[J]. China Metallurgy, 2016, 26(9): 33.)
- [3] CUI Huai-zhou, CHEN Wei-qing. Effect of boron on morphology of inclusions in tire cord steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2012, 19(4): 22.
- [4] 邓志银, 周业连, 朱苗勇. 铝镇静钢中夹杂物形态对其去除的影响[J]. 钢铁, 2018, 53(1): 34. (DENG Zhi-yin, ZHOU Ye-lian, ZHU Miao-yong. Effect of state of inclusions on removal in Al-killed liquid steel[J]. Iron and Steel, 2018, 53(1): 34.)
- [5] 周业连, 邓志银, 朱苗勇. 钢-渣界面液态夹杂物分离过程数值模拟[J]. 钢铁, 2018, 53(7): 31. (ZHOU Ye-lian, DENG Zhi-yin, ZHU Miao-yong. Numerical simulation on separation process of liquid inclusion at steel-slag interface[J]. Iron and Steel, 2018, 53(7): 31.)
- [6] 黄宇, 谢有, 成国光, 等. H13 钢中 Mg-Al-O 系夹杂物的形成机理及控制[J]. 钢铁, 2017, 52(6): 34. (HUANG Yu, XIE You, CHENG Guo-guang, et al. Formation mechanism and control of Mg-Al-O inclusions in H13 steel[J]. Iron and Steel, 2017, 52(6): 34.)
- [7] 邹明, 徐荣媛, 李积鹏, 等. Ti-IF 钢非金属夹杂物形核热力学和演变机理[J]. 中国冶金, 2017, 27(7): 12. (ZOU Ming, XU Rong-huan, LI Ji-peng, et al. Nucleation thermodynamic and evolution of non-metallic inclusions in Ti-IF steel[J]. China Metallurgy, 2017, 27(7): 12.)
- [8] 木村世意, 王艳红. 帘线钢中夹杂物的控制技术[J]. 鞍钢技术, 2005(2): 55. (Mucun Shiyi, WANG Yan-hong. Control technology of inclusions in cord steel[J]. Angang Technology, 2005(2): 55)
- [9] 黄希祜. 钢铁冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005. (HUANG Xi-hu. Principles of Steel Metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005.)
- [10] 张鉴. 炉外精炼的理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999. (ZHANG Jian. Theory and Practice of Ladle Refining[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999.)
- [11] 王新华, 陈斌, 姜敏, 等. 渣-钢反应对高强度合金结构钢中生成较低熔点非金属夹杂物的影响[J]. 钢铁, 2008, 43(12): 28. (WANG Xin-hua, CHEN Bin, JIANG Min, et al. Effect of slag-metal reaction on formation of non-metallic inclusions of lower melting temperature in high strength alloyed structural steel[J]. Iron and Steel, 2008, 43(12): 28.)
- [12] 姚同路, 刘浏, 李树庆, 等. 铝镇静钢夹杂物形态控制工艺研究[J]. 钢铁, 2010, 45(11): 37. (YAO Tong-lu, LIU Liu, LI Shu-qing, et al. Inclusions modality controlling of aluminium-killed steel[J]. Iron and Steel, 2010, 45(11): 37.)
- [13] 林琰, 李勇, 吴伟, 等. 转炉底吹气体对螺纹钢性能的影响[J]. 中国冶金, 2016, 26(1): 13. (LIN Ying, LI Yong, WU Wei, et al. Effect of bottom-blowing gas on properties of twisted steel[J]. China Metallurgy, 2016, 26(1): 13.)
- [14] 贺道中, 苏振江, 周志勇. 铝脱氧钢水钙处理热力学分析与应用[J]. 湖南工业大学学报, 2010, 24(3): 5. (HE Dao-zhong, SU Zhen-jiang, ZHOU Zhi-yong. Thermodynamic analysis and application of calcium treatment on aluminium-killed steel[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2010, 24(3): 5.)