

夹杂物控制与去除技术研究

康伟^{1,2}, 栗红^{1,2}, 李泊³, 朱晓雷^{1,2}, 杨骥^{1,2}

海洋装备金属材料及应用国家重点实验室 辽宁 鞍山 114009; 2. 鞍钢钢铁研究院炼钢技术研究所, 辽宁 鞍山 114009; 3. 鞍钢股份制造管理部, 辽宁 鞍山 114021)

Application and development of inclusion control and removal technology

KANG Wei^{1,2}, LI Hong^{1,2}, LI Bo³, ZHU Xiao-lei^{1,2}, YANG Ji^{1,2}

(1. Key Laboratory of Metal Materials for Marine Equipment and Application, Anshan 114009, Liaoning, China; 2. Ansteel Group Iron and Steel Research Institute, Anshan 114009, Liaoning, China; 3. Product Making Department, Angang Steel Company Limited, Anshan 114021, Liaoning, China)

1. 前言

夹杂物对于钢材性能和表面质量有着重要影响, 不加以控制会使钢材出现表面缺陷并降低钢材性能, 例如 IF 钢冷轧薄板表面的线性或斑点缺陷一般是由铸坯尤其是表层中夹杂物造成,

钢热加工时如果夹杂物变形很小或根本不变形, 钢基体与夹杂物界面上会形成微裂纹、空洞等, 在其后工件服役过程容易成为疲劳破坏源^[1-4]。随着对于夹杂物不断深入研究, 提出了洁净钢的概念, 即当钢中杂质元素或非金属夹杂物的数量、尺寸或分布对产品性能没有影响时认为是洁净钢, 目前我国国内也已经搭建起洁净钢生产平台^[5-7]; 氧化物冶金 (Oxide Metallurgy) 的概念, 最早是于 1990 年, 由日本的高村仁一和沟口庄三等提出, 传统观点认为, 非金属夹杂物会导致钢结构内部的缺陷, 是有害的。然而, 对于较大的非金属夹杂物而言是有害的, 但对于微米级的氧化物而言, 可通过控制其大小尺寸、排列分布和组成, 从而让钢的性能得到一个质的提升和改善^[8-10]。

为丰富和推进夹杂物控制与去除技术的发展实践, 本文开展了外加粉剂、不同脱氧方式、中间包外加合金等夹杂物控制与去除技术的研究工作。

2. 夹杂物控制技术与去除技术实践

2.1 喷吹粉剂对夹杂物的影响

2.1.1 试验方案

选取 EH36 为试验钢种, 采用喷射法在中间包长水口向钢水中喷吹 CaO 粉剂, 共进行一个浇次 4 罐试验, 其中 1、2、3 罐进行喷粉试验, 第 4 罐作为对比罐次, 试验方案如下:

表 1 试验方案

Table.1 Experimental scheme

熔炼号	罐次	粉剂种类	粉剂粒度	喷吹粉剂量	备注
105D0799	1	CaO	<5 μ m	2.414kg	
105D0800	2	CaO	<5 μ m	2.414kg	
106D0819	3	CaO	<5 μ m	1.207kg	浇铸中后期管路堵塞.
105D0801	4	—	—	—	对比罐次, 只吹氩气

每罐取 RH 或 LF 搬出钢水样 2 个, 每罐取浇铸中期钢水样各 2 个, 每罐钢在第 2 块铸坯头部沿拉坯

方向取 70mm，加工检验如图 1 所示：

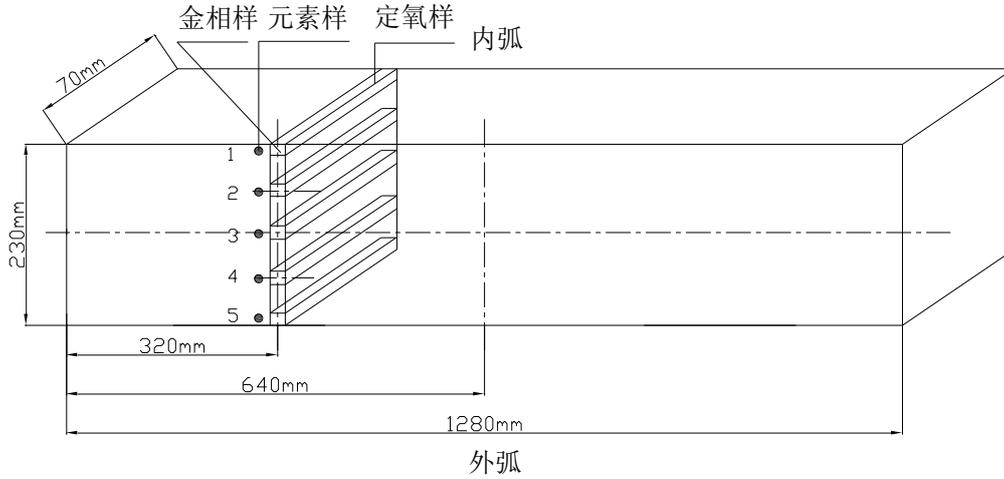


图 1 铸坯加工检验示意图
Fig.1 Sampling sketch of cast slab

铸坯试样主要进行化学成分 T[O]、[N]含量分析，应用 AxioSkop200 金相显微镜，放大倍数为 500X，观察视场面积为 20mm²，进行夹杂物定量金相分析。

2.1.2 试验结果

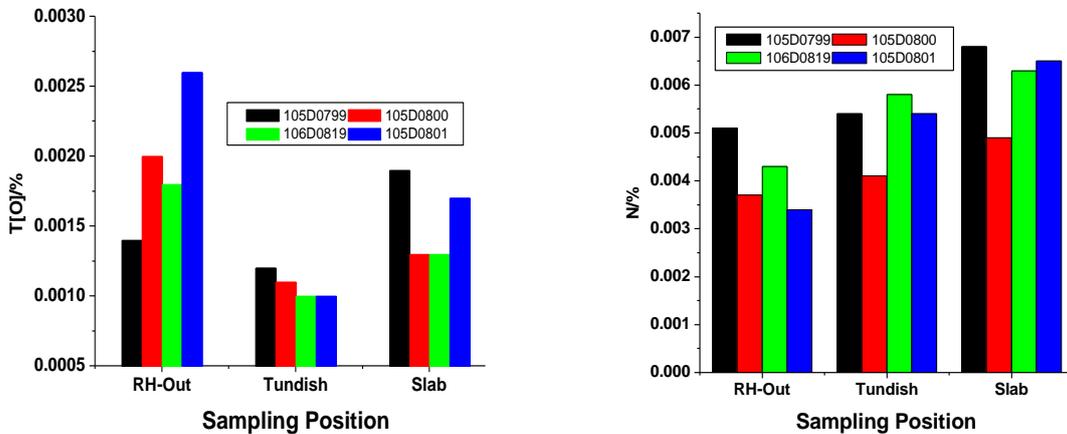


图 2 各精炼位置 T[O]、[N]含量结果

Fig.2 The content of T[O] and [N] at refining position

注：各个工位 T[O]、[N]含量均为平均值

由图 2 所示，从铸坯中 T[O]、[N]含量分析结果来看，第 1 罐（喷粉罐次）高于其它罐次，T[O]、[N]含量的增加，可能是由于刚开始浇铸保护浇注问题所造成的。第 2、3 罐次属于稳定浇注，中包和铸坯中的 T[O]、[N]含量变化不大，第 4 罐中包和铸坯中的 T[O]、[N]含量都略有增加。

以图 1 中 2 号位所取的金相试样为代表，利用金相显微镜进行了夹杂物定量分析，结果如下：

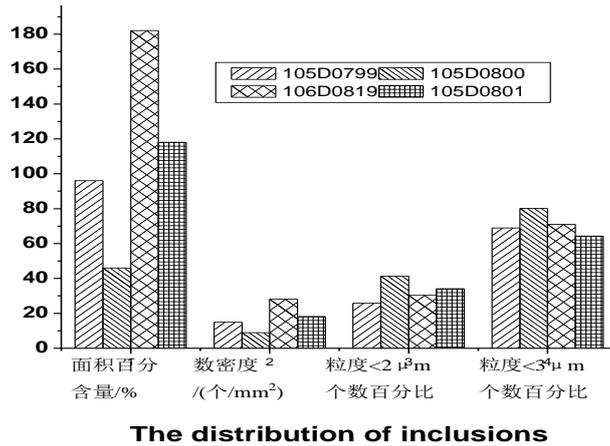


图 3 铸坯夹杂物分布

Fig.3 The inclusions distribution of slab

由图 3 可以看出，第 1、2 罐铸坯夹杂物面积含量和数密度最低，并且相同视场下小尺寸夹杂物数量比例较高，利用 SEM 对夹杂物进行定性分析，结果见下表：

表 2 铸坯中夹杂物类型、形貌描述

Table.2 The type and morphology of inclusions in cast slab

熔炼号	取样位置	样号	夹杂物类型、形貌概述
105D0799 (1)	距内弧 1/4	12	夹杂物为氧化物、硫化物复合夹杂，氧化物夹杂占据复合夹杂的中央、少量硫化物夹杂围绕在外，夹杂物粒径大多小于 3μm
105D0800 (2)	距内弧 1/4	22	夹杂物为大量氧化物夹杂，少量氧化物、硫化物复生夹杂，氧化物夹杂圆形居多，氧化物夹杂粒径大多小于 2.5μm
106D0819 (3)	距内弧 1/4	32	夹杂物为氧化物、硫化物复生夹杂，以氧化物为核心，硫化物围绕氧化物核心形成，夹杂物粒径大多小于 3μm
105D0801 (4)	距内弧 1/4	42	夹杂物为氧化物、硫化物复生夹杂，以氧化物为核心，硫化物围绕氧化物核心形成，夹杂物粒径大多小于 3μm

2.1.3 分析与讨论

试验罐次和对比罐次铸坯中夹杂物类型均为氧化物为核心外面包裹硫化物的复合夹杂，以及少量单独存在的氧化物或硫化物颗粒，夹杂物尺寸小于 3μm 占 68%以上。试验罐次中尺寸在 2μm 左右的圆形颗粒夹杂物其组成为氧化物与硫化物复合夹杂：O-Mg-Al-S-Ca-Mn-Fe。试验罐次铸坯中夹杂物的数密度和面积百分含量参数明显要少于对比罐次，从夹杂物角度来看，所喷入的 CaO 粉剂并没有完全存留在钢水中，而是与钢中的夹杂物反应，形成复合型夹杂物上浮至渣中去除，起到了去除夹杂的效果。

2.2 脱氧方式改变对于夹杂物的影响

2.2.1 试验方案

选取 AG1F31 为试验钢种，进行一个浇次 4 罐钢的试验，前 2 罐均采用铝脱氧，后两罐用硅脱氧，熔

炼信息如下：

表 3 试验罐次及脱氧方式

Table.3 Test trial and deoxidization method

熔炼号	浇铸罐次	脱氧方式
3D6047	1	Al
2D5831	2	Al
3D6049	3	Si
3D6050	4	Si

每罐取铸坯样进行氧、氮化学成分分析及夹杂物检验，铸坯取样加工方式如图 1 所示。

2.2.2 试验结果

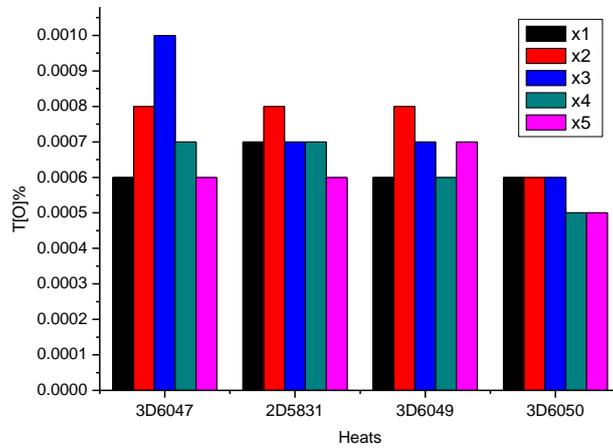


图 4 铸坯各位置全氧含量

Fig.4 The oxygen content at different location in cast slab

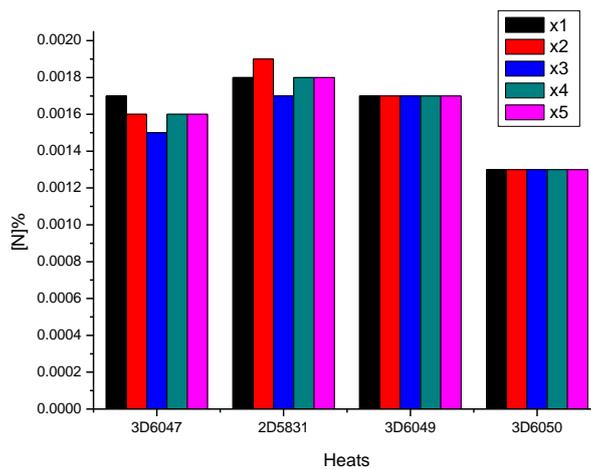


图 5 铸坯各位置氮含量

Fig.5 The nitrogen content at different location in cast slab

图 4、图 5 所示试验罐次所对应铸坯的氧、氮含量相差不大，全氧含量稳定在 10ppm 以下，氮含量在

20ppm 以内，从检验结果看，脱氧方式对铸坯氧、氮含量影响不大。继续对铸坯进行夹杂物检验分析，结果如下：

表 4 铸坯中夹杂物类型、分布及形貌

Table.4 The type, distribution and morphology of inclusions in cast salb

脱氧方式	熔炼号	夹杂物类型及分布	夹杂物形貌
Al 脱氧	3D6047	以小颗粒 Al ₂ O ₃ 为主，独立分布，有的夹杂物中含有 Mg。	参见图 6
	2D5831		
Si 脱氧	3D6049	小颗粒 Al ₂ O ₃ ，含有 Mg 的 Al ₂ O ₃ ，氧硫复合夹杂。	参见图 7
	3D6050		

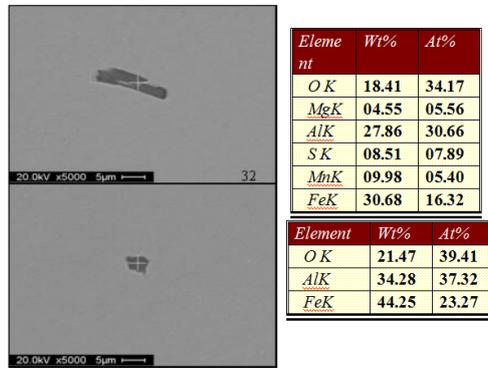


图 6 Al 脱氧罐次铸坯夹杂物形貌及组成

Fig.6 The inclusions morphology and chemical composition in Al deoxidation heat

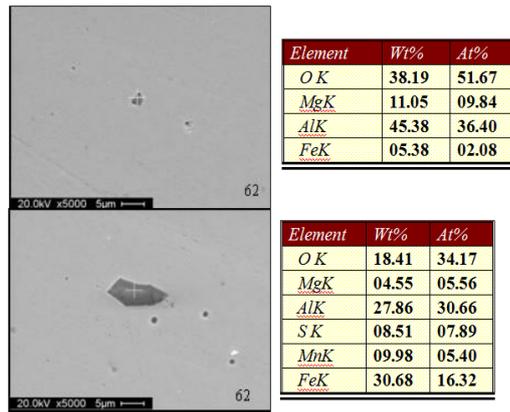


图 7 Si 脱氧罐次铸坯夹杂物形貌及组成

Fig.7 The inclusions morphology and chemical composition in Si deoxidation heat

2.2.3 分析与讨论

相同工艺制度下，Al 脱氧与 Si 脱氧对于硅钢的纯净度影响大致相同，都能保证铸坯中较低的氧、氮含量，Al 脱氧与 Si 脱氧的夹杂物种类有微小差异，分布及尺寸区别不大。

2.3 中间包去夹杂的研究

2.3.1 试验方案

试验钢种为 AB782A,工艺路线为：转炉—ANS—连铸，脱氧制度为 AL 脱氧，其成分（质量分数）如下表所示：

表 5 试验用 AB782A 钢种成分
Table.5 The chemical composition of test steel

C	Si	Mn	P	S	Als	N
0.065	0.012	0.22	0.0174	0.0118	0.013	0.0012

连铸开浇前，中包烘烤结束后，向中间包湍流控制器内加入 11kg 硅铁合金，其余操作条件不变，且试验在同一铸机上进行，进行加硅铁试验和正常开浇试验，每次试验条件相同。取连铸开浇的头坯，头坯出铸机后切除 1m 坯头后，沿连铸方向在铸坯宽度 1/4 处取断面规格为 150 mm×230mm,长度为 2m 的样进行研究，试验坯沿连铸方向每隔 100mm 进行取样成分分析，取样位置为距内弧 1/4 处，图 8 为样坯取样方案。

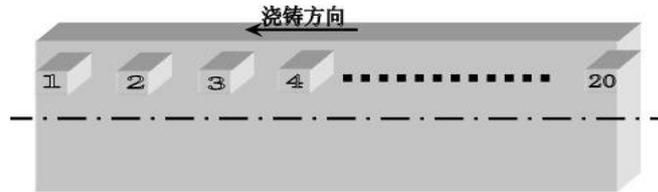


图 8 试验坯取样方案

Fig.8 Sampling sketch of test slab

取样点编号以试验坯坯头为起始处，按连铸方向依次标记为 1、2、3、4...20，每个位置都进行 [O]、[N] 分析，并在 1、5、10、15、20 处取金相样进行夹杂物检验。

2.3.2 试验结果

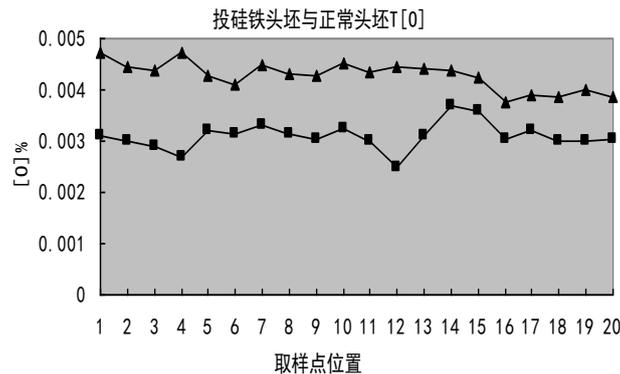


图 9 T[O]含量分析结果

Fig.9 The content of T[O] in slab

图中■：投硅铁头坯 T[O]含量，▲：正常头坯 T[O]含量

由图 9 可以看出，投硅铁头坯全氧含量比正常浇铸头坯低，投硅铁头坯 T[O]平均为 0.0030%，而正常头坯平均为 0.0043%，正常浇铸头坯全氧含量最高点在坯头达到 0.0047%，沿连铸方向逐渐下降，试验坯末端达到 0.0038%；投硅铁头坯全氧含量沿连铸方向不呈显下降趋势，全氧含量最高为 0.0036%，最低为

0.0025%，说明开浇中包投入硅铁能够减少二次氧化的影响。

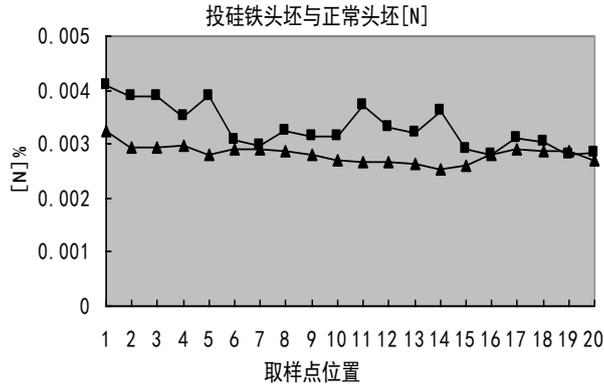


图 10 [N]含量分析

Fig.10 The content of [N] in slab

图中■：投硅铁头坯[N]含量，▲：正常头坯[N]含量

由图 10 所示，投硅铁头坯氮含量略高于正常头坯，投硅铁头坯氮含量平均为 0.0033%，正常头坯为 0.0028%，投硅铁头坯氮含量沿连铸方向逐渐降低，而正常头坯氮含量下降趋势不明显。

表 6 金相显微镜下夹杂物统计分析结果

Table.6 The statistical analysis of inclusion under metallurgical microscope

投硅铁头坯夹杂物分析情况		正常头坯夹杂物分析情况	
11	Al ₂ O ₃ 尺寸 2um-5um, MgO.Al ₂ O ₃ .SiO ₂ 尺寸 20um, Al ₂ O ₃ .CaS.MnS 尺寸 5um;	Al ₂ O ₃ 尺寸 10um, MgO.Al ₂ O ₃ .SiO ₂ 尺寸 10um-20um, 簇状 Al ₂ O ₃ ;	
55	Al ₂ O ₃ 尺寸 5um, Al ₂ O ₃ . MnS 尺寸 8-15um, MnS 尺寸 8 um, MgO.SiO ₂ 尺寸 15 um;	Al ₂ O ₃ 尺寸 10um, 簇状 Al ₂ O ₃ , MgO.Al ₂ O ₃ .SiO ₂ 尺寸 20um;	
110	Al ₂ O ₃ 簇状, Al ₂ O ₃ 尺寸 20um;	Al ₂ O ₃ 簇状、Al ₂ O ₃ .MnS 簇状夹杂;	
115	Al ₂ O ₃ 尺寸 2um-5um, Al ₂ O ₃ . MnS 尺寸 5-6um;	Al ₂ O ₃ 簇状、Al ₂ O ₃ .MnS 簇状夹杂;	
220	Al ₂ O ₃ 尺寸 2um-5um;	Al ₂ O ₃ 簇状夹杂;	

由表 6 的分析结果可以看出，正常头坯与投硅铁头坯夹杂物都以 Al₂O₃ 为主，同时存在含 MgO、SiO₂、MnS 的复合夹杂，正常头坯 Al₂O₃ 多呈簇状分布，而投硅铁头坯呈簇状分布的 Al₂O₃ 较少，两者差异由图 11 可以看出：

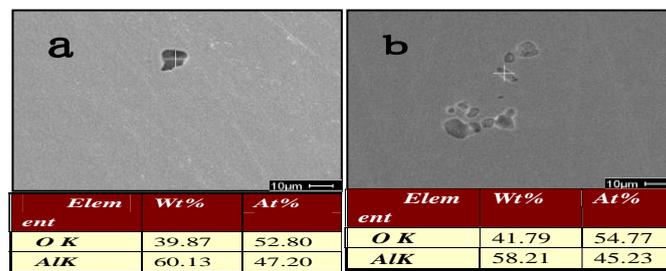


图 11 投硅铁试验夹杂物分布

Fig.11 The inclusion distribution of adding ferrosilicon trial

图中：a 投硅铁头坯中的 Al₂O₃ 夹杂，b 正常头坯中的 Al₂O₃ 夹杂

2.3.3 分析与讨论

由于在开浇阶段，向中包投入了硅铁，增加了钢液中的[Si]含量，因此，当钢液发生二次氧化时，加入硅铁的中包内可能形成了 SiO_2 、 MnO 与 Al_2O_3 的复合锰铝榴石夹杂，这种夹杂容易上浮，不残留在钢液中，而没加入硅铁的中包则形成以 Al_2O_3 为主的夹杂，大部分 Al_2O_3 夹杂残留于钢液中，来不及上浮，形成簇状；从检验结果看，加入硅铁的头坯 T[O]含量较低，且夹杂物数量较少、分布较为均匀。

3.结论

(1) EH36 钢液中喷吹 CaO 粉剂能够去除夹杂物，使铸坯中夹杂物的数密度和面积含量减少，并形成尺寸在 $2\mu\text{m}$ 左右的圆形颗粒夹杂物，其组成为氧化物与硫化物复合夹杂： $\text{O-Mg-Al-S-Ca-Mn-Fe}$ 。

(2) AG1F31 钢采用铝、硅脱氧对铸坯氧、氮影响不大，铸坯中全氧含量稳定在 10ppm 以下，氮含量在 20ppm 以内，两种脱氧方式铸坯中主要夹杂物为小颗粒 Al_2O_3 ，硅脱氧铸坯中出现含有 Mg 的 Al_2O_3 ，氧硫复合夹杂，分布及尺寸基本相同。

(3) 开浇前向 AB782A 钢中包加入硅铁合金，能够降低头坯的全氧含量，正常头坯平均为 0.0043%，投硅铁头坯 T[O]平均为 0.0030%，减少了开浇二次氧化的影响，正常头坯与投硅铁头坯夹杂物都以 Al_2O_3 为主，正常头坯 Al_2O_3 多呈簇状分布，而投硅铁头坯呈簇状分布的 Al_2O_3 较少。

参考文献

- [1]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):28-30.
- [2]吴维双,刘建华,王敏,崔衡,包燕平. Ti-IF 钢冷轧缺陷的形成分析[J]. 钢铁钒钛,2010,31(4):39-45.
- [3]曾建华,吴国荣,陈永,杨素波,杨金成,赵克文. 减少冷轧 IF 钢表面条痕缺陷的生产实践[J]. 钢铁,2010,45(9):44-47.
- [4]王习术,梁锋,曾燕屏,谢锡善. 夹杂物对超高强度钢低周疲劳裂纹萌生及扩展影响的原位观测[J]. 金属学报,2005,41(12):1272-1276.
- [5]李镇,王晓峰,费鹏,林洋,孙群,辛国强,姜茂发. 鞍钢高效率、低成本洁净钢生产平台建立--反应诱发微小异相净化钢水技术开发[J]. 第八届(2011)中国钢铁年会.
- [6]原丽君,田勇. 高碳纯净钢生产工艺的研究与实践[J]. 鞍钢技术,2009(3):54-57.
- [7]徐匡迪,蒋国昌,洪新,郑少波,徐建伦. 从废钢冶炼纯净钢新流程的讨论[J]. 金属学报,2001,34(4):395-399.
- [8]王睿之,杨健,祝凯,王毓男. 钙脱氧和镁脱氧的氧化物冶金工艺效果对比[J]. 炼钢,2016,32(3):50-54.
- [9]杨成威,吕迺冰,卓晓军,王新华,王万军. MnS 在 Ti-Al 复合脱氧氧化物上的析出研究[J]. 钢铁,2010,45(11):32-36.
- [10]胡振华,杨俊,杨云清. 氧化物冶金在高强度低合金钢生产中的试验研究[J]. 金属材料与冶金工程.2014,42(3):17-21.