

重轨钢夹杂物镁弥散化控制研究

宋光洁¹, 王奕¹, 张达先², 张凤明², 付建勋¹, 何建中²

- 上海大学材料科学与工程学院先进凝固技术中心 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海 200444;
- 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古包头 014010)

摘要:包钢是我国主要的重轨钢生产基地之一,大尺寸的非金属夹杂物是制约重轨钢质量提高的瓶颈。文章基于镁的理化及冶金性能,开发镁对重轨钢夹杂物微细弥散化控制技术。镁改质工业试验与传统工艺对比分析显示,镁改质后,重轨钢中的MnS、CaO-Al₂O₃-SiO₂夹杂物转变为小尺寸的MgO·Al₂O₃与MnS的复合夹杂物,钢轨垂直观察面、水平观察面、中间垂直观察面的夹杂物密度分别由17 mm⁻²、21 mm⁻²、18 mm⁻²增加到22 mm⁻²、29 mm⁻²、25 mm⁻²,等效直径分别由2.7 μm、2.6 μm、2.4 μm减小到2.3 μm、2.4 μm、2.3 μm,夹杂物面积占比分别由0.017%、0.016%、0.014%减小到0.013%、0.014%、0.012%。镁改质后钢中非金属夹杂物按A法评级为A类(0.5,0.5)、B类(0.5,0.5)、C类(1.0,0.5)、D类(0.5,0.5)、Ds类(0),按K法评级为2.78。镁改质后重轨钢夹杂物满足标准要求。

关键词:夹杂物;镁改质;重轨钢;MnS

中图分类号:TG142.1

文献标识码:B

文章编号:1009-5438(2024)05-0061-06

Control Study on Dispersion of Inclusions in Heavy Rail Steel with Magnesium

Song Guang-jie¹, Wang Yi¹, Zhang Da-xian², Zhang Feng-ming²,
Fu Jian-xun¹, He Jian-zhong²

- Center for Advanced Solidification Technology, State Key Laboratory of Advanced Special Steel, School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;
- Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: Baotou Steel is one of the main production bases of heavy rail steel in China and large size nonmetallic inclusions are the bottleneck restricting improvement of quality of heavy rail steel. In this paper, the control technology for superfine dispersion of inclusions in heavy rail steel with magnesium is developed based on the physicochemical and metallurgical properties of magnesium. The comparative analysis between industrial tests of magnesium modification and traditional process showed that the inclusions in heavy rail steel such as MnS and CaO-Al₂O₃-SiO₂ were transformed into

收稿日期:2024-06-01

基金项目:中央引导地方科技发展资金(2022ZY0124)。

作者简介:宋光洁(2000-),男,河南省新乡市人,硕士,现从事钢铁冶金方面的研究工作。

small size composite inclusions of $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ and MnS , density of inclusions on vertical and horizontal observation planes and intermediate vertical observation plane of the rail were increased from 17 mm^{-2} , 21 mm^{-2} and 18 mm^{-2} to 22 mm^{-2} , 29 mm^{-2} and 25 mm^{-2} respectively, while equivalent diameters were decreased from $2.7 \mu\text{m}$, $2.6 \mu\text{m}$ and $2.4 \mu\text{m}$ to $2.3 \mu\text{m}$, $2.4 \mu\text{m}$ and $2.3 \mu\text{m}$ respectively as well as proportion of area of inclusions were decreased from 0.017%, 0.016% and 0.014% to 0.013%, 0.014% and 0.012% respectively after magnesium modification. Moreover, the non-metallic inclusions in steel are rated as Grade A (0.5, 0.5), Grade B (0.5, 0.5), Grade C (1.0, 0.5), Grade D (0.5, 0.5) and Grade Ds (0) according to Method A as well as rated as 2.78 according to Method K. The inclusions of heavy rail steel after magnesium modification could meet the standard requirements.

Key words: inclusion; magnesium modification; heavy rail steel; MnS

包钢是中国重要的钢铁工业基地之一。作为新中国首批建设的三大钢铁企业之一,其生产的钢材广泛应用于国家重点工程^[1]。包钢自成立 70 年以来,不断进行技术革新和产业升级,为我国的经济建设和国防建设提供了重要支撑,从最初生产的单一钢铁产品,到后来能够生产无缝钢管、稀土钢、重轨钢等高端钢材^[2-4],包钢的产品种类和质量都得到了极大的提高,在国内外填补了多个领域的技术空白,为中国的现代化建设提供了强有力的材料保障。

在国家实施“八纵八横”铁路网规划和西部开发的背景下,重轨钢的质量要求越来越高,《铁路用热轧钢轨》标准于 2021 年完成修订并开始实施^[5],在新标准中,针对非金属夹杂物提出了更高的要求,时速 300 km/h 的钢轨比时速 200 km/h 的钢轨, A 类夹杂物评级从 2.5 级提高到了 2.0 级, B 类、C 类、D 类从 1.5 级提高到了 1.0 级,夹杂物控制成为高品质重轨钢开发的关键。

包钢率先在国际上实现钢铁企业生产 500 m 成品钢轨和直供线路铺设,依托“镁冶金弥散化控制技术在高品质重轨钢开发及工艺创新上的应用”研究,率先开展镁对重轨钢夹杂物调控的研究。希冀改变传统夹杂物控制技术^[6]对生产节奏、综合成本的较大影响,在新技术中,把夹杂物当作钢的天然组成部分,通过夹杂物改质,让夹杂物微细弥散化,把夹杂物从对钢性能有害向无害甚至有益的方向转化,开创一种成本更低、节奏更快的高强韧钢材开发新途径^[7-9]。

本文主要介绍镁对重轨钢夹杂物调控的研究,在实验室冶炼试验摸索的最佳控制参数基础上,开展了镁对重轨钢夹杂物改质对比试验,取得了较好的工艺控制效果。

1 镁冶金技术概述

镁冶金技术是国内外公认的最具潜力的夹杂物

调控技术。从 20 世纪 90 代至今,日本、美国、韩国等国家的先进钢铁企业开展了系统的研究及应用,镁冶金技术在船板钢、汽车钢、管线钢、非调质钢、轴承钢等得到广泛的应用^[10-13]。

镁是元素周期表中 II A 族元素,沸点较低,在 $1\ 107 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,镁在钢液中的溶解度为 0.1%^[14]。向熔融的钢液中加入镁,镁会迅速气化成气泡上升,在镁气泡上升的过程中,一部分镁会与钢中的氧和硫发生反应,而另一部分溶解的镁也会与氧和硫发生反应^[15-16]。镁具有很强的脱氧、脱硫能力,且脱氧能力大于脱硫能力,仅需少量的镁就可以将钢中氧含量降低到很低的值,在 $1\ 600 \text{ }^\circ\text{C}$ 下仅需要很少的镁就可以将氧脱到很低的水平,但是当镁含量增加到 0.001 0% 后,镁的脱氧效果不明显^[17]。

镁改质的钢液中易生成细小弥散的 MgO 或 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 。这些氧化物形核的势垒更低^[18],形核率更高, MgO 的临界形核半径为 0.24 nm,远小于 Al_2O_3 的临界形核半径 0.65 nm; MgO 的形核率为 $399 \text{ n}/(\text{s} \cdot \text{cm}^3)$,远比 Al_2O_3 的 $171 \text{ n}/(\text{s} \cdot \text{cm}^3)$ 的形核率高; MgO 、 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 与钢液之间的接触角要比 Al_2O_3 小的多,与钢液间的界面张力小,颗粒之间吸引力约为 Al_2O_3 夹杂物的 1/10,因此 MgO 、 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 不易聚集长大^[19-20],在钢液中更容易呈现细小弥散的分布状态。镁改质后细小弥散的夹杂物,与有尖锐棱角的 Al_2O_3 夹杂物不同,细小夹杂物的边缘几乎都是圆滑的,因而在后续加工过程中不会成为裂纹源^[21],因此能作为硫化物、氧化物、碳化物、奥氏体晶粒凝固形核的核心^[22-23],形成复合夹杂物,改善钢材性能。国外将钢液加镁改质的工艺,称为镁氧化物冶金技术。

研究发现^[24-29],向钢液中加镁可以同时钢中的氧化物和硫化物进行改性,镁能将钢中 Al_2O_3 和 $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ 改质为 $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂包裹氧化铝

的复合夹杂物,这种复合夹杂物的数量随着镁含量的增加而变多,镁改质后钢液洁净度显著提高,夹杂物分布更加均匀,尺寸更小。相对于传统的钙改质,镁改质对硫化物有显著的变质作用,可将Ⅱ类和Ⅲ类硫化物转变为Ⅰ类,钢中原本长条状的硫化物转变为细小弥散的纺锤状硫化物, MnS 夹杂物由单独的 MnS 转变为以 $MgO \cdot Al_2O_3$ 为核心,外围包裹着 MnS 所构成的复合夹杂物,此类复合夹杂物抗变形能力提高,在轧制过程中能够保持近球形或纺锤形。

综上所述,镁可以对钢中夹杂物起到变质改性作用,尤其是氧化物、硫化物,向熔融的钢液中加入镁,可以使钢中的 Al_2O_3 夹杂物转变为 $MgO \cdot Al_2O_3$ 复合夹杂物, MnS 夹杂物转变成 MgS 夹杂物以及 $MgS \cdot MnS$ 复合夹杂物,且夹杂物以细小弥散的形式分布在钢中,不易团聚长大,钢液的洁净度得到提高。

2 重轨钢镁改质工艺

重轨钢中 B 类 (Al_2O_3 类)、C 类 (硅酸盐类) 夹杂物,特别是靠近踏面位置的夹杂物可能成为应力

集中点,导致重轨服役失效,也可能象 A 类夹杂物衍生焊接问题,是目前制约重轨钢质量的瓶颈之一。为持续提高包钢重轨钢洁净度,对包钢重轨钢进行镁改质工业试验,在保持原有生产工艺不变的条件下,在真空精炼处理后,对钢液进行镁改质,具体工艺流程为:铁水预处理→转炉冶炼→LF 炉外精炼→VD 真空脱气→镁改质→连铸。镁以含镁包芯线的形式加入,喂线前要求钢水过热度在 $60 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$,钢中活度氧含量不超过 0.0010% 。根据热力学分析制定镁改质工艺要求,含镁包芯线喂入量为大于 0.0200% ,在喂线工艺结束后,进行软吹处理,促使夹杂物充分上浮;在钢液表面覆盖碳化稻壳进行保温,防止钢液氧化。

为分析重轨钢夹杂物的镁改质效果,对镁改质前后的重轨产品分别取样分析,采用线切割的方法从轨头截取 3 个横断面,每个断面取 2 个金相试样,对 3 个观察面进行检测分析,取样观察示意图如图 1 所示,检测其化学成分见表 1。成品钢轨夹杂物取样和检测均采用高密度检测方式,以保证试验真实性。

表 1 重轨钢的化学成分(质量分数)

试样	C	Si	Mn	P	S	V	Al	Mg
原样	0.73	0.35	0.95	0.012	0.002	0.004	0.003 4	
镁改质	0.75	0.35	0.95	0.015	0.002	0.054	0.003 5	0.001 8

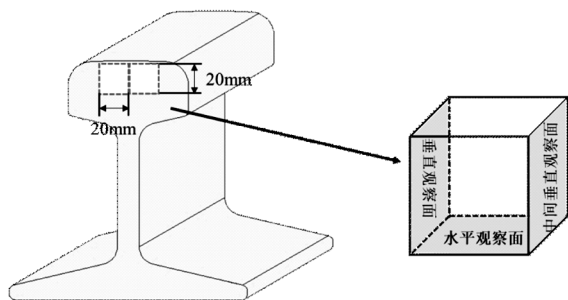


图 1 取样观察示意图

3 重轨钢镁改质效果

3.1 夹杂物类型

图 2 为镁改质前后重轨钢中典型夹杂物的三维形貌和成分。镁改质前,重轨钢中的夹杂物主要有 MnS、 $CaO - Al_2O_3 - SiO_2$, MnS 夹杂物以长条状和片状的形式单独存在,尺寸集中分布在 $20 \sim 100 \mu\text{m}$ 之

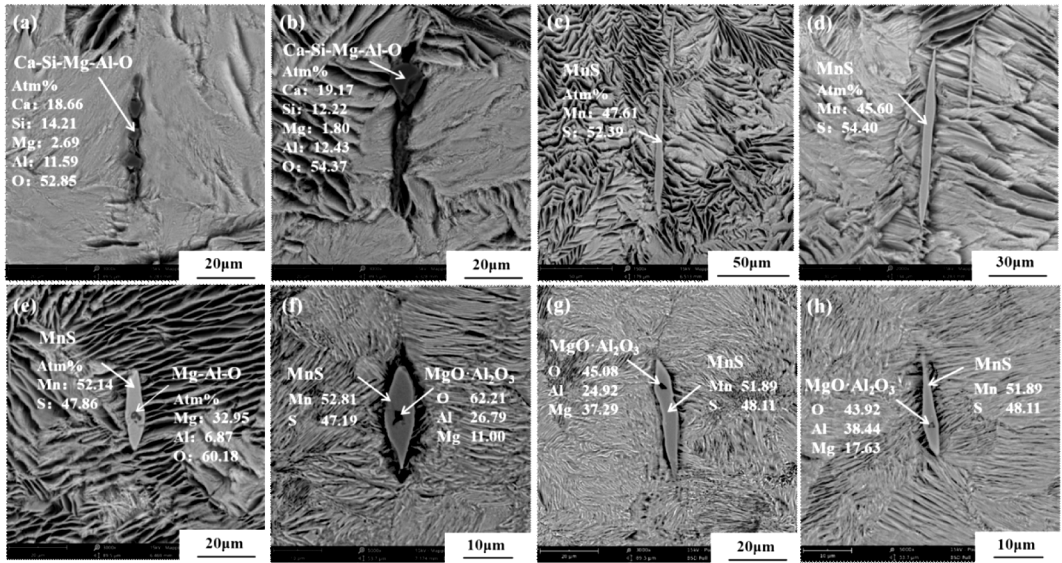
间, $CaO - Al_2O_3 - SiO_2$ 夹杂物呈灰褐色,其沿轧制方向发生了破碎,呈窜簇状,尺寸集中分布在 $20 \sim 80 \mu\text{m}$; 镁改质后重轨钢中的夹杂物主要为 $MgO \cdot Al_2O_3$ 与 MnS 的复合夹杂, $MgO \cdot Al_2O_3 \cdot MnS$ 主要由外围包裹着灰色的 MnS 和中心呈黑色的 $MgO \cdot Al_2O_3$ 两部分组成,和镁改质前相比,夹杂物变形程度普遍减小,大尺寸夹杂物基本消失,尺寸分布在 $10 \sim 50 \mu\text{m}$ 。

3.2 洁净度

图 3 为镁改质前后重轨钢中夹杂物的密度、等效直径、面积占比的统计结果。镁改质前,垂直观察面、水平观察面、中间垂直观察面的夹杂物密度分别为 17 mm^{-2} 、 21 mm^{-2} 、 18 mm^{-2} ,等效直径分别为 $2.7 \mu\text{m}$ 、 $2.6 \mu\text{m}$ 、 $2.4 \mu\text{m}$,面积占比分别为 0.017% 、 0.016% 、 0.014% ; 镁改质后,垂直观察面、水平观察面、中间垂直观察面的夹杂物密度分别为

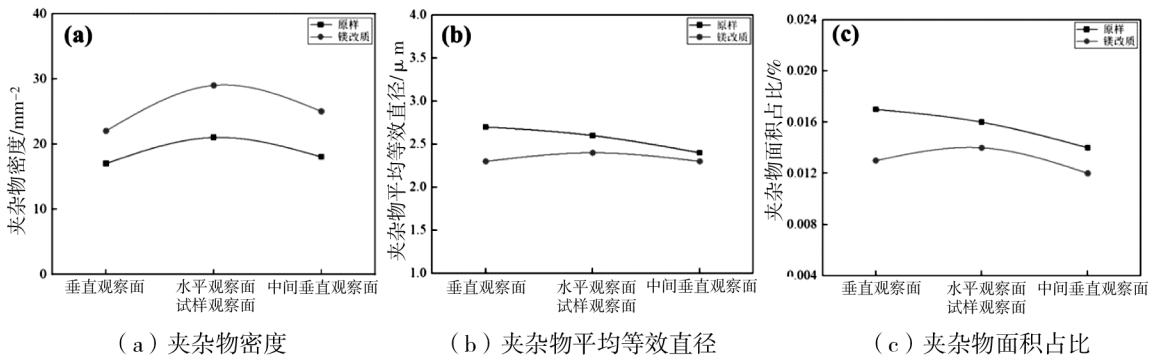
22 mm⁻²、29 mm⁻²、25 mm⁻²，等效直径分别为 2.3 μm、2.4 μm、2.3 μm，面积占比分别为 0.013%、0.014%、0.012%。整体而言，镁改质后夹杂物密度增加，等效直径和面积占比减小，结合

SEM 和 EDS 分析结果可知，镁改质使得重轨钢中的夹杂物更加均匀地分散在钢基体中，原本较大尺寸的夹杂物经过变质，转变为尺寸更小的夹杂物，这有助于改善钢材的整体性能。



(a) ~ (d) 原样; (e) ~ (h) 镁改质

图 2 镁改质前后重轨钢中典型夹杂物三维形貌和成分



(a) 夹杂物密度

(b) 夹杂物平均等效直径

(c) 夹杂物面积占比

图 3 镁改质前后重轨钢中夹杂物特征变化

图 4 为镁改质前后重轨钢中大尺寸夹杂物分布，其中 61 ~ 66 为镁改质后重轨钢钢轨，71 ~ 76 为镁改质前重轨钢钢轨。统计发现，未改质与镁改质大尺寸夹杂物(评级达到 1.5 级以上)数量占比:垂直观察面为 6:1，水平观察面为 2:0，中间垂直观察面为 3:0。图 5 为镁改质前后重轨钢中硫化物长宽

比分布。统计发现，镁改质后，垂直观察面、水平观察面、中间垂直观察面的夹杂物长宽比平均值分别由 19.4、14.0、17.2 减小到 10.1、7.3、12.3。镁改质后可以改变柔软硫化物的存在形式，减小夹杂物长宽比。

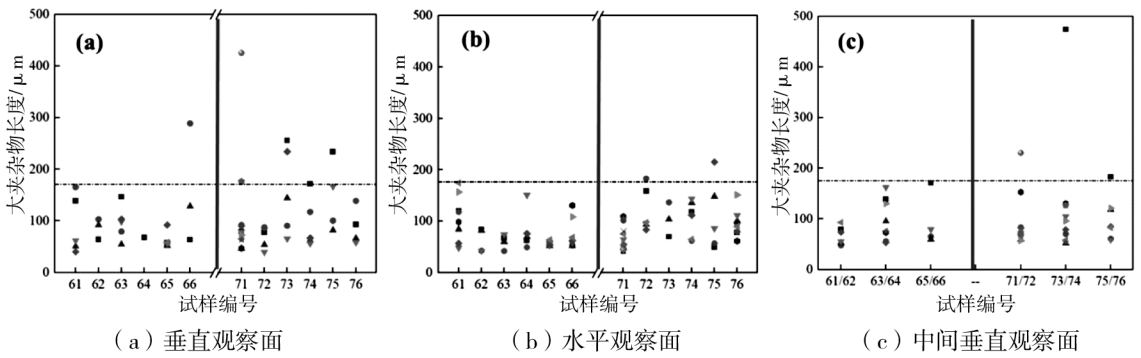


图 4 镁改质前后重轨钢中大尺寸夹杂物分布

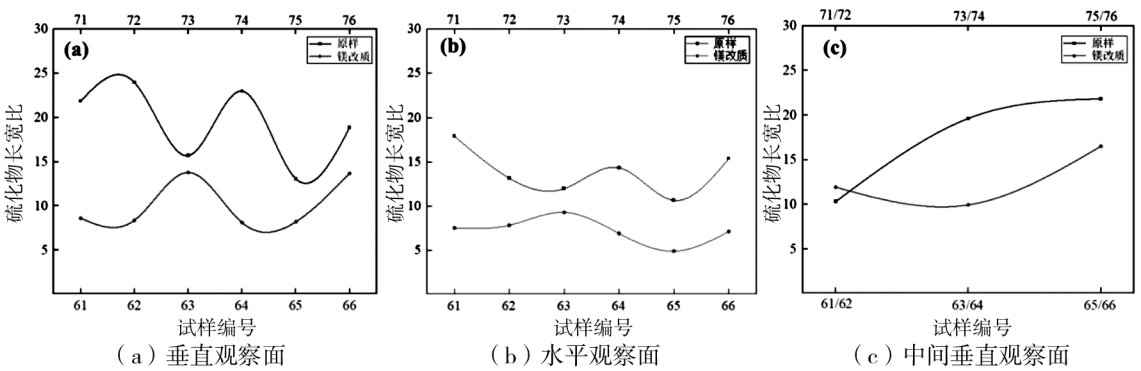


图 5 镁改质前后重轨钢中硫化物长宽比分布

表 2 为镁改质前后重轨钢中夹杂物评级,可以看出,按 K 法评级,镁改质后夹杂物评级由原样的 8.01 降到 2.78;按 A 法评级,原样钢中的 A 类和 B 类的粗系、细系均为 0.5 级,C 类粗系 1 级、细类 0.5 级,D 类粗系和细系均为 1 级,Ds 类 0.5 级。镁改

质后,钢中 A 类和 B 类的粗系、细系均为 0.5 级,C 类粗系 1 级、细类 0.5 级,D 类粗系和细系均降为 0.5 级,Ds 类降为 0 级,钢中夹杂物整体评级较好。由此可见,镁改质显著细化了钢中的夹杂物。

表 2 镁改质前后重轨钢夹杂物评级

试样	K 法	A 法								
		A 粗	A 细	B 粗	B 细	C 粗	C 细	D 粗	D 细	Ds
原样	8.01	0.5	0.5	0.5	0.5	1	0.5	1	1	0.5
镁改质	2.78	0.5	0.5	0.5	0.5	1	0.5	0.5	0.5	0

4 结论

(1) 镁对重轨钢夹杂物调控研究发现,镁对重轨钢中夹杂物改质效果明显,取得较好的实物改善效果。镁改质后钢中非金属夹杂物按 A 法评级:A 类和 B 类的粗系、细系均为 0.5 级,C 类粗系为 1 级、细系为 0.5 级,D 类粗系、细系均为 0.5 级,Ds 类为 0 级;按 K 法评级为 2.78。夹杂物弥散化效果

显著。

(2) 镁改质后,夹杂物性质和组分改变。重轨钢中的夹杂物由 MnS 、 $CaO - Al_2O_3 - SiO_2$ 转变为 $MgO \cdot Al_2O_3$ 与 MnS 的复合夹杂物,夹杂物变形程度较小,大尺寸夹杂物基本消失,尺寸分布在 $10 \sim 50 \mu m$ 。

(3) 镁改质后,重轨钢洁净度显著提高。钢轨垂直观察面、水平观察面、中间垂直观察面的夹杂物

密度分别由 17 mm^{-2} 、 21 mm^{-2} 、 18 mm^{-2} 增加到 22 mm^{-2} 、 29 mm^{-2} 、 25 mm^{-2} ，等效直径分别由 $2.7 \mu\text{m}$ 、 $2.6 \mu\text{m}$ 、 $2.4 \mu\text{m}$ 减小到 $2.3 \mu\text{m}$ 、 $2.4 \mu\text{m}$ 、 $2.3 \mu\text{m}$ ，夹杂物面积占比分别由 0.017% 、 0.016% 、 0.014% 减小到 0.013% 、 0.014% 、 0.012% 。

参 考 文 献

- [1] 苏媛媛. “齐心协力建包钢”历史佳话的深刻内涵和新时代价值[J]. 呼伦贝尔学院学报, 2022, 30(2): 6-11.
- [2] 张行刚. 内蒙古包钢钢联股份有限公司钢管公司首次成功试制轻量化高强度 Q620D 结构管[J]. 钢管, 2021, 50(1): 17.
- [3] 徐绍亮, 鲁慧杰, 刷利敏. 包钢稀土钢标准体系的研究与构建[J]. 包钢科技, 2019, 45(6): 95-98.
- [4] 包钢热卷管线钢首次出口土耳其[J]. 轧钢, 2023, 40(3): 102.
- [5] GB/T 2585—2021, 铁路用热轧钢轨[S].
- [6] 刘浏. 洁净钢生产技术的发展与创新[J]. 中国冶金, 2016, 26(10): 18-28.
- [7] 杨春政. 高效低成本洁净钢生产实践探索[J]. 钢铁, 2021, 56(8): 20-25.
- [8] 徐匡迪, 肖丽俊, 干勇, 等. 新一代洁净钢生产流程的理论解析[J]. 金属学报, 2012, 48(1): 1-10.
- [9] 周立平. 洁净钢生产中硫的控制[J]. 冶金管理, 2019(3): 58-59.
- [10] 尉政, 任英, 任强, 等. 镁对 GCr15 轴承钢中夹杂物及奥氏体晶粒的影响[J]. 钢铁, 2023, 58(7): 133-143.
- [11] 费鹏. IF 钢镁处理技术开发与应用[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
- [12] Bai G, Yang J, Liang W. Evaluation and Analysis of the Influence of Rare-Earth Ce on Inclusions in Heavy Rail Steel [J]. Metals, 2023, 13(3): 614.
- [13] Fei J, Zhou G, Zhou J, et al. Research on the Effect of Pearlite Lamellar Spacing on Rolling Contact Wear Behavior of U75V Rail Steel [J]. Metals, 2023, 13(2): 237.
- [14] 王亮亮. 镁对 H13 热作模具钢夹杂物及性能影响的研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
- [15] 吕铭. 船板钢镁处理工艺技术开发与应用[D]. 沈阳: 东北大学, 2016.
- [16] 张同生. 多元钢液体系中镁的冶金行为与作用机理[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- [17] 陈斌, 姜敏, 王灿国, 等. Mg 在超纯净钢中应用的理论探索[J]. 钢铁, 2007, 42(7): 30-33.
- [18] 王德永, 屈天鹏. 镁洁净钢新技术发展与展望[J]. 炼钢, 2020, 36(5): 1-13, 20.
- [19] 陈东. 镁处理对钢中夹杂物分布特点及聚合行为的影响[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- [20] 席作冰. 钙镁处理对高碳硬线钢中 B 类夹杂物形态控制研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [21] 陈常勇. 镁对 D2 冷作模具钢夹杂物及性能影响的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2016.
- [22] 王蓝卿, 朱航宇, 赵吉轩, 等. MgO 与低密度钢液相互作用及其对夹杂物的影响[J]. 钢铁, 2021, 56(10): 83-90.
- [23] 曹磊, 金朋亮, 肖远悠, 等. 镁处理低碳钢中 MgAl_2O_4 夹杂物的聚集行为[J]. 钢铁, 2020, 55(11): 37-46.
- [24] Shen P, Fu J. Morphology Study on Inclusion Modifications Using Mg-Ca Treatment in Resulfurized Special Steel [J]. Materials, 2019, 12(2): 197.
- [25] Xie J B, Zhang D, Yang Q K, et al. Exploration of Morphology Evolution of the Inclusions in Mg-Treated 16MnCr5 Steel [J]. Iron-making & Steelmaking, 2019, 46(6): 564-573.
- [26] 张浩, 刘年富, 胡芳忠, 等. 镁对 20MnCr5 齿轮钢中夹杂物的改质研究[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(8): 775-783.
- [27] 朱浩然, 刘年富, 周蕾, 等. 镁处理对 45 钢中夹杂物的改质效果[J]. 特殊钢, 2022, 43(1): 6-10.
- [28] 艾克南, 谢剑波, 曾志崎, 等. 镁对非调质钢中组织及硫化物的影响[J]. 钢铁研究学报, 2019, 31(4): 361-367.
- [29] 李志伟, 曾志崎, 谢剑波, 等. 含镁非调质钢中尖晶石转变机制研究[J]. 钢铁钒钛, 2021, 42(5): 164-169.