

中碳车轮钢中 $\text{MnS-Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物的研究

丁小明^{1,2}, 李涛^{3*}, 郭晓培⁴, 庄欠玉², 刘恺³

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 航材国创(青岛)高铁材料研究院有限公司, 山东 青岛 266109;
3. 华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063210; 4. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘要: 高速车轮钢中的 $\text{MnS-Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物能够降低 Al_2O_3 夹杂物对于车轮钢疲劳性能的危害。通过检测实验室制备的车轮钢, 确定了车轮钢中存在 MnS 夹杂物、 Al_2O_3 夹杂物和 $\text{MnS-Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物。采用酸溶法提取 Al_2O_3 夹杂物, 根据 XRD 检测结果确定钢中 Al_2O_3 夹杂物的晶体类型为 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。通过非水溶液电解法提取了钢中的复合夹杂物, 并检测 $\text{MnS-Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物的形貌。根据钢的成分进行热力学计算, 分析试验钢的固相线和液相线温度和夹杂物析出温度的关系, 表明车轮钢中 Al_2O_3 夹杂物能够为 MnS 的析出提供形核条件。最后, 通过计算 $\text{MnS-Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物界面两相的晶面错配度, 说明了 MnS 的 (100) 面在 Al_2O_3 (0001) 面上可以有效形核析出。这为钢中形成 $\text{MnS-Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物, 降低 Al_2O_3 夹杂物危害提供了一定的理论基础。

关键词: 车轮钢; 复合夹杂物; $\text{MnS-Al}_2\text{O}_3$; 错配度; 非水溶液电解法

中图分类号: TF76, TG142.33

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2023)04-0183-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.04.026

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Study on the composite inclusions of $\text{MnS-Al}_2\text{O}_3$ in wheel steel

Ding Xiaoming^{1,2}, Li Tao^{3*}, Guo Xiaopei⁴, Zhuang Qianyu², Liu Kai³

(1. Beijing Institute of Aeronautical Materials, AECC, Beijing 100095, China; 2. Aviation Materials Guochuang (Qingdao) High-speed Railway Materials Research Institute Co., Ltd., Qingdao 266109, Shandong, China; 3. College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China; 4. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The composite inclusions of $\text{MnS-Al}_2\text{O}_3$ in high-speed railway wheel steel can reduce the effect of Al_2O_3 on fatigue properties of wheel steel. In this study, the types of inclusions in wheel steel were determined as MnS , Al_2O_3 and $\text{MnS-Al}_2\text{O}_3$ composite inclusions by testing wheel steel prepared in laboratory. The inclusions of Al_2O_3 were extracted by acid dissolution method. XRD results showed that crystal texture of Al_2O_3 inclusion in steel was $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. The composite inclusion in steel was extracted by non-aqueous electrolysis method, and the morphology of $\text{MnS-Al}_2\text{O}_3$ composite inclusion was detected. Based on the thermodynamic calculation of steel composition, the relationship between the solidus and liquidus temperatures of experimental steel and the precipitation temperature of inclusions was analyzed. The results show that Al_2O_3 inclusions in wheel steel can provide nucleation sites for the precipitation of MnS . It was clarified that the surface of (100) of MnS can precipitate on the Al_2O_3 (0001) through the calculation of the mismatch between the two phases of MnS and Al_2O_3 . This works provides

收稿日期: 2022-09-13

基金项目: 河北省杰出青年科学基金(E2021209039); 2021年度河北省引进留学人员资助项目(C20210309); 唐山市科技创新团队培养计划项目。(21130209D)。

作者简介: 丁小明, 1987年出生, 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事金属加工及热处理研究, E-mail: ding_1121@163.com;

*通讯作者: 李涛, 1984年出生, 男, 博士, 教授, 主要从事钢中夹杂物三维表征及相关研究, E-mail: litao@ncst.edu.cn。

a theoretical basis for the formation of MnS-Al₂O₃ composite inclusions in steel and the reduction of the damage of Al₂O₃ inclusions.

Key words: wheel steel, composite inclusions, MnS-Al₂O₃, mismatch, non-aqueous electrolysis

0 引言

随着我国现代交通的发展,高铁已经成为最方便快捷的交通方式之一。高速车轮是高铁列车中的承重部件,其对钢材性能提出了高强度、高韧性、高抗疲劳、高耐磨、高抗热裂等要求。高铁车轮失效的常见方式之一是轮辋产生疲劳裂纹,而钢中 Al₂O₃ 等脆性夹杂物的存在是造成裂纹产生的重要原因^[1-4]。Mi 等人^[5]计算了车轮钢中 Al₂O₃ 夹杂物周围的应力分布,认为 Al₂O₃ 夹杂物会引起应力集中,并引发周围的微裂纹。所以,降低车轮钢中 Al₂O₃ 夹杂物危害成为了避免高速车轮疲劳断裂的冶金技术关键问题。

对于降低 Al₂O₃ 夹杂物危害,一般从两个方面入手。一是通过加入其他元素实现对夹杂物的改性,该方法通常一方面可以降低夹杂物尺寸,另一方面可以改变夹杂物的类型;另一种方法是洁净钢冶炼,尽量减少钢中的夹杂物。徐周等人^[6]通过微镁处理减小 Al₂O₃ 夹杂物尺寸,并将部分 Al₂O₃ 夹杂物变质为 MgO·Al₂O₃ 夹杂物,从而提高了车轮钢的耐磨性。郭振和等人^[7]通过镁钙处理实现了类似的效果。然而,钙镁处理在实际生产过程中,由于其活性较高,在炼钢加料过程中加入时容易造成飞溅,目前在车轮钢夹杂物处理中较少采用。唐庆余等人^[8]在车轮钢中添加稀土 Ce,不仅改变了夹杂物的类型和尺寸,还减小了车轮钢的晶粒大小,实现了其韧性的提高。但通过添加元素的方法增加了生产的成本,因此不是实际生产的最优解。

Wu 等人^[9]发现钢中的 Al₂O₃ 夹杂物可以与 MnS 形成 MnS-Al₂O₃ 复合夹杂物,在独立的 Al₂O₃ 夹杂物周围可能会产生裂纹,但 MnS-Al₂O₃ 复合夹杂物周围没有发现裂纹。因此,研究车轮钢中 MnS-Al₂O₃ 复合夹杂物的形成对于减少钢中裂纹的产生具有重要意义。余音宏等人^[10]研究了 S 含量对复合夹杂物形成的影响,其发现当 S 含量为 0.011% 时, MnS-Al₂O₃ 复合夹杂物数量达到稳定。雷少龙等人^[11]研究了 Al 脱氧钢中氧化物对 MnS 析出的影响,结果表明直径小于 4 μm 的 Al₂O₃ 夹杂物可被推至固液两相区,作为 MnS 的异质形核质点。侯传

安等人^[12]发现随着冷却速率的增加,夹杂物的尺寸以及 MnS 在 Al₂O₃ 上的析出比例逐渐降低,且包裹型的复合夹杂物平均尺寸逐渐减小。沈昶等人^[13]通过理论计算,确定了 MnS 塑性夹杂工艺需要在低活度氧的条件下进行铝终脱氧。综上,目前对于 MnS-Al₂O₃ 复合夹杂物的研究集中在工艺控制^[14-16]和成分设计^[17-18]上,而很少从机理上解释该种复合夹杂物的形成。笔者在实验室下成功制备了含 MnS-Al₂O₃ 复合夹杂物的车轮钢,并阐述了 MnS-Al₂O₃ 复合夹杂物的形成机理。

1 试验材料与方法

1.1 车轮钢样品制备

在尺寸为 Ø35 mm×100 mm 的刚玉坩埚中加入高纯铁和少量氧化铁,采用电磁感应炉加热到 1 450 ℃ 左右熔融后,加入硅锰等合金,保温 3 min 后加入铝粒进行脱氧。整个试验样品制备过程在氩气保护气氛中进行,防止样品发生氧化。最终制备的钢锭约为 150 g,其主要化学成分如表 1 所示。

表 1 试验钢主要化学成分
Table 1 Main chemical composition of experimental steel %

C	Si	Mn	Cr	S	Als	O
0.50	0.30	0.72	0.21	0.011	0.070	0.001 7

1.2 夹杂物的检测

使用电火花线切割设备从制备的钢锭上切取 10 mm×10 mm×5 mm 块体,然后对块体进行抛光处理。利用扫描电镜及能谱分析(SEM-EDS)检测其中的夹杂物,确定钢中的夹杂物种类。对于钢基体上的夹杂物形貌检测,当直接在钢基体上检测时,通常不能够看到其完整形貌。为了更清楚的观测复合夹杂物的形貌,需要提取钢中的夹杂物。

1.3 酸溶法提取 Al₂O₃ 夹杂物

由于 Al₂O₃ 夹杂物不溶于盐酸,而 MnS 和钢基体可以在盐酸中溶解。因此,可以采用浓盐酸溶解部分钢锭,然后过滤得到其中的 Al₂O₃ 夹杂物。为了研究 MnS-Al₂O₃ 复合夹杂物界面处 Al₂O₃ 和 MnS 的晶面错配度,需要确定 Al₂O₃ 的晶体类型。采用

XRD 检测分析过滤后的 Al₂O₃ 夹杂物粉末, 可以确定 Al₂O₃ 的晶体类型。

1.4 非水溶液电解法提取复合夹杂物

电解法是常用的提取钢中夹杂物的方法。根据电解溶剂的不同, 可以分为非水溶液和水溶液电解。水溶液电解效率较高, 但一般都用来提取尺寸较大或者较为稳定的夹杂物。对于 MnS-Al₂O₃ 复合夹杂物, 表面的 MnS 在水溶液中电解时, 很容易被电解破坏。所以, 试验采用非水溶液电解法对钢样进行电解。具体操作步骤为: 将试验钢放入到无水乙醇中, 使用超声波进行清洗振荡, 去除表面杂质, 在恒温电解槽中电解, 试验装置如图 1 所示。电解液的成分为: 10% 乙酰丙酮+1% 四甲基氯化铵+89% 甲醇。电解电压设置为 3.5 V, 电解温度保持在 -5 ~ 5 ℃。将电解后的溶液过滤, 烘干后得到钢中所有类型夹杂物粉末。将粉末均匀地黏附在导电胶上, 用扫描电镜观测其形貌。

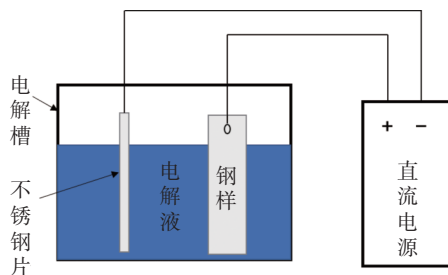


图 1 电解提取夹杂物装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of inclusion extraction device by electrolysis

2 结果与讨论

2.1 夹杂物的类型确定

在扫描电镜下检测抛光的块状样品, 发现钢中存在 MnS 夹杂物、Al₂O₃ 夹杂物和 MnS 包裹 Al₂O₃ 形成的 MnS-Al₂O₃ 复合夹杂物, 如图 2 所示。

在检测过程中发现有簇状的 Al₂O₃ 夹杂物, 如图 3 所示, 这可能与实验室制备车轮钢的坩埚较小, 脱氧后电磁搅拌时间较短有关。由于钢基体的存在, 并不能完全看出其完整形貌。另外, 在其元素面扫描分布中可以看出, 簇状 Al₂O₃ 夹杂物表面某些区域存在 MnS。

2.2 Al₂O₃ 夹杂物的晶体类型

对提取的 Al₂O₃ 夹杂物粉末进行 XRD 检测。通过分析, 确定钢中 Al₂O₃ 夹杂物的晶型为 α-Al₂O₃, 属三方晶系, 其晶格参数如表 2 所示。

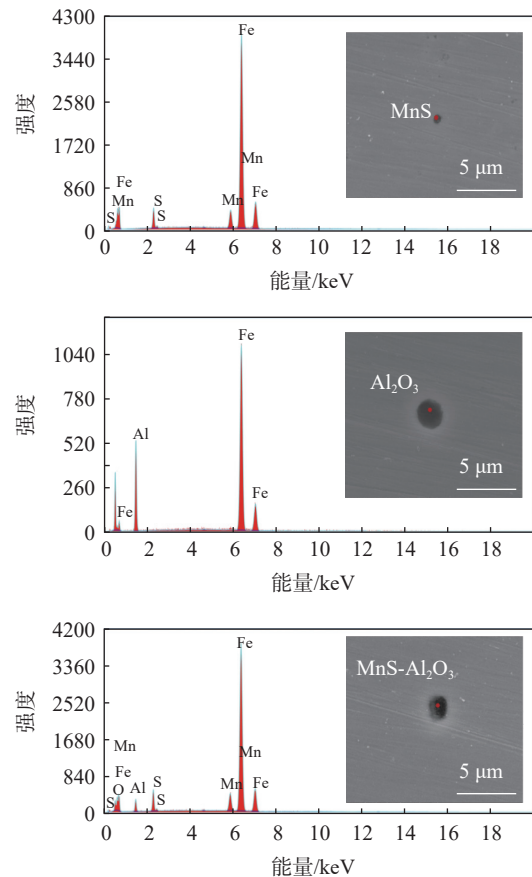


图 2 试验钢中不同类型夹杂物的形貌及成分
Fig. 2 Morphology and composition of different types of inclusions in experimental steels

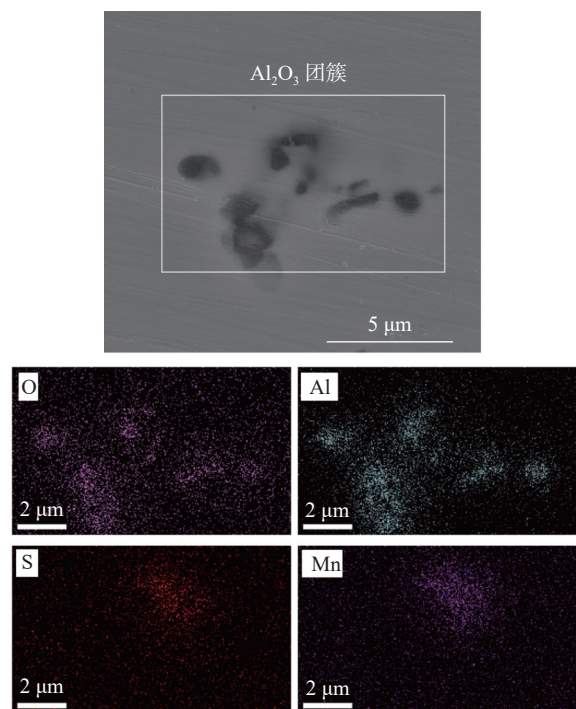


图 3 Al₂O₃ 团簇形貌及分布
Fig. 3 Morphology and distribution of Al₂O₃ clusters

表2 α - Al_2O_3 的晶格参数
Table 2 The lattice parameters of α - Al_2O_3

晶格参数(三方晶系)	晶格常数/nm			角度/(°)		
	a	b	c	α	β	γ
Al_2O_3 (PDF卡片)	0.476	0.476	1.299	90	90	120

2.3 夹杂物的形貌检测

采用 SEM-EDS 对有机溶液电解法提取的夹杂

物粉末进行检测, 其形貌及元素分布如图4所示。可以看出, MnS 夹杂物大小约为 $1\ \mu\text{m}$, 呈椭球形。而 $\text{MnS-Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物大小约为 $3\ \mu\text{m}$, 呈椭球形。另外, 在提取的夹杂物中发现了簇状的 Al_2O_3 , 其形貌如图5所示。这也证明了在直接抛光的块状样品中看到的分散 Al_2O_3 夹杂物为团簇 Al_2O_3 , 且在该 Al_2O_3 表面局部也有少量的 MnS 。

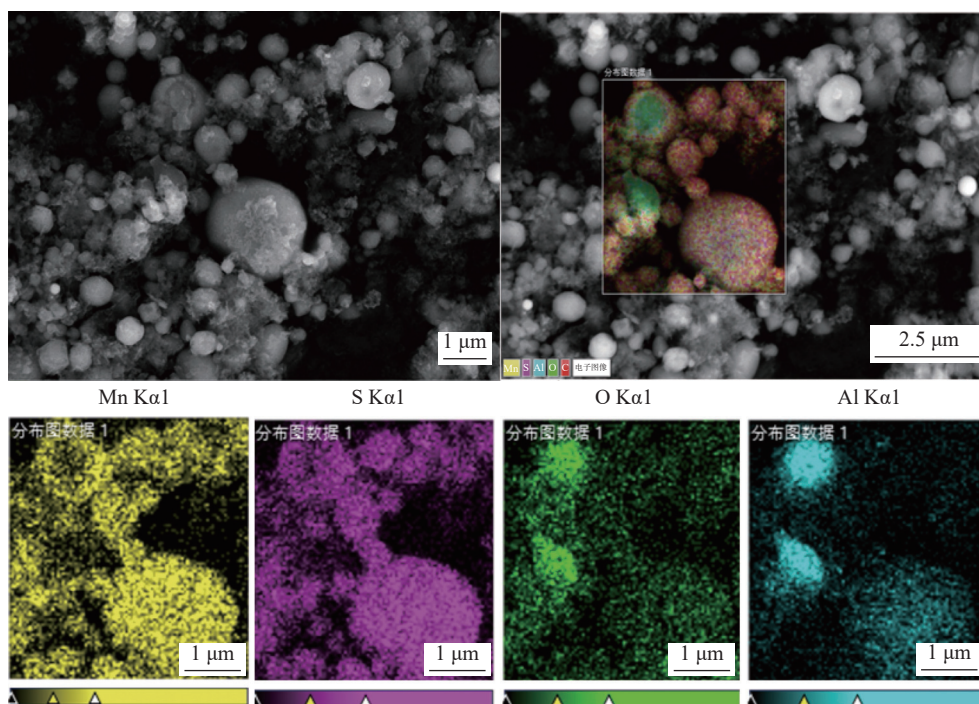


图4 MnS 及 $\text{MnS-Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物的形貌及元素分布
Fig. 4 Morphology and elements distribution of MnS and $\text{MnS-Al}_2\text{O}_3$

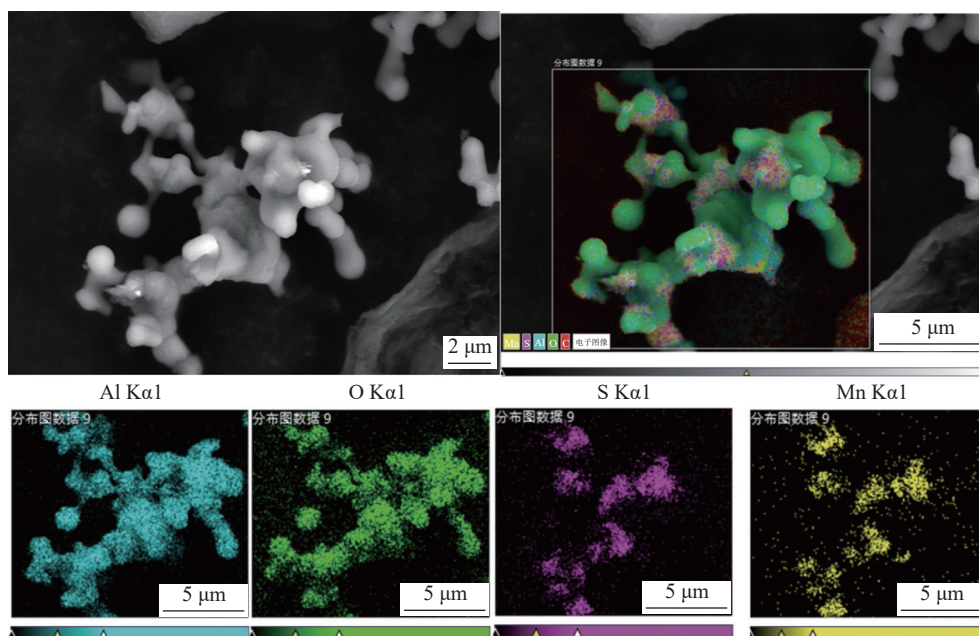


图5 簇状 Al_2O_3 夹杂物的形貌及元素分布
Fig. 5 Morphology and elements distribution of tufted Al_2O_3 inclusions

2.4 MnS 析出热力学计算

为了验证 MnS 析出是在液相中析出,还是在凝固过程中的固液两相区或者是在凝固后的固态中析出,分别通过公式(1)和(2)计算试验钢的液相线温度^[19]和固相线温度^[20]。

$$T_L = 1537 - 88w_{[C]} - 25w_{[S]} - 5w_{[Cu]} - 8w_{[Si]} - 5w_{[Mn]} - 2w_{[Mo]} - 4w_{[Ni]} - 1.5w_{[Cr]} - 18w_{[Ti]} - 2w_{[V]} - 30w_{[P]} \quad (1)$$

$$T_S = 1538 - 175w_{[C]} - 20w_{[Si]} - 30w_{[Mn]} - 280w_{[P]} - 575w_{[S]} - 4.75w_{[Ni]} - 6.5w_{[Cr]} - 7.5w_{[Al]} - 40w_{[Ti]} - 2w_{[V]} - 160w_{[O]} \quad (2)$$

T_L 和 T_S 分别代表液相线和固相线,其计算值分别为 1486 °C 和 1414 °C。

利用 Thermocalc 软件计算试验钢各析出相成分和温度的关系,如图 6 所示。其中, MNS 相组成为 MnS,可以看出其在 1390 °C 开始析出,在 1356 °C 析出急剧增多,直到 1000 °C 左右析出完毕,质量分数不再增加。而 Al₂O₃ 存在于 FCC_A1 相中,可以看出 Al₂O₃ 夹杂物在 1490 °C 已经开始析出。所以, Al₂O₃ 夹杂物析出于试验钢的液相中,这为 MnS 在 Al₂O₃ 夹杂物上析出形成 MnS-Al₂O₃ 复合夹杂物提供了条件。

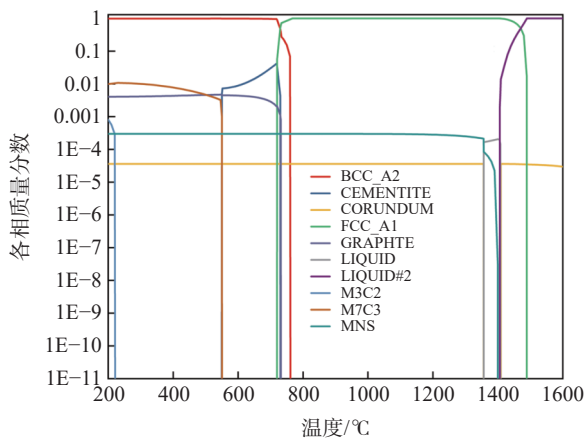


图 6 试验钢中各析出相的质量分数

Fig. 6 Mass fraction of each precipitated phase in the experimental steel

2.5 复合夹杂物界面错配度计算

基底与形核相之间的界面能是异质形核行为的控制因素。界面能越小,越容易触发异质形核。界面能与相关影响因素关系可用式(3)^[21]表示:

$$\gamma = \gamma_c + \gamma_d + \gamma_e \quad (3)$$

其中, γ 为两相界面能, γ_c 为相间界面化学性质(成键等)引起的能量变化, γ_d 为两相界面点阵错配能, γ_e 为晶格电子密度引起的能量变化。该理论较好地定性

解释了异质形核。很多研究者认为,界面点阵错配度对于促进异质形核起到了主导作用。Turnbull 等人^[22]首先定义了一维错配度,如式(4)所示:

$$f = \frac{\Delta a_0}{a_0} \quad (4)$$

其中, f 为基底相和形核相的一维错配度; a_0 为形核相低指数晶面上的晶格常数; Δa_0 为形核相与基底相在低指数晶面上晶格常数的差值。一般认为,当错配度低于 6% 时,为最有效形核;错配度在 6% ~ 12% 时,为一般有效形核;错配度高于 12% 时,对于形核基本无效。Briamffit^[23]发现对于 WC 和 δ -Fe 形成的界面而言,一维错配度并不能解释 WC 可以促进 δ -Fe 形核。这是由于一维错配度公式只能应用在两种晶型相同或者接近的晶体界面。为了克服一维错配度公式局限性,对于不同晶型的晶体界面, Briamffit 定义了二维错配度公式,如式(5):

$$\delta_{(hkl)_s}^{(hkl)_n} = \sum_{i=1}^3 \frac{|(d_{[uvw]_s} \cos \theta) - d_{[uvw]_n}|}{d_{[uvw]_n}} \times 100\% \quad (5)$$

式中, $(hkl)_s$ 为基底的低指数晶面, $[uvw]_s$ 为该晶面的一个低指数晶向, $d_{[uvw]_s}$ 为沿该晶向的原子间距, $(hkl)_n$ 为形核相的低指数晶面, $[uvw]_n$ 为该晶面的一个低指数晶向, $d_{[uvw]_n}$ 为沿该晶向的原子间距, θ 为 $[uvw]_s$ 和 $[uvw]_n$ 的夹角。

包裹型的 MnS-Al₂O₃ 复合夹杂物可以简化成的模型,其外层为 MnS 夹杂物,核心为 Al₂O₃ 夹杂物。对于 MnS 晶体,选取三个低指数晶面分别为 (100)、(110)、(111);对于 Al₂O₃ 晶体,选取的三个低指数晶面分别为 (0001)、(11-20)、(10-14)。根据式(5)进行 MnS 和 Al₂O₃ 界面的错配度计算,计算结果如表 3 所示。可以看出, MnS 的 (100) 与 Al₂O₃ (0001) 面的错配度只有 0.92%,远低于 6%;对于 MnS 的 (100) 面与 Al₂O₃ (10-14) 面,错配度最低也只有 6.45%。综上, Al₂O₃ 夹杂物可以促进 MnS 在其表面析出。这为在钢中形成 MnS-Al₂O₃ 复合夹杂物,降低 Al₂O₃ 夹杂物的危害提供了理论基础。

表 3 MnS 和 Al₂O₃ 不同晶面的错配度
Table 3 Mismatches of different crystal planes of MnS and Al₂O₃

Al ₂ O ₃ 晶面	错配度 /%		
	MnS(100)	MnS(110)	MnS(111)
Al ₂ O ₃ (0001)	0.92	18.25	20.82
Al ₂ O ₃ (11-20)	17.22	24.79	10.94
Al ₂ O ₃ (10-14)	6.45	16.36	20.20

3 结论

1) 实验室制得的车轮钢中主要存在 Al_2O_3 夹杂物、 MnS 夹杂物和 $\text{MnS-Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物,其中, Al_2O_3 夹杂物的晶型为 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。

2) 通过非水溶液电解法可以提取钢中的 $\text{MnS-Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物。在簇状的 Al_2O_3 夹杂物表面局部存在 MnS 。

3) MnS 在试验钢的固相中析出,而 Al_2O_3 在钢的液相中析出,这为形成 $\text{MnS-Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物提供了形核条件。

4) MnS 的 (100) 与 Al_2O_3 (0001) 面的错配度低于 6%,而 MnS 的 (100) 面与 Al_2O_3 (10-14) 面的错配度也只有 6.45%,所以, MnS 可以在 Al_2O_3 夹杂物表面有效形核析出。

致谢

感谢高铁车轮钢中复相夹杂物调控研究项目,河北省杰出青年科学基金(E2021209039),2021年度河北省引进留学人员资助项目(C20210309),唐山市科技创新团队培养计划项目(21130209D)的资助。

参考文献

- [1] Fan Xinguang. Research on rolling contact fatigue crack initiation and propagation of train wheels [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
(范新光. 列车车轮滚动接触疲劳裂纹萌生及扩展研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.)
- [2] Li Wei, Cheng Shengwei, Zhang Jinwen, *et al.* Research on technology of preventing rims crack from railway wheel fatigue[J]. Physical Testing and Measurement, 2019, 37(5): 32-37.
(李伟, 成生伟, 张锦文, 等. 防止铁道车轮疲劳裂纹技术探讨[J]. 物理测试, 2019, 37(5): 32-37.)
- [3] Cong Tao. Research on ultra-high cycle fatigue behavior and life evaluation method of railway wheels [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
(丛韬. 铁路车轮超高周疲劳行为研究和寿命评估方法[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.)
- [4] Meng Wei. Prediction of critical size of inclusions induced wheel rim crack [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
(孟伟. 诱发车轮轮辋裂纹的夹杂物临界尺寸预测[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.)
- [5] Mi G, Nan H, Liu Y, *et al.* Influence of inclusion on crack initiation in wheel rim[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2011, 18(1): 49-54.
- [6] Xu Zhou. Effect of Mg treatment on inclusions, microstructure and properties of low carbon microalloyed steel [D]. Suzhou: Soochow University, 2018.
(徐周. Mg处理对低碳微合金钢中夹杂物、组织及性能的影响[D]. 苏州: 苏州大学, 2018.)
- [7] Guo Zhenhe, Deng Liqin. Effect of magnesium and calcium treatment on inclusions and fatigue properties of wheel steel[J]. Baosteel Technology, 2016, (4): 16-20.
(郭振和, 邓丽琴. 镁钙处理对车轮钢中夹杂物及疲劳性能的影响[J]. 宝钢技术, 2016, (4): 16-20.)
- [8] Tang Qingyu, Yang Jichun, Yang Wenkui, *et al.* Effect of rare earth Ce on microstructure and impact properties of CL50 wheel steel[J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2017, 36(3): 221-224.
(唐庆余, 杨吉春, 杨文魁, 等. 稀土Ce对CL50车轮钢显微组织和冲击性能的影响[J]. 内蒙古科技大学学报, 2017, 36(3): 221-224.)
- [9] Wu Zhanfang, Liu Zhenyu, Qiu Shengtao, *et al.* Effect of composition and morphology of non-metallic inclusions on fracture toughness in as-cast AHSS[J]. Metall. Res. Technol., 2019, 116: 623.
- [10] Yu Yinong. Effect of sulfur content on second phase precipitation and mechanical properties of high-speed wheel steel [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.
(余音宏. 硫含量对高速车轮钢第二相析出及力学性能的影响[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.)
- [11] Lei Shaolong, Jiang Min, Yang Die, *et al.* Effects of oxides on MnS precipitation in Al deoxidized steel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(11): 1443-1449.
(雷少龙, 姜敏, 杨叠, 等. Al脱氧钢中氧化物对 MnS 析出的影响[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(11): 1443-1449.)

- [12] Hou Chuan'an, Huang Ye, Li Jingshe, *et al.* Effect of cooling rate on the inclusion ratio of MnS+Al₂O₃ composite in steel[J]. *Industrial Heating*, 2016, 45(3): 20–22.
(侯传安, 黄野, 李京社, 等. 冷却速率对钢中MnS+Al₂O₃复合夹杂物包裹率的影响研究[J]. *工业加热*, 2016, 45(3): 20–22.)
- [13] Shen Chang, Lu Qiang, Guo Junbo, *et al.* Process development and practice of forming MnS plastic inclusion in middle and high carbon aluminum killed steel[J]. *Iron and Steel*, 2021, 56(12): 62–67, 74.
(沈昶, 陆强, 郭俊波, 等. 中高碳铝镇静钢形成MnS塑性夹杂的工艺开发与实践[J]. *钢铁*, 2021, 56(12): 62–67, 74.)
- [14] Li Li, Xue Dongmei, Pan Tao, *et al.* Effect of heating temperature on chemical metallurgy of high sulfur wheel steel inclusions[J]. *Continuous Casting*, 2017, 42(3): 43–48.
(李丽, 薛东妹, 潘涛, 等. 加热温度对高硫车轮钢夹杂物化学冶金的影响[J]. *连铸*, 2017, 42(3): 43–48.)
- [15] Li Zhaodong. Study on microstructure and property control of new high-speed railway wheel materials [C]//Proceedings of the 11th China Steel Annual Conference. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2017.
(李昭东. 新型高铁车轮材料的组织和性能调控研究[C]//第十一届中国钢铁年会论文集. 北京: 中国金属学会, 2017.)
- [16] Li Shengjun, Ren Xuechong, Gao Kewei, *et al.* Effect of heat treatment on morphology and distribution of inclusions in wheel steel[J]. *Journal of Materials and Heat Treatment*, 2011, 32(12): 48–54.
(李胜军, 任学冲, 高克玮, 等. 热处理对车轮钢中夹杂物的形态和分布的影响[J]. *材料热处理学报*, 2011, 32(12): 48–54.)
- [17] Chen P, Zhu C, Li G, *et al.* Effect of sulphur concentration on precipitation behaviors of MnS-containing inclusions in GCr15 bearing steels after LF refining[J]. *ISIJ International*, 2017, 57(6): 1019.
- [18] Yang Jichun, Liu Xiangjun, Zhou Li, *et al.* Effect of rare earth Ce on mechanical properties and corrosion resistance of CL50D high-speed wheel steel[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2019, 44(4): 15–18.
(杨吉春, 刘香军, 周莉, 等. 稀土Ce对CL50D高速车轮钢力学性能及耐腐蚀性能的影响[J]. *金属热处理*, 2019, 44(4): 15–18.)
- [19] Thomas B G, Samarasekera I V, Brimacombe J K. Mathematical model of the thermal processing of steel ingots: Part I. Heat flow model[J]. *Metallurgical Transactions B*, 1987, 18(1): 119–130.
- [20] Chen J X. Manual of chart and data in common use of steel making[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.
- [21] Tiller W A, Takahashi T. The electrostatic contribution in heterogeneous nucleation theory: Pure liquids[J]. *Acta Metallurgica*, 1969, 17(4): 483–496.
- [22] Turnbull D, Vonnegut B. Nucleation catalysis[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1952, 44(6): 1292–1298.
- [23] Bramfitt B L. The effect of carbide and nitride additions on the heterogeneous nucleation behavior of liquid iron[J]. *Metallurgical Transactions*, 1970, 1(7): 1987–1995.

编辑 邓淑惠

西南地区容量最大全钒液流储能示范项目落地攀枝花

2013年7月6日,在“2023国有企业攀枝花行”主题活动上,总投资约16亿元、西南地区容量最大的全钒液流储能电站示范应用项目落户攀枝花钒钛高新区。

项目由攀枝花钒钛高新区与攀枝花中电投新能源有限公司签约,拟选址攀枝花钒钛高新区团山片区,用地面积约80亩,投资建设100 MW/500 MWh全钒液流储能示范电站。该项目是世界级钒钛产业基地、全国重要清洁能源基地建设重点支撑项目,将打造四川省电力系统长时储能应用试点样板,极大提升攀枝花建设“中国钒电之都”的影响力,为攀枝花全钒液流储能产品立足四川、辐射西南、服务全国提供先导支撑,并推动钒储能从商业化初期向规模化发展。

摘自 <http://www.panzhihua.gov.cn/tzfw/zwgk/tzdt/4478841.shtml>