

# 高速车轮钢包裹类非金属夹杂物研究

李向阳<sup>1</sup>, 吴旺朋<sup>1</sup>, 陈艳<sup>1\*</sup>, 赵海<sup>2</sup>, 沈昶<sup>2</sup>, 何宜柱<sup>1</sup>

(1. 安徽工业大学材料科学与工程学院, 安徽 马鞍山 243032; 2. 马鞍山钢铁股份有限公司, 安徽 马鞍山 243032)

**摘要:**为评估高速车轮钢中包裹类夹杂物的包裹状态, 利用扫描电镜和 ASPEX 型自动扫描电镜对高速车轮钢中核壳结构包裹类非金属夹杂物进行分析研究, 包括核壳结构包裹类非金属夹杂物形貌、成分, 包括核和壳、包裹类夹杂物和基体界面的成分, 统计分析了核和壳的尺寸。研究表明, 核壳结构包裹类非金属夹杂物一般呈椭圆形, 长度主要分布在 1 ~ 10  $\mu\text{m}$ , 包裹外壳主要成分为塑性的 MnS 夹杂, 包裹厚度不均匀, 一般为 0 ~ 2.26  $\mu\text{m}$ 。被包裹的核以脆性夹杂物  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为主, 核的尺寸较小, 一般为 0.31 ~ 1.43  $\mu\text{m}$ 。从夹杂物核心到外壳存在成分梯度, 推断包裹夹杂物外层 MnS 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  间为化学结合。采用 JMatPro 热力学软件计算, 结果表明, S 和 Mn 尤其是 S 含量的增加可以提高 MnS 的析出温度, 有助于形成 MnS 包裹  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的核壳类非金属夹杂物, 从而改善高速车轮钢的疲劳性能。

**关键词:**高速车轮钢; 包裹类非金属夹杂物; 成分; 尺寸; 热力学计算

中图分类号: TF76 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2021)03-0199-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.03.030

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Research on non-metallic inclusions in high-speed wheel steel

Li Xiangyang<sup>1</sup>, Wu Wangpeng<sup>1</sup>, Chen Yan<sup>1\*</sup>, Zhao Hai<sup>2</sup>, Shen Chang<sup>2</sup>, He Yizhu<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Technology, Ma' anshan 243032, Anhui, China; 2. Ma' anshan Iron and Steel Co., Ltd., Ma' anshan 243032, Anhui, China)

**Abstract:** In order to reduce the adverse effects of brittle  $\text{Al}_2\text{O}_3$  inclusions on the fatigue properties of high-speed wheel steels, plastic inclusions are usually used to wrap the brittle inclusions. In order to evaluate the wrapping state of wrapped inclusions in high-speed wheel steel, scanning electron microscope and ASPEX automatic scanning electron microscope are used to analyze and study the wrapped non-metallic inclusions in core-shell structure of high-speed wheel steel, including core-shell structure wrapped non-metallic inclusions. The morphology and composition of metal inclusions, including the core and shell, the composition of the inclusions and the matrix interface, were analyzed. And the size of the core and shell had been statistically measured. It is found out that core-shell structured non-metallic inclusions are generally elliptical with a length of 1 ~ 10  $\mu\text{m}$ . The main component of the coating shell is plastic MnS inclusions. The thickness of the coating is typical around 0 ~ 2.26  $\mu\text{m}$ . The wrapped core is dominated by brittle inclusions  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , and the size of the core is small, generally 0.31 ~ 1.43  $\mu\text{m}$ . There is a composition gradient from the core of the inclusion to the outer shell. It is inferred that the outer layer of the inclusion is chemically bonded between MnS and  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . The calculation results using JMatPro thermodynamics software show that the increase of S and Mn content can increase the precipitation temperature of MnS, help to form core-shell non-metallic inclusions of MnS wrapped  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , thereby improve the fatigue performance of high-speed wheel steel.

收稿日期: 2020-09-23

**作者简介:** 李向阳 (1993—), 男, 安徽亳州人, 硕士研究生, 主要从事高速车轮钢中非金属夹杂物研究, E-mail: 565383460@qq.com; \* 通讯作者: 陈艳 (1975—), 女, 四川乐山人, 副教授, 博士, 主要从事改善连铸坯质量研究, E-mail: chenyan@ahut.edu.cn.

**Key words:** high-speed wheel steel, wrapped non-metallic inclusions, composition analysis, size statistics, thermodynamic calculation

## 0 引言

随着铁路运输向高速、重载方向发展,特别是近几年我国铁路经过六次大提速以后,对高速车轮用钢的质量要求越来越高。车轮钢的质量是影响高速车轮安全性的第一要素。高速列车运行中突出的安全问题是车轮踏面剥离,其中非金属夹杂物是车轮踏面剥离的主要因素。由于氧化物夹杂为硬脆的特性,其一直是断裂发生的主要因素,塑性的MnS包裹脆性 $Al_2O_3$ 后,相较于单一的 $Al_2O_3$ 夹杂,可以改善其周围的应力集中,从而改善高速车轮踏面的疲劳断裂韧性<sup>[1-2]</sup>。为评价高速车轮钢中脆性 $Al_2O_3$ 夹杂被塑性MnS夹杂包裹状态,笔者主要对

高速车轮钢中包裹类非金属夹杂物的形貌、成分和尺寸进行分析研究,并对高速车轮钢中MnS夹杂和 $Al_2O_3$ 夹杂生成与转变进行热力学计算分析。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 非金属夹杂物检测方法

试验钢是某钢厂生产的高速车轮钢,主要化学成分如表1所示。选取现场生产的正常车轮,利用线切割的方法截取尺寸为10 mm×10 mm×10 mm的金相试样。通过粗磨、细磨、抛光等程序后,再采用夹具,增加冲洗、清抛、清洁等工艺更好地保障分析试样的平行度和清洁度<sup>[3]</sup>。

表1 高速车轮钢的主要化学成分

Table 1 Main chemical compositions of high-speed wheel steel

C	Si	Mn	Mo	Ni	V	Cr	Cu	S	P	Al	O	N
0.2~0.3	1.2~1.5	1.91	0.5	0.2~0.28	0.03~0.12	0.03	0.09	<0.006	0.019	<0.04	<0.001	<0.005

采用场发射扫描电镜(NANO SEM430)和背散射扫描电镜(JSM-6490LV)以及能谱仪(EDS)对核壳结构的包裹类非金属夹杂物形貌和成分进行分析。使用统计软件Image-proplus对壳核结构的包裹类非金属夹杂物的尺寸进行统计分析。

利用美国FEI公司生产的ASPEX型自动扫描电镜对核壳结构的包裹类非金属夹杂物定量分析。此设备与常规扫描电镜相比除了具备基本功能,还能对较大尺寸试样进行分析,得到检测区域夹杂物的信息<sup>[4]</sup>。其通过采集背散射电子束信号检测夹杂物,使同步控制X射线能谱仪对夹杂物成分进行分析<sup>[5]</sup>。达到对非金属夹杂物全面的分析。

### 1.2 热力学计算方法

JMatPro热力学软件是研究钢中非金属夹杂物生成及转变的常用软件。为了更好地研究成分对MnS包裹 $Al_2O_3$ 夹杂的影响,采用该软件分别计算了车轮钢中各元素含量对MnS夹杂以及 $Al_2O_3$ 夹杂析出温度的影响。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 包裹类非金属夹杂物的扫描电镜分析

在高速车轮钢中观察到典型的包裹类非金属夹杂物形貌,如图1所示,从图1可以看出,为浅灰色

夹杂包裹着深灰色夹杂的壳核结构非金属夹杂物。通过对包裹类夹杂物成分进行面扫描(图2所示)可知在被包裹夹杂物主要成分为O和Al,说明其为脆性的氧化物 $Al_2O_3$ 为主。浅灰色包裹外层主要成分为S和Mn。也就是说此类夹杂物是由塑性MnS包裹脆性 $Al_2O_3$ 的复合夹杂物。实现塑性夹杂对脆性氧化物夹杂的包裹,有利于提高高速车轮钢的疲劳性能。为确定包裹类非金属夹杂物是否存在成分梯度,从核心向外壳逐点分析了其成分(结果如图3所示)。由图3可知,Al和O的含量随包裹厚度的增加逐渐减少,而S和Mn的含量随着包裹厚度的增加逐渐增加,说明包裹类夹杂物外壳和核心的结合方式是化学结合。

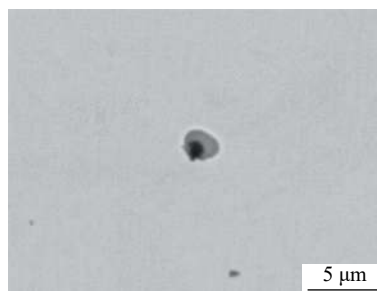


图1 高速车轮钢中包裹类非金属夹杂物形貌  
Fig. 1 The morphology of wrapped non-metallic inclusions in high-speed wheel steel

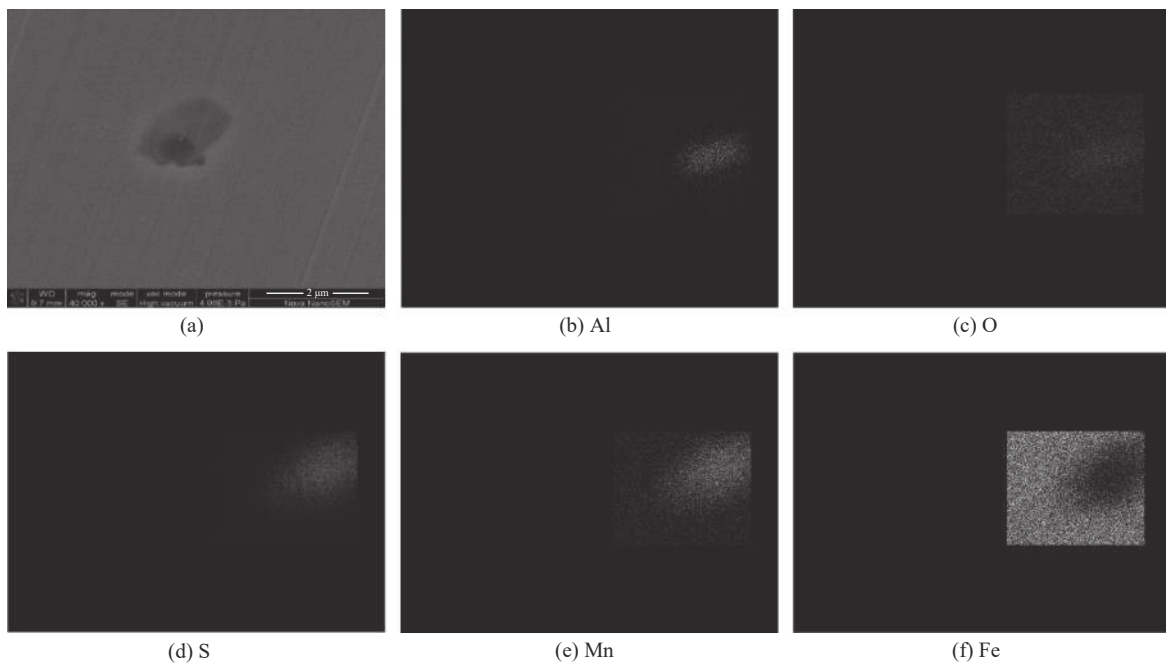


图 2 高速车轮钢包裹类夹杂物 EDS 面分析图像  
 Fig. 2 EDS surface analysis image of high-speed wheel steel-wrapped inclusions

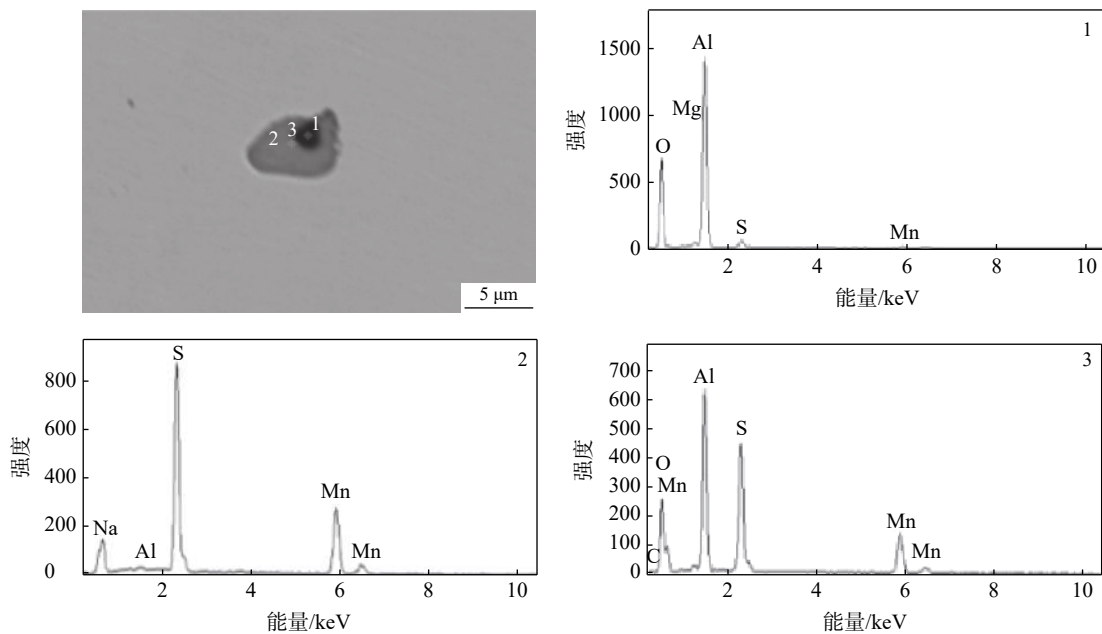


图 3 高速车轮钢包裹类夹杂物扫描电镜形貌及能谱照片  
 Fig. 3 SEM image and energy spectrum photos of inclusions in high-speed wheel steel

为了解高速车轮钢中包裹类非金属夹杂物的分布情况,采用 ASPEX 全自动扫描电镜对车轮钢中非金属夹杂物进行统计分析,统计结果如图 4 和表 2 所示。由图 4 可知,单位面积内 MnS 夹杂数量最多,面积最大,其次是氧化物- MnS 复合夹杂。对不同长度的各类夹杂物数量进行统计结果见表 2。高速

车轮钢中核壳结构的非金属夹杂物的长度主要分布在 1 ~ 10 μm。高速车轮钢中包裹类非金属夹杂物的形貌多数为椭圆形。其中塑性夹杂物占到了总夹杂物的 98.4%,塑性好的 MnS 夹杂和包裹类夹杂占据多数,有利于改善车轮钢的塑性。

为评价塑性 MnS 对脆性 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂包裹状态,

测量了包裹层厚度、核心尺寸,结果如图5、6所示。由图5可知,相对于纯MnS而言,包裹类夹杂物尺寸比较小些,一般为1~10 μm。核心尺寸一般为0.31~4.55 μm,其中集中分布在0.31~1.43 μm,说明Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>夹杂尺寸为0.31~1.43 μm时更易被MnS

包裹。由图6可知,包裹外壳厚度一般为0~2.26 μm,其分布范围比较宽,再结合图1可看出此高速车轮钢中的MnS包裹Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>复合夹杂的包裹不均匀,对改善脆性氧化物对车轮钢疲劳性能影响的效果不够理想。

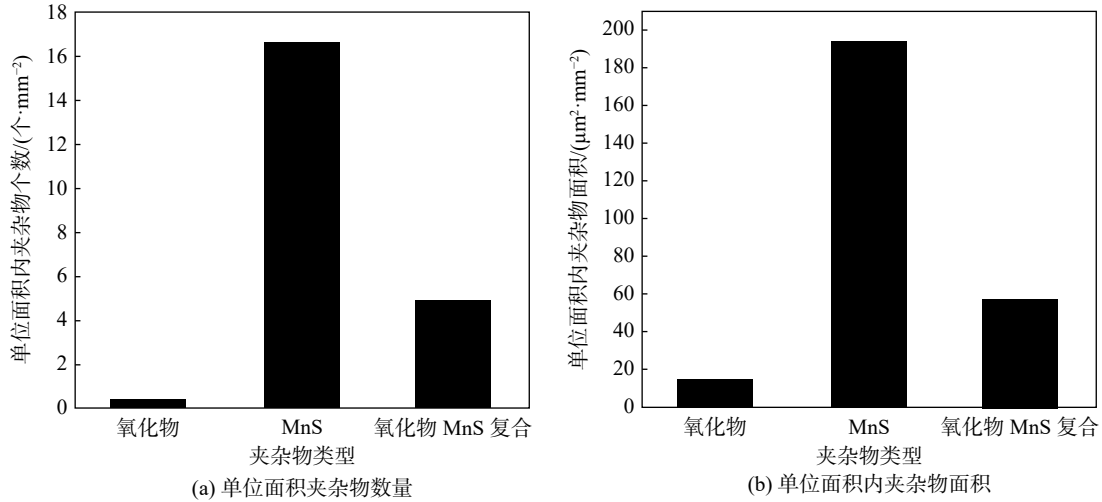


图4 高速车轮钢各类夹杂物比较  
Fig. 4 Comparison of various inclusions in high-speed wheel steel

表2 不同长度的各类夹杂物数量占总夹杂物数量的比例

Table 2 The proportion of the number of various types of inclusions of different lengths to the total number of inclusions

夹杂物类型	占比/%					合计
	1~5 μm	5~10 μm	10~15 μm	15~20 μm	>20 μm	
氧化物	0.4	0.7	1.3	0.0	0.2	1.6
MnS	32.9	27.6	11.3	3.7	0.4	75.9
氧化物-MnS复合	12.8	7.0	2.0	0.5	0.2	22.5
合计	46.1	35.3	14.6	4.2	0.8	100

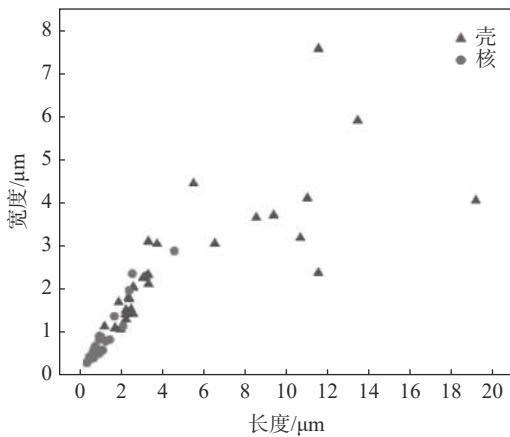


图5 高速车轮钢包裹类非金属夹杂物壳及被包裹Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>核长宽分布

Fig. 5 High-speed wheel steel-coated non-metallic inclusion shell and the length and width distribution of the coated Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> core

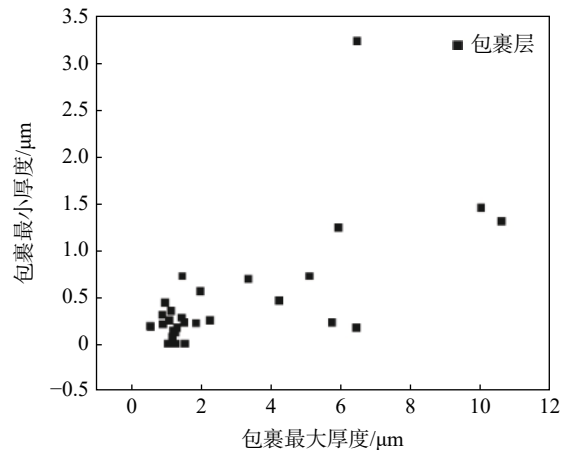


图6 高速车轮钢包裹类非金属夹杂物包裹厚度分布  
Fig. 6 Thickness distribution diagram of non-metallic inclusions wrapped in high-speed wheel steel

## 2.2 非金属夹杂物生成的热力学计算

由前面分析结果可知 MnS 对脆性  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂的包裹不均匀,甚至部分  $\text{Al}_2\text{O}_3$  还裸露在钢基体中,这对高速车轮钢的疲劳性能是不利的。为了改善核壳结构非金属夹杂物的包裹状态,分别计算了钢成分对外壳 MnS 和核心  $\text{Al}_2\text{O}_3$  析出温度的影响,如图 7 所示。由图 7 可知,在实际冷却过程中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  液相线以上析出, MnS 在 1400 °C 开始析出,并随着钢液温度的降低其含量逐渐增加,最终达到析出平衡状态。凝固过程中,小尺寸  $\text{Al}_2\text{O}_3$  被推至固液两相区,选分结晶作用使得钢中的 Mn 和 S 在凝固前沿富集,并以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  作为异质形核质点析出 MnS 夹杂物<sup>[6]</sup>。

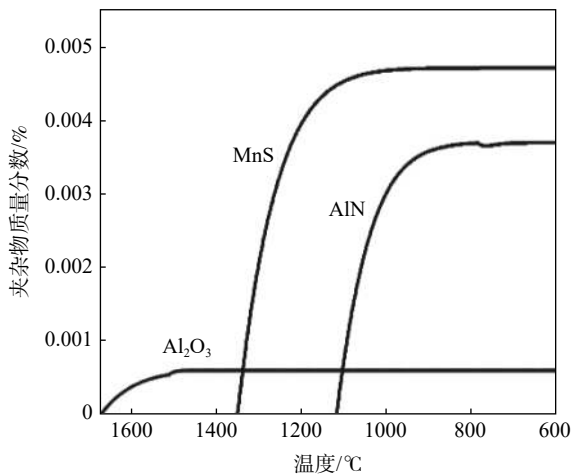


图 7 高速车轮钢凝固过程中非金属夹杂物的析出行为  
Fig. 7 Precipitation behavior of non-metallic inclusions during solidification of high-speed wheel steel

S 含量增加对高速车轮钢中 MnS 夹杂析出温度变化的影响,如图 8 所示。由图 8 可知, S 含量在从 0.001% 增加到 0.004% 时, MnS 夹杂析出温度逐渐升高。S 含量在大于 0.004% 时 MnS 析出温度变化不大。固相线温度随 S 含量增加略有降低。研究表明 S 含量为 0.011% 时韧性最优且有效促进包裹类夹杂物的形成<sup>[7]</sup>。

Mn 含量增加对高速车轮钢中 MnS 夹杂析出温度变化的影响,如图 9 所示。由图 9 可知随着 Mn 含量的增加 MnS 夹杂析出温度逐渐升高最终趋于平缓,固相线温度随 Mn 含量增加略有降低。

计算结果显示其他元素对 MnS 析出温度没有影响, S、Mn、Si、Mo、P 元素的增加可以降低固相线温度。通过增加 Mn 和 S 的含量提高 MnS 的析出温度,有利于 MnS 包裹  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的核壳类非金属夹杂物形成,且可以改善包裹类夹杂的形态,从而改善高速车轮钢的疲劳性能。

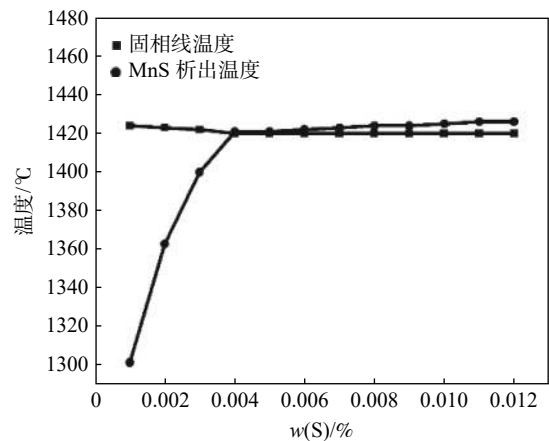


图 8 S 含量对高速车轮钢 MnS 析出温度的影响  
Fig. 8 Effect of S content on the precipitation temperature of MnS in high-speed wheel steel

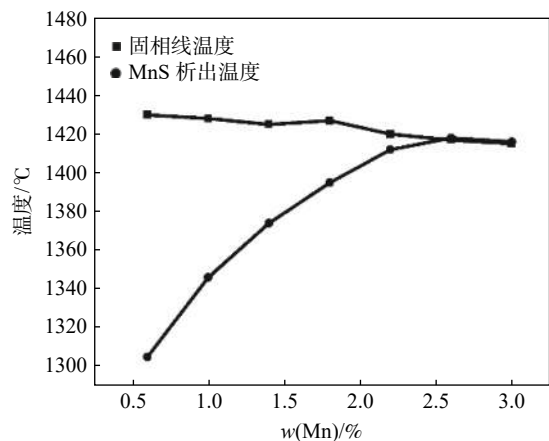


图 9 Mn 含量对高速车轮钢 MnS 析出温度的影响  
Fig. 9 Effect of Mn content on precipitation temperature of MnS in high-speed wheel steel

## 3 结论

1) 高速车轮钢中核壳结构的包裹类非金属夹杂物一般呈椭圆形,核是  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂呈深灰色,外壳是 MnS 夹杂呈浅灰色,其外壳和核心是化学结合。

2) 被包裹的核心以脆性夹杂物  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为主,核的尺寸较小,主要集中在 0.31 ~ 1.43  $\mu\text{m}$ ,若控制  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂的尺寸在此范围,更易被 MnS 包裹。包裹外壳主要成分为塑性的 MnS 夹杂,包裹厚度为 0 ~ 2.26  $\mu\text{m}$ 。包裹层不均匀,不利于改善高速车轮钢的疲劳性能。

3) 热力学计算结果可知, S 和 Mn 尤其是 S 含量的增加可以提高 MnS 的析出温度,有利于形成 MnS 包裹  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的核壳类非金属夹杂物,且可以改善包裹类夹杂的形态,从而有助于提高高速车轮钢的疲劳性能。

## 参考文献

- [1] Ma Yue, Pan Tao, Jiang Bo, *et al.* The effect of S content on the fracture toughness of high-speed wheel steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2011, 47(8): 978–983.  
(马跃, 潘涛, 江波, 等. S含量对高速车轮钢断裂韧性影响的研究[J]. *金属学报*, 2011, 47(8): 978–983.)
- [2] Lyne C M, Kasak A. Effect of sulfur on the fatigue behavior of bearing steel[J]. *Trans ASM*, 1968, 61(1): 10.
- [3] Zhang Jingrui, Hu Qingli, Zhao Naisheng, *et al.* Preparation process of samples for ASPEX automatic inclusion analyzer[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Physics*, 2018, 54(10): 712–715.  
(张敬蕊, 胡庆利, 赵乃胜, 等. ASPEX全自动夹杂物分析仪试样的制备工艺[J]. *理化检验(物理分册)*, 2018, 54(10): 712–715.)
- [4] Wang Xinhua, Li Xiugang, Li Qiang, *et al.* Control of non-metallic inclusions in series CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system in X80 pipeline steel plate[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2013, 49(5): 553–561.  
(王新华, 李秀刚, 李强, 等. X80管线钢板中条串状CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系非金属夹杂物的控制[J]. *金属学报*, 2013, 49(5): 553–561.)
- [5] Tian Chao, Liu Jianhui, Dong Han. Comparative study on the characteristics of inclusions in imported and domestic bearing steel[J]. *Hot Working Technology*, 2017, 46(24): 58–62.  
(田超, 刘剑辉, 董瀚. 进口与国产轴承钢夹杂物特征的对比研究[J]. *热加工工艺*, 2017, 46(24): 58–62.)
- [6] Lei Shaolong, Jiang Min, Yang Die, *et al.* Effects of oxides in Al deoxidized steel on MnS precipitation[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.)
- [7] Yu Yinhong, Pan Tao, Yin Jiancheng, *et al.* The effect of S content on the properties and inclusions of high-speed wheel steel[J]. *Iron and Steel*, 2013, 48(10): 57–62.  
(余音宏, 潘涛, 尹建成, 等. S含量对高速车轮钢性能和夹杂物的影响[J]. *钢铁*, 2013, 48(10): 57–62.)

编辑 邓淑惠

## 攀钢研究院成功打通精制尾渣制备钒系合金工艺技术路线

(2021年6月16日消息)四氯化钛精制尾渣是高炉渣提钛产线除钒后所得二次资源,该尾渣具有钒含量高、物相结构简单、杂质含量低等优点,被视作一种高品质提钒原料。攀钢研究院钒技术研究所产品团队在前期通过对脱氯尾渣成分、物相及热力学可行性进行深入分析,初步验证了脱氯尾渣制备钒系合金的技术可行性,并在此基础上进行了铝热自蔓延公斤级试验,成功打通精制尾渣制备钒系合金工艺技术路线。

此次试验,科研人员对反应炉体打结制度、体系热量需求、还原剂添加量等参数进行了深入探索、详细计算及数值化设定,并通过炉体准备、精心备料、精准配料等手段,开展了相关试验并取得一次性成功,获得了满足GB/T 4139—2012标准要求的钒铁合金产品及V、Ti、Al、Fe含量达98.0%的钒钛系合金,实现精制尾渣由渣到“金”的完美蜕变。

下一步,项目团队拟进一步跟进该尾渣成分变化,并在此基础上开展条件试验,为该技术产业化试验提供技术支撑。

(余彬 供稿)