

# 稀土对高强车轮钢夹杂物赋存特征的影响研究

刘 军<sup>1</sup>, 韩荣荣<sup>1,2</sup>, 张 波<sup>2\*</sup>, 李明光<sup>1</sup>, 苗 隽<sup>1</sup>, 刘宏亮<sup>1</sup>, 刘承军<sup>2</sup>

- (1. 本钢集团有限公司 技术中心 先进汽车用钢开发与应用技术国家地方联合工程实验室, 辽宁 本溪 117000;  
2. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:**结合高温模拟实验和热力学分析,探讨了稀土对高强车轮钢中夹杂物类型及尺寸分布的影响,并与传统的钙处理钢进行了对比。研究表明,铝脱氧车轮钢经钙处理后夹杂物主要为 $Al_2O_3$ 、 $MnS$ 、 $(Mn, Ca)S$ 和 $CaO-Al_2O_3$ 以及 $Al_2O_3-(Mn, Ca)S$ 和 $CaO-Al_2O_3-CaS$ 包裹型复合夹杂物;与钙处理钢对比,车轮钢经稀土处理后,钢中 $Al_2O_3$ 夹杂物数量减少, $MnS$ 和 $(Ca, Mn)S$ 夹杂物消失,生成了近球形的 $Ce_2O_2S$ 、 $Ce_2O_3$ 夹杂,夹杂物尺寸显著减小;随稀土含量的增加[ $w(Ce) = 0.0160\% \sim 0.0250\%$ ],不大于 $5 \mu m$ 的夹杂物数量占比由 $91.0\%$ 提升至 $99.8\%$ ,稀土细化夹杂物效果显著。热力学分析表明:在 $1600 \text{ }^\circ C$ 条件下,随着车轮钢中 $w(Ce)$ 由 $0$ 增加至 $0.0300\%$ ,钢液中主要夹杂物类型的变化规律为 $Al_2O_3 \rightarrow CeAlO_3 \rightarrow Ce_2O_3 \rightarrow Ce_2O_2S$ 。通过稀土处理可实现钢中 $Al_2O_3$ 夹杂物的变质,并有效抑制凝固过程中 $MnS$ 夹杂的生成,生成 $Ce_2O_2S$ 、 $Ce_2O_3$ 夹杂。

**关键词:**车轮钢;稀土;夹杂物;热力学分析;尺寸细化

**中图分类号:** TG174; O614.33

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-0277(2024)02-0057-09

随着近年来车轮轻量化水平的不断提高,车轮用钢向着高强度发展,而非金属夹杂物通常是影响钢材性能的不利因素<sup>[1,2]</sup>。已有研究表明<sup>[3-9]</sup>,大尺寸非金属夹杂物是导致车轮钢发生疲劳失效的主要原因,钢中夹杂物对疲劳性能的影响一方面取决于夹杂物的类型、数量、尺寸、形状和分布,另一方面受钢基体组织和性质制约。比如长条状 $MnS$ 塑性夹杂、大尺寸的 $Al_2O_3$ 脆性夹杂以及钙铝酸盐夹

杂等,由于其弹性模量和热膨胀系数与钢基体不同,会破坏钢基体的连续性,在疲劳失效过程中极易成为裂纹源,在夹杂物与基体之间产生应力集中,进而裂纹扩展,造成疲劳断裂。因此降低钢中杂质元素含量,严格控制钢中夹杂物的类型、尺寸对提升高强车轮钢的疲劳性能十分有利。

稀土 $Ce$ 由于其原子结构的特殊性,化学活性强,易与钢液中的氧、硫元素反应生成密度小的高熔点稀

收稿日期:2023-07-20

基金项目:国家自然科学基金项目(52174383;U1908224);辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC2002047);辽宁省优秀青年科学基金项目(2022-YQ-09)

作者简介:刘 军(1971-),男,辽宁本溪人,教授级高级工程师,主要从事高品质钢冶金工艺技术研究,E-mail: lious1@yeah.net

\* 通讯作者:张 波,教授,博导,E-mail: zhangbo@smm.neu.edu.cn

DOI: 10.3724/S1004-0277.202402005

土化合物,上浮至钢渣中被吸收,从而减少钢液内的杂质含量,起净化钢液、变质夹杂物作用。据大量研究表明<sup>[10-13]</sup>,添加适量 Ce 可将钢中硬质的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂变质成较软的  $\text{CeAlO}_3$ 、 $\text{Ce}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$  夹杂,且 Ce 处理可抑制 MnS 夹杂的生成,转而生成为对钢材性能影响较小的  $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$  夹杂。虽然前人<sup>[14-16]</sup>对稀土变质夹杂物作用有一定的研究,但稀土对高强车轮钢中夹杂物的影响研究报道较少。

因此本文以国内某企业生产的车轮钢为研究对象,利用高温感应炉进行车轮钢稀土处理的高温模拟实验<sup>[17]</sup>,并结合 Factsage 进行热力学计算,对比分析传统钙处理和不同强度的稀土处理条件下车轮钢铸锭中夹杂物的赋存特征变化。

## 1 实验方法

本文采用 50 kg 真空感应炉冶炼高强车轮钢,

在镁砂坩埚内装入工业纯铁及石墨,接通真空泵保持炉内真空度达到 10 Pa 以下送电加热,使炉料进行熔化,通入氩气进行气氛保护,待炉料完全熔化后向钢液中添加铝粒进行铝脱氧,脱氧 5 min 后加入 Si、Mn、Cr、Nb 进行合金化,待合金完全熔化后,采用铁皮包裹硅钙合金或铈铁合金放入炉顶加料器中,进而加入钢液内部并搅拌模拟钙处理或稀土处理,将钢液温度控制在 1550 °C 进行浇铸,待钢锭在铸模中完全凝固并冷却至室温脱模,取出铸锭。

浇铸后铸锭为带有半球底的圆柱,在下部切下来的半球底中心位置取直径为 8 mm 的圆柱试样,采用 ARL 直读光谱仪测定铸锭主要元素成分,采用氧氮分析仪测定钢中  $w(\text{T. O})$ 、 $w[\text{N}]$ ,采用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)测定稀土 Ce 含量,实验钢化学成分如表 1 所示。

表 1 实验钢成分/%(质量分数)

Table 1 Test results of steel composition/%(Mass fraction)

No.	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Nb	O	N	Ce	Ca
1 <sup>#</sup>	0.068	0.768	1.52	0.0030	0.0025	0.030	0.288	0.048	0.006	0.0013	0	0.0020
2 <sup>#</sup>	0.067	0.688	1.43	0.0026	0.0008	0.040	0.236	0.047	0.001	0.0032	0.0160	0
3 <sup>#</sup>	0.062	0.721	1.49	0.0025	0.0008	0.037	0.247	0.045	0.002	0.0032	0.0210	0
4 <sup>#</sup>	0.063	0.718	1.48	0.0027	0.0020	0.029	0.243	0.048	0.003	0.0053	0.0250	0

利用 Phenom Desktop 扫描电镜(SEM)及其自带的能谱(EDS)和小样电解分析钢中非金属夹杂物的类型和形貌,利用 Phenom 扫描电镜在 2000 倍下拍摄 150 个视场,共得到 1.5 mm<sup>2</sup> 的统计面积,基于扫描电镜拍摄照片中钢基体和夹杂物间存在的色泽差异,采用专业图像分析软件 Image pro plus 6.0 统计视场中尺寸小于 0.5 μm、介于 0.5 μm~2 μm、2 μm~5 μm 和大于 5 μm 的夹杂物数量,并计算各实验钢夹杂物的平均尺寸和数密度。

本文采用 Factsage8.1 热力学软件对车轮钢体系中夹杂物的析出行为进行计算,由于该软件中稀土化合物热力学数据的缺失,有学者<sup>[18]</sup>在软件优化

数据库中添加了  $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$  的热力学数据,使计算结果更加准确。数据库选择 FactPS、FToxid、FSstel 及新添加的  $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$  数据库,利用 Equilib 模块计算 1600 °C 和平衡凝固条件下车轮钢中夹杂物的析出演变规律。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 铸锭中的夹杂物类型分析

1<sup>#</sup>经 Ca 处理的实验钢中典型夹杂物 SEM 图像及成分如图 1、图 2 所示,包括  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、MnS、(Mn, Ca)S 和 CaO- $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。其中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂(如图 1a 所示)形状不规则且含尖角,属于脆性夹杂,在轧制过

程中会破坏钢基体的连续性,严重影响到钢的力学性能和加工性能,且  $\text{Al}_2\text{O}_3$  数量过多会在水口内形成结瘤,从而使水口堵塞,影响钢的浇注。 $\text{MnS}$  夹杂(如图 1b 所示)小部分呈长条状分布,大部分呈球状分布。 $1^\#$  实验钢通过钙处理将  $\text{MnS}$  夹杂变质成  $(\text{Mn}, \text{Ca})\text{S}$  夹杂(如图 1c 所示),降低  $\text{MnS}$  夹杂

使钢材性能呈各向异性的危害。此外,  $\text{Ca}$  与部分  $\text{Al}_2\text{O}_3$  反应生成大尺寸的  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$  夹杂(如图 1d 所示)。除以上成分均匀分布的夹杂物外,钢中含有部分包裹型复合夹杂物: $\text{Al}_2\text{O}_3-(\text{Mn}, \text{Ca})\text{S}$  和  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3-\text{CaS}$ ,其面扫图像如图 2a、2b 所示,呈半包裹和完全包裹形貌。

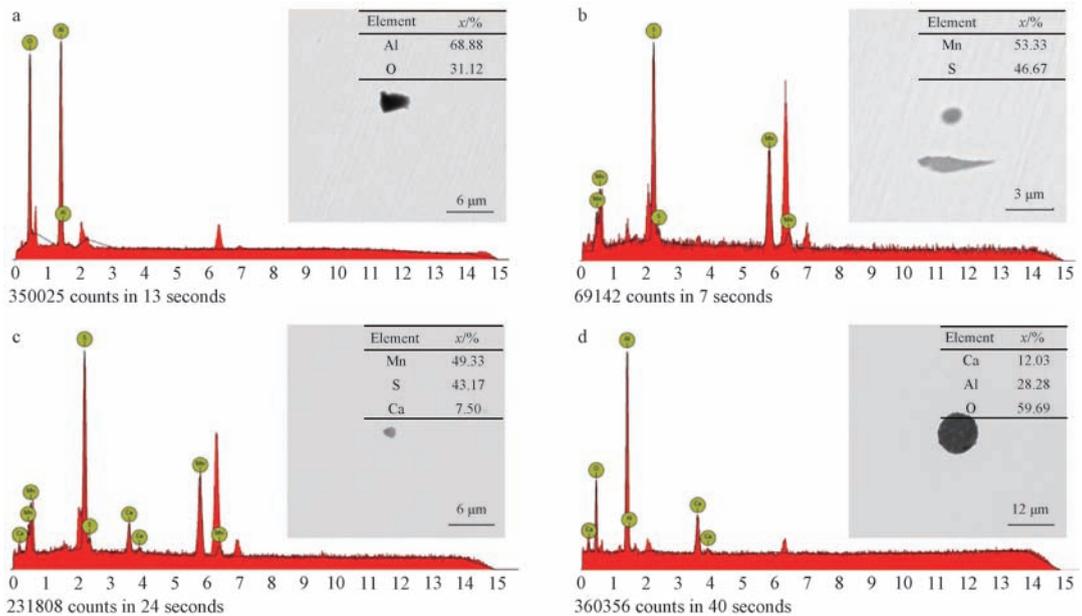


图 1  $1^\#$  钢成分均匀分布的典型夹杂物

Fig. 1 Typical inclusions with uniform composition in steel 1

经不同含量的稀土处理的实验钢中典型夹杂物 SEM 图像及成分如图 3 所示。经稀土处理后,夹杂物类型为: $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Ce}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$ 。夹杂物类型、尺寸、形貌均发生改变,添加 Ce 后, $\text{MnS}$  和  $(\text{Ca}, \text{Mn})\text{S}$  的复合夹杂物消失,新生成  $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$ 、 $\text{Ce}_2\text{O}_3$  夹杂(如图 3a、3b 所示), $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$  夹杂颜色为亮白色,且质地较软,该类夹杂物可提升钢塑性变形能力, $\text{Ce}_2\text{O}_3$  夹杂呈椭球状分布,颜色较  $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$  暗,呈灰白色。

在浇注后的铸锭上取样进行小样电解,利用场发射扫描电镜观测电解后各实验钢的夹杂物三维形貌如图 4、图 5 所示,  $\text{Ca}$  处理实验钢中夹杂物形状大部分不规则,有呈块状、片状且含尖角,呈长条状分布;相反,经稀土处理后的实验钢夹杂物均成

球形分布,与  $\text{Ca}$  处理相比,稀土处理球化夹杂物效果较好。

## 2.2 稀土对夹杂物数量和尺寸的影响

由图 6 实验钢夹杂物尺寸分布的变化图可知,与  $1^\#$   $\text{Ca}$  处理钢相比,添加稀土可有效减小夹杂物的尺寸,随稀土含量的增加, $2^\# \sim 4^\#$  钢中尺寸大于  $5 \mu\text{m}$  的夹杂物数量显著减少, $0.5 \mu\text{m} \sim 2 \mu\text{m}$  的夹杂物数量增加;其中,稀土含量  $w(\text{Ce}) = 0.0250\%$  的  $4^\#$  钢与  $1^\#$   $\text{Ca}$  处理钢相比,尺寸  $\leq 5 \mu\text{m}$  的夹杂物占比由 91% 提升至 99.79%,且钢中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  数量减少, $\text{MnS}$ 、 $\text{MnS-CaS}$  和含  $(\text{Ca}, \text{Mn})\text{S}$  的复合夹杂物消失。可见,稀土处理能够有效抑制  $\text{MnS}$ 、 $\text{CaS}$  夹杂的生成,转而生成对钢性能十分有利的  $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$  夹杂。

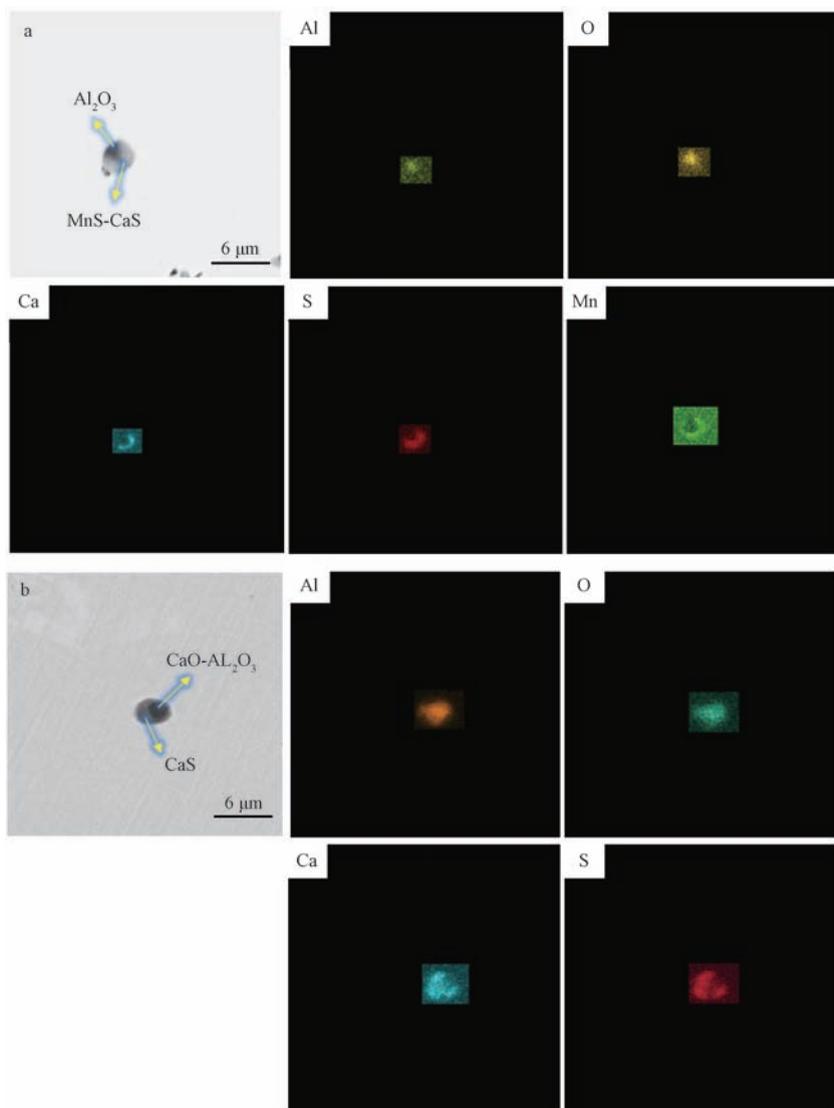
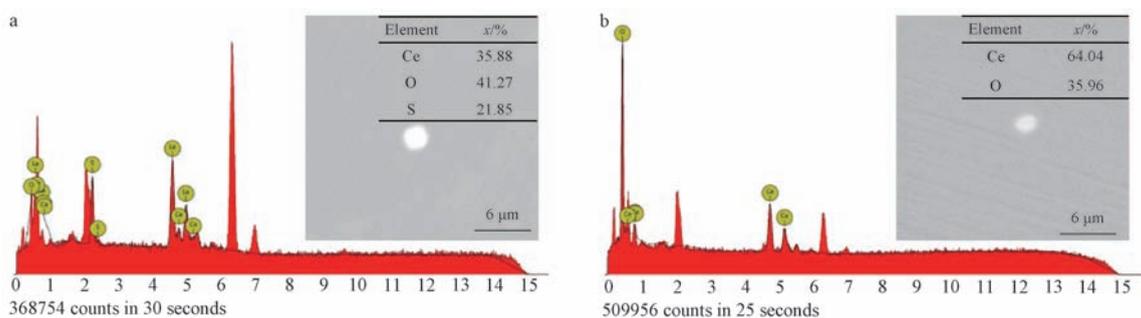
图 2 1<sup>#</sup>钢包裹型复合夹杂物及其面扫图

Fig. 2 Wrapped composite inclusions in steel 1 and their surface scanning

图 3 2<sup>#</sup>~4<sup>#</sup> [ $w(\text{Ce}) = 0.0160\% \sim 0.0250\%$ ] 钢典型夹杂物Fig. 3 Typical inclusions in steel 2, 3 and 4 [ $w(\text{Ce}) = 0.0160\% \sim 0.0250\%$ ] Steel

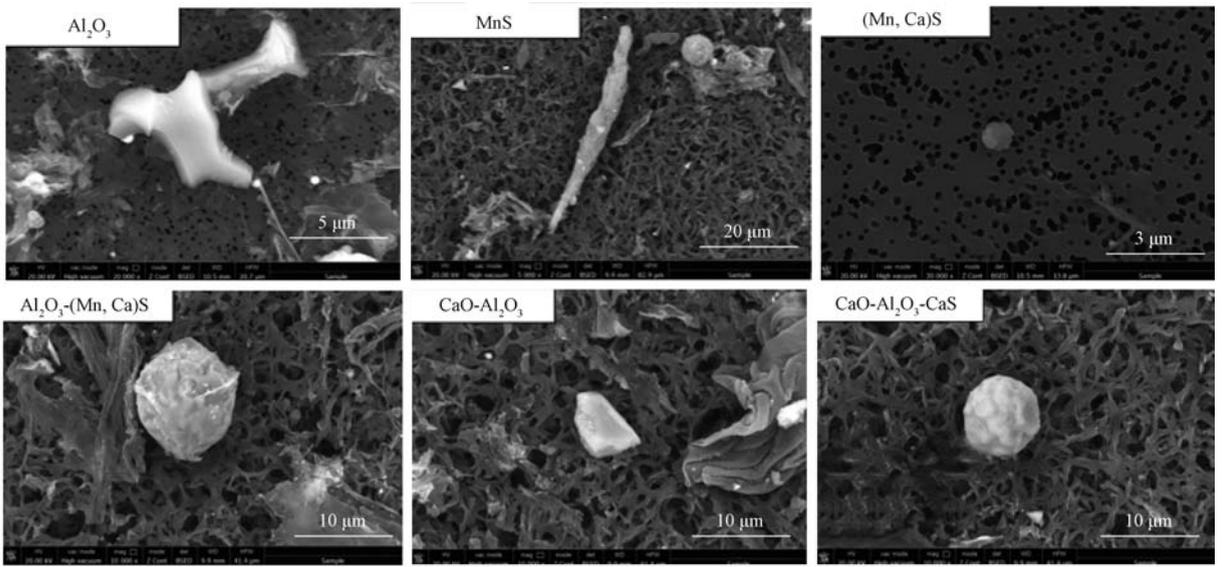


图 4 Ca 处理实验钢夹杂物三维形貌 SEM 图

Fig. 4 SEM images of three-dimensional morphology of inclusions in experimental steel treated with Ca

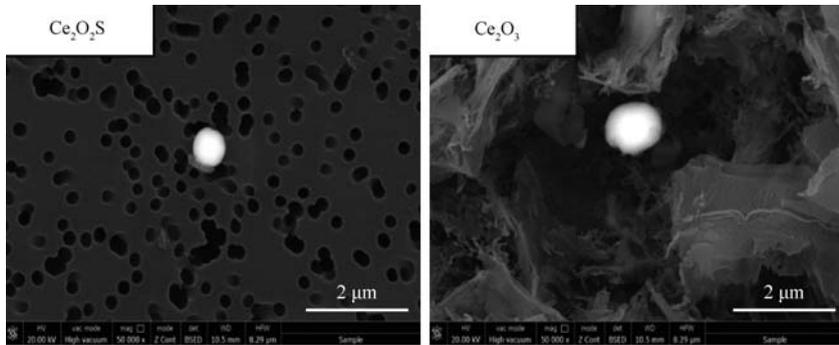


图 5 稀土处理实验钢夹杂物三维形貌 SEM 图

Fig. 5 SEM image of three-dimensional morphology of inclusions by rare earth treated steel

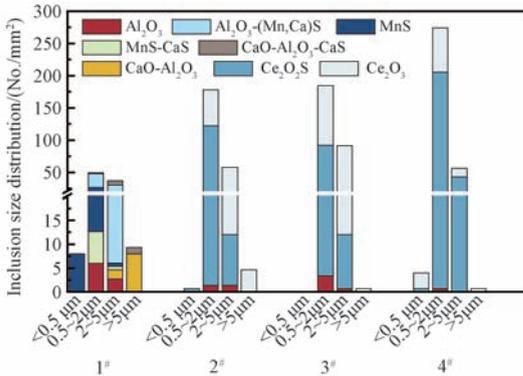


图 6 实验钢夹杂物尺寸分布变化图

Fig. 6 Distribution variation diagram of inclusion size in experimental steel

图 7 为实验钢夹杂物数密度及平均粒径的变化曲线。稀土处理与 Ca 处理相比,虽然夹杂物数量密度随 Ce 含量的增加而增加,但夹杂物平均粒径相比于 Ca 处理均有不同程度的降低。当  $w(\text{Ce}) = 0.0160\%$  时,夹杂物平均粒径由  $2.372 \mu\text{m}$  减小至  $1.789 \mu\text{m}$ ,与 1#Ca 处理钢相比夹杂物平均粒径减少了 24.6%;当  $w(\text{Ce}) = 0.0250\%$ ,夹杂物平均粒径进一步减小至  $1.467 \mu\text{m}$ ,与 Ca 处理相比夹杂物平均粒径减少了 38.2%。综上所述,稀土处理比 Ca 处理在钢中细化夹杂物的作用效果更加显著,且随  $w(\text{Ce})$  的增加,夹杂物尺寸逐渐减小。

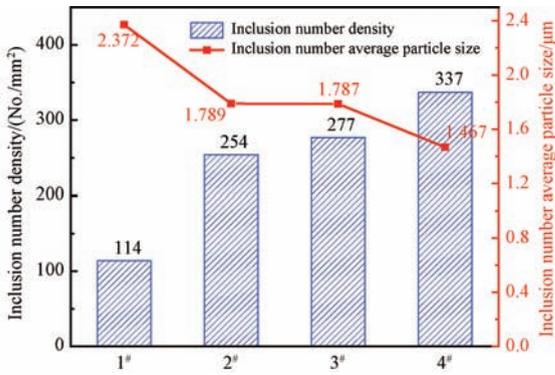


图 7 实验钢夹杂物数密度及平均粒径的变化曲线

Fig. 7 Variation curve of number density and average particle size of inclusions in experimental steel

### 2.3 热力学分析

本文采用 Factsage8.1 热力学软件对车轮钢体系中夹杂物的析出行为进行计算, 计算结果如图 8 至图 11 所示。图 8 为 1#Ca 处理实验钢凝固过程 (1200 °C ~ 1600 °C) 夹杂物的析出变化规律, 由图可知, 钙铝酸盐夹杂自 1600 °C 开始大量析出, MnS-CaS 夹杂在凝固末期形成, 由于 Ca 处理变质不完全, 使得钢液凝固完全最终稳定析出  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 由于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与 MnS 有良好的错配度<sup>[19]</sup>, 在钢液凝固过程中,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂和  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$  可作为 MnS 和 CaS 的异质形核核心, 促进凝固过程中硫化物的析出, 形成包裹型复合夹杂物, 热力学计算结果与上文检测结果一致。

3 种 Ce 含量下, 1600 °C 和凝固温度 (1200 °C ~ 1600 °C) 下车轮钢中夹杂物析出过程大致相同, 以 2# 实验钢  $w(\text{Ce}) = 0.0160\%$  为例, 结果如图 9 至图 11 所示。由图 9 可知, 1600 °C 条件下,  $w(\text{Ce}) = 0 \sim 0.0300\%$ , 钢液中夹杂物的演变规律依次为:  $\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{CeAlO}_3 \rightarrow \text{Ce}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$ , 本文实验钢成分点在 1600 °C 条件下析出的夹杂物均为  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  和  $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$  夹杂; 由图 10 可知, Ce 首先与 O 反应, O 含量越高,  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  生成量的峰值则越大, 达到峰值要求的 Ce 含量越高, 当  $w(\text{S}) = 0.0008\%$  时, 氧含量越高, 生成  $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$  所需的  $w(\text{Ce})$  越高, 这一计算结果与前人研

究结果一致<sup>[13]</sup>。对于 4# 实验钢, O、S 含量均明显高于 2#、3# 钢, 使得  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  生成量的峰值最高, 生成  $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$  所需的  $w(\text{Ce})$  最高, 且 4# 钢  $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$  夹杂的生成量最大, 与实际检测结果一致。

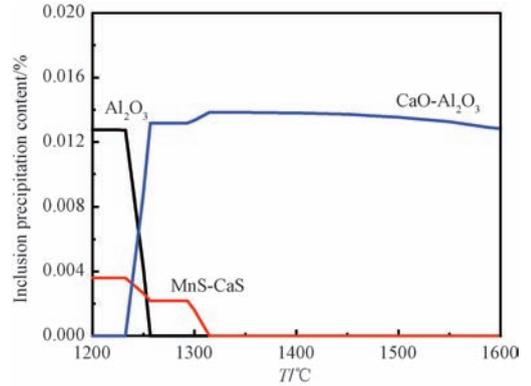


图 8 1200 °C ~ 1600 °C 下 1# 钙处理实验钢中夹杂物的析出变化

Fig. 8 Precipitation changes of inclusions in experimental steel 1 treated with Ca at 1200 °C to 1600 °C

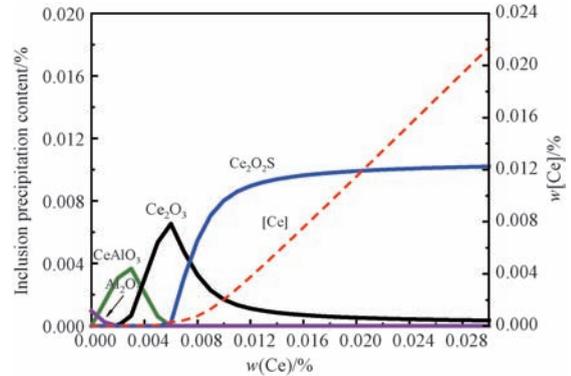


图 9 1600 °C 下车轮钢中夹杂物和  $w[\text{Ce}]$  随  $w(\text{Ce})$  的析出变化

Fig. 9 Variation of inclusions precipitation and  $w[\text{Ce}]$  in wheel steel with  $w(\text{Ce})$  at 1600 °C

由图 11 可知, 凝固温度 (1200 °C ~ 1600 °C) 下, 钢液凝固完全最终均稳定析出  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  和  $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$  夹杂, 与上文结果一致。综上所述, 在 Ca 处理车轮钢凝固过程中析出了对车轮钢性能影响较大的 MnS 夹杂物。通过稀土处理可抑制 MnS

夹杂的生成,转而生成对钢材性能影响较小的  $Ce_2O_2S$  夹杂。

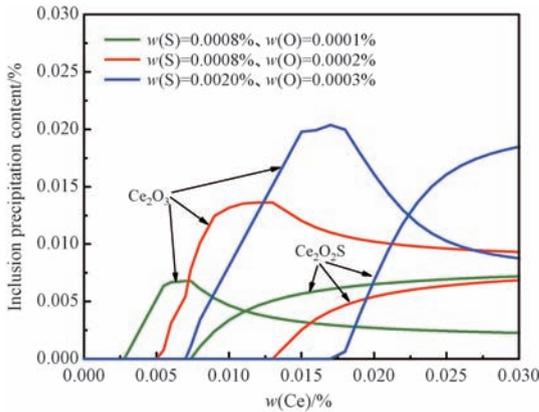


图 10 1600 °C Ce 含量对车轮钢中稀土夹杂物的影响

Fig. 10 Effect of Ce content on rare earth inclusions in wheel steel at 1600 °C

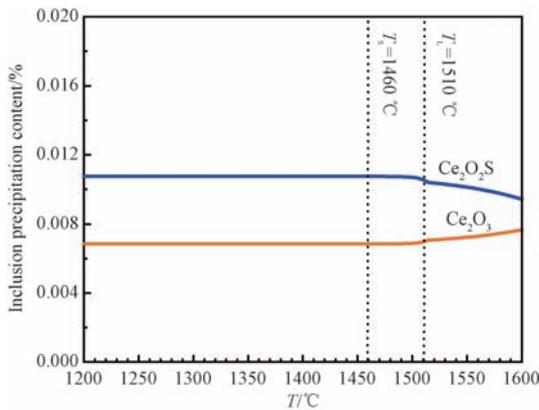


图 11 1200 °C ~ 1600 °C 下 2# 钢 [  $w(Ce) = 0.0160\%$  ] 中夹杂物的析出变化

Fig. 11 Precipitation changes of inclusions in 2# experimental steel [  $w(Ce) = 0.0160\%$  ] at 1200 °C ~ 1600 °C

### 3 结论

1. 在本实验条件下,1# 铝脱氧车轮钢经钙处理后夹杂物类型主要为形状不规则的  $Al_2O_3$ 、 $MnS$ 、 $(Mn, Ca)S$  和  $CaO-Al_2O_3$  以及  $Al_2O_3-(Mn, Ca)S$  和  $CaO-Al_2O_3-CaS$  包裹型复合夹杂物,与钙处理钢对比,车轮钢经稀土处理后,钢中  $Al_2O_3$  夹杂物数量减

小,  $MnS$  和  $(Ca, Mn)S$  夹杂物消失,生成了近球形的  $Ce_2O_2S$ 、 $Ce_2O_3$  夹杂,稀土处理球化夹杂物效果好于 Ca 处理。

2. 与 Ca 处理钢相比,经稀土处理后的实验钢夹杂物尺寸显著减小,随稀土含量的增加 [  $w(Ce) = 0.0160\% \sim 0.0250\%$  ], 不大于  $5 \mu m$  的夹杂物数量占比由 91.0% 提升至 99.8%,稀土细化夹杂物效果显著。

3. 热力学分析表明:在 1600 °C 条件下,随着车轮钢中  $w(Ce)$  由 0 增加至 0.0300%,钢液中主要夹杂物类型的变化规律为  $Al_2O_3 \rightarrow CeAlO_3 \rightarrow Ce_2O_3 \rightarrow Ce_2O_2S$ 。通过稀土处理可实现钢中  $Al_2O_3$  夹杂物的变质,并有效抑制凝固过程中  $MnS$  夹杂的生成,生成  $Ce_2O_2S$ 、 $Ce_2O_3$  夹杂,与实验结果一致。

### 参考文献:

- [1] 张楠,田志凌,潘辉,郑江鹏,侯晓东. 热轧汽车结构钢在轻量化商用车上的发展与应用[J]. 汽车文摘, 2020, (9): 1-11.  
Zhang N, Tian Z L, Pan H, Zheng J P, Hou X D. Development and application of hot rolled automotive structural steel in lightweight commercial vehicles[J]. Automotive Digest, 2020, (9): 1-11.
- [2] 王露芬,濮一康. 分析高强度钢制车轮的轻量化研究[J]. 时代农机, 2018, 45(12): 204.  
Wang L F, Pu Y K. Study on lightweight analysis of high strength steel wheels[J]. Times Agricultural Machinery, 2018, 45(12): 204.
- [3] 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.  
Guo Z H, Deng L Q. Effect of Mg and Ca treatment on inclusion and fatigue properties of wheel steel[J]. Baosteel Technology, 2016, (4): 16-20.
- [4] 曾立,罗衍昭,刘延强,赵长亮,季晨曦,徐海卫. 汽车板中大尺寸钙铝酸盐类夹杂来源及控制工艺[J]. 钢铁, 2023, 58(10): 67-74.  
Zeng L, Luo Y Z, Liu Y Q, Zhao C L, Ji C X, Xu H W. Control technology and source of large-size calcium aluminate inclusions in automobile sheets[J]. Iron &

- Steel, 2023, 58(10): 67-74.
- [5] 唐德池, 张宏艳, 吉立鹏, 肖宝亮, 张大伟, 曾智. 钙处理车轮钢洁净度[J]. 钢铁, 2018, 53(4): 37-41.  
Tang D C, Zhang H Y, Ji L P, Xiao B L, Zhang D W, Zeng Z. Cleanliness of calcium-treated wheel steel[J]. Iron & Steel, 2018, 53(4): 37-41.
- [6] 赵东伟, 李海波, 高攀, 杨健, 郝丽霞. 非钙处理铝脱氧车轮钢夹杂物形成及变形行为[J]. 钢铁, 2016, 51(1): 25-32.  
Zhao D W, Li H B, Gao P, Yang J, Hao L X. Inclusion formation and deformation in Al-killed wheel steel without calcium treatment[J]. Iron & Steel, 2016, 51(1): 25-32.
- [7] 李向阳, 吴旺朋, 陈艳, 赵海, 沈昶, 何宜柱. 高速车轮钢包裹类非金属夹杂物研究[J]. 钢铁钒钛, 2021, 42(3): 199-204.  
Li X Y, Wu W P, Chen Y, Zhao H, Shen C, He Y Z. Research on non-metallic inclusions in high-speed wheel steel[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2021, 42(3): 199-204.
- [8] 孟宪堂, 郭子峰, 李飞, 李瑞恒, 周娜, 王伦. 首钢 590 MPa 级高疲劳寿命轮辐用钢的研制[J]. 锻压技术, 2015, 40(4): 121-125.  
Meng X T, Guo Z F, Li F, Li R H, Zhou N, Wang L. Research on wheel disk with high-cycle fatigue life for Shougang 590 MPa grade steel[J]. Forging & Stamping Technology, 2015, 40(4): 121-125.
- [9] 温瀚. SCX400 车轮钢非金属夹杂物控制工艺研究与实践[J]. 炼钢, 2020, 36(6): 54-60.  
Wen H. Research and practice of non-metallic inclusion control process for wheel steel SCX400[J]. Steelmaking, 2020, 36(6): 54-60.
- [10] 黄宇, 成国光, 谢有. 稀土 Ce 对钎具钢中夹杂物的改质机理研究[J]. 金属学报, 2018, 54(9): 1253-1261.  
Huang Y, Cheng G G, Xie Y. Modification mechanism of cerium on the inclusions in drill steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(9): 1253-1261.
- [11] 常立忠, 高岗, 郑福舟, 施晓芳. 稀土-镁复合处理对 GCr15 轴承钢中夹杂物的影响[J]. 工程科学学报, 2019, 41(6): 763-771.  
Chang L Z, Gao G, Zheng F Z, Shi X F. Effect of rare earth and magnesium complex treatment on inclusions in GCr15 bearing steel[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(6): 763-771.
- [12] 史学红, 杨礼林, 夏明, 徐祺昊, 赵莉萍. 稀土 Ce 含量对 4Cr<sub>5</sub>MoSiV1 钢中夹杂物的变质作用[J]. 金属热处理, 2022, 47(11): 223-229.  
Shi X H, Yang L L, Xia M, Xu Q H, Zhao L P. Modification effect of rare earth Ce content on inclusions in 4Cr<sub>5</sub>MoSiV1 steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(11): 223-229.
- [13] 鲍道华, 黄宇, 成国光, 乔通, 代卫星. Ce 含量对 H13 钢中稀土夹杂物析出行为的影响[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(8): 792-800.  
Bao D H, Huang Y, Cheng G G, Qiao T, Dai W X. Effect of Ce content on precipitation behavior of rare earth inclusions in H13 steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 33(8): 792-800.
- [14] 张宏艳, 田志红, 邵肖静, 栾义坤, 邓小旋, 季晨曦. 改质工艺对高强度低合金钢夹杂物特性的影响[J]. 中国冶金, 2021, 31(2): 31-37.  
Zhang H Y, Tian Z H, Shao X J, Luan Y K, Deng X X, Ji C X. Influence of modification processes on inclusion properties of high strength low alloy steel[J]. China Metallurgy, 2021, 31(2): 31-37.
- [15] 王野光, 刘承军, 邱吉雨. 铝对稀土耐热钢中非金属夹杂物的影响[J]. 钢铁, 2022, 57(4): 52-57.  
Wang Y G, Liu C J, Qiu J Y. Effect of Al content on non-metallic inclusions in heat-resistant steel containing rare earth element [J]. Iron & Steel, 2022, 57(4): 52-57.
- [16] 杨晓红, 吴鹏飞, 吴铖川, 成国光. 特殊钢中稀土变质夹杂物行为研究[J]. 中国稀土学报, 2010, 28(5): 612-618.  
Yang X H, Wu P F, Wu C C, Cheng G G. Behavior of rare earth on modifying inclusion in special steel [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2010, 28(5): 612-618.
- [17] 魏晓东, 崔海平, 宿成, 刘德勤, 张嘉华, 张振杰. 稀土车轮用钢炼钢生产实践[J]. 包钢科技, 2019,

45(6): 10-13,26.

Wei X D, Cui H P, Su C, Liu D Q, Zhang J H, Zhang Z J. Production practices for steel making of wheel steel with rare earth [J]. Science & Technology of Baotou Steel, 2019, 45(6): 10-13,26.

[18] Wang Y G, Liu C J. Agglomeration characteristics of various inclusions in Al-killed molten steel containing

rare earth element [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2020, 51(6): 2585-2595.

[19] Verma N, Pistorius P C, Fruehan R J, Potter M S, Oltmann H G, Pretorius E B. Calcium modification of spinel inclusions in aluminum-killed steel; Reaction steps [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2012, 43(4): 830-840.

## Effect of Rare Earth on the Occurrence Characteristics of Inclusions in High-strength Wheel Steel

LIU Jun<sup>1</sup>, HAN Rong-rong<sup>1,2</sup>, ZHANG Bo<sup>2\*</sup>, LI Ming-guang<sup>1</sup>, MIAO Jun<sup>1</sup>,  
LIU Hong-liang<sup>1</sup>, LIU Cheng-jun<sup>2</sup>

(1. National and Local Joint Engineering Laboratory of Advanced Automotive Steel Development and Application Technology,  
Technology Center of Bensteel Group Co., Ltd., Benxi 117000, China;

2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** The effects of rare earth on the type and size distribution of inclusions in high-strength wheel steel were investigated by high temperature simulation experiment and thermodynamic analysis, and the occurrence characteristics of inclusions in rare earth treated steel was compared with the traditional calcium treated. The results show that the inclusions in aluminum deoxidized wheel steel after calcium treatment are mainly  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnS}$ ,  $(\text{Mn}, \text{Ca})\text{S}$  and  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ , and  $\text{Al}_2\text{O}_3-(\text{Mn}, \text{Ca})\text{S}$  and  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3-\text{CaS}$  wrapped composite inclusions. Compared with calcium-treated steel, the content of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  inclusions in wheel steel after rare earth treatment is reduced,  $\text{MnS}$  and  $(\text{Ca}, \text{Mn})\text{S}$  nearly spherical inclusions of  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  and  $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$  were formed, and the size of inclusions decreased significantly. With the increase of rare earth content [ $w(\text{Ce}) = 0.0160\% \sim 0.0250\%$ ], the proportion of inclusions  $\leq 5 \mu\text{m}$  increased from 91.0% to 99.8%, and the effect of rare earth refining inclusions was remarkable. In addition, the thermodynamic analysis shows that, with the increase of  $w(\text{Ce})$  in wheel steel from 0 to 0.0300%, the change rule of main inclusions in molten steel is  $\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{CeAlO}_3 \rightarrow \text{Ce}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$  at 1600 °C. The modification of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  inclusions in steel can be realized by rare earth treatment, and the formation of  $\text{MnS}$  inclusions during solidification can be effectively suppressed, resulting in  $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$  and  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  inclusions.

**Key words:** wheel steel; rare earth; inclusion; thermodynamic analysis; size refinement