

# 热轧加热对无取向硅钢中 AlN 和 MnS 析出相的影响

左锐<sup>1a</sup>, 陆勤阳<sup>1a</sup>, 刘志鹏<sup>1a</sup>, 李娜<sup>1a</sup>, 王永强<sup>1b</sup>, 夏雪兰<sup>2</sup>, 裴英豪<sup>2</sup>

(1. 安徽工业大学 a. 冶金工程学院, b. 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技术中心, 安徽马鞍山 243000)

**摘要:** AlN 和 MnS 等析出相对无取向硅钢的磁性能有重要影响, 受热轧加热工艺影响, 无取向硅钢中的析出相与免常化工艺实现的效果紧密相关。以 1.5%Si-0.3%Al 无取向硅钢锻造坯为研究对象, 利用热力学软件计算钢中可能的析出相, 使用箱式电阻炉在不同温度和保温时间下对实验钢进行热轧加热实验, 利用光学显微镜 (OM)、扫描电子显微镜 (SEM) 表征分析析出相的形貌、尺寸及样品晶粒尺寸, 研究热轧加热温度和保温时间对实验钢中 AlN 和 MnS 析出相的影响。结果表明: 实验钢中夹杂物主要为 AlN 和 MnS, 当加热温度为 1 050 °C 时, 保温时间由 1 h 延长至 3 h, 细小的 AlN 和 MnS 析出相 (直径小于 1 μm) 占比由 33% 降至 19%, 平均晶粒尺寸从 100.0 μm 增加到 149.7 μm; 保温时间为 1 h 时, 加热温度由 1 050 °C 提高至 1 150 °C, 细小的 AlN 和 MnS 析出相占比由 33% 降至 7%, 平均晶粒尺寸从 100.0 μm 增加到 124.3 μm。不改变其他实验条件, 热轧加热温度的提高与保温时间的延长都会使实验钢中 AlN 和 MnS 析出相与晶粒尺寸变大, 有利于绿色低碳的无取向硅钢免常化生产工艺的实现。

**关键词:** 无取向硅钢; 加热工艺; 夹杂物; 晶粒尺寸; 析出相; 绿色低碳

**中图分类号:** TG 156.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.24071



## Effect of Hot Rolling Heating on Precipitated Phases of AlN and MnS in Non-oriented Silicon Steel

ZUO Rui<sup>1a</sup>, LU Qinyang<sup>1a</sup>, LIU Zhipeng<sup>1a</sup>, LI Na<sup>1a</sup>, WANG Yongqiang<sup>1b</sup>, XIA Xuelan<sup>2</sup>, PEI Yinghao<sup>2</sup>

(1. a. School of Metallurgical Engineering, b. School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China; 2. Technical Center, Maanshan Iron and Steel Co., Ltd, Maanshan 243000, China)

**Abstract:** The precipitation of AlN and MnS has a significant impact on the magnetic properties of non-oriented silicon steel. Due to the influence of hot rolling heating process, the precipitation phase in non-oriented silicon steel is closely related to the effect achieved by non-normalization process. Taking the forging billet of 1.5% Si-0.3% Al non-oriented silicon steel as the research object, the thermodynamic software was used to calculate the possible precipitation phase in the steel. The hot rolling heating experiments were conducted on the experimental steel at different temperatures and holding times using a box type resistance furnace. The morphology and size of the precipitates, and sample grain size were characterized and analyzed with optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM). The effects of hot rolling heating temperature and holding time on AlN and MnS

收稿日期: 2024-04-26

基金项目: 安徽省重点研发计划项目 (202104a05020021); 国家自然科学基金项目 (51604002)

作者简介: 左锐 (2000—), 男, 安徽铜陵人, 硕士生, 主要研究方向为无取向硅钢的组织性能调控。

通信作者: 李娜 (1983—), 女, 河北邢台人, 博士, 副教授, 主要研究方向为高性能无取向硅钢的研发。

引文格式: 左锐, 陆勤阳, 刘志鹏, 等. 热轧加热对无取向硅钢中 AlN 和 MnS 析出相的影响 [J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(4):412-422.

precipitates in experimental steel were studied. The results show that the inclusions in the experimental steel are mainly AlN and MnS, when the heating temperature is 1 050 °C, the holding time is extended from 1 h to 3 h, the proportion of precipitation phase of fine AlN and MnS (with a diameter of less than 1 μm) decreases from 33% to 19%, and the average grain size increases from 100.0 μm to 149.7 μm. When the holding time is 1 h, and the heating temperature is raised from 1 050 °C to 1 150 °C, the proportion of precipitation phase of fine AlN and MnS decreases from 33% to 7%, and the average grain size increases from 100.0 μm to 124.3 μm. Without changing the other experimental conditions, increasing the hot rolling heating temperature and prolonging the holding time will result in increasing in the size of AlN and MnS precipitates and grains in the experimental steel, which is beneficial for achieving the normalization free production process of green and low-carbon non-oriented silicon steel.

**Keywords:** non-oriented silicon steel; heating process; inclusions; precipitation phase; grain size; green and low-carbon

无取向硅钢广泛用于制作各种电机、小型变压器等电气设备,是非常重要的1种电工材料<sup>[1-2]</sup>。磁性能是无取向硅钢最重要的性能指标,受生产工艺和化学成分的影响<sup>[3-5]</sup>,夹杂物、晶粒尺寸和晶体学织构是无取向硅钢生产过程需调控的关键因素<sup>[6-13]</sup>。无取向硅钢在铸坯冷却过程中,N和S等杂质元素的溶解度随温度的下降而降低,进而形成氮化物、硫化物等夹杂物,且主要以MnS,AlN及其复合夹杂的形式存在<sup>[14-15]</sup>。微细夹杂物对晶界迁移的钉扎作用明显<sup>[16]</sup>,细小弥散的AlN和MnS夹杂物对无取向硅钢的磁性能危害较大,严重恶化磁性能<sup>[17-19]</sup>。根据国家“十四五”节能减排规划,绿色、高效、低成本生产是包括生产硅钢在内的先进钢铁制造技术发展的主流方向。传统中高牌号无取向硅钢生产过程中为使热轧板心部晶粒完全再结晶及晶粒长大,需进行常化处理,但常化处理能耗高、生产效率低。因此,研究热轧加热过程中无取向硅钢第二相粒子的溶解析出行为,促使热轧过程中第二相粒子粗化和晶粒有效长大,保证后续冷轧顺行及产品的磁性能,从而免除常化处理过程,对于探索绿色低碳、节能高效的钢铁制造技术具有重要意义。

罗小燕等<sup>[20]</sup>对不同热装温度下无取向硅钢铸坯中夹杂物的析出行为进行研究,发现热装温度可通过影响复合夹杂中AlN,MgS的析出来调控夹杂物尺寸;试验条件下,合适的铸坯热装温度为700 °C时,钢中微细夹杂物(直径小于0.5 μm)的数量最少。

吴园园等<sup>[21]</sup>研究不同加热温度和保温时间对无取向硅钢50WH470铸坯中夹杂物析出行为的影响,发现铸坯在1 050~1 250 °C保温20~180 min时,夹杂物的数量随加热温度升高或保温时间延长先增后减,1 110 °C保温40 min时达最大,为242个/mm<sup>2</sup>,平均直径1 μm以上的夹杂物约占96.8%。现有研究多关注铸坯加热工艺对无取向硅钢性质的影响,但较少从免常化工艺处理的角度探讨热轧加热工艺对铸坯中夹杂物(析出相)的影响。热轧前的坯料在加热保温过程中,应尽可能让夹杂物充分析出且长大,减少N,S在基体中的固溶含量,这样可最大程度地避免细小弥散的AlN,MnS等夹杂物在热轧或后续退火过程中析出,减少其对晶粒长大的阻碍作用,进而可降低无取向硅钢的铁损,改善无取向硅钢的磁性能,为免常化工艺的实现提供有利保障。鉴于此,以无取向硅钢锻造坯为对象,研究不同加热工艺下AlN,MnS等夹杂物的析出行为,为制定免常化工艺的无取向硅钢热轧前加热工艺提供依据。

## 1 实验材料与方案

### 1.1 实验材料

以1.5%Si-0.3%Al无取向硅钢为研究对象,利用真空感应熔炼炉冶炼合金,然后将其浇注成尺寸为400 mm×200 mm×100 mm(长×宽×厚)铸坯。其主要化学成分如表1。

表1 实验钢的主要化学成分

Tab. 1 Main chemical compositions of experimental steel

C	Si	Mn	P	S	Ti	Al	N	O	Fe
0.002 7	1.46	0.51	0.003	0.003	0.000 8	0.28	0.001 7	0.000 7	余量

由表1可知,实验钢中Si, Al实际质量分数分别为1.46%, 0.28%, 与设计成分相符,属于典型的1.5%Si-0.3%Al中牌号成分体系。

## 1.2 实验方案

利用FactSage热力学软件计算实验钢的Fe-Si平衡相图,如图1。由图1可看出:温度由低至高,实验钢分别对应铁素体相区( $\alpha$ 相区)、铁素体与奥氏体两相区( $\alpha+\gamma$ 相区)、奥氏体相区( $\gamma$ 相区)、铁素体与奥氏体两相区( $\alpha+\gamma$ 相区)、高温铁素体相区( $\delta$ 相区),相变点温度为1 020, 1 120  $^{\circ}\text{C}$ 。依据图1确定锻造加热温度为1 120  $^{\circ}\text{C}$ ,将铸坯加热至此温度保温1 h热锻成厚度为45 mm的钢坯,将其线切割成尺寸为10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 10 mm的块状试样若干。利用箱式电阻炉对试样进行热轧加热实验,加热温度为1 050, 1 100, 1 150  $^{\circ}\text{C}$ ,保温时间为1, 2, 3 h,加热后水淬至室温,取出备用。

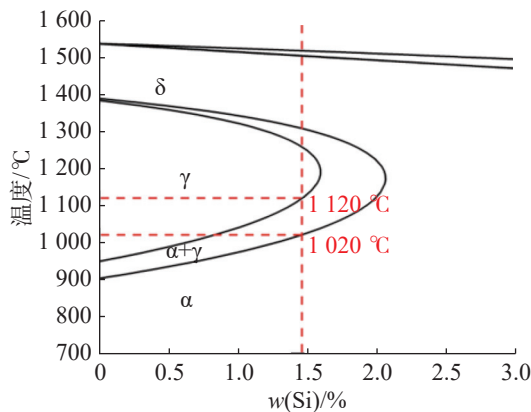


图1 实验钢的Fe-Si平衡相图

Fig. 1 Fe-Si equilibrium phase diagram of experimental steel

对试样依次用240~4 000 #砂纸打磨、粒度为0.5  $\mu\text{m}$ 的金刚石抛光膏机械抛光、体积分数为4%的硝酸酒精侵蚀、无水乙醇清洗后吹干等处理后,使用Leica DM400光学显微镜(optical microscope, OM)观察试样的金相组织,使用Image-Pro金相分析软件统计试样的晶粒尺寸及分布,使用NANO SEM430扫描电镜和能谱仪(scanning electron microscope/energy disperse spectroscopy, SEM/EDS)分析试样中AlN和MnS析出相的尺寸和数量分布。

## 2 结果与分析

### 2.1 析出相的热力学计算结果与分析

使用JMatpro热力学软件对实验钢中的夹杂物进行平衡析出计算,结果如图2。

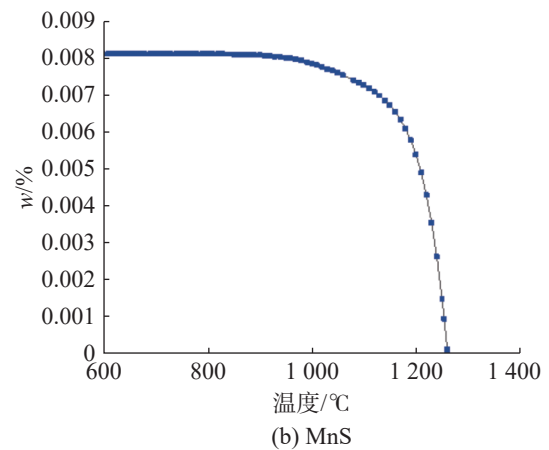
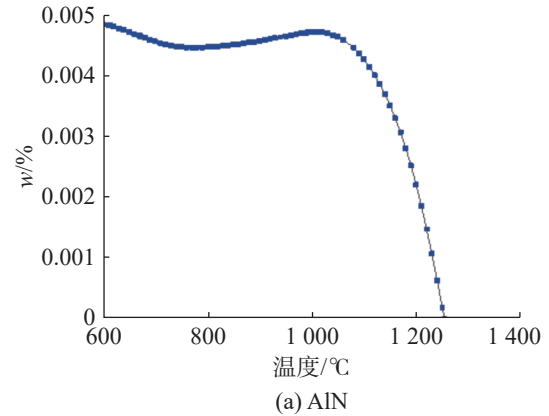
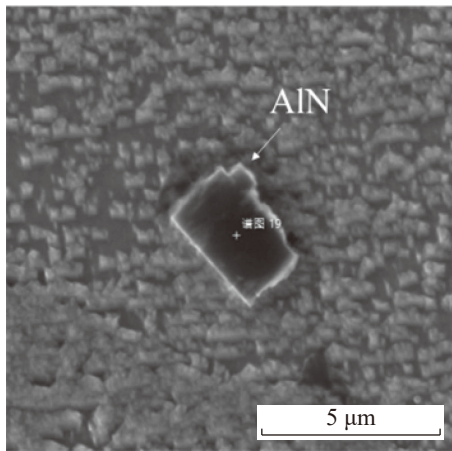


图2 实验钢中AlN和MnS析出量与温度的关系曲线

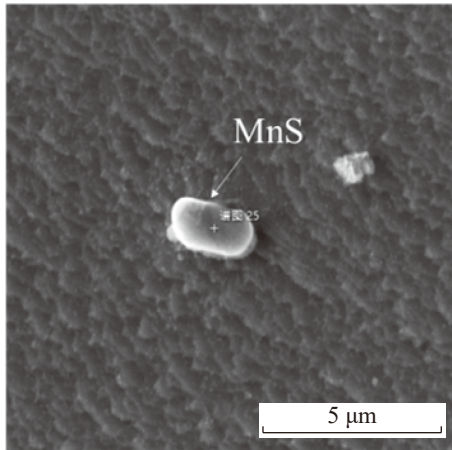
Fig. 2 Relationship curve between precipitation quantity of AlN and MnS in experimental steel and temperature

由图2可知:实验钢中的夹杂物为AlN和MnS,开始析出温度分别为1 255, 1 260  $^{\circ}\text{C}$ ;随温度的降低,AlN和MnS析出量逐渐增加,与此同时AlN和MnS的析出速率逐渐降低,温度下降到一定后,AlN和MnS的析出速率降到最低,析出量达到最大,且几乎不再改变,对应的温度分别为1 000, 900  $^{\circ}\text{C}$ 。由此可看出:无取向硅钢热轧加热过程中,随温度的升高,钢中AlN和MnS夹杂物数量逐渐减少,当加热温度高于AlN和MnS的开始析出温度时,N和S固溶在无取向硅钢基体中,会在后续轧制过程中以细小弥散的AlN和MnS析出,危害成品板的磁性能;加热温度低于900  $^{\circ}\text{C}$ 时,基体中固溶的N和S含量处于平衡状态,钢中析出的AlN和MnS含量几乎不再变化。

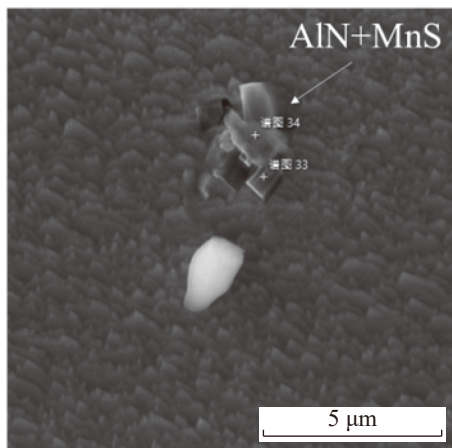
分析热轧加热过程中实验钢析出相的形貌和成分,其中代表性的结果如图3。



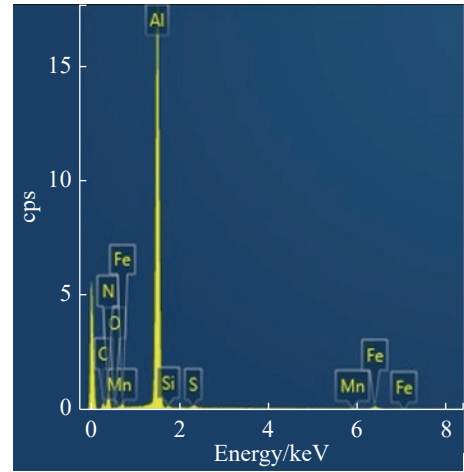
(a) AlN形貌



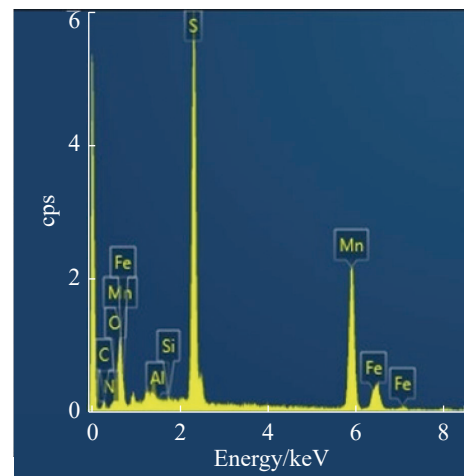
(b) MnS形貌



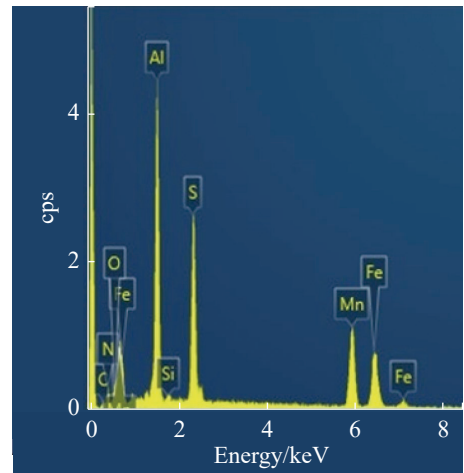
(c) AlN+MnS形貌



(d) AlN成分分析



(e) MnS成分分析



(f) AlN+MnS成分分析

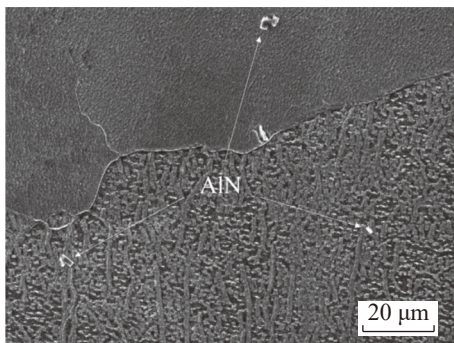
图 3 实验钢中夹杂物的形貌及 EDS 成分分析

Fig. 3 Morphology and EDS composition analysis of inclusions in experimental steel

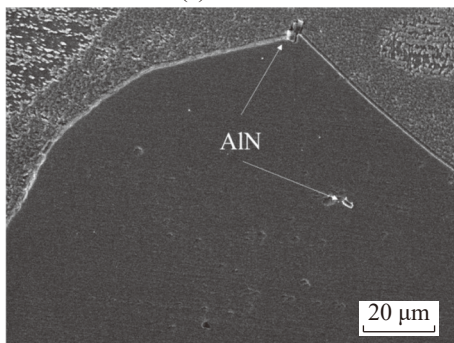
由图 3 可看出: 实验钢中的夹杂物主要为单独析出的 AlN 和 MnS 及复合析出的 AlN+MnS, 这与热力学计算结果相符; AlN 夹杂物形状比较规则, 有棱角, 尺寸在 1 μm 以上居多, 当 AlN 析出尺寸较小时, 形状接近于圆形, 大尺寸的 AlN 以长方形为主;

MnS夹杂物一般呈椭圆形,尺寸在 $1\ \mu\text{m}$ 以下居多;大多AlN独立析出,而MnS同AlN复合析出较多,单独的MnS较少,这可能是因为AlN开始析出温度稍高,先析出的AlN可为MnS析出提供有利的形核位置。

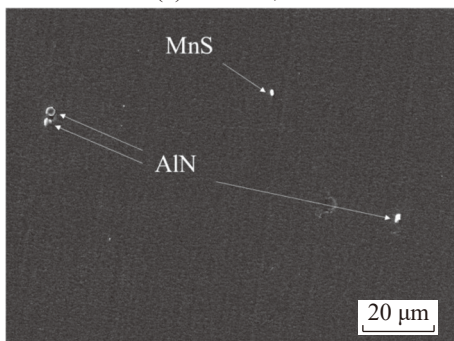
图4为不同加热工艺下实验钢中AlN和MnS析出相分布的SEM图。由图4可看出:实验钢在未经加热处理时,只观察到独立析出的AlN和MnS夹杂;经加热处理后,观察到AlN与MnS复合析出现象,说明热轧加热过程影响夹杂物的析出行为和性质。实验钢坯料在加热保温过程中,第二相粒子发生回溶,尺寸小的夹杂物可能消失,大的可能长大,总的夹杂物数量减小。根据析出相的热力学计算结果(图2)可知,加热过程中AlN的回溶速率比MnS低,在加热冷却过程中为了降低析出形核功,未回溶的AlN粒子有可能作为MnS夹杂析出的核心,以AlN与MnS复合析出的方式析出。



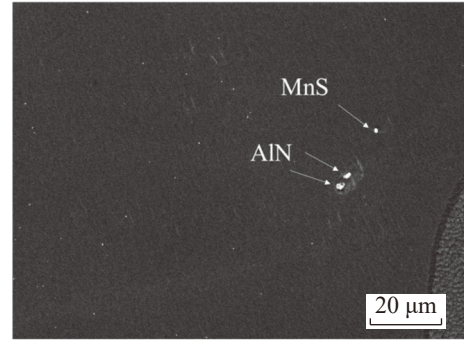
(a) 锻造态



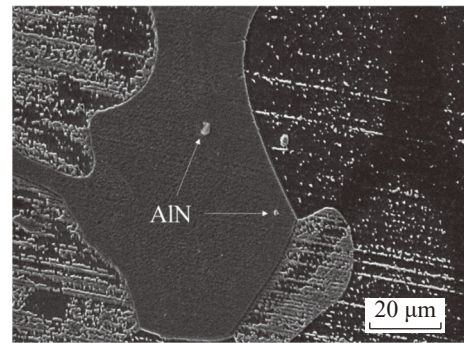
(b) 1050 °C, 1 h



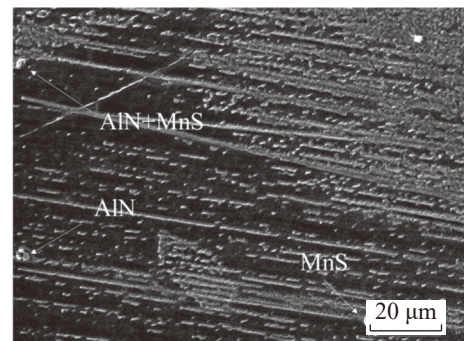
(c) 1050 °C, 2 h



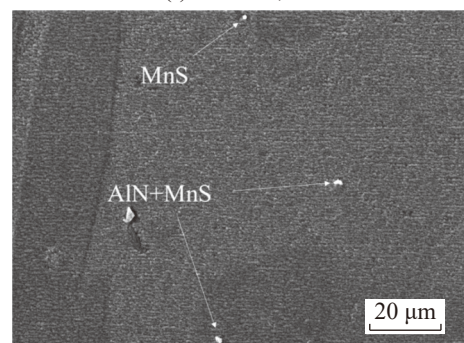
(d) 1050 °C, 3 h



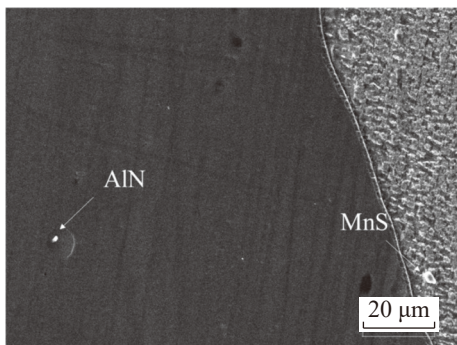
(e) 1100 °C, 1 h



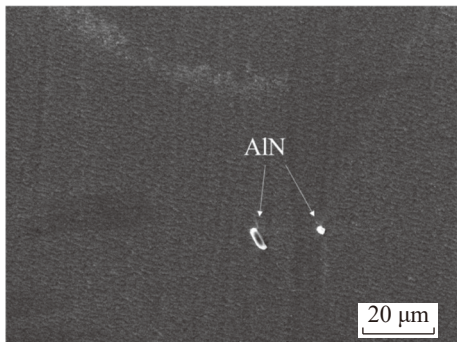
(f) 1100 °C, 2 h



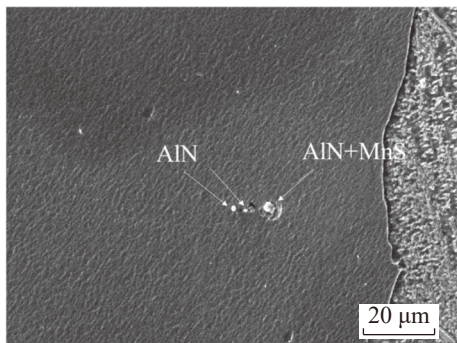
(g) 1100 °C, 3 h



(h) 1 150 °C, 1 h



(i) 1 150 °C, 2 h



(j) 1 150 °C, 3 h

图 4 不同加热工艺下钢中 AlN 和 MnS 析出相的分布

Fig. 4 Distribution of AlN and MnS precipitates in steel under different heating processes

2.2 保温时间对析出相尺寸和数量的影响

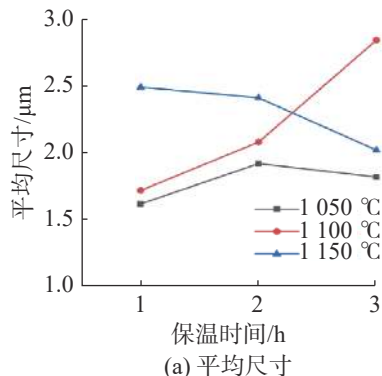
图 5 为 1 050, 1 100, 1 150 °C 加热温度下保温不同时间, 实验钢中 AlN 和 MnS 析出相平均尺寸和数量随保温时间变化的统计结果。

由图 5(a) 可知: 加热温度较低时 (1 050 °C), 随保温时间的增加, 实验钢中 AlN 和 MnS 析出相的平均尺寸总体呈上升趋势; 加热温度升至 1 100 °C 时, 保温时间从 1 h 分别延长至 2, 3 h, 夹杂物平均尺寸由 1.7 μm 分别增至 2.1, 2.9 μm, 即延长保温时间, 夹杂物不断粗化; 加热温度较高时 (1 150 °C), 夹杂物尺寸随保温时间的延长而减小。

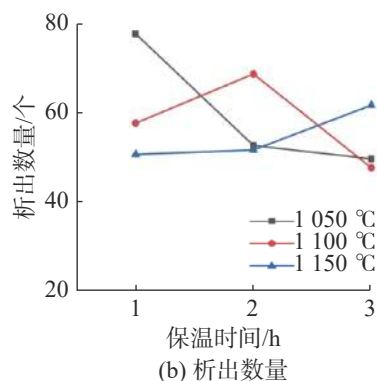
由图 5(b) 可看出: 加热温度较低时 (1 050, 1 100 °C), 随保温时间的延长, AlN 和 MnS 析出相的

数量整体呈下降趋势; 加热温度较高时 (1 150 °C) 时, 夹杂物数量随保温时间的延长而有所增加。

实验钢在加热和随后的冷却过程中, 存在夹杂物粒子回溶和析出 2 个过程, 温度越高, AlN, MnS 夹杂物粒子稳定性越差, 回溶程度越大, 固溶至基体的 Al, Mn, N, S 元素越多, 冷却时 AlN, MnS 夹杂物析出的驱动力越大, 形核率越高。但因为水淬速度较快, 扩散型的 AlN, MnS 夹杂物析出长大过程受到抑制, 不能充分进行。因此, 1 150 °C 下, 加热时间越长, 实验钢中夹杂物的尺寸越小、数量越多; 较低温度加热时, 随保温时间延长, 小尺寸夹杂物回溶, 大尺寸夹杂物回溶程度较小, 剩余的夹杂物可作为冷却过程中夹杂物的形核质点, 由此导致 AlN, MnS 夹杂物的平均尺寸增大, 数量减少<sup>[22-24]</sup>。



(a) 平均尺寸



(b) 析出数量

图 5 保温时间与钢中 AlN, MnS 析出相平均尺寸和析出数量的关系

Fig. 5 Relationship between heating time and average size and quantity of AlN and MnS precipitates in steel

为进一步探究实验钢加热过程中夹杂物性质的变化, 对 1 050, 1 100, 1 150 °C 保温 1~3 h 实验钢中 AlN 和 MnS 析出相的尺寸频数分布进行统计, 因不同参数样品中析出相频数分布变化趋势相同, 故文中以 1 050 °C 加热样品为例进行分析, 结果如图 6。

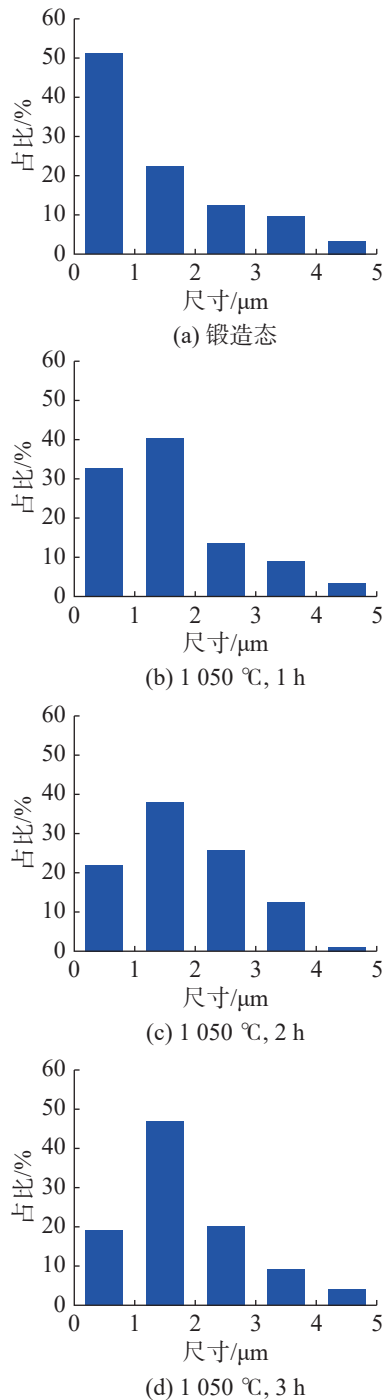


图6 不同保温时间下钢中 AlN 和 MnS 析出相尺寸分布  
Fig. 6 Size distribution of AlN and MnS precipitates in steel under different holding times

由图6得知: 未经加热处理的实验钢中, 尺寸小于  $1\ \mu\text{m}$  的 AlN 和 MnS 析出相占比为 51%; 经  $1050\ \text{°C}$  加热保温分别为 1, 2, 3 h 时, 尺寸小于  $1\ \mu\text{m}$  的 AlN 和 MnS 析出相占比分别为 33%, 22%, 19%。由此可看出, 相较于未经热处理的实验钢, 经加热处理后钢中尺寸小于  $1\ \mu\text{m}$  的 AlN 和 MnS 析出相占比下降; 随保温时间的延长, 小尺寸 AlN 和 MnS 析出相 ( $<1\ \mu\text{m}$ ) 占比逐渐减少, 说明经加热处理后无取向硅钢中的

细小夹杂物可得到粗化。

### 2.3 加热温度对析出相尺寸和数量的影响

图7为 1, 2, 3 h 加热保温时间下, 实验钢中 AlN 和 MnS 析出相平均尺寸和数量随加热温度变化的统计结果。

由图7(a)可知: 当保温时间较短时 (1, 2 h), 实验钢中 AlN 和 MnS 析出相的平均尺寸随加热温度的提升而增大; 当保温时间较长时 (3 h), 随加热温度的提升, 实验钢中 AlN 和 MnS 析出相的平均尺寸先增大后减小, 整体呈上升趋势。如保温时间为 1 h 时, 加热温度从  $1050\ \text{°C}$  提高至  $1100, 1150\ \text{°C}$ , AlN 和 MnS 析出相平均尺寸由  $1.6\ \mu\text{m}$  分别增至  $1.7, 2.5\ \mu\text{m}$ , 即提高加热温度, 夹杂物得到粗化。

由图7(b)可知: 当保温时间为 1 h 时, 夹杂物数量随加热温度的提升而下降; 保温时间延长至 2 h, 随加热温度的升高, 析出相的数量先升后降; 经 3 h 保温处理,  $1150\ \text{°C}$  加热条件下的实验钢析出相数量高于其他温度组 ( $1050, 1100\ \text{°C}$ )。

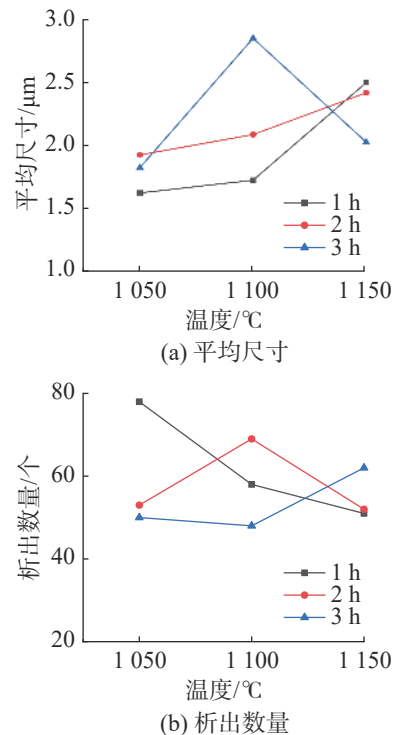


图7 加热温度与钢中 AlN 和 MnS 析出相平均尺寸和析出数量的关系

### Fig. 7 Relationship between heating temperature and average size and quantity of AlN and MnS precipitates in steel

对 1, 2, 3 h 不同加热温度下实验钢 AlN 和 MnS 析出相尺寸频数分布进行统计, 以 1 h 加热样品为例进行分析, 结果如图8。

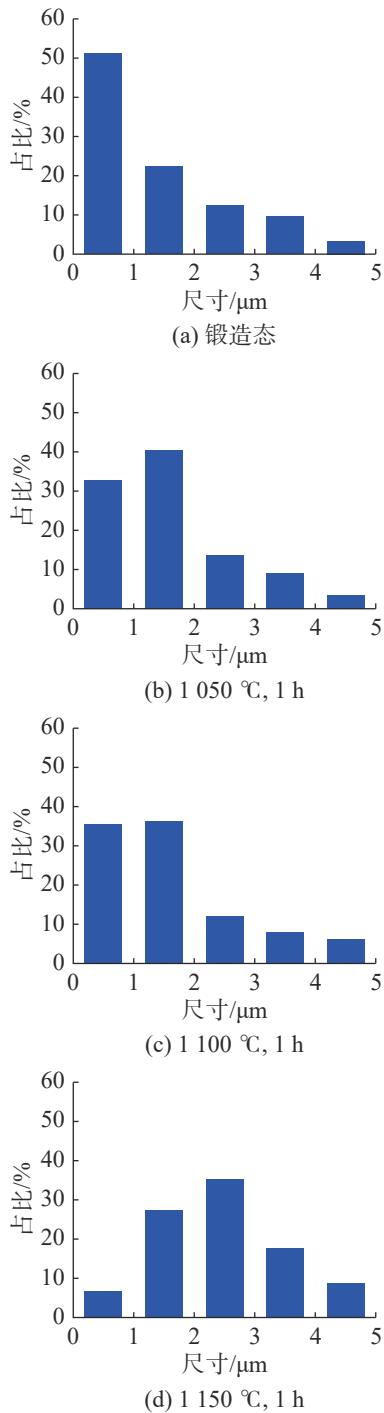


图8 不同加热温度下 AlN 和 MnS 析出相尺寸分布

Fig. 8 Size distribution of AlN and MnS precipitates in steel under different heating temperatures

由图 8 可知: 未经加热处理的实验钢中, 尺寸小于 1 μm 的 AlN 和 MnS 析出相占比为 51%, 经 1 050, 1 100, 1 150 °C 加热保温 1 h 的实验钢中, 尺寸小于 1 μm 的 AlN 和 MnS 析出相占比分别为 33%, 35%, 7%。由此可见, 在保温 1 h 的情况下, 随加热温度的升高, 实验钢中尺寸小于 1 μm 的 AlN 和 MnS 析出相数量整体呈下降的趋势, 说明温度越高, 细小夹杂物的回溶程度越大。这是因为温度越高, AlN, MnS

夹杂物热力学稳定性越差, 且原子扩散速率越快, 加之细小夹杂物的界面能高, 回溶的速度越快。

#### 2.4 加热工艺对实验钢晶粒尺寸的影响

利用光学显微镜观察加热温度为 1 050, 1 100, 1 150 °C 不同保温时间下实验钢的金相组织, 以 1 050 °C 加热样品为例进行分析, 图 9, 10 分别为经 1 050 °C 加热保温 1, 2, 3 h 后实验钢的金相组织及晶粒尺寸分布。

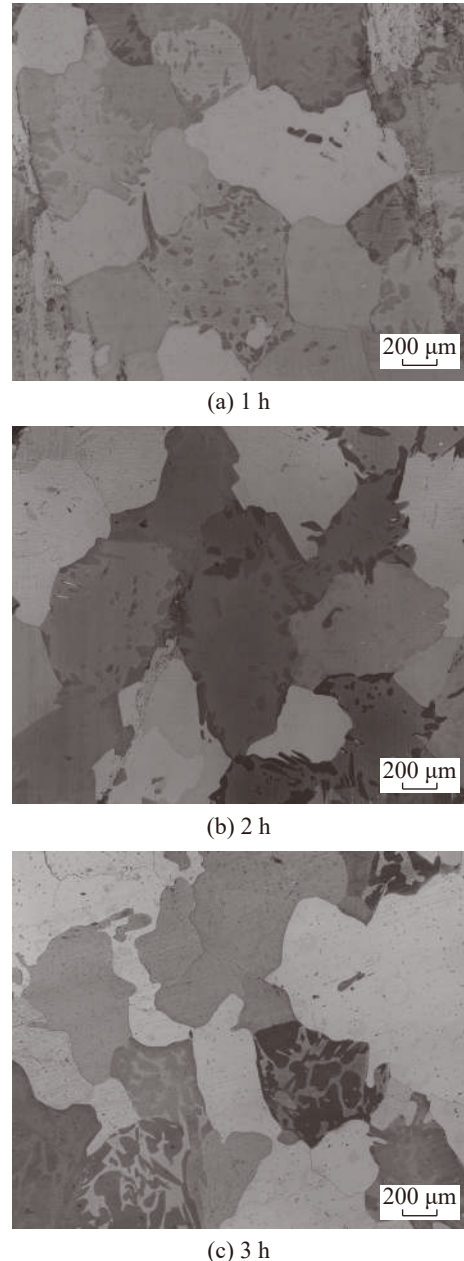


图9 1 050 °C 不同保温时间下实验钢的显微组织

Fig. 9 Microstructure of experimental steel under different holding times at 1 050 °C

综合图 9, 10 可知: 实验钢中尺寸较小的奥氏体晶粒被包裹在尺寸较大的铁素体晶粒内部, 随保温时间的延长, 奥氏体晶粒尺寸变大, 保温时间为 1, 2, 3 h

时,晶粒平均直径( $d_{av}$ )分别为 100.0, 132.2, 149.7  $\mu\text{m}$ ; 实验钢中较小尺寸晶粒占比随保温时间延长而降低,保温时间为 1, 2, 3 h 时较小晶粒尺寸(0~100  $\mu\text{m}$ )占比分别为 82%, 70%, 61%; 较大尺寸晶粒占比随保温时间延长得到提升,保温时间为 1, 2, 3 h 时较大晶粒尺寸(200  $\mu\text{m}$  以上)的占比分别为 10%, 15%, 22%。随保温时间的延长,一方面受原子扩散影响,在晶界能的作用下,实验钢晶粒发生长大;另一方面,细小第二相粒子逐渐回溶或聚集长大,对晶界的阻碍作用减弱,故较小尺寸晶粒减少、较大晶粒尺寸增多,平均晶粒尺寸变大。

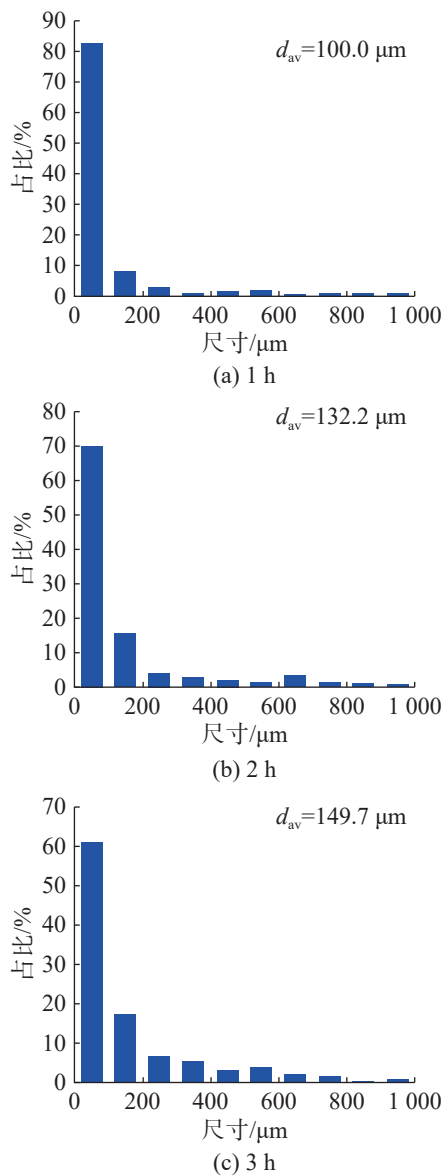
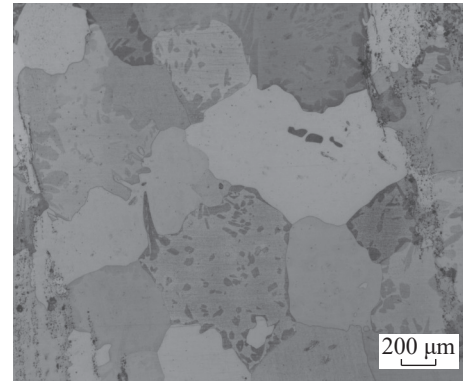


图10 1 050  $^{\circ}\text{C}$  不同保温时间下实验钢中晶粒尺寸分布

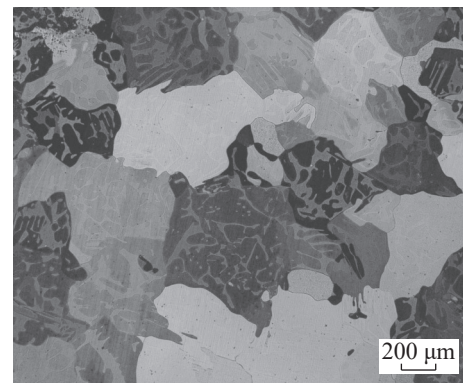
Fig. 10 Grain size distribution in experimental steel under different holding times at 1 050  $^{\circ}\text{C}$

以 1 h 保温样品为例进行分析,图 11, 12 为不同加热温度下保温 1 h 实验钢的显微组织与晶粒

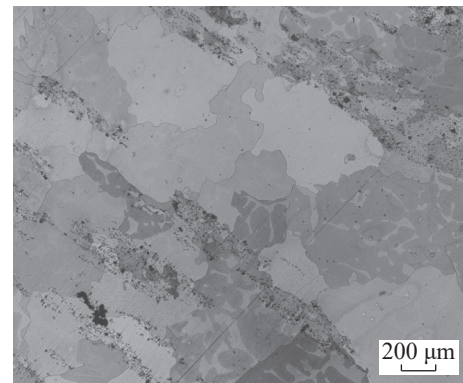
尺寸分布。



(a) 1 050  $^{\circ}\text{C}$



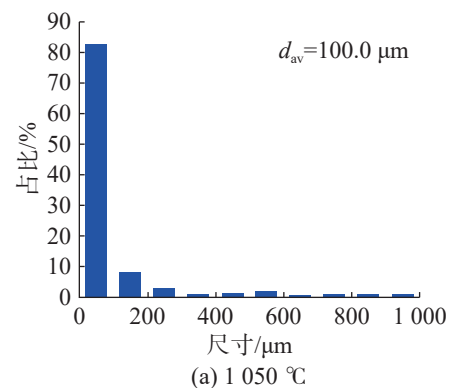
(b) 1 100  $^{\circ}\text{C}$



(c) 1 150  $^{\circ}\text{C}$

图11 不同加热温度下实验钢保温 1 h 的显微组织

Fig. 11 Microstructure of experimental steel with 1 h insulation under different heating temperatures



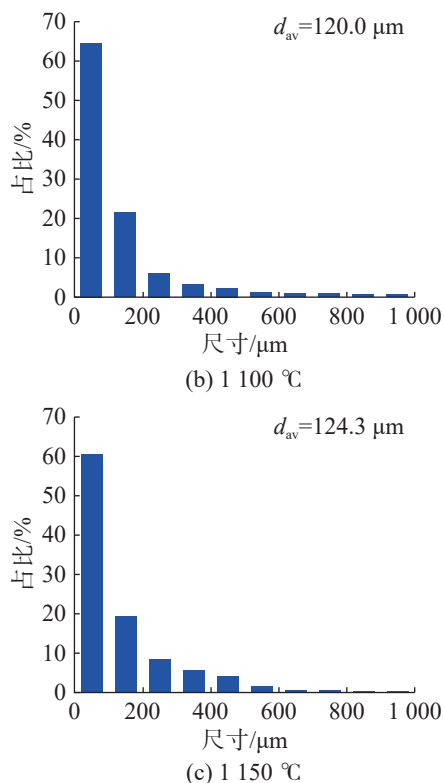


图12 不同加热温度下实验钢保温 1 h 的晶粒尺寸分布  
Fig. 12 Grain size distribution of experimental steel with 1 h insulation under different heating temperatures

综合图 11, 12 可知: 加热温度为 1 050, 1 100, 1 150 °C 时, 实验钢中晶粒平均直径 ( $d_{av}$ ) 分别为 100.0, 120.0, 124.3  $\mu\text{m}$ , 平均晶粒尺寸随加热温度的提高而增大; 实验钢中较小尺寸晶粒占比随加热温度的提高而降低, 加热温度为 1 050, 1 100, 1 150 °C 时较小尺寸晶粒 (0~100  $\mu\text{m}$ ) 占比分别为 82%, 65%, 61%; 较大尺寸 (200  $\mu\text{m}$  以上) 晶粒占比随加热温度的提高得到提升, 加热温度为 1 050, 1 100, 1 150 °C 时, 较大尺寸晶粒的占比分别为 10%, 14%, 20%。加热温度越高, 原子扩散速率越快, 晶粒越易于长大, 且较高温度下, 细小第二相粒子的回溶程度越大, 对晶界的阻碍作用越小, 因此平均晶粒尺寸变大。

由于无取向硅钢组织的遗传性, 较大尺寸晶粒的热轧板往往对应较大尺寸晶粒与较低铁损的退火板, 这有益于改善成品板的磁性能。由图 5 知, 热轧加热工艺参数为 1 150 °C、保温 2 h 时, 夹杂物性质最优 (数量最少、尺寸最大), 对晶粒长大的阻碍作用最小, 同时得到的晶粒尺寸也较理想, 有助于免常化工艺的实现。鉴于更长的加热时间会导致更高的能耗, 综合磁性能和成本考虑, 认为本实验条件下最佳的热轧加热工艺参数为 1 150 °C、保温 2 h。

### 3 结论

析出相对无取向硅钢的组织 and 磁性能有重要影响, 钢中析出相与轧制加热阶段的工艺参数密切相关。实验研究热轧前加热温度 (1 050, 1 100, 1 150 °C) 和保温时间 (1, 2, 3 h) 对 1.5%Si-0.3%Al 中牌号无取向硅钢坯料中析出相形貌、尺寸等的影响, 得到如下主要结论:

1) 实验钢中夹杂物主要为 AlN 和 MnS, 其中 AlN 夹杂物形状比较规则, 多为长方形, 尺寸在 1  $\mu\text{m}$  以上居多; MnS 夹杂物一般呈椭圆形, 尺寸在 1  $\mu\text{m}$  以下居多。经过加热处理钢中出现 AlN 与 MnS 复合析出现象。

2) 整体而言, 随保温时间的延长和加热温度的升高, 实验钢中细小 AlN 和 MnS 析出相的数量减少, 平均夹杂物尺寸变大, 平均晶粒尺寸增大。

3) 从磁性能和成本角度考虑, 本实验条件下最佳的热轧加热工艺参数为 1 150 °C、保温 2 h, 在此工艺参数下得到的晶粒尺寸和夹杂物性质 (数量最少、尺寸最大) 最优, 有利于无取向硅钢免常化生产工艺的实现。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG N, YANG P, MAO W. Effect of rolling methods on microstructure, recrystallization texture and magnetic properties in a Fe-2.5% Si-0.52% Al non-oriented electrical steel[J]. *Materials Characterization*, 2015, 108:85.
- [2] DU Y, O'MALLEY R, BUCHELY M F. Review of magnetic properties and texture evolution in non-oriented electrical steels[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(10):6097.
- [3] CHEN D M, WANG G D, LIU H T. The significance of hot rolled microstructure controlled by fine-tuning Al content to texture evolution and magnetic properties of low silicon non-oriented electrical steels[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2021, 528:167740.
- [4] QIANG R, ZHIYUAN H, LIN C, et al. Effect of rare earth elements on magnetic properties of non-oriented electrical steels[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, 560:169624.
- [5] PALTANEA G, MANESCU V, ANTONIAC A, et al. Mechanical and magnetic properties variation in non-oriented electrical steels with different cutting technology: a review[J]. *Materials*, 2024, 17(6):1345.
- [6] YANG L, XIAO Z, PEI W, et al. Investigation on inclusions in non-oriented silicon steels[J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2020, 51(1):22-26.
- [7] LONG J Q, LEI L, HU F G, et al. Effect of hot band

- annealing on inclusions, texture, and magnetic properties of 2.97%Si-0.59% Al non-oriented silicon steel[J]. *Ironmaking Steelmaking*, 2020, 47(1):22-30.
- [8] ZHI H L, SONG K X, GUO D W, et al. Dependence of recrystallization behavior and magnetic properties on grain size prior to cold rolling in high silicon non-oriented electrical steel[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 888:161576.
- [9] JIA S W, MING L, XIA H W, et al. Effect of grain size before cold rolling on microstructure, texture and magnetic properties of ultra-thin low-Si non-oriented silicon steel[J]. *JOM*, 2023, 75(6):1824-1838.
- [10] XIE L, HE M, SUN L, et al. Columnar grain growth in non-oriented electrical steels via plastic deformation of an initial columnar-grained solidification microstructure[J]. *Materials Letters*, 2020, 258:126797.
- [11] SAEED T, HE Y L, MEHDI S, et al. Mechanical properties and crystallographic texture of non-oriented electrical steel processed by repetitive bending under tension[J]. *Materials Science Engineering A*, 2022, 835:142665.
- [12] LUKAS N, HERBERT K, HERBERT L, et al. Influence of intermediate annealing temperature on the microstructure and texture of double stage cold rolled non-grain oriented electrical steel[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2023, 585:171083.
- [13] LUO Y, ZHANG L, YANG W, et al. Precipitation of nitrides in non-oriented silicon steel[J]. *Ironmaking Steelmaking*, 2019, 46(4):359-367.
- [14] 张兴海, 杨超, 王郁倩, 等. 双辊薄带连铸 3.2%Si 无取向硅钢析出相研究 [J]. 河北冶金, 2020(8):11-16.
- [15] 吴园园, 王晓东, 金传伟, 等. 冷轧无取向硅钢中夹杂物的微观结构表征及演变规律探讨 [J]. 冶金分析, 2023, 43(4):34-40.
- [16] 乔家龙, 郭飞虎, 胡金文, 等. 无取向硅钢中氮化物的析出机理 [J]. 材料热处理学报, 2021, 42(1):110-118.
- [17] 王新宇, 王丽霞. 夹杂物对无取向硅钢磁性能的影响 [J]. 太钢科技, 2007(1):31-33.
- [18] 王宝明, 赵志毅, 陈凌峰, 等. 夹杂物尺寸及数量对无取向硅钢磁性能影响的主成分回归分析 [J]. 冶金分析, 2014, 34(10):1-6.
- [19] 吴媛. 高牌号无取向硅钢中夹杂物/析出物的表征及硫化物对组织影响的研究 [D]. 上海: 上海大学, 2017.
- [20] 罗小燕, 朱诚意, 李光强, 等. 热装温度对无取向硅钢中夹杂物析出特性的影响 [J]. 武汉科技大学学报, 2018, 41(1):8-14.
- [21] 吴园园, 金传伟, 张继明, 等. 加热工艺对无取向硅钢连铸坯中夹杂物析出行为的影响 [J/OL]. 热加工工艺, [2024-05-31]. <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20212006>.
- [22] 刘磊, 乔家龙, 尹思博, 等. 取向硅钢奥氏体中 AlN 沉淀析出的动力学计算 [J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(2):158-162.
- [23] 韩世绪, 冯运莉, 白敏, 等. 含铌取向硅钢第二相沉淀析出相变动力学计算 [J]. 金属热处理, 2019, 44(7):194-197.
- [24] 徐阳, 李彦睿, 刘宝胜, 等. 无取向硅钢中第二相的析出行为 [J]. 材料研究学报, 2023, 37(1):47-54.

责任编辑: 何莉