

酸溶铝对铸态取向硅钢中第二相粒子组成和形貌的影响

朱诚意¹ 郑建新¹ 李光强¹ 陈先红¹ 张峰²

(1 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081;

2 宝山钢铁股份有限公司硅钢部, 上海 201900)

摘 要 试验的铸态取向硅钢(/% : 0.044 ~ 0.056C, 3.12 ~ 3.32Si, 0.08 ~ 0.11Mn, 0.002 ~ 0.008S, 0.0029 ~ 0.0291Als, 0.0062 ~ 0.0109N) 由 30 kg 高频真空感应炉熔炼。通过场发射扫描电子显微镜/能谱仪(FE-SEM/EDS) 研究结果表明, 0.0029% Als 钢中氧化物主要为 SiO₂, 存在片状、棒状及近似球状的独立 MnS, 未发现含铝的氧化物或氮化物; 0.0090% Als 钢中出现以 Al₂O₃ 为主的复合氧化夹杂物, 存在 MnS 与 AlN 的复合析出物。钢中 Als 增加, 复合析出物多呈簇状发展。氧化物容易成为 MnS-AlN 复合析出的核心, 钢中 Als 含量越低, 夹杂物中的 MnS 含量越高; 作为核心的氧化物夹杂的尺寸越小, 形成的复合夹杂物的形状越规则, 尺寸也越小。热力学计算结果表明, 钢中 Als 含量主要影响了钢中氧化物夹杂的组成和 AlN 的析出温度及析出量。

关键词 酸溶铝 铸态取向硅钢 第二相粒子 组成 形貌 热力学分析

Influence of Acid-Soluble Aluminium on Ingredient and Morphology of Second Phase Particles in As-cast Grain-Oriented Silicon Steel

ZhuChengyi¹, Zheng Jianxin¹, Li Guangqiang¹, Chen Xianhong¹ and Zhang Feng²

(1 Key Laboratory of Ferrous Metallurgy and Resources Utilization, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Silicon Steel Department, Baoshan Iron and Steel Co Ltd, Shanghai 201900)

Abstract Test as-cast grain-oriented silicon steel (/% : 0.044 ~ 0.056C, 3.12 ~ 3.32Si, 0.08 ~ 0.11Mn, 0.002 ~ 0.008S, 0.0029 ~ 0.0291Als, 0.0062 ~ 0.0109N) is melted by a 30 kg high frequency vacuum induction furnace. The research results by using field emission-scanning electron microscope/energy dispersive spectrometer (FE-SEM/EDS) show that in 0.0029% Als steel the main oxide is SiO₂, and there is independent laminable, rod-like and approximate spherical shape MnS while the oxide or nitride bearing aluminium has not been found in steel; in 0.0090% Als steel the composite oxide containing prime Al₂O₃ occurs and there is MnS-AlN compounded precipitate; with increasing Als in steel the compounded precipitate develops in a cluster form. The oxide particle is easily becoming a nucleus of MnS-AlN compounded precipitating, and the lower Als content in steel the higher MnS content in inclusion; the smaller oxide as nucleus the more regular morphology of formed compounded inclusion and smaller its size. The thermodynamic calculation results show that the Als content in steel is the main factor to influence on the ingredient of oxide inclusion in steel and the precipitating temperature and amount of AlN in steel.

Material Index Acid-Soluble Aluminium, As-cast Grain Oriented Silicon Steel, Second Phase Particle, Ingredient, Morphology, Thermodynamic Analysis

取向硅钢中通常需要添加溶质元素或晶界偏析元素来获得足够数量、适当尺寸(纳米级)及弥散分布的“抑制剂”(通常为 MnS 和 AlN), 抑制脱碳退火过程初次再结晶晶粒的长大, 促进高温退火过程中高斯位向的二次再结晶晶粒长大来发展高斯织构从而获得良好的磁性能^[1-5]。取向硅钢生产采用 Al 脱氧导致钢中固溶有一定量的酸溶铝(Als), Als 可通过影响钢中 Al₂O₃, SiO₂ 夹杂的比例来影响作为抑制剂的 MnS 的形态和尺寸, 从而最终影响钢的磁性能^[2,6-9]。加入钢中的铝形成 Al₂O₃ 夹杂可能成为 MnS 析出的核心, 氧硫复合夹杂不但容易在铸坯中心偏析, 而且弱化 MnS 的抑制能力。同时, 钢中适当数量的 Als 能形成一定数量的起抑制剂作用的

AlN, 有助于获得理想的高斯织构。铸态取向硅钢中第二相粒子的组成、数量、尺寸及分布对铸坯成分的均匀性、铸坯后续的加热、轧制及退火工艺制度的制定和最终高斯织构的形成及稳定起非常关键的作用^[10-13]。有关取向硅钢常用抑制剂如 MnS、AlN、Cu₂S 单独在钢的二次再结晶过程中的析出行为及其对钢磁性能的影响已有很多报道^[14-21]。研究中没有涉及到铸态钢样中 MnS 和 AlN 等单独或复合析出的行为。试验主要研究 Als 含量对取向硅钢铸坯中氧化物夹杂及 MnS、AlN 的组成及形貌的影响, 掌握它们在钢中的组成、形貌与 Als 含量之间的对应关系, 并通过热力学计算分析其影响机理, 以期控制钢中夹杂物和获得有利的抑制剂。

1 取向硅钢的熔炼及钢中第二相粒子分析方法

试验用取向硅钢采用 30 kg 高频真空感应炉熔炼,冶炼温度为 (1913 ± 2) K。采用铝脱氧后加硅铁进行合金化,根据钢中硫含量的水平分 A、B 两个系列,再调整铝的加入量使 Als 含量达到控制要求,脱氧后保证钢中全氧含量低于 0.003 0%。将冶炼好的取向硅钢浇铸成钢锭后切割成小钢片以备用,试样的化学成分如表 1 所示。场发射扫描电镜 (FE-SEM) 用于观察采用 10% 的 AA 溶液电解腐蚀后及金相法制样后的钢基体中的夹杂物,结合能谱仪 (EDS) 确定各种元素在夹杂物中的含量。

2 取向硅钢中第二相粒子特征的分析结果

2.1 取向硅钢中典型硫化物及氮化物的组成、形貌分析

采用 FE-SEM 观察电解腐蚀后保留在钢基体中硫化物及氮化物的形貌如图 1(a₁, b₁, c₁, d₁) 所示。钢中存在长度方向为微米级的条片状[图 1(a₁)],或棒状的 MnS[图 1(b₁)],长径为微米级或亚微米级的近似球状的 MnS[图 1(c₁)]。当钢中 Als 为 0.016 0% 时, MnS 中存在一定量的 AlS_x。不同 Als 含量水平的试样中均未发现单独析出的 AlN。在 Als 为 0.009 0% 的试样中发现了 AlN 与 MnS 的复合析出。另外,钢中的 Cu、Ti、Si 等元素在钢液凝固过程中也会与 MnS 一起进行复合析出。由于 AlN 主要与 MnS 复合析出,复合析出物的形貌和尺寸受 MnS 和 AlN 各自的形貌和尺寸的影响。除亚微米级复合析出物形状稍规则外,钢中析出物大都呈簇状发展[图 1(d₁)],且随着钢中 Als 增多,析出物的尺寸变大,结构变得更复杂。图 1(a₁, b₁, c₁, d₁) 中不同 Als 对应的硫化物、氮化物中各元素所占的原子百分比如表 2 所示。

采用 FE-SEM 观察纵向剖开的金相试样的背散射电子像并结合 EDS 分辨出 MnS 和 AlN 在复合析出物中的分布结果如图 2(a) 所示。图中 AlN 和 MnS 复合夹杂物的尺寸在 1.5 μm 左右。MnS 和 AlN 复合析出的形式受局部形核核心

表 1 铸态试验取向硅钢主要合金及杂质元素的含量 / %
Table 1 Content of main alloy and impurity elements in as-cast test grain-oriented silicon steel / %

| 编号 | C | Si | Mn | S | Als | N |
|-----|-------|------|------|-------|---------|---------|
| A-1 | 0.052 | 3.14 | 0.08 | 0.002 | 0.002 9 | 0.006 2 |
| A-2 | 0.044 | 3.12 | 0.08 | 0.002 | 0.020 7 | 0.010 9 |
| B-1 | 0.056 | 3.29 | 0.11 | 0.007 | 0.009 0 | 0.007 0 |
| B-2 | 0.052 | 3.32 | 0.11 | 0.008 | 0.016 0 | 0.006 3 |
| B-3 | 0.053 | 3.30 | 0.10 | 0.007 | 0.025 0 | 0.008 5 |
| B-4 | 0.053 | 3.22 | 0.10 | 0.007 | 0.029 1 | 0.008 3 |

表 2 Als 对铸态试验取向硅钢硫化物和氮化物析出相元素含量的影响, EDS

Table 2 Influence of Als on elements content in sulphide and nitride precipitate phases in as-cast test oriented silicon steel, EDS

| Als / % | 元素的原子百分数 / % | | | | | | |
|---------|--------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| | N | Al | Si | S | Mn | Fe | C |
| 0.002 9 | - | - | 9.81 | 2.59 | 2.38 | 85.22 | - |
| 0.002 9 | - | - | 5.50 | 24.61 | 17.43 | 52.46 | - |
| 0.016 0 | - | 8.31 | 3.12 | 44.55 | 35.20 | 8.83 | - |
| 0.025 0 | 15.24 | 13.30 | 3.25 | 8.94 | 6.91 | 32.85 | 19.52 |

类型影响。

2.2 取向硅钢中典型的 O、S、N 复合夹杂物的组成、形貌分析

采用 FE-SEM 观察非水溶液电解提取钢中的非金属夹杂物后的钢基体,其中存在部分以氧化物为核心,外包 MnS、AlN、TiN、Cu_xS 的复合夹杂物。以 SiO₂、Al₂O₃ 或 TiO_x 等为核心的复合夹杂物的形貌如图 1(a₂, b₂, c₂, d₂) 所示,呈方形、球形(或近似球

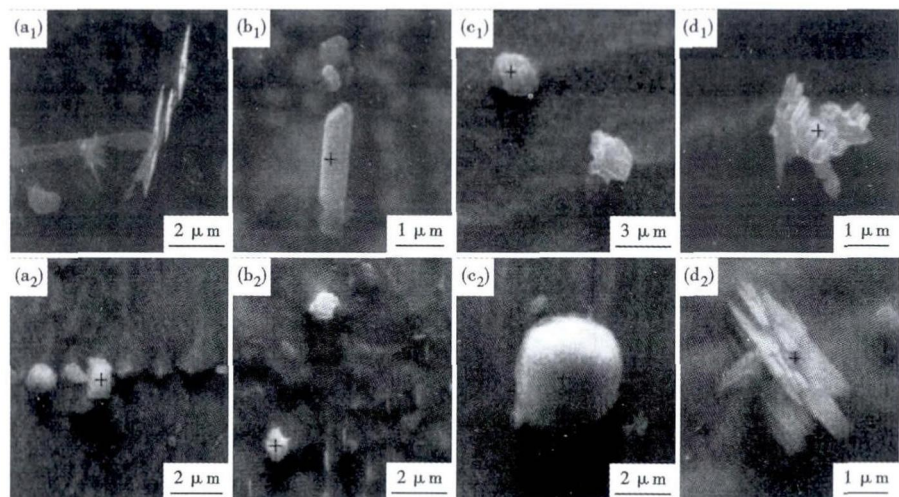


图 1 Als 对铸态试验取向硅钢硫化物和氮化物(a₁, b₁, c₁, d₁) 和 SiO₂, Al₂O₃ 或 TiO_x 为核心的复合夹杂物(a₂, b₂, c₂, d₂) 形貌的影响: Als / %: (a₁) (b₁) 0.002 9; (c₁) 0.016 0; (d₁) 0.025 0; (a₂) 0.002 9; (b₂) 0.020 7; (c₂) 0.009 0; (d₂) 0.029 1

Fig. 1 Influence of Als on morphology of sulphide and nitride (a₁, b₁, c₁ and d₁) and compounded inclusions with SiO₂, Al₂O₃ or TiO_x nucleus (a₂, b₂, c₂ and d₂), Als / %: (a₁) (b₁) 0.002 9; (c₁) 0.016 0; (d₁) 0.025 0; (a₂) 0.002 9; (b₂) 0.020 7; (c₂) 0.009 0; (d₂) 0.029 1 in as-cast test oriented silicon steel

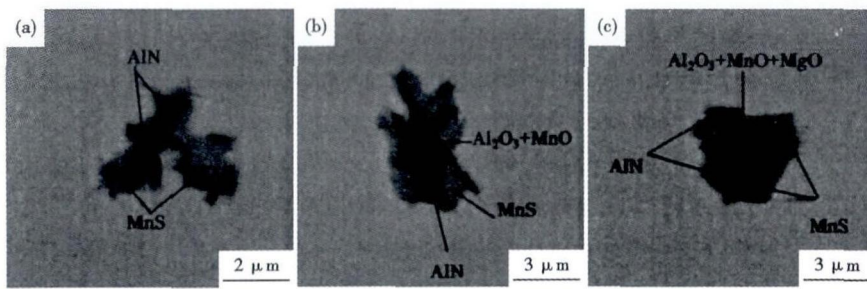


图 2 铸态试验取向硅钢 MnS 和 AlN 复合夹杂物(a),典型 O、S、N 复合夹杂(b)(c) 的形貌

Fig.2 Morphology of MnS and AlN compounded inclusion (a) and typical oxygen, sulfur and nitrogen compounded inclusions (b) and (c) in as-cast test oriented silicon steel

表 3 Als 对铸态试验取向硅钢典型 O、S、N 复合夹杂物中元素含量的影响,EDS
Table 3 Influence of Als on elements content in typical oxygen, sulfur and nitrogen compounded inclusions in as-cast test oriented silicon steel, EDS

| Als/% | 原子百分含量/% | | | | | | | | | | |
|---------|----------|------|-------|------|-------|-------|-------|------|------|-------|--|
| | N | O | Al | Si | S | Mn | Fe | Cu | Ti | C | |
| 0.002 9 | - | 8.43 | - | 3.45 | 17.21 | 14.69 | 35.49 | - | - | 20.23 | |
| 0.020 7 | 15.60 | 5.99 | 18.74 | 4.84 | 8.03 | 6.58 | 39.84 | - | 0.37 | - | |
| 0.009 0 | - | 5.12 | 0.70 | 1.20 | 8.04 | 6.92 | 14.21 | 0.66 | - | 63.15 | |
| 0.029 1 | - | 8.33 | 3.22 | 3.98 | 0.57 | 0.67 | 50.66 | - | - | 32.57 | |

形)及不规则形状如簇状。夹杂物各微区对应元素的原子百分含量如表 3 所示。由上述两方面的分析结果可以看出,Als 含量越低,夹杂物中 MnS 含量高;当作为核心的氧化物夹杂的尺寸越小,形成的复合夹杂物的形状越规则,尺寸也越小。以 SiO₂、Al₂O₃ 为核心外包少量 MnS 的复合夹杂物多呈簇状或棒状。以 SiO₂ 或 Al₂O₃ 或它们的复合物为核心外包大量 MnS 的复合夹杂物多呈块状或近似球状。

采用 FE-SEM 观察纵向剖开的金相试样的背散射电子像并结合 EDS 分辨的复合夹杂物中各相的分布结果如图 2(b,c)所示。图 2(b,c)分别是以 Al₂O₃ + MnO 和 Al₂O₃ + MnO + MgO 质点为核心,析出较多的不规则 MnS 掺杂少量 AlN 的复合夹杂物,复合夹杂物的尺寸可达 3 μm 以上。

3 试验结果讨论

3.1 取向硅钢中氧化物夹杂形成的热力学分析

取向硅钢中 Si 含量一般为 3% 左右,出钢时先需采用 Al 预脱 O 以保证合金化过程中 Si 的收得率。由于合金元素 Si 含量高,在精炼过程中存在一定程度的氧化。本研究采用热力学软件 FactSage6.1 计算了 1913 K 钢中溶解 O 含量(%)为 0.001 0, 0.003 0, 0.005 0 时 Als 含量变化对成分(%)为:Fe-0.050C- 3.20Si- 0.080Mn- 0.007 0S- (0.001 0 ~

0.040 0) Al-0.008 0 N-0.003 0 Ti 的钢中氧化物夹杂组成及含量的影响。计算结果与本试验检测的结果比较如图 3 所示。图 3 中实线表示 Als 含量变化引起夹杂物的变化趋势,图 3 中的点表示试验统计的不同 Als 含量铸坯试样中的氧化物夹杂的组成及含量。由图 3 可知,试验检测的结果与计算的氧化物组成的变化趋势吻合较好,偏离计算区域的夹杂物的出现是由于实际钢样中的 O 及其他夹杂物形成元素的含量与计算条件存在一定的偏差。当钢中 Als 为 0.002 9% 时,钢中的氧化物夹杂以 SiO₂ 为主,包含部分 Fe_xO。当钢中 Als 达到 0.009 0% 时,钢出现含 Al₂O₃ 为主的复合夹杂物。随着钢中 Als 升高,钢中独立的 SiO₂ 的含量变少,且其尺寸变小(亚微米级)。这是由于当钢中 Als 低时,在一定的温度下,钢中的 O 含量高,钢中的 Si 含量高易被氧化,同时 Si 在高温下能还原钢中未上浮的 Al₂O₃ 从而被氧化。随着钢中 Als 的增加,钢中溶解的 O 含量降低,Si 的氧化减少,形成独立的 SiO₂ 数量变少,尺寸变小,钢中容易形成 Al₂O₃ 和

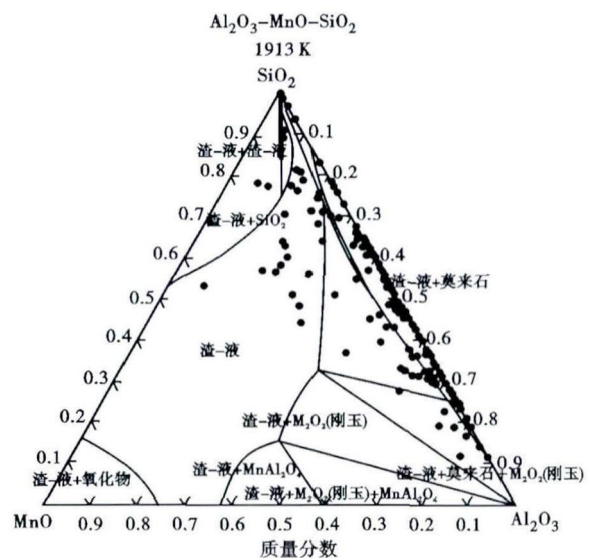


图 3 Als 含量(0.001 0% ~ 0.040 0% Al)对 3.20% Si 钢中夹杂物组成和含量的影响

Fig.3 Influence of Als content (0.001 0% ~ 0.040 0%) in steel on ingredient and content in inclusions in 3.20% Si steel

SiO₂ 的复合夹杂。氧化物易成为硫化物、氮化物的形核核心。由于加入的合金中含有一定的 Ti, 顶渣或耐火材料中可能带入 MgO、CaO, 因此, 钢中还存在着少量的 TiO_x、MgO、CaO 与 SiO₂ 复合在一起的夹杂物。

3.2 Als 对取向硅钢中在硫化物及氮化物组成及形貌的影响

以设计的取向硅钢 (%) Fe-0.053C-3.2Si-0.1Mn-0.007S-0.0250Als-0.009N 为例, 采用热力学软件 FactSage6.1 计算钢液凝固过程 Mn、Al、S、N 4 种元素的析出形式。结果表明, Mn 以 MnS 形式析出, Al 可以以 AlN 或 Al₂S₃ 的形式单独析出, 还可以与 MnS 复合析出。

采用热力学软件 J-matpro 计算的试验钢的液相线温度为 1752 K 左右, 固相线温度为 1702 K 左右, 实际钢包精炼温度达 1913 K 左右。理论上讲, MnS 和 AlN 不会在液相中析出。但在钢液凝固过程中, 由于凝固前沿局部溶质元素的偏析及受形核核心的诱导, 且钢液中 S 和 N 的溶解度随着温度的降低而减小, 钢中的 Mn 和 Al 容易分别以 MnS、AlN 的形式单独或复合析出, 或以氧化物为核心进行复合析出。试验结果表明, 作为抑制剂的 MnS 可以单独析出, 也可以与氧化物和(或)AlN 复合析出; 作为抑制剂的 AlN 只有在 Als 比较高如达到 0.009 0% 时才与氧化物和 MnS 复合析出。针对试验钢成分, 采用 Iwayama 等给出的 MnS 和 AlN 在 3.0% Si 钢中的溶解度公式^[22], 计算出 MnS 的开始析出温度在 1401 ~ 1501 K, AlN 的开始析出温度在 1347 ~ 1587 K。试验钢中抑制剂形成元素含量不同, 出现以 MnS 为核心外包 AlN 和以 AlN 为核心外包 MnS 的复合析出物。

当钢中 Als 较低时, 作为异质形核质点的氧化物核心太少, 钢液凝固过程中易于因成分偏析形成单个的 MnS, 其形貌呈片状、棒状及近似椭球状。Als 过低析出 AlN 的可能性会很小, 不同 Als 的试样中均发现有单个的 MnS 析出。在高 Als 下没有观察到杆状的 MnS 析出物, 这是由于随着 Als 的升高, 可以作为析出核心的铝酸盐的量增加, 一部分 MnS 已经在氧化物上析出, 从而导致固溶析出的 MnS 减少并影响其长大。试样中 Als 超过 0.016 0% 时, 随着 Als 增加, 析出的 AlN 增加, MnS 与 AlN 复合的机会增多, 其形貌向簇状发展, 尺寸变大。

对含 Als 为 0.002 9% 的钢样分析发现, 钢中不存在任何单独或复合析出的 AlN, 在 Als 为

0.009 0% 的试样中检测到了与 MnS 复合的 AlN。Sakai 等把钢中 AlN 分为三类^[17]: A 类为细针状小于 10 nm 的析出点; B 类为细小片状介于 20 ~ 50 nm 的析出点; C 类为尺寸为 200 ~ 300 nm 较大的聚合片状析出物。蒙肇斌等的研究表明^[23], Hi-B 钢中 AlN 的析出存在一定的惯习面, 从而使 AlN 的形貌呈现平行条束状分布。在试验中, MnS 和 AlN 的复合析出物多呈簇状, 面扫描的结果显示其中的 AlN 呈条束状分布, AlN 的析出特性与上述文献报道的一致。

3.3 Als 对取向硅钢中 O、S、N 复合粒子组成及形貌的影响

试验钢中 O、S、N 复合夹杂物以 3 种方式存在, 其中少数为当 Als 含量相对较低的情况下存在的 MnS 与 SiO₂ 复合部分 Si 及 N 形成的复合夹杂物; 当 Als 含量较高时, 存在 MnS 与 AlN、Al₂O₃、SiO₂、MgO、MnO、TiO_x 等形成的复合夹杂物。

当 Als 含量较低时, 由于作为异质形核质点的氧化物核心太少, 只有少量的 MnS 在 SiO₂ 上析出。随着 Als 含量的升高, 作为 MnS 析出核心的铝酸盐的量增加, 在钢液凝固过程中 Mn 和 S 向氧化物核心扩散, 导致夹杂物附近元素浓度梯度变大, Mn、S、Al、N 向氧化物区域扩散的驱动力更大, 使含氧化物复合夹杂继续长大。

在较高的 Als 含量时, 钢中形成了一定数量的 AlN, MnS 与 AlN 复合在氧化物表面进行析出, 这些复杂的夹杂物的形状除了受作为核心的氧化物的影响外, 还与 MnS、AlN 的生长方式有关, 呈现出近似球状、棒状、簇状及不规则形状析出物。Kim 等^[24]的研究认为几乎所有的氧化物周围都会伴随有 MnS 析出, 如果存在有含 Mn 的氧化物盐类, MnS 会在其上以内嵌的形式析出。Wakoh 等的研究表明^[25], 当钢中硫的含量控制在 0.005 0% ~ 0.010 0% 时, MnS 容易在熔点较低的锰硅酸盐和锰铝酸盐表面析出, 且锰硅酸盐更有利于 MnS 的析出。研究表明, MnS 在氧化物核心的析出形式还受钢中 Als 含量的影响。

4 结论

(1) 不同 Als 含量的试样中包含有独立的 SiO₂、Al₂O₃、莫来石及其与少量 MnO、TiO_x、MgO、CaO 构成的复合夹杂物。当钢中 Als 为 0.002 9% 时, 钢中的氧化物夹杂以 SiO₂ 为主, 包含部分 MnO 和 Fe_xO; 当 Als 达到 0.009 0% 时, 钢出现以 Al₂O₃ 为主的复

合氧化夹杂物。

(2)当钢中 Als 含量为0.002 9%时,钢中存在独立的呈片状(条片及圆片)、棒状及近似球状的 MnS。当 Als 含量增加到0.009 0%时,近似呈球形的亚微米级 MnS 与 AlN 复合析出。随着钢中 Als 含量的进一步增多,绝大部分复合析出物呈簇状发展,尺寸变大,结构变得更复杂。

(3)不同 Als 含量的试样中未发现单独析出的 AlN,AlN 主要与 MnS 复合析出,AlN 和 MnS 开始析出的温度受钢中 Al、N、Mn、S 浓度的影响。Als 含量高时析出物中包含部分硅的氮化物和铝的硫化物。复合析出物的形貌和尺寸受 MnS 和 AlN 各自的形貌和尺寸的影响。

(4)氧化物容易成为 MnS、AlN 复合析出的核心,钢中 Als 含量越低,夹杂物中的 MnS 含量高。当

作为核心的氧化物夹杂的尺寸越小,形成的复合夹杂物的形状越规则,复合夹杂物的尺寸也越小。以 SiO₂、Al₂O₃ 为核心外包少量 MnS 的复合夹杂物多呈簇状,外包大量 MnS 的复合夹杂物多呈块状或近似球状。

(5)热力学计算表明,在试验用钢冶炼条件下,钢中氧的含量保持恒定,随着钢中 Als 含量增加,钢中 Al₂O₃ 夹杂的含量增加;钢中能稳定存在的夹杂物有独立的 SiO₂、Al₂O₃、莫来石及 SiO₂、Al₂O₃ 和 MnO 构成的复合夹杂物。钢中的 MnS、AlN 不能单独从液相中析出,在凝固过程中 Mn 主要以 MnS,Al 主要以 AlN 或 Al₂S₃ 的形式和 MnS 复合析出。

国家自然科学基金青年基金(No. 51104109)

参考文献

[1] 日本金属研究调查会. 电磁钢板现状与基础知识[J]. 电工钢, 2009(3):37-44.

[2] 何忠治. 电工钢(上册)[M]. 北京:冶金工业出版社,1997:176-179,342-346.

[3] 张颖,傅耘力,汪汝武,等. 高磁感取向硅钢中的抑制剂[J]. 中国冶金,2008,18(11):4-9.

[4] 赵宇,何忠治. 取向硅钢二次再结晶机理研究的进展[J]. 钢铁研究学报,1991,3(4):79-90.

[5] Tetsuo Toge, Michiro Komatsubara, Atsuhito Honda, et al. Grain-Oriented Electromagnetic Steel Sheet and Process for Producing the Same[P]. United States Patent,6039818,2000,03,21.

[6] 黎世德. 作为晶粒长大抑制相的硫化锰及其状态控制[J]. 电工钢,1999,35(1):16-25.

[7] 肖丽俊,项利,岳尔斌,等. 低温加热生产取向硅钢中 MnS 和 Cu₂S 的竞相析出[J]. 钢铁研究学报,2010,22(4):48-51.

[8] 赵楠,穆海玲,斯松华. 冷轧无取向电工钢的组织及性能分析[J]. 电工材料,2007(4):14-18.

[9] Yu Hao, Kang Yong-lin, Zhao Zheng-zhi, et al. Morphology and Precipitation Kinetics of MnS in Low-Carbon Steel during Thin Slab Continuous Casting Process[J]. Journal of Iron and Steel Research, International,2006,13(5):30-36.

[10] Ushigami Y, Masui K, Okazaki Y, et al. Development of Low-Loss Grain-Oriented Silicon Steel[J]. ASM International,1996,5(3):310-315.

[11] Obara T, Takeuchi H, Takamiya T, et al. Control of Inhibitor Precipitation Producing Grain-Oriented Silicon Steel[J]. ASM International,1993,2(2):205-210.

[12] 何忠治. 电工钢(下册)[M]. 北京:冶金工业出版社,1997:562-732.

[13] Oh Jae-Hoon, Cho Sang-Hyun, John Jonas J. AlN Precipitation in Dual-phase 3% Si Electrical Steels[J]. ISIJ International,2001,41:484-491.

[14] Ito Yoichi, Masumitsu Noriyuki, Matsubara Kaichi. Formation of Manganese Sulfide in Steel[J]. Transactions ISIJ,1981,21(7):477-484.

[15] Oikawa Katsunari, Ohtani Hiroshi, Ishida Kiyohito, et al. The Control of the Morphology of MnS Inclusions in Steel during Solidification[J]. ISIJ International,1995,35:402-408.

[16] Sun W P, Militzer M, Jonas J J. Diffusion-controlled Growth and Coarsening of MnS during Hot Deformation[J]. Metallurgical Transactions A,1992,23(11):3013-3023.

[17] Sakai T, Shiozaki M, Takashina K. A Study on AlN in High Permeability Grain-Oriented Silicon Steel[J]. Journal of Applied Physic,1979,50(3):2369-2371.

[18] 蒙肇斌,赵宇,何忠治. 高磁感取向硅钢中抑制剂质点硫化物与 AlN 析出形态的研究[J]. 金属功能材料,1997(1):34-37.

[19] Harase J, Takashima K, Shimizu R, et al. Effect of AlN Precipitation on the Secondary Recrystallization of Fe-3% Si Alloy[J]. ISIJ International,1987,73(14):1746-1753.

[20] Yim Jung-Ryoul, Min Ah-Ri, Park Jong-Tae, et al. Distribution of the Precipitates on the Grain Boundaries in Fe-3% Si Steel during Secondary Recrystallization Annealing[J]. Materials Science Forum,2007,558-559:1453-1457.

[21] Cui Feng-e, Yang Ping, Mao Wei-min. Behaviors of Different Inhibitors during Secondary Recrystallization of a Grain-Oriented Silicon Steel[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials,2011,18(3):314-319.

[22] Iwayama K, Haratani T. The Dissolution and Precipitation Behavior of AlN and MnS in Grain-Oriented 3% Silicon-Steel With High Permeability[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,1980,19:15-17.

[23] 蒙肇斌,赵宇,何忠治,等. 高磁感取向硅钢中微观结构与抑制剂质点的 TEM 观察[J]. 钢铁研究学报,1997,9(5):25-28.

[24] Kim Han-Soo, Lee Hae-Geon, Oh Kyung-Shik. Evolution of Size, Composition and Morphology of Primary and Secondary Inclusions in Si/Mn and Si/Mn/Ti Deoxidized Steels[J]. ISIJ International,2002,42(12):1404-1411.

[25] Wakoh Masamitsu, Sawal Takashi, Mizoguch Shozo. Effect of S Content on the MnS Precipitation in Steel With Oxide Nuclei[J]. ISIJ International,1996,36(8):1014-1021.

朱诚意(1971-),女,博士(武汉大学),教授,中南工业大学(本科)毕业,纯净钢冶炼,钢中夹杂物控制研究。
E-mail:zhchysy-2002@163.com

收稿日期:2013-09-23