

急冷条件下 Nb对高磁感取向硅钢中抑制剂析出行为的影响

张 颖, 傅耘力, 吴开明
(武汉科技大学, 湖北 武汉 430083)

摘要: 以工业高磁感取向硅钢的化学成分为基础, 采用真空感应炉冶炼了两炉试验钢, 其中一炉为基体钢未添加微合金元素作为对比钢, 另一炉钢中添加了微合金元素 Nb以形成新型抑制剂。采用石英管直接伸入钢水吸取少量钢水后迅速插入水中进行急冷。电子显微镜的分析结果表明, 试样中的大型夹杂物为 MnS与 Al_2O_3 和 /或 MgO的复合物。基体钢以及 Nb微合金化试验钢急冷样品中都弥散分布着细小的析出物, 这些细小析出物的直径约为几个纳米。Nb微合金化的高磁感取向硅钢中, 不仅有 MnS和 AlN的细小析出物, 还有大量细小的 Nb(C, N)析出颗粒。采用 Nb微合金化有望降低取向硅钢的板坯加热温度, 还可能会进一步增强抑制剂的抑制效果。

关键词: 取向硅钢; 抑制剂; 微合金化; Nb

0 前言

取向硅钢主要用于制造变压器和电抗器。一般将磁感应强度 $B_8 = 1.82\text{ T}$ 的硅钢片称为普通取向硅钢 (简称 CGO 钢), 而 $B_8 \geq 1.88\text{ T}$ 的称为高磁感取向硅钢 (简称 Hi-B 钢)。在取向电工钢生产工艺中, 为了控制再结晶过程, 并获得一定的织构, 抑制剂是必不可少的。传统的抑制剂以 MnS、AlN 为主。近年来, 为了降低板坯加热温度, 提高抑制剂强度, 改善取向电工钢的磁性等, 围绕着抑制剂的高温固溶和引入方式开展了大量的研究工作, 如以氮化物和晶界析出元素等来强化抑制剂, 低温加热技术也得到了相应的发展^[1-6]。本文将研究急冷条件下微合金元素 Nb

对高磁感取向硅钢中抑制剂析出行为的影响。

1 试验材料与方法

本文以工业生产高磁感取向硅钢的化学成分为基础, 设计了两种试验钢, 其化学成分如表 1 所示。基体钢为不含微合金元素 Nb 的工业高磁感取向硅钢, 对比试验钢为 Nb 微合金化的对比钢种。基于严格的化学成分计算, 在试验室采用高纯合金, 利用真空感应炉冶炼了 2 炉 20 kg 试验钢。采用石英管直接伸入钢水中, 吸取少量钢水后迅速插入水中的取样方式模拟急冷, 分别进行 SEM 和 TEM 分析, 研究夹杂物和析出物的析出行为。同时, 利用 JMatPro 软件在试验室模拟计算该取向硅

表 1 试验钢化学成分的质量分数 %

类别	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Nb	N
基体硅钢	0.062	3.07	0.072	0.020	0.017	0.090	0.011	-	0.008 0
Nb微合金化硅钢	0.062	3.07	0.075	0.015	0.015	0.082	0.011	0.09	0.008 2

钢凝固过程中的各种抑制剂的析出情况。

2 试验结果

2.1 抑制剂析出的模拟计算

利用 JMatPro 软件模拟了取向电工钢中抑制剂的析出过程。图 1 为 Nb 微合金化硅钢中抑制剂的析出曲线。由该图可以看出, 随着钢液温度的降低, 首先形成 AlN, 其次是 Nb(C, N), 然后 MnS 随后析出。图 2 给出了不同 Nb 质量分数对

Nb(C, N)析出的影响。由该图可知, 随着 Nb 质量分数的增加, Nb(C, N)析出温度逐渐增高而且析出量也增加。

2.2 夹杂物的 SEM-EDS 分析

基体钢急冷样品中夹杂物的能谱分析表明, 夹杂物的主要化学成分为 O, Al, Si, Mn, Mg 元素。由能谱分析可知, 与化学成分相对应的最为可能的化合物的存在形式为: Al_2O_3 , MgO 和 MnS 的复合夹杂物。图 3(a)所示的析出物可能为 Al_2O_3

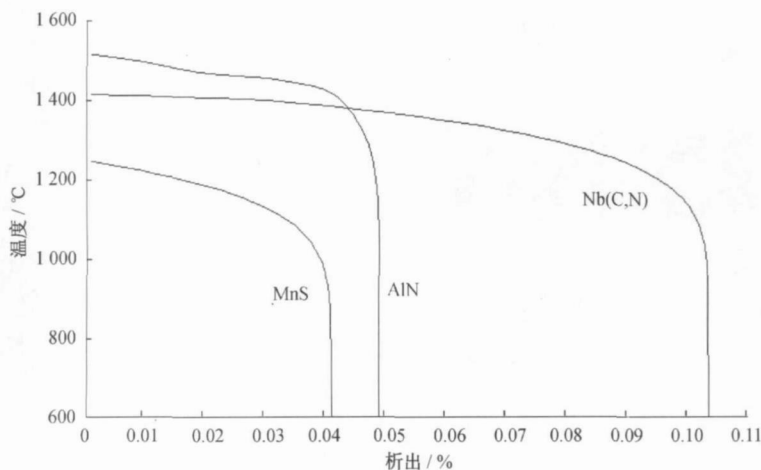


图1 Nb微合金化硅钢中MnS、AlN及Nb(C,N)的析出曲线

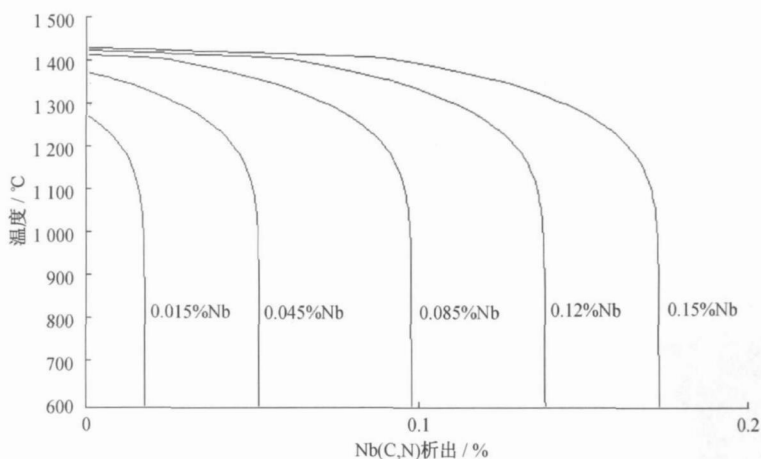


图2 Nb微合金化硅钢中Nb含量对Nb(C,N)析出的影响图

和MgO的复合夹杂物。根据大量的能谱分析可知,MnS一般都与氧化物如 Al_2O_3 和MgO复合析出,很少检测到单独沉淀析出的MnS。复合析出的夹杂物的尺寸都比较大,直径约为 $3\sim 5\mu m$ 以近似球形为主。需要指出的是,在这些夹杂物中出现了一些不在化学成分设计范围内的元素或化合物,如MgO,它们可能是来自真空感应炉的炉衬材料,该炉衬主要由MgO烧结而成。

Nb微合金化钢的急冷样品中的析出物能谱分析表明,析出物主要含有N,S,Mn,Nb等元素,其存在形式可能为MnS与NbN等化合物,如图3(b)所示。夹杂物尺寸比较大,直径约为 $2\sim 3\mu m$ 。

2.3 抑制剂的TEM以及EDS分析

Nb微合金化硅钢急冷样品中,析出物也以复合析出的形式存在。析出物可能存在形式为Nb(C,N)和MnS。铁素体基体中弥散分布大量的细小球形析出物,直径约为几个纳米,如图4所示。

3 讨论

根据热力学计算, Al_2O_3 和MnS主要是在钢水凝固过程中析出,NbN一般在固态相变中析出^[7]。文献报道,MnS一般附着于 Al_2O_3 等氧化物夹杂而析出^[8],因此可以推断,样品中存在的大型复合析出物中,在冷却过程中析出的MnS依附 Al_2O_3 而析出。根据SEM-EDS分析,急冷过程中MnS一般都与氧化物如 Al_2O_3 和MgO复合析出,很少检测到单独沉淀析出的MnS。复合析出物的尺寸都比较大,直径约为 $3\sim 5\mu m$ 以近似球形为主。

根据以AN+MnS为抑制剂的Hi-B钢中^[6],AN析出质点平均直径为 $13\sim 16nm$,析出物所占体积分数为 1.59×10^{-3} ,质点分布密度为 2×10^{14} 个/ cm^3 。基体组织中存在的细小颗粒的大小、数量以及弥散度都与传统的Hi-B钢中的AN析出行为极其相似,因此可以推测这些析出物为AN颗粒。

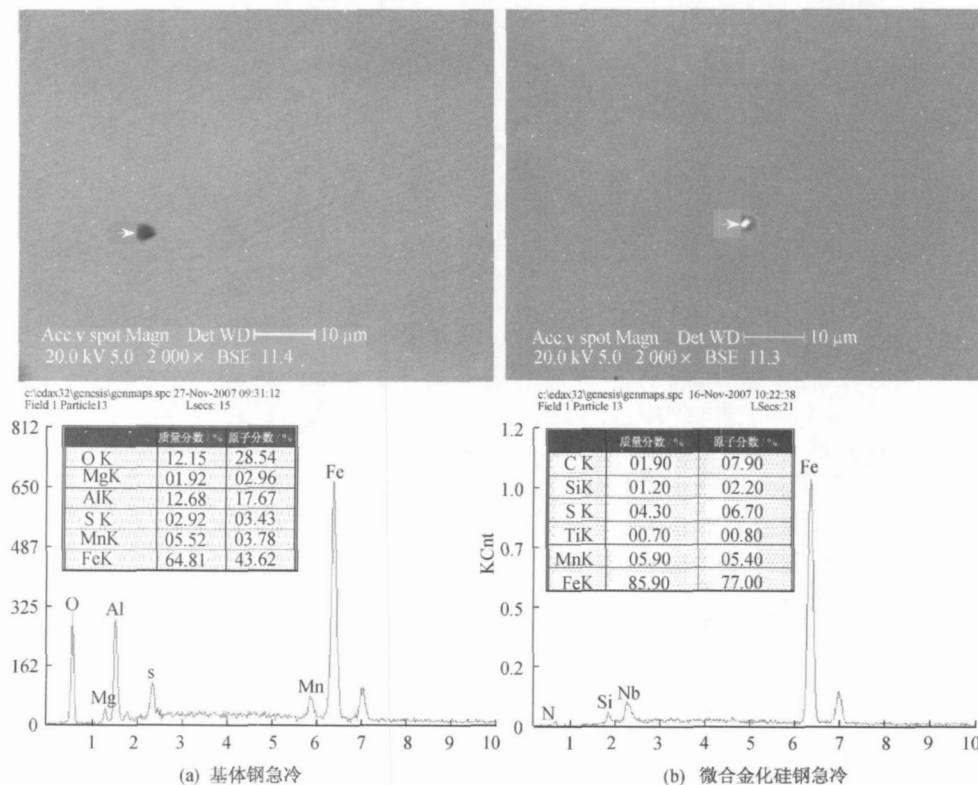


图3 夹杂物能谱分析

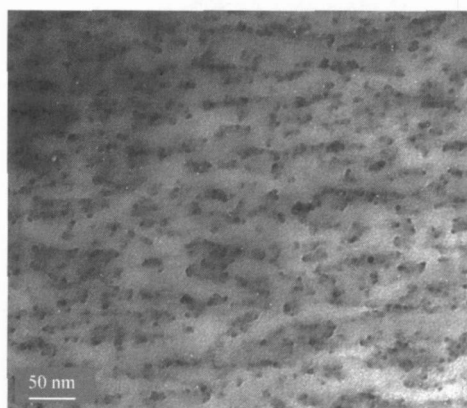


图4 Nb微合金化硅钢急冷样品中析出物的TEM照片

Nb钢急冷样品组织中,在铁素体基体中弥散分布着大量的细小球形析出物,这些细小析出物的直径为几个纳米,可以推测这些析出物为Nb(C,N)和AN的颗粒。其尺寸大小满足抑制晶粒长大的析出物颗粒尺寸要求。

4 结语

(1)热力学模拟计算结果表明,随着钢液温度的降低,首先形成AN,其次是Nb(C,N),然后MnS随后析出。

(2)基体硅钢以及Nb微合金化硅钢急冷样品中弥散分布着细小的析出物,这些细小夹杂物的直径约为几个纳米,可能为Nb(C,N)和AN的析出颗粒。其尺寸大小满足抑制晶粒长大的析出物颗粒尺寸要求。

参考文献

- [1] 李文达. 冷轧取向电工钢片中的抑制相系[J]. 特殊钢, 1998, 19(6): 1-7
- [2] Kubota T, Fujikura M, Ushigami Y. Recent progress and future trend on grain oriented silicon steel[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 2000, 215-216: 69-73
- [3] Takahashi N, Suga Y, Kobayashi H. Recent developments in oriented silicon steel[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 1996, 160: 98-101
- [4] Mishra S, Kumar V. Co-precipitation of copper manganese sulphide in Fe-3% Si steel[J]. Materials Science and Engineering 1995, B32: 177-184
- [5] 朱文英. 板坯低温加热工艺生产取向电工钢片[J]. 上海金属, 2001, 23(4): 33-37
- [6] 何忠治, 李军. 电工钢最近国际发展信息[J]. 电工钢, 2001, 43(1): 2-3
- [7] SH M JH, OH Y J, SUH J Y, et al. Ferrite nucleation potency of non-metallic inclusions in medium carbon steels[J]. Acta mater 2001, 49: 2115-2122
- [8] 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