

热处理工艺对 0.25% Si 含铌无取向硅钢 显微组织和铁损的影响

张文岳, 张 峰*

(宝山钢铁股份有限公司中央研究院, 上海 201900)

摘 要:向无取向硅钢中添加适量的铌元素,可以有效改善成品钢的显微组织和机械性能,但会对电磁性能产生不利影响。截至目前,尚不清楚铌元素在无取向硅钢中的存在形式、作用机理,以及在不同热处理工艺条件下对电磁性能的影响效果。研究结合 0.25% Si 含铌无取向硅钢生产实际,探讨了铌元素在钢中的存在形式、作用机理和影响效果,并借助热处理工艺优化以减轻铌元素对钢电磁性能的影响。结果表明,铌元素在钢中会形成百纳米级、数量众多的有害夹杂物,钉扎晶界和降低晶界扩散率,并推迟钢的再结晶开始温度和结束温度,因而,导致晶粒细化和铁损升高。随着钢中铌含量增加,钢的涡流损耗基本相当,但磁滞损耗不断增加。合理的热处理工艺,可以促进消除应力退火之后的晶粒尺寸长大,并在一定程度上减少磁滞损耗之间的差异。

关键词:无取向硅钢; 铌元素; 热处理; 显微组织; 铁损

中图分类号: TF76, TG156.2

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2021)01-0164-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.01.027

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听
语
音
聊
科
研
与
作
者
互
动

Effects of heat treatment process on microstructure and iron loss of 0.25% Si non-oriented silicon steel sheets containing niobium

Zhang Wenyue, Zhang Feng*

(Central Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China)

Abstract: The microstructure and mechanical properties can be greatly improved by adding proper niobium concentration in liquid steel, but the magnetic properties will sharply decrease as the increase of niobium concentration in non-oriented silicon steel sheets. So far, the formation state and effect mechanism of niobium element as well as its influence on the change of magnetic properties under different hot treatment technology are yet to clarify. In present work, the formation type of the Nb-containing inclusion and its negative effect was discussed based on 0.25% Si non-oriented silicon steel sheets containing niobium. It is expected that the proper heat treatment techniques can be used to decrease the harmful effect of the magnetic properties by niobium element. The results showed that, there is multiple harmful inclusions with hundreds of nanoscale in size, that can pin grain boundary and decrease grain boundary diffusion rate, and retard the started temperature and the finished temperature of recrystallization of the cold rolled steel sheets. Thus, the grain size will be refined and the iron loss will be poor. As the increase of niobium concentration, the eddy loss will be stable and the hysteresis loss will be increase, respectively. The suitable heat treatment techniques can improve the grain size after

收稿日期: 2020-04-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(A16EC17604)。

作者简介: 张文岳(1985—), 男, 广东惠来人, 大学本科, 工程师, 主要从事新型热处理工艺技术开发和试验研究; * 通讯作者: 张峰(1976—), 男, 河南正阳人, 博士, 高级工程师, 主要从事新型热处理工艺开发和技术管理, E-mail: zhangfengboasteel@163.com。

stress release annealing, and decrease the deviation of hysteresis loss for the different niobium concentrations as possible.

Key words: non-oriented silicon steel sheets, niobium element, heat treatment, microstructure, iron loss

0 引言

研究表明,即使向钢中添加少量的铌,也会有效降低钢的脆性,提高钢的耐热性、耐蚀性,改善钢的机械性能、焊接性能^[1]。基于上述诸多优点,近年来,铌在桥梁钢、管线钢、高压容器钢等品种钢上的应用越来越广泛^[2-5]。随着研究的不断深入,铌作为低温高磁感取向硅钢辅助抑制剂,和在高强度无取向硅钢上的应用,已经有所报道^[6-8]。然而,对于常规的无取向硅钢而言,铌往往被认为是有害元素,需要严格控制,希望钢中的含量越低越好^[9]。一般认为,向无取向硅钢中添加铌,会显著降低钢的磁感、大幅劣化钢的铁损^[10],但对其在钢中的存在形式、作用机理和影响效果等报道较少。笔者结合 0.25% Si 含铌无取向硅钢生产实际,探讨了不同的热处理工艺条件下,铌对钢的再结晶显微组织变化和对钢电磁性能的影响。

1 研究方法

试验用钢借助 50 kg 级中频真空感应炉进行熔炼。钢的化学成分设计目标为 0.25% Si 和 0.25% Mn。钢中的有害元素含量 C、S、O、N 等残余。熔炼炉数为 3 炉,对应编号为 1[#]、2[#]、3[#],分别含有 0.000 5%、0.005 1% 和 0.008 3% Nb。熔炼结束之后,将成分合格的钢液浇铸成断面为 30 mm×30 mm 的钢锭,热送热装至目标温度为 1 000 ℃ 的高温箱式电阻炉内保温 60 min;然后,将上述钢锭依次分别进行热轧开坯、锯床切割、热轧轧制、酸洗冷轧、再结晶模拟连续退火和消除应力退火(SRA 退火)。目标冷轧厚度为 0.50 mm。试验结束后,借助透射电镜及其自带的能谱仪,观察夹杂物的形貌、尺寸,确定夹杂物的组成、类型;借助光学显微镜观察试样的显微组织,采用截线法计算试样的晶粒尺寸。采用爱泼斯坦方圈法测量铁损 $P_{15/50}$,每副试样质量约为 0.50 kg,纵、横方向各半。

2 结果分析与讨论

2.1 钢中的含 Nb 夹杂物

借助透射电镜观察了 0.005 1% Nb 含量钢试样,

晶界位置处的夹杂物形貌、尺寸分布情况,利用设备自带的能谱仪,确定了夹杂物的组成、类型,结果如图 1 所示。研究发现,含 Nb 夹杂物大多以 Nb(C, N)形式存在,主要分布在晶界位置,并能和(Mn, Cu)S 夹杂物复合共同析出。少量的含 Nb 夹杂物以 NbN、NbC 形式存在,可在晶内与(Mn, Cu)S 夹杂物复合析出,也可在晶内单独析出。NbN 夹杂物尺寸相对较大, Nb(C, N)夹杂物次之, NbC 夹杂物尺寸最小。这是因为, NbN 夹杂物的全固溶温度要高于 NbC 夹杂物。在冶炼、热轧环节,随着温度的不断降低,高温阶段析出相主要为 NbN,其析出时机早、热力学条件好,因此相对尺寸较大,并且能为(Mn, Cu)S 夹杂物提供析出核心;低温阶段析出相主要为 Nb(C, N),数量众多,尺寸较小。温度继续降低,则夹杂物中氮元素比例持续降低、碳元素比例不断增加,此时,析出时机较晚的 NbC 尺寸细小、数量亦少^[11]。统计表明,上述三种含 Nb 夹杂物平均尺寸均在百纳米级别。随着钢中 Nb 含量增加,含铌夹杂物尺寸不断减小,且数量不断增加,如图 2 所示。可以看出,不同 Nb 含量对应的夹杂物尺寸、数量存在显著差异。随着钢中 Nb 含量增加,夹杂物平均尺寸从 0.000 5% Nb 的 152 nm 快速减少到了 0.005 1% Nb 的 92 nm 和 0.008 3% Nb 的 64 nm;与此同时,对应的夹杂物数量从 1.7×10^7 个/mm³,逐渐增加到了 6.3×10^7 个/mm³ 和 8.4×10^7 个/mm³。这说明向钢中加入少量 Nb 之后,不仅自身会生成尺寸细小的夹杂物,还会降低传统夹杂物的固溶温度并影响其形核、析出,进而对其尺寸产生细化作用^[12]。

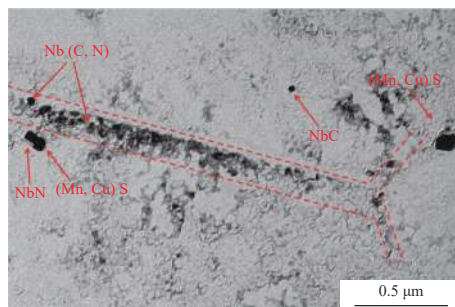


图 1 成品试样中的含 Nb 夹杂物形貌
Fig. 1 Morphology of Nb-containing inclusions in the finished steel sample

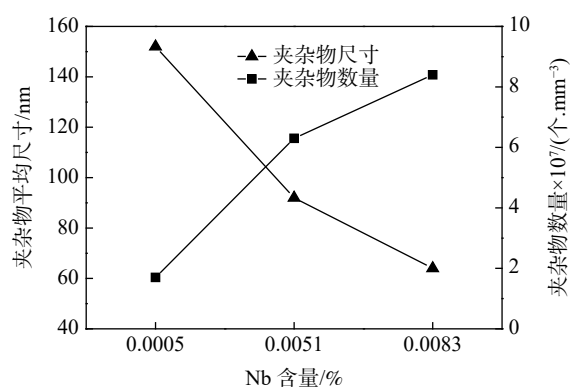


图2 成品试样中夹杂物的数量和尺寸

Fig. 2 Number and size distribution of the inclusion in the finished steel samples

2.2 冷轧试样的再结晶显微组织

本试验条件下,不同铌含量冷轧试样的再结晶显微组织如图3所示。观察到,690℃×5 min连续退火时,0.000 5% Nb冷轧试样的形核、再结晶效果良好,0.005 1% Nb冷轧试样才开始形核、再结晶,0.008 3% Nb冷轧试样则完全没有形核、再结晶;在830℃×5 min连续退火时,0.000 5% Nb冷轧试样完成了所有形核、再结晶,0.005 1% Nb冷轧试样基本完成了所有形核、再结晶,0.008 3% Nb冷轧试样则未能完成全部形核、再结晶,视场中的显微组织仍保留有较多的未完全再结晶纤维组织。

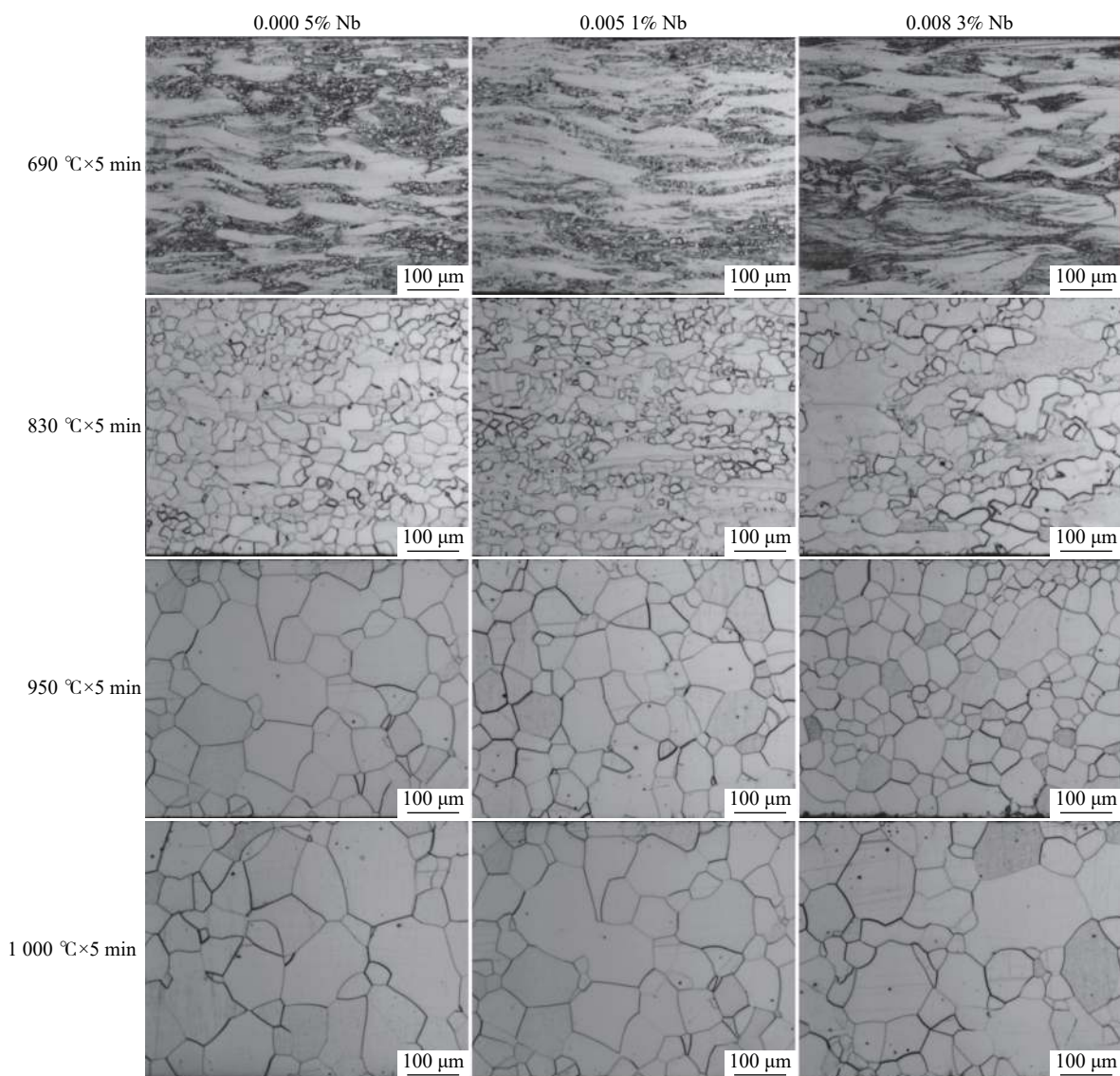


图3 不同铌含量冷轧试样的再结晶显微组织

Fig. 3 Crystallization microstructure of the cold rolled samples after continuous annealing under different Nb concentrations

图 3 充分说明, 随着钢中铌含量增加, 冷轧试样的形核、再结晶能够得到有效抑制。铌元素会推迟冷轧试样形核、再结晶开始温度, 也会推迟形核、再结晶结束温度。但是, 随着连续退火温度的继续升高, 三种铌含量冷轧试样都能完成所有再结晶, 只是在不同温度下, 等轴晶粒尺寸、分布等存在较大差异。其中, 在 $950\text{ }^{\circ}\text{C}\times 5\text{ min}$ 连续退火时, 0.000 5% Nb 冷轧试样的晶粒生长速度最快, 晶粒粗大、尺寸均匀, 0.005 1% Nb 冷轧试样的晶粒尺寸略有减小, 差异变大, 0.008 3% Nb 冷轧试样的晶粒生长速度最慢, 晶粒细小, 且局部区域有细晶偏聚现象。这是因为, 随着钢中铌含量增加, 晶界位置的含 Nb 夹杂物数量增加、尺寸变小, 并产生了蜿蜒曲折的晶界, 这样, 晶界扩散所需克服钉扎力的活化能急剧增加, 直接导致了晶界扩散率的显著降低, 和阻碍了晶粒尺寸的生长速度, 最终导致了细晶问题出现^[13]。此外, 在冷轧试样局部区域, 高储能的亚晶粒中, $\{111\}$ 、 $\{112\}$ 晶粒取向具有先天优势, 会择优形核、长大, 使得晶粒尺寸分布均匀性大大降低^[14]。在 $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}\times 5\text{ min}$ 连续退火时, 0.000 5% Nb 和 0.005 1% Nb 冷轧试样晶界受力均匀, 晶界扩散速度慢, 因此, 晶粒尺寸变化不大, 0.008 3% Nb 冷轧试样晶粒长大的驱动力进一步提高, 前期未能充分长大的偏聚细晶, 则能够克服钉扎力的不利影响, 实现等速扩散和匀速长大。此时, 三种铌含量条件下的晶粒尺寸均匀程度仍存在一定差异, 但平均晶粒尺寸大致相当, 约为 $75\text{ }\mu\text{m}$ 。

进一步研究了不同 SRA 退火工艺条件下, 经过模拟连续退火之后钢试样显微组织的变化情况。发现在 $750\text{ }^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}$ SRA 退火时, 0.000 5% Nb 钢试样的晶粒生长速度最快, 其次是 0.005 1% Nb 钢试样和 0.008 3% Nb 钢试样。继续提高均热温度或者延长均热时间, 三种铌含量钢试样的晶粒尺寸会继续长大, 但长大速度仍是随着铌含量的增加而不断降低, 如图 4 所示。

由图 4 可以看出, 对于 0.000 5% Nb 钢试样, 在 $825\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}$ SRA 退火工艺时, 平均晶粒尺寸为 $79.6\text{ }\mu\text{m}$; 对于 0.005 1% Nb 钢试样, 在 $825\text{ }^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}$ SRA 退火工艺时, 平均晶粒尺寸为 $80.1\text{ }\mu\text{m}$; 对于 0.008 3% Nb 钢试样, 在 $850\text{ }^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}$ SRA 退火工艺时, 平均晶粒尺寸为 $79.7\text{ }\mu\text{m}$ 。这直接说明了, 即使三者铌含量不同, 但在各自适宜的 SRA 退火工艺时, 也可以达到相同的晶粒尺寸控制效果。此外, 还可

以看出, 对于 0.000 5% Nb 钢试样, 其晶粒尺寸生长速度最快, 低温、短时即实现了晶粒尺寸的快速长大, 而随着钢中铌含量增加, 晶粒长大速度不断变缓, 适当升高均热温度或者延长均热时间能够促进晶粒尺寸长大, 并且均热温度升高对晶粒尺寸长大的改善效果要明显高于均热时间延长的改善效果。

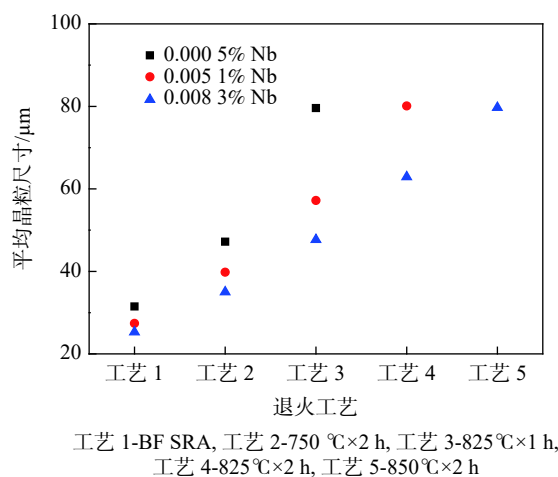


图 4 SRA 退火工艺对成品钢试样晶粒尺寸的影响

Fig. 4 Effects of stress release annealing on grain size in the finished steel samples under different Nb concentrations

2.3 成品钢试样的铁损变化

经过模拟连续退火和经过 SRA 退火之后, 不同工艺条件下, 钢试样铁损的变化情况列于表 1。

表 1 SRA 退火工艺对成品钢试样铁损的影响

Table 1 Effects of stress release annealing on iron loss in the finished steel samples under different Nb concentrations

条件	铁损 $P_{15/50}/(\text{W}\cdot\text{kg}^{-1})$		
	0.000 5% Nb	0.005 1% Nb	0.008 3% Nb
工艺1	4.28	4.44	4.58
工艺2	3.27	3.61	3.99
工艺3	3.13	3.32	3.53
工艺4	3.10	3.15	3.31

注: 工艺1-BF SRA; 工艺2- $750\text{ }^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}$; 工艺3- $825\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}$; 工艺4- $825\text{ }^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}$ 。

由表 1 可以看出, 经过模拟连续退火之后, 随着钢中铌含量增加, 钢试样的铁损单调增加。与 0.000 5% Nb 钢相比, 0.005 1% Nb 钢和 0.008 3% Nb 钢的铁损分别增加了 0.16 W/kg 和 0.30 W/kg 。而在经过 SRA 退火之后, 三者之间的铁损差异十分明显。对于 0.000 5% Nb 钢试样, 经过 $750\text{ }^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}$ SRA 退火之后, 铁损大幅降低至 3.27 W/kg , 下降幅度为 23.6% , 而在经过 $825\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}$ 和 $825\text{ }^{\circ}\text{C}\times 2\text{ h}$ SRA 退火之后, 两者铁损则分别降低至 3.13 W/kg

和 3.10 W/kg, 下降幅度分别为 26.9% 和 27.6%。这说明, 对于 0.000 5% Nb 钢试样, 经过 750 °C×2 h SRA 退火之后, 铁损就能得以明显改善, 进一步提高 SRA 退火温度或者延长均热时间, 对铁损的降低意义不大。与此相比, 对于 0.005 1% Nb 钢试样, 经过 750 °C×2 h SRA 退火之后, 铁损降低为 3.61 W/kg, 下降幅度为 18.7%, 明显小于 0.000 5% Nb 钢的 23.6%, 而在经过 825 °C×1 h 和 825 °C×2 h SRA 退火之后, 两者铁损则分别降低至了 3.32 W/kg 和 3.15 W/kg, 下降幅度分别为 25.2% 和 29.1%。可以看出, 两者工艺对 0.005 1% Nb 钢的铁损改善效果都很好, 主要是因为该期间驱动力的增加, 在一定程度上克服了含铌夹杂物在晶界位置的钉扎效果, 晶界能够快速迁移, 晶粒尺寸能够快速长大, 因此, 铁损仍能得以较大改善。进一步, 对于 0.008 3% Nb 钢试样, 经过 750 °C×2 h SRA 退火之后, 铁损降低为 3.99 W/kg, 下降幅度为 12.9%, 明显小于 0.000 5% Nb 钢的 23.6% 和 0.005 3% Nb 钢的 18.7%, 说明在此铌含量条件下, 750 °C×2 h SRA 退火已无法提供有效的驱动力来促进晶粒尺寸快速生长, 而在经过 825 °C×1 h 和 825 °C×2 h SRA 退火之后, 两者铁损则分别降低至 3.53 W/kg 和 3.31 W/kg, 下降幅度分别为 22.9% 和 27.7%。这说明, 对于

0.008 3% Nb 含量钢试样, 经过 825 °C×1 h SRA 退火, 可以在一定程度上有效促进晶粒尺寸长大, 但继续延长均热时间, 则对晶粒尺寸长大效果不明显。这说明, 对于 0.008 3% Nb 含量钢试样, 为了获得更低的铁损, 需要进一步提高均热温度以提供更强的晶粒尺寸生长驱动力。

在此基础之上, 进一步测试了三种铌含量条件下, 铁损 $P_{15/50}$ 的涡流损耗 P_e 和磁滞损耗 P_h , 作于图 5。可以看出, 在上述几种工艺条件下, 三者的涡流损耗 P_e 大致相当, 而磁滞损耗 P_h 差异明显。其中, 磁滞损耗 P_h 的增加, 直接对铁损 $P_{15/50}$ 的劣化起到主导作用。而与畴壁厚度相近的百纳米级夹杂物^[15], 则是造成磁滞损耗 P_h 增加的根本原因。另一方面, 如前所述, 钢中铌含量增加, 会降低夹杂物的平均尺寸、增加夹杂物的数量, 这样就能有效钉扎晶界扩散和晶粒长大。对于 0.000 5% Nb 钢而言, 在 750 °C×2 h SRA 退火时, 钢试样的铁损下降速度明显要快于 0.005 1% Nb 钢和 0.008 3% Nb 钢, 这主要是其晶界的扩散率大, 晶粒尺寸长大速度快, 进而, 造成磁滞损耗 P_h 大幅降低。但是, 随着 SRA 退火均热温度的升高, 几者之间的晶界扩散率都有所降低, 但其晶粒尺寸差异越来越小, 由此导致了三者之间的磁滞损耗 P_h 差值越来越小。

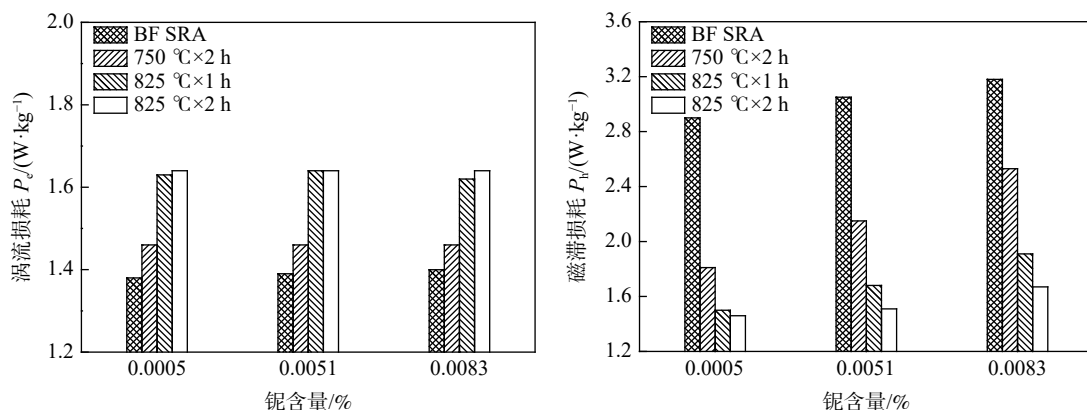


图 5 退火温度对铁损分离的影响

Fig. 5 Effect of annealing temperature on iron loss deviations of the finished steel samples

3 结论

结合 0.25% Si 含铌无取向硅钢, 探讨了铌元素在钢中的存在形式、作用机理和影响效果, 以及热处理工艺对连续退火之后、消除应力退火之后钢电磁性能的影响。结论如下:

1) Nb 元素在钢中会形成百纳米级的含铌夹杂物, 并会导致其它类型的夹杂物尺寸细化。其以

Nb(C、N)夹杂物为主, 可以复合析出或者单独析出, 绝大部分聚集在晶界位置附近, 会钉扎晶界并显著降低晶界迁移率。随着钢中 Nb 含量的增加, 含 Nb 夹杂物的尺寸不断减小, 数量不断增加。同时, 含 Nb 夹杂物还可以作为形核核心, 促进(Mn、Cu)S 夹杂物的析出和细化。

2) Nb 元素会推迟无取向硅钢的再结晶开始温度和结束温度, 并直接导致成品带钢的晶粒细化和

磁滞损耗 P_h 增加,而钢的涡流损耗 P_e 则基本保持不变。实际生产中,在钢中 Nb 含量偏高时,可以通过采用适当提高消除应力退火温度,或者延长消除

应力退火时间的方式,以获得与低 Nb 含量相当的粗大晶粒尺寸,在一定程度上可以降低磁滞损耗,改善钢的电磁性能。

参考文献

- [1] Zhongxin Microalloyed Technology Center Intercompilation. Niobium microalloyed high performance structure steel[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2011.
(中信微合金化技术中心编译. 铌微合金化高性能结构钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.)
- [2] Tian Fei, Wang Zhirong, Li Zhaodong. Strengthening mechanism of batch annealed Nb microalloyed steel for automobile[J]. Iron & Steel, 2015, 50(9): 76–80.
(田飞, 王志荣, 李昭东. 罩式退火铌微合金化汽车钢的强化机理[J]. 钢铁, 2015, 50(9): 76–80.)
- [3] Qiao Guiying, Hna Yang, Han Xiulin, *et al.* Microstructure and mechanical properties of welding heat affected zone of a high-Nb high strength pipeline steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2014, 26(10): 40–45.
(乔桂英, 韩杨, 韩秀林, 等. 高铌高强管线钢焊接热影响区的组织与性能[J]. 钢铁研究学报, 2014, 26(10): 40–45.)
- [4] Liu Dongsheng, Li Qingliang. Microstructure and mechanical properties of 550 MPa yield-strength-class hot rolled plate steel[J]. Iron & Steel, 2011, 46(4): 53–58.
(刘东升, 李庆亮. 热轧屈服强度550 MPa高强度钢板组织性能[J]. 钢铁, 2011, 46(4): 53–58.)
- [5] Li Qiuhe, Wang Gang, Ying Chuantao, *et al.* Effect of finishing rolling temperature on the microstructure and mechanical properties of low Si-Mn-Nb hot rolled dual-phase steel strip[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2018, 39(3): 139–143.
(李秋鹤, 王刚, 应传涛, 等. 终轧温度对含铌低Si-Mn系热轧双相钢组织与性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2018, 39(3): 139–143.)
- [6] Zhang Ying, Fu Yunli, Wang Ruwu, *et al.* Inhibitors in high magnetic induction grain-oriented silicon steel[J]. China Metallurgy, 2008, 18(11): 4–6.
(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): 4–6.)
- [7] Yan Bin, Zhu Chengyi, Zhang Yunxiang. Effect of Nb on precipitation behavior of inhibitors in hot rolled plate of oriented silicon steel[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(1): 14–16, 21.
(严彬, 朱诚意, 张云祥. Nb对取向硅钢热轧板中抑制剂析出行为的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(1): 14–16, 21.)
- [8] Huang Jun, Luo Haiwen. Influence of annealing process on microstructures, mechanical and magnetic properties of Nb-containing high-strength non-oriented silicon steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(3): 377–384.
(黄俊, 罗海文. 退火工艺对含Nb高强无取向硅钢组织及性能的影响[J]. 金属学报, 2018, 54(3): 377–384.)
- [9] Xie Li, Lin Yuan, Zhang Wenkang. Effect of Nb on mechanical properties and magnetic properties of 0.5% silicon steel[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(24): 62–64, 67.
(谢力, 林媛, 张文康. 铌对0.5% Si钢力学性能和磁性能的影响[J]. 热加工工艺, 2016, 45(24): 62–64, 67.)
- [10] He Zhongzhi, Zhao Yu, Luo Haiwen. Electrical steel[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.
(何忠治, 赵宇, 罗海文. 电工钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.)
- [11] Zhang Hongmei, Chen Yue, Sun Chengqian, *et al.* Thermodynamics and kinetics of precipitation for Nb bearing high strength IF steel with fine grain structure[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(4): 226–231.
(张红梅, 陈越, 孙成钱, 等. 含Nb细晶高强IF钢的析出热力学和动力学[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(4): 226–231.)
- [12] Liu Jiamei, Jin Donghao, Jia Yunke, *et al.* Effect of niobium on solid solution temperature of precipitates in oriented silicon steel[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2019, 40(4): 138–143.
(刘嘉美, 金东浩, 贾云柯, 等. 铌对取向硅钢中析出物固溶温度的影响[J]. 钢铁钒钛, 2019, 40(4): 138–143.)
- [13] Hiroshi Masai, Yukiyo Fujii, Hiroko Fujii, *et al.* Method of high magnetic flux oriented electrical steel sheet, Japan Patent: 08-199239[P]. 1996-08-06.
(增井浩昭, 藤井宣意, 藤井浩康, 等. 高磁束密度方向性电磁钢板的制造方法, 日本专利: 特开平 08-199239[P]. 1996-08-06.)
- [14] Zhao Hu, Kang Yonglin, Liu Guangming, *et al.* Texture in extra-low carbon bake hardened steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2007, 19(11): 47–50, 59.
(赵虎, 康永林, 刘光明, 等. 超低碳烘烤硬化钢板的组织[J]. 钢铁研究学报, 2007, 19(11): 47–50, 59.)
- [15] Fan Yongfei, Yu Hao, Sun Jing, *et al.* Study on precipitation and transition mechanisms from the magnetic properties of silicon steel during annealing[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2014, 21(4): 379–387.