

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.02.017

低温取向硅钢中第二相粒子的析出行为及热轧组织

朱诚意^{1,2}, 陈先红^{1,2}, 李光强^{1,2}, 付勇^{1,2}, 姜玉龙^{1,2}

(1. 省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室, 武汉 430081;
2. 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)

摘要:研究了不同工艺生产的低温取向硅钢热轧板中第二相粒子的析出行为及其组织。结果表明, 热轧板中的析出物除了弥散分布的纳米级球形或椭球形的 MnS、Cu₂S 外, 还观察到与其形貌相似的 SiO₂、AlN 和 Si₃N₄ 及其复合在一起的复杂化合物。试样中微米级析出物主要为 SiO₂、MnS、Cu₂S 和 AlN 的复合物, 纳米级析出物主要为 AlN、Si₃N₄、MnS、Cu₂S 的复合物。热轧板中 0.01~0.2 μm 的析出物数量最多, 约占总数的 99%。与常规热轧板相比, CSP 试样中夹杂物面积密度较小, 在大于 1 μm 范围内其平均尺寸较大, 会使得后期退火过程中二次再结晶不完整, 影响产品磁性能。热轧板在垂直于轧向横截面上组织分布具有很大的差别, 其中 CSP 试样组织相对比较均匀, 不利于后续处理工艺中发展完善的二次再结晶织构从而获得良好的磁性能。

关键词:薄板坯连铸连轧; 低温取向硅钢; 第二相粒子; 热轧组织

中图分类号: TF703

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2015)02-0111-7

The precipitation behaviors of thesecond phase particles and hot rolled texture in the low temperature grain-oriented silicon steel

ZHU Chengyi^{1,2}, CHEN Xianhong^{1,2}, LI Guangqiang^{1,2}, FU Yong^{1,2}, JIANG Yulong^{1,2}

(1. The State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Wuhan 430081, P.R.China;
2. Key Laboratory of Ferrous Metallurgy and Resources Utilization, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, P.R.China)

Abstract: The precipitation behaviors of the second phase particles and their textures in the low temperature grain-oriented silicon steel are studied under different processes. The results show that not only the dispersed nanoscale spherical or ellipsoidal MnS and Cu₂S precipitations are observed in the hot rolled slabs, but also SiO₂, AlN and Si₃N₄ which are similar to MnS and Cu₂S in the morphology and complex compounds that are composed by them together are observed. In the sample, precipitations at the micron scale are mainly composed by SiO₂, MnS, Cu₂S and AlN, and precipitations at the nanoscale are mainly composed by AlN, Si₃N₄, MnS and Cu₂S. The number of precipitates whose size is from 0.01 μm to 0.2 μm is the largest in the hot rolled slabs, which accounts for about 90%. Compared with the conventional hot rolling slabs, the area density of the inclusions in the CSP samples is smaller, but the average size in the range of greater than 1 μm of that is larger. It will make the secondary recrystallization incomplete during the annealing process, and also it can influence the magnetic property of the products. The distribution of

收稿日期: 2014-11-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51104109); 中国博士后科学基金第 54 批面上资助项目(2013M540609)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China(51104109) and China Postdoctoral Science Foundation(2013M540609).

作者简介: 朱诚意(1971-), 女, 博士, 教授, 主要从事纯净钢冶炼、钢中夹杂物控制研究, (E-mail)zhchyhsy@wust.edu.cn。

texture which is perpendicular to the rolling direction on cross section in the hot rolled slabs is very different. The texture of the CSP samples is relatively uniform, which is harmful to develop complete secondary recrystallization texture during the subsequent treatment process to obtain good magnetic properties.

Key words: compact strip production; low temperature grain-oriented silicon steel; second phase particles; hot rolled texture

取向硅钢是一种具有高斯织构的 3%Si-Fe 软磁材料,也称冷轧变压器钢,主要应用于制造各种电动机、发电机和变压器铁芯,在电力、机械、电子工业中发挥着不可替代的重要作用^[1]。取向硅钢具有沿轧制方向上的高磁导率和低铁损的特性,这与其{110}<001>晶粒取向度或{110}<001>位向偏移角密切相关^[2]。虽然析出物数量及分布状态对取向硅钢 B_8 和 $P_{17/50}$ 直接影响不大,但对形成{110}<001>织构的二次再结晶的发展影响却很大。在取向硅钢中,第二相粒子的作用是在脱碳退火的过程中通过钉扎作用抑制初次再结晶晶粒长大;在高温退火时保证基体再结晶晶粒能有效地解钉,促进{110}<001>位向的二次晶核吞并其周围以{111}<112>位向为主的小的初次晶粒而发生异常长大,从而获得优良的磁性。制造取向硅钢常用的抑制剂为 MnS 和 AlN^[3-5],在生产过程中,由于不同抑制剂的析出行为不同,需要采用不同的处理工艺获得足够数量、弥散分布的纳米级抑制剂以提高最终产品的性能。研究表明^[6-8],MnS 在板坯加热过程中完全固溶,经热轧后在冷却的过程中以细小弥散状态析出,MnS 发生 Ostwald 效应的临界温度为 850~870 °C,需要控制热处理温度在其固溶温度之上,一般为 1 350~1 370 °C;而 AlN 在钢水凝固过程中开始析出,由于析出物尺寸偏大达不到抑制剂尺寸要求,故需采用板坯再加热工艺使较大尺寸的 AlN 粒子能重新固溶于钢中,然后,在常化过程中弥散析出。另外,还有部分低温析出物(Al,Si)N 会在热轧卷取时析出。

近年来,为降低板坯加热温度,提高抑制剂强度,改善取向电工钢的磁性,人们主要围绕抑制剂的高温固溶和引入方式开展了大量的研究。薄板坯连铸连轧生产低温取向硅钢虽然拥有能耗低、成材率高等特点,但其热装温度不能保证在抑制剂的析出温度之上,会导致初次再结晶时抑制剂抑制能力不足,一般需要通过后添加抑制剂或者渗氮等方法来改善,所以,该工艺并未得到大规模工业化使用。文中针对这一现象,讨论了模拟常规热轧和薄板坯连铸连轧(CSP)生产的低温取向硅钢中析出物的形貌、组成、尺寸和数量分布情况,并结合钢热轧组织的均匀性和平均晶粒尺寸进行比较论证,为实际生产提供参考。

1 实验研究

1.1 不同工艺低温取向硅钢的熔炼及热轧

试验用钢采用 100 kg 真空感应炉熔炼,冶炼过程温度控制约为 1 640 °C。冶炼好的钢样一炉采用传统板坯连铸工艺,然后进行后续加热及常规热轧处理;另一炉则直接采用 CSP 工艺。常规热轧工艺中,铸坯再加热采用 100% 氮气氛,钢锭入炉温度为 508 °C,出炉温度为 1 085 °C,轧制过程分为 3 次,终轧温度为 938 °C、卷取温度为 557 °C,热轧板厚 2.6 mm。CSP 工艺与传统板坯连铸工艺相比,其连铸过程冷却强度大,铸坯凝固速度快,铸坯厚度远小于传统连铸坯厚度,且薄板坯经均热炉加热至 1 150 °C 后,无需粗轧,直接轧制成与常规热轧工艺相同厚度的热轧带卷。2 种试样各元素含量基本相同,成分如表 1 所示,其中 1# 为常规热轧工艺生产的低温取向硅钢,2# 为 CSP 工艺生产的低温取向硅钢。

表 1 不同工艺钢样元素含量(质量分数/%)

Table 1 Content of elements in steel samples under different processes(mass fraction/%)								
成分	C	Si	Mn	S	Al _s	N	Sn	Cu
1#	0.053	3.230	0.099	0.007	0.027	0.008	0.045	0.031
2#	0.072	3.220	0.096	0.011	0.027	0.008	0.048	0.031

1.2 观察低温取向硅钢热轧板中夹杂物及组织

实验采用透射电镜(TEM)观察碳膜萃取复型法提取的夹杂物,并结合能谱仪(EDS)分析其组成。萃取复型法是在已制备好的金相试样表面直接蒸发沉积碳膜制成,基本操作过程为:将镶嵌好的试样磨制抛光,

再经 6% 的硝酸酒精溶液进行深浸蚀,直至晶界清晰可见为止。然后在高真空的环境中对金相试样表面进行喷碳处理,随后脱取碳膜,将带有夹杂物和析出物的碳膜用支持铜网捞起来,用 TEM/EDS 来观察并界定萃取出的夹杂物及析出物。

采用 Sirion200 型场发射扫描电镜(FE-SEM)观察金相试样上的夹杂物,每个试样在 5 000 倍条件下连续观察 20 个视场并拍摄图片,然后经图像分析软件(Image-Pro Plus)统计出夹杂物的平均尺寸和单位面积个数(即面积密度)。

采用金相显微镜观察热轧板垂直于轧制方向面上的组织分布情况。将试样镶嵌并进行研磨和抛光处理后,采用 10% 硝酸酒精腐蚀时间为 6 s,使钢样组织凸显出来以便于后续的观察和统计。在观察过程中,将观察面分为中心区域和边缘区域 2 个部分,观察中心区域晶粒分布的均匀性,并用截线法统计边缘的晶粒数和平均晶粒尺寸。

2 实验结果与讨论

影响取向硅钢性能的主要因素为:化学成分、铸坯再加热温度和二次再结晶温度。在取向硅钢中,化学元素 Mn、Al、Cu 等与溶解在钢中的 S、N 等元素具有一定的亲和力,形成的化合物以析出物的形式残留在钢中,这些析出物在退火过程中能抑制初次晶粒长大。有研究表明,添加少量的 Cu 能提高 MnS 显著析出的温度约 50 °C 以上。 Cu_2S 在钢中细小弥散分布,其析出形式受 Mn 含量的影响,能降低二次再结晶温度,控制好冷轧和后续退火条件可获得高比例的高斯织构组分,有利于提高取向硅钢磁性能。Sn 作为一种晶界偏析元素,能在第二相质点 MnS 和 AlN 与基体的界面处偏聚,阻碍它们的 Ostwald 长大,使其更细小、弥散,增强对晶粒正常长大的抑制力。保证取向硅钢质量的关键是针对不同的化学成分采用合适的生产工艺,从而达到对钢中夹杂物和抑制剂的类型、含量(或数量)、尺寸、分布、形貌及其析出过程的控制。

2.1 生产工艺对低温取向硅钢热轧板中第二相粒子组成和形貌的影响

采用 TEM 观察碳膜上的夹杂物形貌,并结合 EDS 分析各试样中夹杂物或析出物的成分及含量的结果如图 1(a)、(b)、(c)、(d) 所示。不同工艺生产的低温取向硅钢热轧板中夹杂物基本为纳米级,只有个别大于 1 μm ,且都均匀分布在碳膜上,其形貌大部分为规则的球形或者椭球形,只有少量不规则的块状夹杂。结合 EDS 分析结果可以得出,析出物组成主要为氧化物(SiO_2)、硫化物(MnS、 Cu_2S)、氮化物(AlN、 Si_3N_4)及其相互复合的复杂化合物;其中微米级析出物主要是 SiO_2 、MnS、 Cu_2S 和 AlN 的复合物;而在纳米级析出物中,氧化物所占比例很少,单个硫化物或者氮化物也比较少,其主要为 MnS、 Cu_2S 、AlN 和 Si_3N_4 的复合物,复合形式如图 1(e) 所示,为硫化物外包氮化物。

试样中氧化物夹杂的来源主要是加铝脱氧及硅合金化过程中形成的化合物,其中大部分大尺寸的夹杂会通过钢渣吸收而去除,少部分小尺寸的 SiO_2 会残留在钢液中,在后续浇铸过程中进一步析出或长大。研究表明^[9],这些氧化物易成为硫化物、氮化物的形核核心,其尺寸越小所形成的复合夹杂物形状就越规则,尺寸也越小。

钢中的 MnS 一般在钢液凝固过程中析出。随着温度的降低,钢液中 S 的溶解度逐渐减小,由于凝固前沿局部溶质元素的偏析及受形核核心的诱导,钢中的 Mn 容易与 S 结合形成 MnS 析出,或以氧化物为核心,形成外包 MnS 的 SiO_2 的微米级复合夹杂物。在取向硅钢生产过程中,一般要求钢中的 MnS 在铸坯再加热时完全固溶,然后在热轧过程中再以细小弥散状态析出,以获得更好的抑制能力。 Cu_2S 主要在热轧过程中析出,且析出温度较 MnS 低,其单独析出时尺寸较小,一般在几十纳米左右,能在钢基体中细小弥散分布,提高钢的磁性能。

取向硅钢中的 AlN 在钢水凝固过程中开始析出,析出物尺寸偏大,一般有几百纳米,尺寸较小的几十纳米的多在常化过程中析出。另外,部分低温析出物(Al、Si)N 也会在热轧卷取时析出。AlN 在钢中 Al 含量较高时还会与氧化物或者 MnS 复合析出。

2.2 生产工艺对低温取向硅钢热轧板中第二相粒子的数量及尺寸分布的影响

采用 FE-SEM 结合 Image-Pro Plus 分别统计了钢中 0.01~0.2 μm ; 0.2~0.5 μm ; 0.5~1 μm ; 1~5 μm 析出物的数量及尺寸分布,结果如图 2 和图 3 所示。

图 2 为 2 种工艺条件下热轧板中析出物的单位面积密度分布。由图可以看出,试样在 0.01~0.2 μm 范

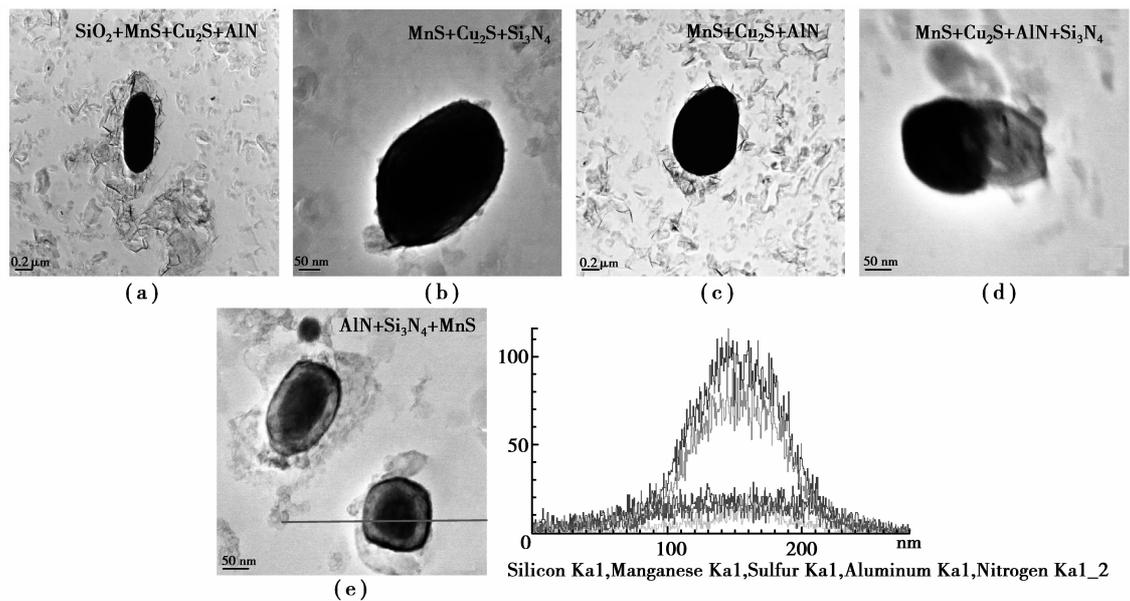


图 1 不同工艺生产的低温取向硅钢热轧板中析出物的形貌与组成

Fig.1 Morphologies and compositions of precipitations in low temperature grain-oriented silicon steel under different processes

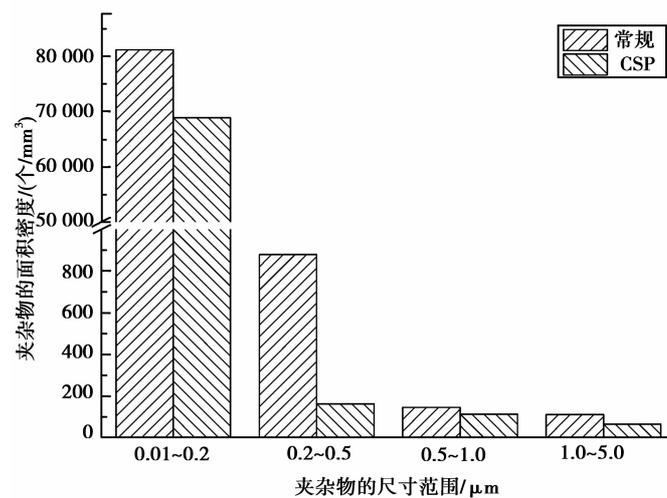


图 2 低温取向硅钢热轧板中析出物的数量

Fig. 2 Number of precipitations in low temperature grain-oriented silicon steel

围内析出物个数最多,约占总个数的 99%。在取向硅钢中,大颗粒夹杂物(尺寸大于 $50 \mu\text{m}$)和显微夹杂物(尺寸为 $1\sim 50 \mu\text{m}$)主要影响钢的表面质量和使用性能,弥散分布在钢中的、尺寸小于 $1 \mu\text{m}$ 的颗粒(特别是尺寸为几十到几百个纳米的抑制剂)即微细夹杂物对钢的磁性能影响较大^[10]。根据 Zenner 公式^[11],晶界抑制力与夹杂物体积分数成正比,和平均半径均成反比。当抑制剂的尺寸愈小或抑制剂所占体积分数愈大,其钉扎晶界能力或晶粒长大抑制力就越强,对磁性能的影响也越大。因此,希望钢中的夹杂物能够细化,避免生成粗大夹杂。实验结果表明,2 种工艺生产的热轧取向硅钢中,小尺寸范围内夹杂物偏多,大尺寸范围内较少,有利于改善取向硅钢磁性能。

图 3 为 2 种工艺条件下热轧板中夹杂物不同范围内的平均尺寸。可以看出,在各个统计范围内,与常规热轧板相比,CSP 工艺生产的热轧板中夹杂物面积密度均较小,其中,在小于 $0.5 \mu\text{m}$ 范围内相差较大,而在大于 $0.5 \mu\text{m}$ 范围内两者相差不大;在小于 $1 \mu\text{m}$ 范围内两者平均尺寸相差不大,CSP 试样大于 $1 \mu\text{m}$ 时夹杂物平均尺寸较大。有研究表明,CSP 工艺的优点为铸坯凝固和冷却速度快,元素偏析程度低,有助 MnS 和 AlN 的尺寸缩小及均匀分布,固溶温度降低,热轧析出的 MnS 和常化析出的 AlN 会更细小,抑制力更强^[12]。

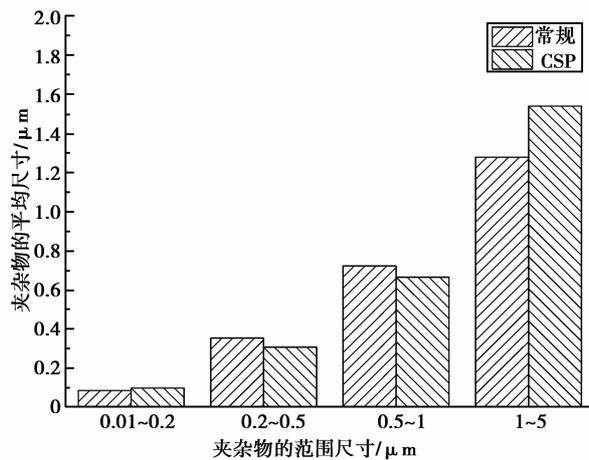


图 3 低温取向硅钢热轧板中析出物的尺寸

Fig. 3 Size of precipitations in low temperature grain-oriented silicon steel

而实验结果与之相反,主要是因为,要生产高温无缺陷铸坯,就必须保证铸坯温度的均匀和抑制剂的固溶状态,使铸坯直接热装温度在 $1\ 150\sim 1\ 200\ ^\circ\text{C}$ (即使铸坯在开轧以前始终保持在抑制剂析出温度以上,保持 S 化物和 C、N 化合物的固溶状态),而实际生产中,CSP 工艺采用的铸坯入炉温度为 $850\sim 1\ 050\ ^\circ\text{C}$,比普通热轧工艺低,铸坯在加热过程中不能保证第二相粒子如 MnS、AlN 等完全固溶(MnS 一般为 $1\ 320\ ^\circ\text{C}$,AlN 一般为 $1\ 280\ ^\circ\text{C}$),因此,在热轧和常化处理过程中,只有部分抑制剂会细小弥散析出,故 CSP 工艺热轧板中夹杂物面积密度均较普通热轧板小,特别是在小尺寸范围内两者相差较大。铸坯入炉温度低,第二相粒子部分析出,在热轧冷却过程中原先析出的就会发生粗化,或者以残留在钢中的尺寸极小的氧化物夹杂为核心复合析出,故 CSP 工艺热轧板中大于 $1\ \mu\text{m}$ 夹杂物平均尺寸较普通热轧大^[13-15]。

CSP 工艺最主要特点就是铸坯没有冷却后再高温加热的工序。要求采取相应的技术措施,以保证铸坯长、宽、厚 3 个方向上的均匀高温及非金属第二相与偏聚元素的固溶组织状态,而目前生产上还达不到。略低的铸坯均热温度直接导致热轧板中抑制剂能力相对不足,使退火过程中二次再结晶不完整,影响最终产品的磁性能。

2.3 生产工艺对低温取向硅钢热轧组织和晶粒尺寸的影响

采用 10% 硝酸酒精腐蚀后,在金相显微镜下观察不同工艺生产的 2 种热轧试样垂直于轧制方向面上的组织分布情况,分析显微组织及晶粒度的变化。将观察面分为中心区域和边缘区域 2 个部分,热轧组织如图 4 所示。由图 4(a)、(b)可知,热轧板沿厚度方向上的组织边缘处一般为较细小的等轴晶粒,形状呈不规则的多边形结构;图 4(c)、(d)所示为中心处组织,一般为伸长的铁素体晶粒与较粗大的碳化物,有些晶界处还有析出的第二相质点。比较图 4(a)、(b)和图 4(c)、(d)得出,由于热轧过程中表面脱碳、部分相变以及沿厚度方向上的温度和受力不同,从而使热轧板在垂直于轧向横截面上组织分布具有很大的差别;其中,CSP 工艺生产热轧板边缘晶粒尺寸为 $40.85\ \mu\text{m}$,常规热轧工艺为 $37.47\ \mu\text{m}$,两者中心组织均为变形晶粒,其尺寸相差不大;与常规热轧工艺相比,CSP 工艺生产的热轧板边缘组织与中心组织更为接近,故 CSP 工艺试样组织相对比较均匀。

热轧组织板厚方向上的不均匀性主要是由于在热轧过程中,板坯表面温度低、变形量大、回复能力低、晶粒储能大,当达到极限时会发生动态再结晶和部分相变,从而形成等轴晶。而中心处温度相对较高,回复能力较强,在晶粒受压变形的同时产生回复,不会发生动态再结晶过程,故最终为形变组织。有研究表明^[16-17],热轧织构沿厚度方向的不均匀性,对取向硅钢的二次再结晶有着重要的影响,特别是具有较强高斯织构组分的表面层。近年来一些研究者对普通取向硅钢(CGO)和高磁感取向硅钢(Hi-B)各阶段板内织构沿厚度方向的变化进行了研究,认为由于织构的继承性和记忆效应,最终成品获得 Goss 织构的关键是热轧板的次表面层有粗大再结晶状态的 $\{110\}\langle 001\rangle$ 取向晶粒层,并且中心层为形变织构^[18-19]。

CSP 工艺相对常规热轧工艺试样组织沿板厚方向较均匀是因为 CSP 工艺生产的连铸坯厚度减小,连铸

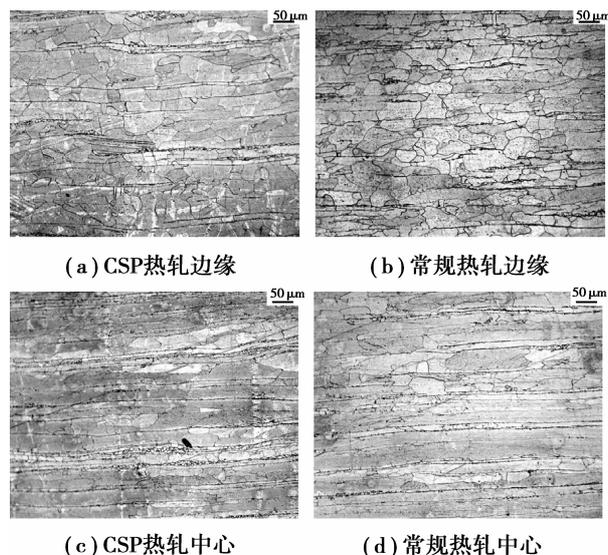


图 4 不同工艺生产的低温取向硅钢热轧组织

Fig. 4 Hot rolled texture in low temperature grain-oriented silicon steel under different processes

坯表面到中心的温度梯度变大,传热更快,柱状晶宽度小,轧制过程中受力也较普通热轧工艺均匀,而且 CSP 流程采用较低的加热温度,可以使铸坯内部和表面温度均匀,延缓均热过程中柱状晶的长大。因此,能获得尽量小的热轧初轧晶粒尺寸,这样有利于提高热轧过程中动态回复和动态再结晶的速度,减小了热轧板厚度方向上组织的不均匀性^[20-21]。此外,CSP 工艺生产的热轧板中析出物与常规热轧板相比,数量少、尺寸大,对晶粒长大的抑制作用小,所以其边缘晶粒尺寸较大,又由于两者中心均为形变组织,晶粒尺寸相差不大,故 CSP 工艺试样组织相对比较均匀。由此可以得出,相对常规热轧工艺,CSP 工艺不利于在后续处理工艺中发展完善的二次再结晶组织以获得良好的磁性能,这与前面研究的第二相粒子得出的结论相符合。

3 结 论

通过分析不同生产工艺对低温取向硅钢中第二相粒子及热轧板组织的影响得出如下结论:

1) 不同工艺生产的低温取向硅钢热轧板中析出物除了弥散分布的纳米级球形或椭球形的 MnS 、 Cu_2S 外,还观察到与 MnS 形貌相似的 SiO_2 、 AlN 、 Si_3N_4 及其复合在一起的复杂化合物。试样中微米级析出物主要是 SiO_2 、 MnS 、 Cu_2S 和 AlN 的复合物,而在纳米级析出物中,氧化物所占比例很少,单个硫化物或者氮化物也比较少,其主要为 AlN 、 Si_3N_4 、 MnS 、 Cu_2S 的复合物,且复合形式为硫化物外包氮化物。

2) 热轧板中夹杂物均是在 $(0.01\sim 0.2)\ \mu\text{m}$ 范围内个数最多,约占总个数的 99%,而大于 $1\ \mu\text{m}$ 很少,只有约 0.1%;与常规热轧板相比,CSP 工艺生产的热轧板中夹杂物面积密度均较小,特别是在小于 $0.5\ \mu\text{m}$ 范围内两者相差较大;CSP 试样大于 $1\ \mu\text{m}$ 夹杂物平均尺寸较大,在小于 $1\ \mu\text{m}$ 范围内两者平均尺寸相差不大。相对而言不利于后期退火过程中二次再结晶的完整,使得最终产品的磁性能得不到保证。

3) 热轧板在垂直于轧向横截面上组织分布具有很大的差别,其中 CSP 试样组织相对比较均匀,不利于在后续处理工艺中发展完善的二次再结晶组织以获得良好的磁性能。

参考文献:

- [1] 何忠治,赵宇,罗海文.电工钢[M].北京:冶金工业出版社,2012.
- [2] Helmut P. Nondestructive Rapid Investigation of Domains and Grain Boundaries of Grain Oriented Silicon Steel [J].ISIJ International,1989,29(10):828-835.
- [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):4-8.
ZHANG Ying, FU Gengli, WANG Ruwu, et al. Inhibitors in high magnetic induction grain-oriented silicon steel[J]. China Metallurgy, 2008,18(11):4-8.
- [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.
ZHAO Yu, HE Zhongzhi. Advances in research on the mechanism of secondary recrystallization in grain oriented silicon

- steels[J]. Journal of Iron and Steel Research, 1991,3(4):79-90.
- [5] Tetsuo T, Michiro K T, Atsuhito H, et al. Grain-Oriented Electromagnetic Steel Sheet and Process for Producing the same;US, 6039818[P]. 2000-03-21.
- [6] 荒井贤一,大森贤次,三浦一夫,等.低损失方向性ケイ素鋼板极薄帯の制造法;日本,昭 63-171827[P].1988-07-05.
- [7] 郑庆,彭勇,雷思源,等.冶金条件对取向硅钢铸锭中夹杂物的影响[J].中国稀土学报,2002,20:436-439.
ZHENG Qing, PENG Yong, LEI Siyuan, et al. Effects of metallurgical conditions on behavior of inclusions in grain-oriented silicon steel ingots[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2002,20:436-439.
- [8] 杨佳欣,刘静.浅谈氮元素在高磁感取向硅钢生产中的作用[J].武钢技术,2007,45(5):38-41.
YANG Jiixin LIU Jing. Effect of nitrogen on production process of high magnetic induction grain-oriented silicon steel[J]. Wisco Technology, 2007,45(5):38-41.
- [9] 朱诚意,郑建新,李光强,等.酸溶铝对铸态取向硅钢中第二相粒子组成和形貌的影响[J].特殊钢,2014,35(2):60-64.
ZHU Chengyi, ZHENG Jianxin, LI Guangqiang, et al. The influence of soluble aluminum on the composition and morphology of the second phase particles in the as-cast grain-oriented silicon steel[J]. Special Steel, 2014,35(2):60-64.
- [10] 郭艳永,蔡开科,骆忠汉,等.钙处理对冷轧无取向硅钢磁性的影响[J].北京科技大学学报,2005,27(4):427-430.
GUO Yanyong, CAI Kaike, LUO Zhonghan, et al. Behavior of microinclusions in cold-rolled non-oriented silicon steel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005,27(4):427-430.
- [11] Flowers J W JR, Karas S P. Coalescence of sulfides during secondary growth in 3% silicon-iron[J]. Journal of Applied Physics, 1967, 38(3):1085.
- [12] 李军,孙颖,赵宇,等.取向硅钢低温铸坯加热技术的研发进展[J].钢铁,2007,42(10):72-75.
LI Jun, SUN Ying, ZHAO Yu, et al. Development of low temperature slab reheating technique for grain-oriented silicon steel[J]. Iron and Steel, 2007,42(10):72-75.
- [13] 于永梅,李长生,王国栋.薄板坯连铸连轧生产取向硅钢技术的研究[J].钢铁,2007,42(11):45-47.
YU Yongmei, LI Changshang, WANG Guodong. Study of production of oriented silicon steel by thin slab casting and rolling[J]. Iron and Steel, 2007,42(11):45-47.
- [14] 吴健鹏,张永锟,张超,等.薄板坯连铸连轧工艺与电工钢生产[J].武钢技术,2009,47(3):48-51.
WU Jianpeng, ZHANG Yongkun, ZHANG Chao, et al. Production of electrical steel by TSCR process[J]. Wisco Technology, 2009,47(3):48-51.
- [15] 仇圣桃,项利,岳尔斌,等.薄板坯连铸连轧流程生产取向硅钢技术分析[J].钢铁,2008,43(9):1-7.
QIU Shengtao, XIANG Li, YUE Erbin, et al. Technology analysis of producing grain oriented silicon steel by thin slab casting and rolling process[J]. Iron and Steel, 2008,43(9):1-7.
- [16] 张贞贞,任卫,方建锋.低温板坯加热取向 3%硅钢热轧板的研究[J].特殊钢,2011,32(1):67-70.
ZHANG Zhenzhen, REN Wei, FANG Jianfeng. A study on texture in hot rolled plate of grain-oriented 3% Si steel with slab reheating at low temperature[J]. Special Steel, 2011,32(1):67-70.
- [17] Seidel L, Hölscher M, Lücke K. Rolling and Recrystallization Textures in Iron-3% Silicon[J]. Textures and Microstructures, 1989, 11:171-185.
- [18] Mishra S, Därmann C, Lücke K. New Information on Texture Development in Regular and High-Permeability Grain-oriented Silicon Steels[J]. Metall Trans, 1986, 17(8):1301-1312.
- [19] Mishra S, Därmann C, Lücke K. On the Development of the Goss Texture in Iron-3% Silicon[J]. Acta Metallurgica, 1984, 32(12):2185-2201.
- [20] 朱涛,施立发,董梅,等.CSP 与传统工艺生产无取向电工钢的组织 and 织构对磁性能影响的对比分析[J].钢铁研究学报,2009,21(11):35-39.
ZHU Tao, SHI Lifa, DONG Mei, et al. Comparative analysis of effect of microstructure and texture on magnetic properties of non-oriented electrical steel produced by CSP and traditional processes[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2009,21(11):35-39.
- [21] 樊立峰,岳尔斌,项利,等.CSP 工艺生产高牌号无取向电工钢的组织 and 夹杂物[J].钢铁研究学报,2008,20(1):32-36.
FAN Lifeng, YUE Erbin, XIANG Li, et al. Structure and inclusion of high grade non-oriented electrical steel produced in CSP process [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2008,20(1):32-36.