

冷轧压下率对双辊铸轧硅钢形变和再结晶
组织的影响

孙超^{1,2},沙玉辉¹,张芳¹,左良¹

(1. 东北大学材料各向异性与组织教育部重点实验室,辽宁沈阳110819;2. 河钢集团唐钢公司技术中心,河北唐山063016)

摘 要:2.0 mm厚双辊铸轧Fe-2.8%Si-0.8%Al硅钢带坯进行直接冷轧和退火,研究了不同冷轧压下率样品的形变与再结晶组织特征.形变组织主要由 α ($\langle 110 \rangle // RD$), γ ($\langle 111 \rangle // ND$)和 λ ($\langle 001 \rangle // ND$)纤维组织组分构成,其取向密度峰值分别位于 $\{001\} \langle 110 \rangle$, $\{111\} \langle 110 \rangle$ 和 $\{001\} \langle 110 \rangle \sim \langle 210 \rangle$.随压下率提高(40%~90%),各主要形变组织组分增强.压下率为60%时,剪切带特征最显著.再结晶组织包含Goss($\{110\} \langle 001 \rangle$),Cube($\{001\} \langle 100 \rangle$), λ , $\{113\} \langle 361 \rangle$ 和 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 等组织组分.随压下率提高,再结晶机制由剪切带形核主导转变为形变带和晶界形核主导,导致再结晶Goss组分减弱,而 $\{113\} \langle 361 \rangle$,Cube, λ 以及 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 再结晶组织组分增强.

关 键 词:冷轧压下率;无取向硅钢;双辊铸轧;形变组织;再结晶组织

中图分类号: TG 337.3 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)09-1311-06

Effect of Cold Rolling Reduction on Deformation and Recrystallization Texture in Twin-Roll Cast Non-oriented Silicon Steel

SUN Chao^{1,2}, SHA Yu-hui¹, ZHANG Fang¹, ZUO Liang¹

(1. Key Laboratory for Anisotropy and Texture of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Hesteel Group Tangsteel Company Technical Center, Tangshan 063016, China. Corresponding author: SHA Yu-hui, E-mail: yhsha@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The twin-roll cast Fe-2.8%Si-0.8%Al strips were directly cold rolled and annealed to investigate the effect of cold rolling reduction on deformation and recrystallization texture. The deformation texture is mainly composed of α , γ and λ fibers with peak at $\{001\} \langle 110 \rangle$, $\{111\} \langle 110 \rangle$ and $\{001\} \langle 110 \rangle \sim \langle 210 \rangle$, respectively. The main deformation texture components are enhanced when the reduction increases from 40% to 90%, while the shear banding becomes the most notable feature at 60% reduction. The recrystallization texture is characterized by Goss, λ fiber, $\{113\} \langle 361 \rangle$, Cube and $\{111\} \langle 112 \rangle$ components. The dominant nucleation sites transform from shear bands to deformation bands and grain boundary regions as the cold rolling reduction increases, resulting in the weakening of Goss and the strengthening of λ fiber, $\{113\} \langle 361 \rangle$, Cube and $\{111\} \langle 112 \rangle$ components.

Key words: cold rolling reduction; non-oriented silicon steel; twin-roll strip casting; deformation texture; recrystallization texture

无取向硅钢是广泛应用于制作发电机和电动机铁芯的重要软磁材料,再结晶组织是决定无取向硅钢磁性能的关键因素之一.强化有利的 λ ($\langle 001 \rangle // ND$)和 η ($\langle 001 \rangle // RD$)组织、抑制不利的 γ ($\langle 111 \rangle // ND$)组织是无取向硅钢组织优化的主要目标. γ 再结晶晶粒主要形核于

形变基体的晶界和形变带^[1-2],通过消耗 γ 形变基体或相邻基体长大,Goss($\{110\}<001>$)再结晶晶粒则主要形核于 γ 形变基体的剪切带^[3-5],通过消耗 γ 形变基体长大,两者之间的竞争决定了再结晶组织特征.采用传统工艺制备的无取向硅钢,通常形成以 γ 为主的再结晶组织^[6-7].

冷轧压下率对再结晶组织影响显著^[4-5,8-10].Samajdar 等^[4]研究表明,Fe-3% Si 硅钢经 70%、90% 压下率轧制和初次再结晶退火后,形成强 γ 和弱 Goss 组织. Park 等^[5]发现,Fe-2% Si 硅钢经 75% 压下率轧制和退火后形成强 Goss 和较弱 γ 组织. Hölischer 等^[10]指出,随压下率增大,以 Goss 组织为主的 η 组织逐渐减弱,而 γ 组织逐渐增强.压下率变化影响形变组织和组织(剪切带数量、储能以及晶界储能),进而影响 γ 和 Goss 再结晶组织之间的竞争^[11].因此,在适当压下率下,良好发展的剪切带可具有储能优势,使 Goss 再结晶晶粒优先形核,同时有效抑制 γ 再结晶晶粒形核.

双辊铸轧技术在硅钢生产中的应用,可显著缩短制备流程、节约能源损耗,受到越来越多的关注.特别是双辊铸轧带坯中特殊的初始 λ 组织^[12],会导致形变与再结晶组织呈现新特征.已有研究表明,双辊铸轧硅钢薄带再结晶组织包括 Cube($\{001\}<100>$)、 λ 、Goss 和 γ 组织^[13-15].其中,Cube 再结晶晶粒除了形核于由初始 Cube 取向演变而来的 Cube 形变带^[16-17]外,还可在 γ 形变基体的 Cube 剪切带形核,并消耗 γ 形变基体而长大^[13],它与同在 γ 形变基体形核的 Goss 和 γ 再结晶晶粒形成竞争关系.目前,冷轧压下率与双辊铸轧硅钢薄带中再结晶 Cube、Goss 和 γ 等组织组分之间的关系尚缺乏系统研究.

本研究以双辊铸轧带坯为初始材料,采用直接冷轧的方式,研究了冷轧压下率对形变与再结晶组织的影响.

1 实验方法

实验材料为 2.0 mm 厚的 Fe-2.8% Si-0.8% Al 双辊铸轧硅钢带坯.经酸洗去除氧化皮后,直接冷轧至 1.20、0.80、0.35 和 0.20 mm,对应冷轧压下率分别为 40%、60%、82% 和 90%,冷轧方向(RD)与铸轧方向平行.冷轧样品在氩气保护气氛中进行 1 000 ℃ 保温 5 min 的再结晶退火.从冷轧和再结晶样品中部截取 22 mm × 20 mm 的组织样品,用含 10% 氢氟酸的双氧水溶

液减薄和去除表面应力.采用 X-射线衍射技术测算冷轧和退火薄带的取向分布函数(ODF),并据此计算各再结晶组织组分的体积分数.冷轧样品经砂纸磨平、机械抛光后,采用 OLYMPUS 的 OLS3100 激光共聚焦显微镜进行组织观察.此外,还进行了 1 000 ℃ 保温 5 s 的部分再结晶退火,获得再结晶分数为 10% 的样品,用于观察不同压下率下再结晶晶粒的形核位置.

2 结果与讨论

双辊铸轧硅钢带坯通体为等轴晶粒,平均晶粒尺寸约为 300 μm .组织主要由以 Cube 取向为峰值的 λ 组织组成,同时含有少量 $\{113\}<361>$ 和 Goss 组织^[13].图 1 为经 40%、60%、82% 和 90% 压下率轧制后的形变组织,主要由 λ 、 α ($<110>\parallel\text{RD}$)和 γ 组织组成.随冷轧压下率增加,形变组织显著变化:40% 和 60% 压下率轧制时,形变组织由以 $\{001\}\sim\{112\}<110>$ 为峰值的 α 组织、以 $\{001\}<110>\sim<210>$ 为峰值的 λ 组织和弱 γ 组织组成;当压下率增大至 82% 和 90% 时,形变组织为以 $\{001\}\sim\{111\}<110>$ 为峰值的 α 组织和以 $\{111\}<110>$ 为峰值的 γ 组织.

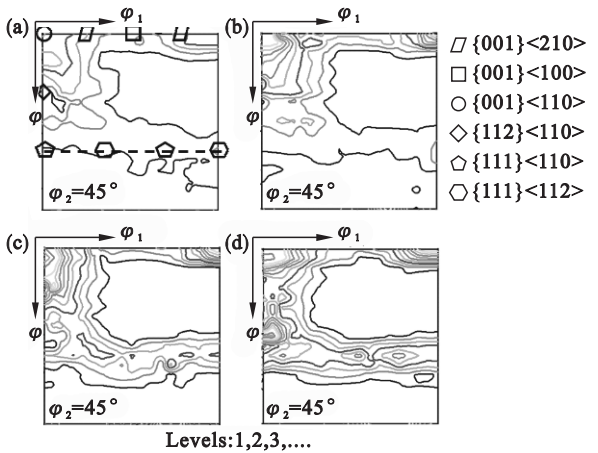


图 1 Fe-2.8% Si-0.8% Al 薄带坯经不同压下率冷轧后的 ODF 恒 $\phi_2=45^\circ$ 截面图
Fig. 1 Constant $\phi_2=45^\circ$ sections of ODF of Fe-2.8% Si-0.8% Al thin sheets cold rolled with different reductions from twin-roll cast strip
(a)—40%; (b)—60%; (c)—82%; (d)—90%.

为了方便比较,图 2 给出了薄带经不同压下率轧制后 λ 、 α 和 γ 取向线的取向密度分布特征.随压下率增大,以 $\{001\}<110>$ 为主的 α 组织和以 $\{111\}<110>$ 为峰值的 γ 组织显著增强,同时 λ 组织中 $\{001\}<110>\sim<210>$ 组分亦强化.

Cube 织构并非汇聚型应变织构,很难在变形过程中形成.因此,形变织构中的少量 Cube 织构来自初始 Cube 织构.作者已有研究表明,初始 Cube 或近 Cube 取向在轧制过程中倾向于向 $\{001\} \langle 210 \rangle$ 或 $\{113\} \langle 361 \rangle \sim \{114\} \langle 481 \rangle$ 取向转动,同时少量初始较准确的 Cube 取向以 Cube 形变带的形式保留下来^[13].在不同压下率轧制后,形变组织均由伸长的形变晶粒组成,部分晶粒内形成剪切带.如图 3 所示,压下率为 40% 时,少数晶粒内形成剪切带;压下率为 60% 时,晶内剪切带明显增多;进一步增大压下率,剪切带则逐渐减少.

随冷轧压下率增大,冷轧样品中各形核位置(剪切带、形变带、晶界)的数量和相对储能发生变化,从而改变再结晶形核位置数.图 4 给出了不同压下率冷轧样品经 1 000 ℃ 保温 5 s 退火后的再结晶形核位置.40% ~ 82% 压下率轧制和退火后,存在较多具有显著剪切带形核特征的形变基体,其晶界形核数量很少;剪切带形核特征不明显的形变基体内亦存在一定数量的再结晶晶粒,此类晶粒应为晶界或形变带形核.90% 压下率轧制和退火后,剪切带形核数量明显减少,形变带、晶界形核显著增加,特别是具有剪切带形核特征的基体晶界处形核数量显著增多.

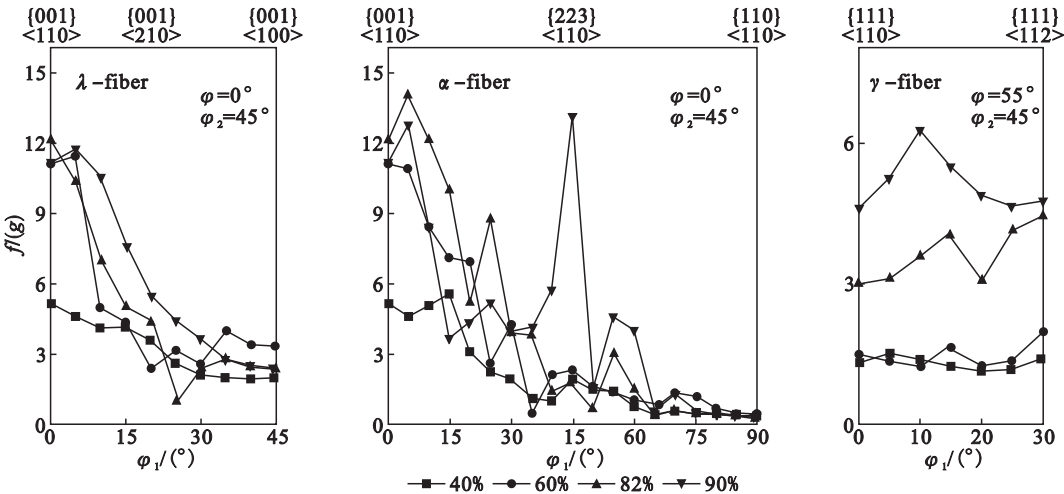


图 2 Fe-2.8% Si-0.8% Al 薄带坯经不同压下率冷轧后 λ、α 和 γ 取向线的取向密度特征

Fig. 2 Orientation densities along λ, α and γ fibers of Fe-2.8% Si-0.8% Al thin sheet cold rolled with different reductions

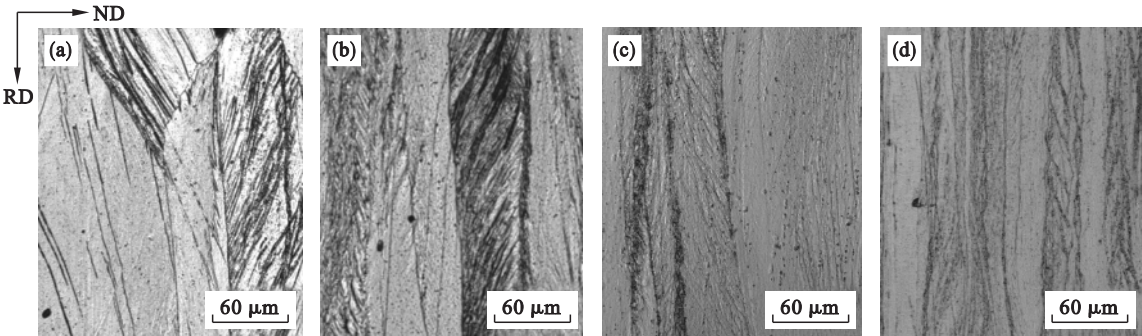


图 3 Fe-2.8% Si-0.8% Al 薄带坯经不同压下率冷轧后的显微组织

Fig. 3 Microstructure of Fe-2.8% Si-0.8% Al thin sheets cold rolled with different reductions

(a)—40% ; (b)—60% ; (c)—82% ; (d)—90% .

图 5 和图 6 给出了不同压下率冷轧样品经 1 000 ℃ 保温 5 min 退火后的再结晶组织和织构.轧制压下率对再结晶组织影响不明显,各样品均由等轴晶粒组成,随压下率增大,晶粒尺寸仅略有减小.随压下率增大再结晶织构类型显著改变,压下率为 40%、60% 时,再结晶织构主要由 Goss、λ、 $\{001\} \sim \{113\} \langle 110 \rangle$ 为峰值的 α 和近 $\{113\}$

$\langle 361 \rangle$ 组成;压下率为 82% 时,再结晶织构为以 $\{001\} \langle 210 \rangle \sim \langle 100 \rangle$ 为峰值的 λ、以 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 为峰值的 γ 和 Goss 组成,α 几乎完全消失;压下率增大至 90% 时,再结晶织构由强 λ、γ 和弱 Goss 组成.

图 7 给出了不同压下率轧制样品中各主要再结晶织构组分的体积分数.冷轧压下率由 40% 增

大至 60% 时 ,Cube ,Goss 和 λ 增加 ,其中 Goss 达到最大值 , $\{113\} \langle 361 \rangle$ 体积分数变化不大. 压下率增加至 82% 时 ,Goss , λ 减少 , $\{111\} \langle 112 \rangle$

显著增加 ,Cube 和 $\{113\} \langle 361 \rangle$ 基本不变 ;当压下率为 90% 时 ,Goss 显著减少 ,其余组分均明显增加.

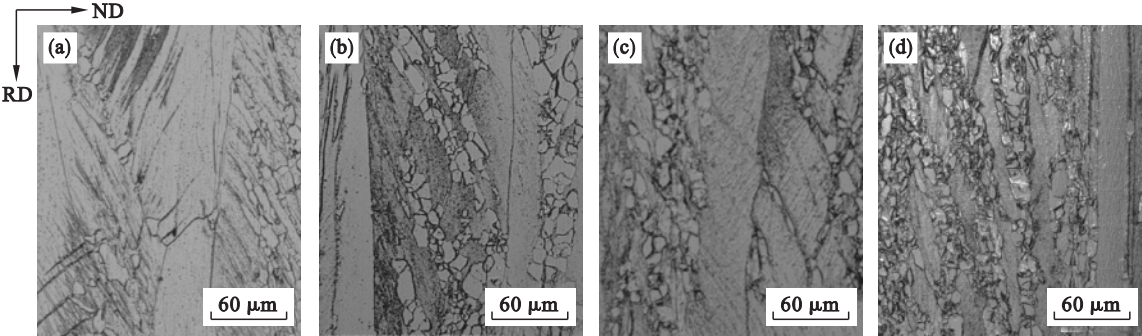


图 4 Fe-2.8% Si-0.8% Al 薄带坯经不同压下率冷轧和退火后的再结晶晶粒的形核位置
Fig. 4 Nucleation sites of recrystallized grains in annealed Fe-2.8% Si-0.8% Al thin sheets cold rolled with different rolling reductions
(a)—40% ; (b)—60% ; (c)—82% ; (d)—90% .

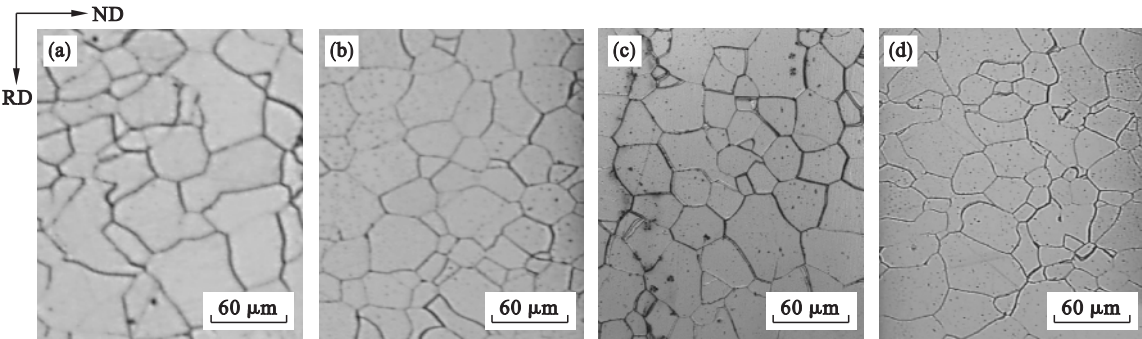


图 5 Fe-2.8% Si-0.8% Al 薄带坯经不同压下率冷轧和退火后的再结晶组织
Fig. 5 Recrystallized microstructure in annealed Fe-2.8% Si-0.8% Al thin sheets cold rolled with different rolling reductions
(a)—40% ; (b)—60% ; (c)—82% ; (d)—90% .

作者之前的研究表明 ,双辊铸轧硅钢带坯经 82.5% 压下率轧制可形成强 Cube 再结晶组织^[13]. Liu 等^[14-15]分别研究了具有初始 λ 织构的 Fe-3.2% Si-0.7% Al 双辊铸轧硅钢带坯 ,经 75% 和 82.5% 压下率轧制和退火后的再结晶组织. 压下率为 75% 时 ,再结晶组织为强 $\{441\} \langle 118 \rangle$ (近 Goss) , $\{111\} \langle 112 \rangle$ 以及较弱的 Cube 和 $\{001\} \langle 210 \rangle$. 压下率为 82.5% 时 ,再结晶组织为近 Cube 和 $\{111\} \langle 112 \rangle$. 适宜的加工参数(冷轧压下率、退火温度)促进了 Goss 或 Cube 织构的择优形核以及随后的择优长大 ,但这些研究并未就压下率变化对双辊铸轧硅钢薄带再结晶组织的影响展开讨论.

双辊铸轧硅钢薄带的再结晶组织主要由以 Cube 为峰值的 λ 、以 Goss 为峰值的 η 和以 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 为峰值的 γ 组成 ,这些组织组分的强弱与形变微结构和形变组织密切相关 ,而初始晶粒尺寸和冷轧压下率是影响形变微结构和形变组织的

重要因素. 薄带坯粗大的初始晶粒尺寸 ,促进了剪切带的发展. 当压下率为 40% 时 , γ 形变组织较弱 ,部分晶粒内出现发展良好的剪切带 ,导致在剪切带形核的 Goss 和 Cube 再结晶晶粒较多 ,Goss 和 Cube 因此较强 ;同时晶界储能低导致 γ 晶粒在晶界形核数量很少 ,故 γ 组织很弱. 此外 ,由于形变带储能低 ,由初始 λ 织构演变而来的强 λ 和 $\{113\} \langle 361 \rangle$ 区域很难发生再结晶 ,退火样品中的 λ 和 $\{113\} \langle 361 \rangle$ 织构可能由充分回复形成. 由此 ,压下率为 40% 时形成了以 Goss ,Cube , $\{113\} \langle 361 \rangle$ 和 λ 为主的再结晶组织.

压下率增大至 60% 时 , γ 形变组织变化不大 ,但剪切带数量明显增多. 这使 Goss ,Cube 再结晶晶粒大量形核 ,再结晶 Goss ,Cube 显著增加 ,其中 Goss 组分尤为明显. 同时 ,Goss 和 Cube 再结晶晶粒的生长抑制了 γ 再结晶晶粒的发展 , γ 体积分数略有减少. 压下率增大至 82% 时 , γ 形变组织明显增强但剪切带数量减少 ,导致再结晶初期 Goss

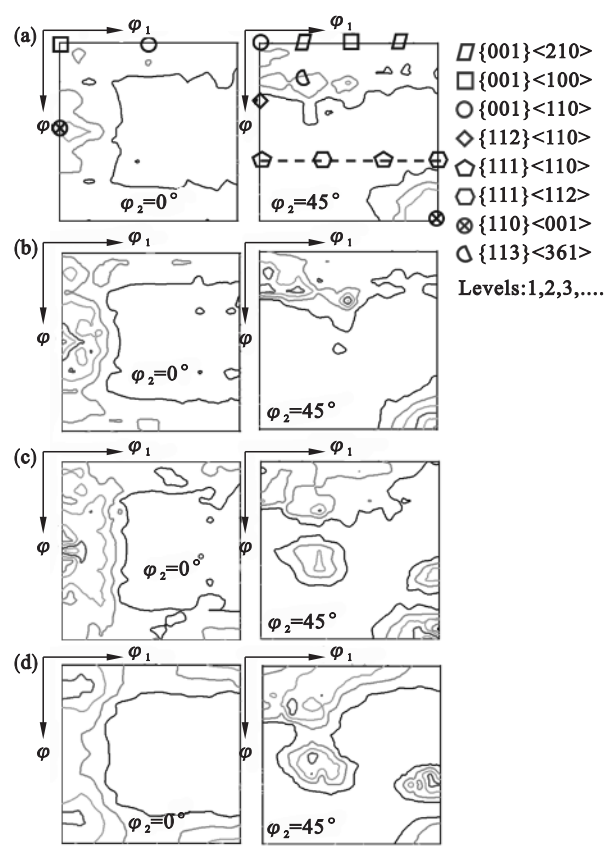


图 6 Fe-2.8%Si-0.8%Al 薄带坯经不同压下率冷轧和 1 000℃保温 5 min 退火后的 ODF 恒 $\varphi_2=0^\circ$ 和 $\varphi_2=45^\circ$ 截面图

Fig. 6 Constant $\varphi_2=0^\circ$ and $\varphi_2=45^\circ$ sections of ODFs of Fe-2.8%Si-0.8%Al thin sheets cold rolled with different rolling reductions after annealing at 1 000℃ for 5 min

(a)—40% ; (b)—60% ; (c)—82% ; (d)—90% .

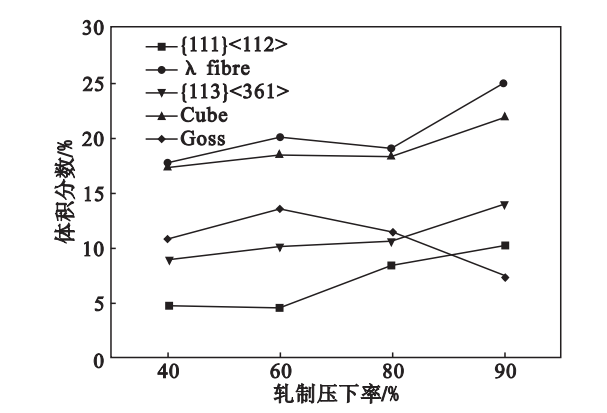


图 7 不同压下率冷轧 Fe-2.8%Si-0.8%Al 薄带经 1 000℃保温 5 min 退火后再结晶组织组分的体积分数

Fig. 7 Volume fractions of various recrystallization texture components in Fe-2.8%Si-0.8%Al thin sheets cold rolled with different reductions after annealing at 1 000℃ for 5 min

和 Cube 晶粒在剪切带形核数量减少,Goss 体积分数显著降低,而 γ 形变织构增强以及晶界储能的增加,使 γ 再结晶晶粒形核数量增多.再结晶

过程中 γ 晶粒的优先长大迅速消耗储能较低的 α 形变基体,导致再结晶 $\{001\}<110>$ 组分减弱. Cube 再结晶晶粒既可在 Cube 剪切带形核也可在 Cube 形变带形核,虽然剪切带形核减少,但形变带储能增加带来 Cube 晶粒形核数量增多,两者共同决定 Cube 体积分数基本不变.当压下率为 90% 时,以近 $\{111\}<110>$ 为峰值的 γ 织构显著增强,虽存在少量剪切带,但再结晶初期剪切带形核数量锐减,导致 Goss 体积分数进一步减小.由于晶界和形变带储能增大,导致 $\{113\}<361>$ 、 γ 、Cube 以及其他 λ 再结晶晶粒的形核数量增多,再结晶完成时体积分数均明显提高.

3 结 论

- 1) 冷轧压下率显著影响形变织构和剪切带特征.随压下率增加,以 $\{001\}<110>$ 为峰值的 α 、以 $\{001\}<110>\sim<210>$ 为峰值的 λ 和以 $\{111\}<110>$ 为峰值的 γ 均显著增强;剪切带先增加后减少,60% 压下率时剪切带最多.
- 2) 再结晶织构随压下率演变呈现新特征: 60% 压下率时,Goss 和 Cube 晶粒在剪切带择优形核, γ 晶粒在晶界的形核受到抑制,而部分初始 λ 和 $\{113\}<361>$ 织构则得以保留,形成由强 λ 、 $\{113\}<361>$ 、Cube 和 Goss 以及弱 γ 组成的再结晶织构.进一步增大压下率,Cube 和 Goss 晶粒在剪切带形核逐渐减弱, $\{111\}<112>$ 、 $\{113\}<361>$ 、Cube 和 λ 再结晶织构在形变带及晶界的形核增强,再结晶织构转变为由强 λ 、 $\{113\}<361>$ 、Cube、 $\{111\}<112>$ 及较弱的 Goss 组成.

参考文献：

[1] Abe M , Kokabu Y , Hayashi Y , et al. Effect of grain boundaries on the cold rolling and annealing textures of pure iron [J]. *Transactions of the Japan Institute of Metals* , 1982 , 23(11) : 718 - 725.

[2] Barnett M R , Kestens L. Formation of $\{111\}<110>$ and $\{111\}<112>$ textures in cold rolled and annealed IF sheet steel [J]. *ISIJ International* , 1999 , 39(9) : 923 - 929.

[3] Ushioda K , Hutchinson W B. Role of shear bands in annealing texture formation in 3% Si - Fe (111) [11 - 2] single crystals [J]. *ISIJ International* , 1989 , 29(10) : 862 - 867.

[4] Samajdar I , Cicale S , Verlinden B , et al. Primary recrystallization in a grain oriented silicon steel on the origin of Goss $\{110\}<001>$ grains [J]. *Scripta Materialia* , 1998 , 39(8) : 1083 - 1088.

[5] Park J T ,Szpunar J A. Evolution of recrystallization texture in nonoriented electrical steels[J]. *Acta Materialia* 2003 ,51 (11) 3037 – 3051.

[6] Kohno M , Muraki M , Kawano M , et al. Deformation microtexture and recrystallized orientations in non-oriented electrical steel observed by high-resolution EBSD [J]. *Materials Science Forum* , 2002 , 408/409/410/411/412 : 785 – 790.

[7] Inagaki H. Fundamental aspect of texture formation in low carbon steel[J]. *ISIJ International* ,1994 ,34(4) 313 – 321.

[8] 杨换平 ,沙玉辉 ,张芳 ,等. 大压下率冷轧无取向硅钢再结晶织构演变[J]. 东北大学学报(自然科学版) ,2013 ,34 (5) 658 – 662.
(Yang Huan-ping , Sha Yu-hui , Zhang Fang , et al. Recrystallization texture in heavily rolled non-oriented silicon steel [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)* 2013 ,34(5) 658 – 662.)

[9] 张智义 ,毛卫民 ,高振宇 ,等. 工艺参数对冷轧无取向硅钢再结晶织构的影响[J]. 材料热处理学报 ,2010 ,31(6) : 102 – 105.
(Zhang Zhi-yi ,Mao Wei-min ,Gao Zhen-yu ,et al. Influence of processing parameters on recrystallization texture of cold rolling non-oriented silicon steel [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment* 2010 ,31(6) :102 – 105.)

[10] Hölscher M ,Raabe D ,Luecke K. Rolling and recrystallization textures of bcc steels [J]. *Steel Research* ,1991 ,62(12) : 567 – 575.

[11] Hutchinson W B. Development and control of annealing textures in low-carbon steels [J]. *International Metals Reviews* ,1984 ,29(1) 25 – 42.

[12] Liu H T ,Liu Z Y ,Li C G ,et al. Solidification structure and crystallographic texture of strip casting 3% Si non-oriented silicon steel [J]. *Materials Characterization* ,2011 ,62 : 463 – 468.

[13] Sha Y H ,Sun C ,Zhang F ,et al. Strong cube recrystallization texture in silicon steel by twin-roll casting process [J]. *Acta Materialia* 2014 ,76(5) :106 – 117.

[14] Liu H ,Liu Z ,Cao G ,et al. Microstructure and texture evolution of strip casting 3wt% Si non-oriented silicon steel with columnar structure [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 2011 ,323(21) 2648 – 2651.

[15] Liu H T ,Liu Z Y ,Sun Y ,et al. Formation of {001 }<510 > recrystallization texture and magnetic property in strip casting non-oriented electrical steel [J]. *Materials Letters* ,2012 ,81 (5) 65 – 68.

[16] Tsuji N ,Tsuzaki K ,Maki T. Effect of initial orientation on the recrystallization behavior of solidified columnar crystals in a 19% Cr ferritic stainless steel[J]. *ISIJ International* ,1993 , 33(7) 783 – 792.

[17] Zhang N ,Yang P ,Mao W M. Formation of cube texture affected by neighboring grains in a transverse-directionally aligned columnar-grained electrical steel [J]. *Materials Letters* 2013 ,93(7) 363 – 365.