

高硅电工钢超薄带冷轧过程中的织构演变

柳金龙, 沙玉辉, 邵光帅, 左良
(东北大学 材料各向异性与织构教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 采用轧制工艺制备了0.10 mm厚的6.5% Si高硅电工钢超薄带,并用X射线衍射技术对冷轧过程中的形变织构演变规律进行了研究,进而提出了分别有利于 λ ($\langle 100 \rangle // ND$, ND为轧面法线方向)和 η ($\langle 100 \rangle // RD$, RD为轧向)再结晶织构优化的形变织构控制方法.研究表明,50%~70%压下率有利于 η 再结晶织构优化,易于促进 $S=0.5$ 层强 η 再结晶织构的形成.小于30%压下率和91%~97%压下率均有利于 λ 再结晶织构优化,其中30%的压下率更适合于二次冷轧法制备高硅钢超薄带时 λ 再结晶织构控制.

关 键 词: Fe-6.5% Si;高硅钢;薄带;冷轧;织构
中图分类号: TG 132.271 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)05-0645-06

Texture Evolution of High Silicon Steel Ultra-thin Sheets During Cold Rolling

LIU Jin-long, SHA Yu-hui, SHAO Guang-shuai, ZOU Liang
(Key Laboratory for Anisotropy and Texture of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: SHA Yu-hui, professor, E-mail: yhsha@mail.neu.edu.cn)

Abstract: High silicon electrical steel ultra-thin sheets of 0.10 mm thick, containing about 6.5% Si, were prepared by rolling method. The evolution of deformation texture during cold rolling was studied using X-ray diffraction. Then the methods of controlling deformation texture were proposed in favor of the λ ($\langle 100 \rangle // ND$, normal direction) and η ($\langle 100 \rangle // RD$, rolling direction) recrystallization texture, respectively. The rolling reduction between 50% and 70% is easy to promote the formation of the η recrystallization texture at the layer of $S=0.5$. While, the rolling reductions of either less than 30% or 91%~97% are in favor of λ recrystallization texture, in which the former reduction is more suitable to control the λ recrystallization texture when using a two-stage cold rolling method to prepare high silicon steel ultra-thin sheets.

Key words: Fe-6.5% Si; high silicon steel; thin sheets; cold rolling; texture

厚0.10 mm的高硅钢超薄带(6.5% Si)具有高磁导率、极低铁损和低噪音等优异的软磁性能,是高频电机和变压器的理想铁芯材料^[1-2].高硅钢超薄带的磁性能对再结晶织构十分敏感,但由于其高硬脆性,长期以来对高硅钢的研究主要集中在如何改善加工成形问题上^[3],关于高硅钢织构的优化控制进展较小.Ros-Yanze等^[4]研究表明,采用热轧、冷轧和退火方法制备的高硅钢薄板中易形成以 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 为峰值的 γ ($\langle 111 \rangle // ND$, ND为轧面法线方向)再结晶织构.林均品等^[5]轧制的高硅钢薄板,在退火后形成了强 γ 再结晶织构.刘璐等^[6]研究表明,不同轧制工艺下二次轧制法制备的高硅钢薄带中再结晶织构均由 γ 和 η 织构组成,且先70%后50%的二次轧制法可增强 η 、降低 γ 织构.

不同使用环境对高硅钢超薄带的织构特征提出了不同的要求.高频电机中的铁芯处于旋转状态, λ 再结晶织构是最理想的织构状态,高频变压器中的铁芯处于静止状态, η 织构是最理想的织构状态. γ 再结晶织构是对磁性最不利的织构组

分.再结晶过程中, λ 、 η 和 γ 晶核的形成位置各不相同: η 晶核的形成位置在 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 形变基体的剪切带上^[2], λ 晶核的形成位置为 λ 形变基体和 $\{114\} \langle 481 \rangle$ 和 $\{113\} \langle 361 \rangle$ 形变基体的形变带或晶界附近^[7], γ 晶核的形成位置是 γ 形变基体的晶界或晶内.因此,明确冷轧过程中织构演变规律,阐明需保留的有利形变织构组态,对高硅钢超薄带再结晶织构优化具有重要意义.本文采用轧制法制造厚 0.1 mm 的高硅钢超薄带,并通过分析冷轧过程的织构演变,探索分别有利于 λ 和 η 再结晶织构优化的形变织构控制方法.

1 实验材料和实验方法

以工业纯铁(99.9%)和工业硅(98.8%)为原料,使用真空感应炉熔炼高硅钢铸锭,并锻造成厚 40 mm 的板坯,锻坯经 1 200 ℃ 加热后连轧至 3.5 mm,热轧板成分见表 1.热轧板先进行 1 050 ℃ × 10 min 常化和酸洗,随后分别冷轧到 2.45,1.75,1.05,0.30 和 0.10 mm,对应冷轧压下率为 30%,50%,70%,91%,97%.其中,从 3.5 ~ 0.30 mm 的冷轧采用常规轧制方法在 200 ℃ 下进行,见图 1a.0.30 ~ 0.10 mm 的冷轧采用叠轧方法在室温下进行,即将两块 0.30 mm 的薄板叠在一起构成 0.60 mm 的薄板,轧到 0.20 mm 时再将两块薄板分开,获得厚 0.10 mm 薄带,见图 1b.

通过光学显微镜沿纵截面观察冷轧组织,采用 X 射线衍射技术和取向分布函数(ODF)方法测试和计算热轧和冷轧板不同厚度层的织构特征.为准确

表示不同厚度层位置,定义参数 $S = 2a/d$,其中 a 为 $S = 0$ 层的距离, d 为整个板厚.厚度为 0.30 ~ 3.5 mm 板带的测试位置如图 1a 中虚线所示,厚度为 0.10 mm 薄带的测试位置如图 1b 中虚线所示.

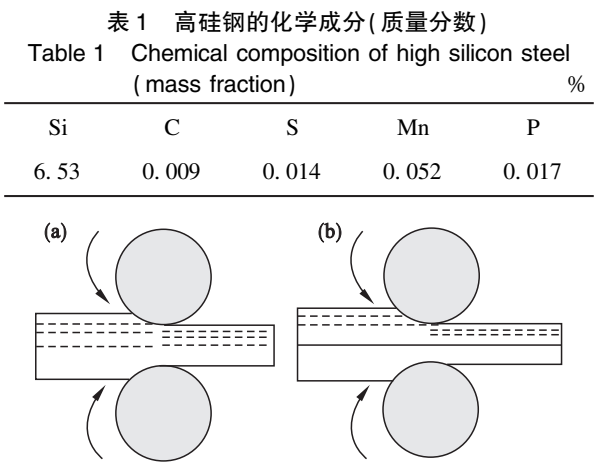


图 1 高硅钢冷轧示意图
Fig. 1 Schematic diagram of cold rolling for high silicon steel
(a) — 常规轧制; (b) — 叠轧.

2 结果与讨论

高硅钢热轧板不同厚度层织构特征见图 2.热轧板 $S = 0.75$ 层形成了以 Goss ($\{110\} \langle 001 \rangle$) 组分为主的强剪切织构, $S = 0$ 层形成了以平面应变织构 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 为峰值的强 α 织构.热变形过程中轧辊与热轧板表面存在强摩擦力,越靠近热轧板表面剪切应变织构越强,靠近 $S = 0$ 层则平面应变织构越强. $S = 0.5$ 层为过渡层,兼具 $S = 0.75$ 和 0 层的织构特征.

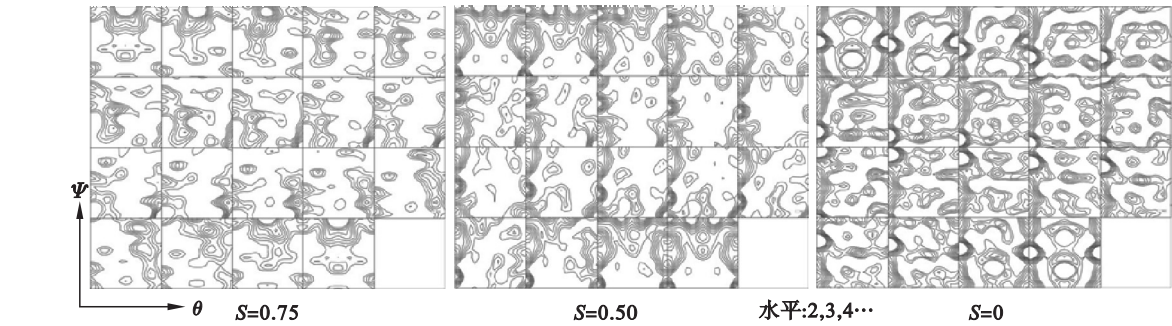


图 2 高硅钢热轧板不同厚度层的 ODF 恒 φ 截面图
Fig. 2 Constant φ sections of the ODF at different layers of hot bands in high silicon steels.

常化后热轧板完全再结晶,平均晶粒尺寸约 170 μm ,常化与热轧的织构特征相似,但强度显著减弱.图 3 给出了 0.10 mm 高硅钢超薄带轧制过程中不同压下率时的形变组织.在 30% 的压下率时,冷轧组织中出现了明显的形变孪晶. Xie

等^[3,8]研究了高硅钢在 400 ℃ 下压缩变形时的孪晶现象和形成机制,发现高硅钢压缩变形初期的变形机制为滑移,没有形变孪晶形成;压缩变形量为 5.8% 时,可观察到少量孪晶;压缩变形量为 10.8% ~ 26.8% 时,孪晶大量出现.随塑性变形增

大滑移受阻,在 5.8%~26.8% 范围内孪晶逐渐演变为主导的变形机制.同时,孪晶机制又协调了高硅钢晶粒的晶体学取向,促进滑移继续进行.高硅钢变形时孪晶的形成与晶粒尺寸、晶粒取向和有序相(B2 和 DO₃ 相)密切相关,故图 3a 中孪晶呈显著的不均匀分布.

在 50%~70% 压下率时,冷轧组织中出现了大量的剪切带.剪切带是因不均匀变形而形成的与轧面成 20°~40°角、厚度为 1~10 μm 的集中变形区域.随压下率的增加部分剪切带消失,故与 50%~70% 压下率相比,大于 91% 压下率时剪切带数量明显减少.

图 4 为 0.10 mm 高硅钢超薄带轧制过程中不同压下率时 $S=0.5$ 层的组织特征.由图可知:30% 压下率时主要组织组分为 λ , η 和 $\{114\} <481> \sim \{113\} <361>$ 织构;在 50%~70% 范围内,形成以 $\{111\} <112>$ 为峰值的 γ 织构和较弱的 α 织构;从 70% 增大到 91% 时, γ 织构整体增强, γ 织构的峰值由 $\{111\} <112>$ 旋转到了 $\{111\} <110>$ 位置, α 织构中的 $\{112\} <110>$ 和 $\{001\} <110>$ 组分都显著增强,整体上, α 与 γ 织构强度相近;从 91% 增大到 97% 的过程中,基本保持了 91% 的组织特征.

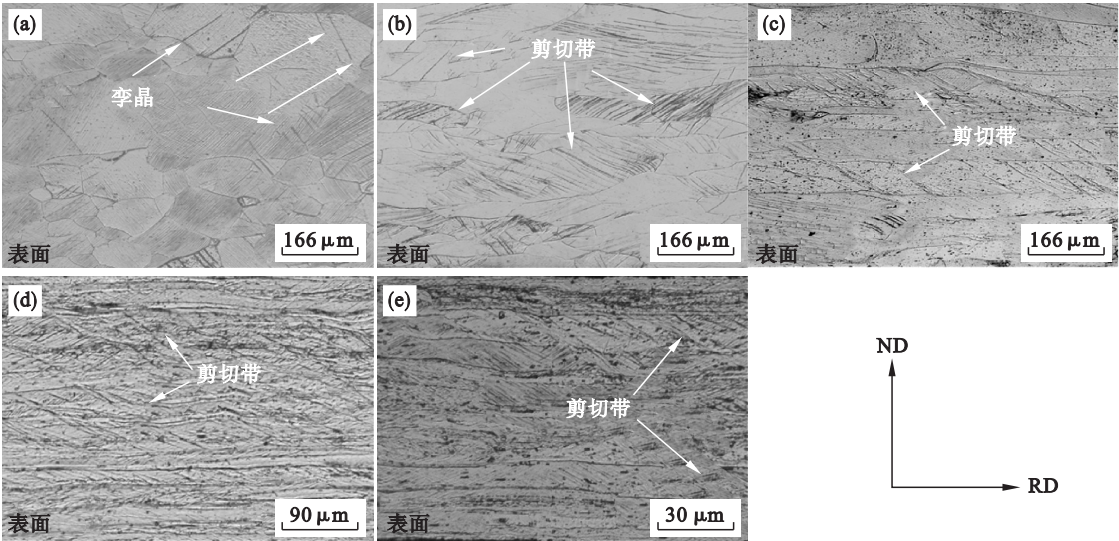


图 3 高硅钢超薄带冷轧过程中不同压下率时的形变组织

Fig. 3 Microstructures of high silicon steel ultra-thin sheets after deformation with different cold rolling reduction (a)—30%; (b)—50%; (c)—70%; (d)—91%; (e)—97% .

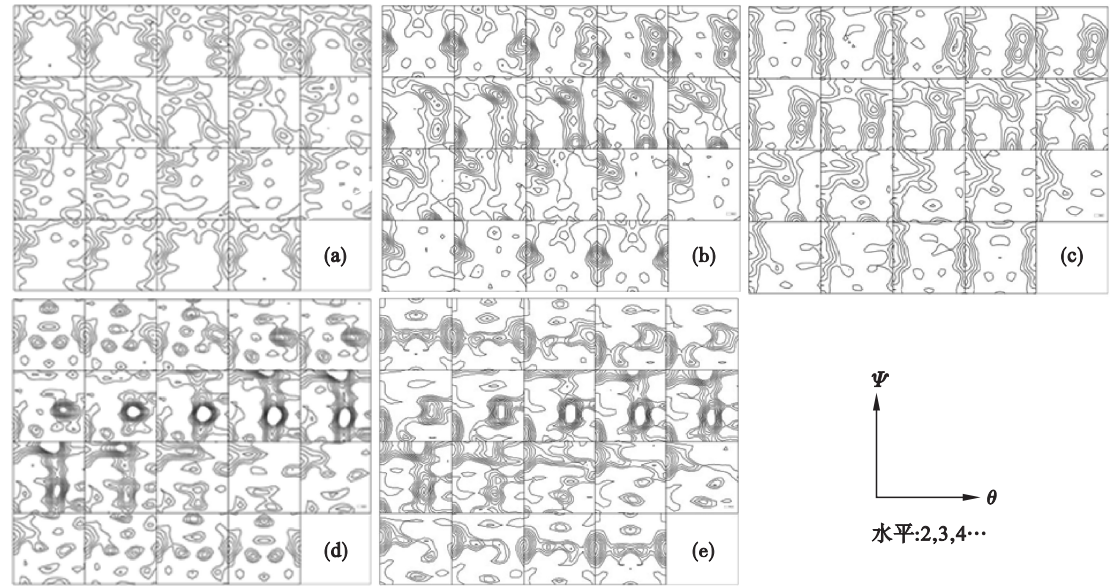


图 4 高硅钢超薄带轧制过程中不同压下率时 $S=0.5$ 层的 ODF 恒 ϕ 截面图

Fig. 4 Constant ϕ sections of the ODF at the layer of $S=0.5$ in high silicon steel ultra-thin sheets with different cold rolling reductions (a)—30%; (b)—50%; (c)—70%; (d)—91%; (e)—97% .

图 5 为 0.10 mm 高硅钢超薄带轧制过程中不同压下率时 $S=0$ 层的组织特征. 由图可知: 30% 压下率时形成了较强的 $\{111\} \langle 112 \rangle$, $\{001\} \langle 110 \rangle$, $\{113\} \langle 110 \rangle$ 和 $\{114\} \langle 481 \rangle \sim \{113\} \langle 361 \rangle$ 织构; 从 30% 增大到 50% 时, $\{001\} \langle 110 \rangle$, $\{113\} \langle 110 \rangle$ 和 $\{114\} \langle 481 \rangle \sim \{113\} \langle 361 \rangle$ 织构均向 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 汇聚, $\{111\} \langle 112 \rangle$ 向 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 旋转, 达到 50% 时形成了较均匀的 α , γ 和 λ 织构以及较弱的 $\{114\} \langle 481 \rangle \sim \{113\} \langle 361 \rangle$ 织构; 从 50% 增大到 70% 时, $\{111\} \langle 110 \rangle$ 和 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 持续增强; 在 70% ~ 97% 的范围内, 均形成了以 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 为峰值的强 γ 织构以及以 $\{112\} \langle 110 \rangle$

和 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 为峰值的强 α 织构, 且随压下率增大, $\{112\} \langle 110 \rangle$ 组分持续增强.

总体上, 高硅钢超薄带轧制过程中的形变织构演变规律与普通无取向硅钢冷轧织构特征相似. 随压下率增大, λ 和 η 织构减弱, $\{111\} \langle 112 \rangle$ 织构先增强后减弱, $\{111\} \langle 110 \rangle$, $\{112\} \langle 110 \rangle$ 和 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 组分增强. 而且, 沿板厚方向形成了明显的织构梯度, 随 S 值减小, 含剪切织构特征的 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 组分减弱, 以 $\{111\} \langle 110 \rangle$, $\{112\} \langle 110 \rangle$ 和 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 为代表的平面应变织构增强.

图 6 给出了 $S=0.5$ 和 0 层在不同压下率时 $\{111\} \langle 112 \rangle$, $\{111\} \langle 110 \rangle$, $\{112\} \langle 110 \rangle$ 和

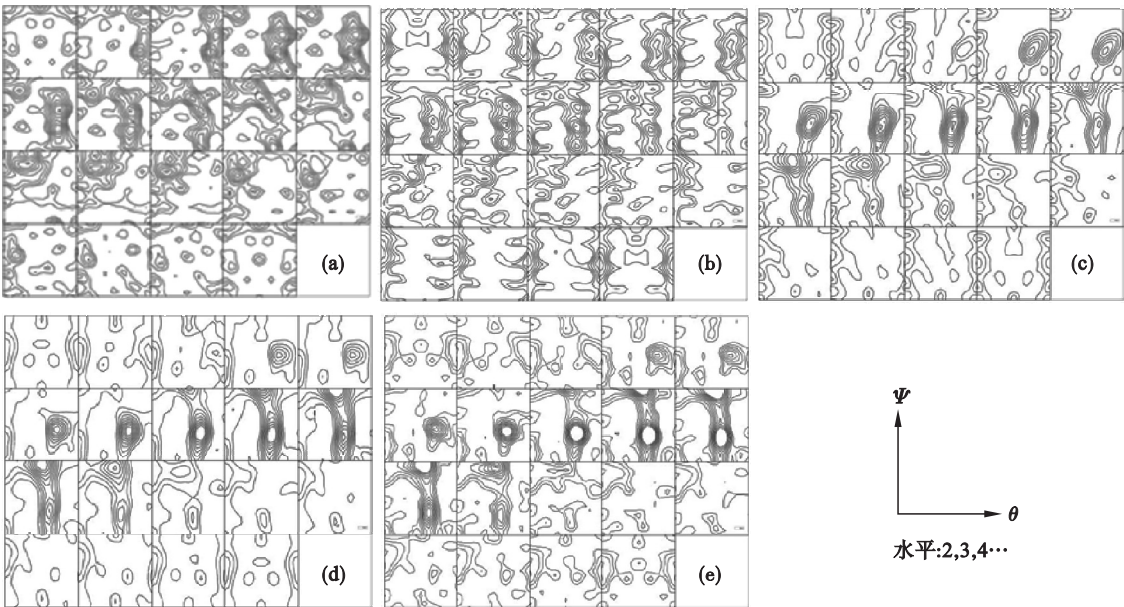


图 5 高硅钢超薄带轧制过程中不同压下率时 $S=0$ 层的 ODF 恒 φ 截面图
Fig. 5 Constant φ sections of the ODF at the layer of $S=0$ in high silicon steel ultra-thin sheets with different cold rolling reductions
(a)—30% ; (b)—50% ; (c)—70% ; (d)—91% ; (e)—97% .

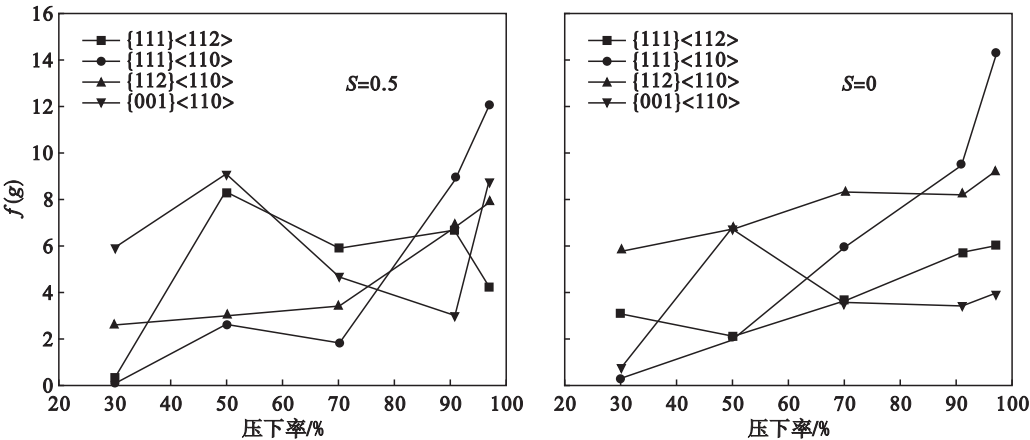


图 6 高硅钢超薄带冷轧过程中不同压下率时的主要织构组分取向密度
Fig. 6 Orientation densities of the primary texture components in high silicon-steel ultra-thin sheets with different cold rolling reductions

$\{001\} <110>$ 4种主要织构组分的取向密度特征. BCC金属冷轧时晶粒取向演变主要有如下两种途径^[9]:

(A) $\{110\} <001> \rightarrow \{111\} <112> \rightarrow \{111\} <110> \rightarrow \{223\} <110>$,

(B) $\{001\} <100> \rightarrow \{001\} <110> \rightarrow \{112\} <110> \rightarrow \{223\} <110>$.

由于 $\{111\} <110>$ 和 $\{112\} <110>$ 织构十分接近最终稳定取向 $\{223\} <110>$,故图6中 $S=0.5$ 和0层的 $\{111\} <110>$ 和 $\{112\} <110>$ 织构均随压下率增大而逐渐增强. $\{001\} <110>$ 织构是亚稳取向,随压下率增大先增强后减弱,当压下率为50%时,在 $S=0.5$ 和0层均出现峰值. $\{111\} <112>$ 在 $S=0$ 层随压下率增大缓慢增强,当压下率为50%时,在 $S=0.5$ 层中出现峰值,这是由于 $\{111\} <112>$ 织构位于欧拉空间中平面应变织构和剪切应变织构交汇的位置, $S=0.5$ 层的较高剪切应变促进了 $\{111\} <112>$ 组分的发展.

根据上述冷轧过程中形变织构的演变规律,下面分别针对 λ 和 η 再结晶织构的优化控制,讨论冷轧过程中需要保留的形变织构特征.

η 再结晶晶粒的主要形核位置在 $\{111\} <112>$ 形变基体的剪切带上.30%压下率时:从 $S=0.5$ 层到 $S=0$ 层均未形成强 $\{111\} <112>$ 织构,且由图3可知,在30%变形时剪切带很少形成,故30%以下的变形量不利于 η 再结晶织构的形成.压下率在50%~70%之间:在 $S=0.5$ 层形成了强 $\{111\} <112>$ 织构,且由图3可知此时也形成了大量的剪切带,故高硅钢退火薄板的 $S=0.5$ 层易形成强 η 再结晶织构;在 $S=0$ 层,50%压下率时 $\{111\} <110>$ 的织构强度与 $\{111\} <112>$ 相似,达到70%时 $\{111\} <110>$ 织构明显强于 $\{111\} <112>$,且 $S=0$ 层形成剪切带困难,故高硅钢薄带的中心层形成强 η 再结晶织构较难.由于剪切应变会同时增强剪切带的强度和 $\{111\} <112>$ 织构的强度,所以后续的研究工作可考虑采用非对称轧制或增大常化板 $S=0$ 层晶粒尺寸等方法,增强 $S=0$ 层的剪切应变,从而达到优化 $S=0$ 层 η 织构的目的.

λ 再结晶晶粒的主要形核位置为 λ 形变基体和 $\{114\} <481> \sim \{113\} <361>$ 形变基体.30%压下率时:在 $S=0.5$ 层形成了较强的 λ 形变织构, λ 形变织构不是稳定的汇聚取向,故此时较强的 λ 形变织构主要遗传自热轧织构;在 $S=0$ 层形成了较强的 γ 织构,但也存在与 γ 织构强度相

近的 λ , α 和 $\{114\} <481> \sim \{113\} <361>$ 织构.总体上,30%压下率的形变织构特征有利于再结晶时 λ 织构的形成,考虑到30%压下率的减薄效果有限,故该变形量更适合于二次冷轧法制备高硅钢超薄带的 λ 再结晶织构控制.压下率在50%~70%之间:从 $S=0.5$ 层到 $S=0$ 层,织构特征均为强 γ ,不利于 λ 再结晶织构的形成.压下率在91%~97%之间:从 $S=0.5$ 层到 $S=0$ 层,都形成了强 γ 和强 α 织构的特征;强 γ 形变织构不利于 λ 再结晶织构的形成,但对强 α 织构是有利的.Quadir等^[10]在研究大变形冷轧IF钢中 α 形变基体的再结晶现象时发现,压下率超过85%时, α 形变晶粒会发生取向分裂,形成较多的形变带,易形成 $\{001\} <210>$, $\{114\} <481> \sim \{113\} <361>$ 等有利于 λ 晶粒形核的形变基体,而且伴随取向分裂存在的较大形变储能,也为 $\{001\} <210>$ 和 $\{114\} <481> \sim \{113\} <361>$ 等低储能形变基体的形核创造了条件.因此,在大变形下形成 $\{001\} <110> \sim \{112\} <110>$ 织构有利于 λ 再结晶织构的优化.

3 结 论

1) 本研究利用轧制法成功制备了厚度为0.10 mm的高硅钢超薄带,并通过分析变形过程中的织构演变规律,提出了分别有利于 λ 和 η 再结晶织构优化的形变织构控制方法.

2) 50%~70%压下率有利于 η 再结晶织构优化,易于促进再结晶过程中 $S=0.5$ 层强 η 再结晶织构的形成.小于30%压下率和91%~97%压下率均有利于 λ 再结晶织构优化.30%的压下率更适合于二次冷轧法制备高硅钢超薄带时 λ 再结晶织构控制.91%~97%的大变形则可促进 $\{001\} <210>$ 和 $\{114\} <481> \sim \{113\} <361>$ 等有利形变基体的形成,并为这些低储能形变基体的形核创造条件.

参考文献:

- [1] Ruiz D, Ros-Yanez T, Vandenbossche L, et al. Influence of atomic order on magnetic properties of Fe-Si alloys [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2005, 290: 1423-1426.
- [2] Liu J L, Sha Y H, Zhang F, et al. Development of $\{210\} <001>$ recrystallization texture in Fe-6.5 wt.% Si ultra-thin sheets [J]. *Scripta Materialia*, 2011, 65: 292-295.

(下转第654页)