

弯曲冷加工工艺对冷轧无取向硅钢性能的影响

张智义¹ 李亚东¹ 陈春梅¹ 高振宇¹ 刘文鹏¹ 毛卫民² 杨平²

(1 鞍钢集团钢铁研究院,鞍山 114009;2 北京科技大学材料科学与工程学院,北京 100083)

摘要 分析了不同的冷弯曲工艺的冷轧无取向硅钢(0.003C,0.80Si,0.28Mn,0.015P,0.003S,0.24Als)经750℃2h去应力退火后的组织和性能。结果表明,再结晶晶粒弯曲变形后,去应力退火过程表面晶粒的长大使钢板中的不利{111}面织构明显减弱,{111} <112>织构组分也不再突出;还出现了一定量有利的Goss({110} <001>)织构。该弯曲20次工艺既能改善冲压性能,又提高去应力退火后电磁性能。

关键词 无取向硅钢 弯曲 冷变形 退火 织构

Influence of Bending Cold Working Process on Properties of Cold Rolling Non-Oriented Silicon Steel

Zhang Zhiyi¹, Li Yadong¹, Chen Chunmei¹, Gao Zhenyu¹, Liu Wenpeng¹, Mao Weimin² and Yang Ping²
(1 Ansteel Group Iron & Steel Research Institute, Anshan 114009;
2 School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract The microstructures and textures in final products of the non-oriented silicon steel(0.003% C,0.80% Si, 0.28% Mn,0.015% P,0.003% S,0.24% Als) with different cold bending process and stress-relief annealing at 750 °C for 2 h are determined and analyzed. The results show that the preferred nucleation and preferred growth of new grains at surface in stress-relief annealing strongly reduce the detrimental {111} texture, particularly the {111} <112 > texture component is not predominant and the beneficial Goss texture of {110} <001 > is promoted. The proposed bending 20 times working process can improve both formability and magnetic properties of stress relief annealed sheet products.

Material Index Non-Oriented Silicon Steel, Bending, Cold Deformation, Annealing, Texture

提高无取向硅钢的硅含量,可以显著降低铁损,但磁感也随之降低^[1]。人们熟知,改善钢板织构分布可以同时降低铁损并提高磁感,尤其对磁感的改进会比较明显,因此得到了持续的关注和不断深入的开发研究^[2-6]。近年来国家不断提高高效电机的能效比,除对冲片后进行去应力退火外,对硅钢的要求更低的铁损和更高磁感,传统工艺已很难达到要求。热轧板常化处理可以即降低铁损,又提高磁感,但增加一次热处理,使生产成本大幅提高。本文尝试通过对传统工艺生产的成品进行了冷变形处理,再利用高效电机去应力退火工艺,达到提高铁芯最终使用电磁性能的目的。

1 试验材料及方法

选用无取向硅钢成品试样同一位置连续取若干组试样,试样厚度为0.5mm,其成分(%)为0.003C,0.80Si,0.28Mn,0.015P,0.003S,0.24Als,其它成分均小于0.005%。在图1所示的冷弯装置上按表1的不同弯曲制度的沿轧制方向弯曲工艺处理(每向同一方向弯90°计作1次)。弯曲后的试样进行力学性能检测。将弯曲后的试样加工成横纵向

各8片30mm×300mm方圈试样,随后将冷变形形

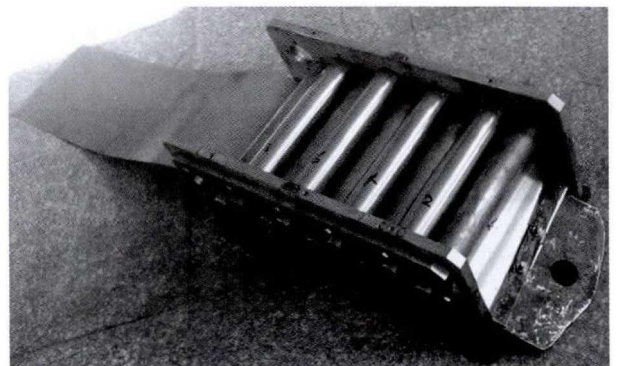


图1 弯曲装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of bending device

表1 反复弯曲制度
Table 1 Repeated cold-bending scheme

工艺编号	弯心半径/mm	弯曲/次
0 [#]	无	0
1 [#]	10	10
2 [#]	10	20
3 [#]	10	6
4 [#]	15	20
5 [#]	15	30
6 [#]	15	40

样在 25% H₂ + 75% N₂ 气氛热处理炉中进行 750 °C 保温 2 h 模拟冲片去应力退火。退火后观察各金相组织,用截点法测量再结晶尺寸。电磁性能测量采用方圈试样按 GBT 3655-2008 用爱泼斯坦方圈测量电工钢片(带)磁性能的方法在 BROCKHAUS MEASUREMENTS MPG200D 测磁设备上。织构测量在采用西门子 D-5000 型 X 射线衍射仪和 Mo α 靶分别在各个试验阶段试样的表面测量 {110}、{200} 和 {211} 3 个不完全极图,然后用级数展开法计算取向分布函数后绘制的 ODF(取向分布函数) $\Phi 2 = 45^\circ$ 截面图。

2 试验结果

2.1 力学性能

表 2 给出了部分试样经冷弯处理后的力学性能,冷弯变形使钢的屈服强度和抗拉强度均有所提高,特别是屈强比提高较明显,强度提高的同时,也提高铁芯冲压时铆接力,对提高冲压铆接性能有利^[7]。

2.2 显微组织形貌

表 2 弯曲前后硅钢力学性能

Table 2 Mechanical properties of silicon steel before and after bending process

工艺编号	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$R_{p0.2}/R_m$	$A_{50}/\%$
0 [#]	397	267	0.67	41.5
1 [#]	415	326	0.79	39.8
2 [#]	408	328	0.80	37.4
3 [#]	402	315	0.78	38.3
4 [#]	410	330	0.80	38.5
5 [#]	415	335	0.81	39.2
6 [#]	421	345	0.82	37.4

冷变形试样经去应力退火后的金相组织如图 2 所示,图片为钢板全厚度照片,上下为钢板两个表面。未冷弯的 0[#]样与其它试样厚度未观察到变化,说明冷弯对钢板厚度没有影响。未作弯曲变形处理的 0[#]试样在模拟退火处理后没有发生明显变化,退火后仍为尺寸较小的等轴晶粒。

经弯曲变形后再退火处理各试样中的晶粒组织在厚度方向不均匀。如 4[#]试样中不同部位所观察到的组织有全部细等轴晶区、粗大晶粒和细等轴晶粒混合区、及以粗大晶粒为主的区域。晶粒组织的不均匀性应该与弯曲变形处理时变形区域的不均匀分布有关。

当弯曲变形次数较少的 3[#]试样,退火处理后发现少量粗大晶粒组织,没有长大的晶粒尺寸与原始组织(0[#]试样)没有明显变化,原始平均晶粒尺寸为 28 μm ,退火过程中未发生明显的组织变化,因而织构也基本与未弯曲变形的试样一致。当弯曲次数达到 10 次的 1[#]试样,退火后出现了大量的大尺寸晶粒(平均晶粒尺寸约为 150 μm),但仍有少量原始小晶粒组织。当弯曲变形次数超过 20 次时,弯曲变形再退火处理的部分试样中出现了粗大再结晶晶粒组织,晶粒尺寸长大到贯穿整个试样厚度,如 2[#]、4[#]、5[#]、6[#]。弯曲次数相同,弯曲半径减少,有利于晶粒长大(如 2[#]与 4[#]样)。当弯曲半径相同时,随弯曲次数增加,晶粒尺寸更易长大(如 4[#]、5[#]及 6[#]试样)。

2.3 织构分析

图 3 给出了各试样的经不同弯曲加工并退火后钢板织构的取向分布函数 $\Phi 2 = 45^\circ$ 截面图。未变形

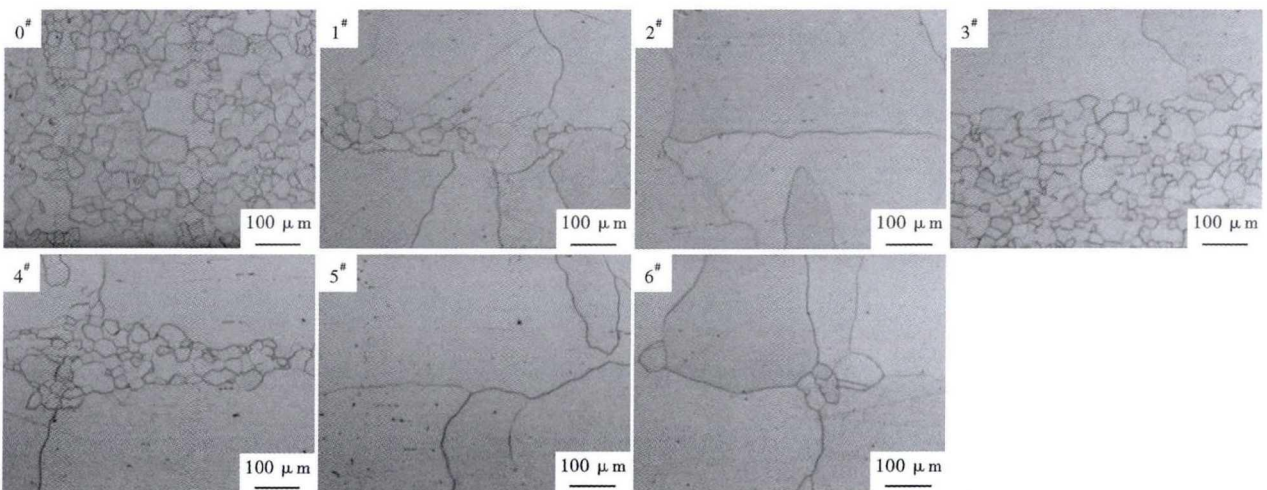


图 2 0[#] ~ 6[#]弯曲制度加工的硅钢 750 °C 2 h 退火后组织(纵向)

Fig. 2 Microstructures of silicon steel by 0[#] ~ 6[#] bending process and annealing at 750 °C for 2 h (longitudinal)

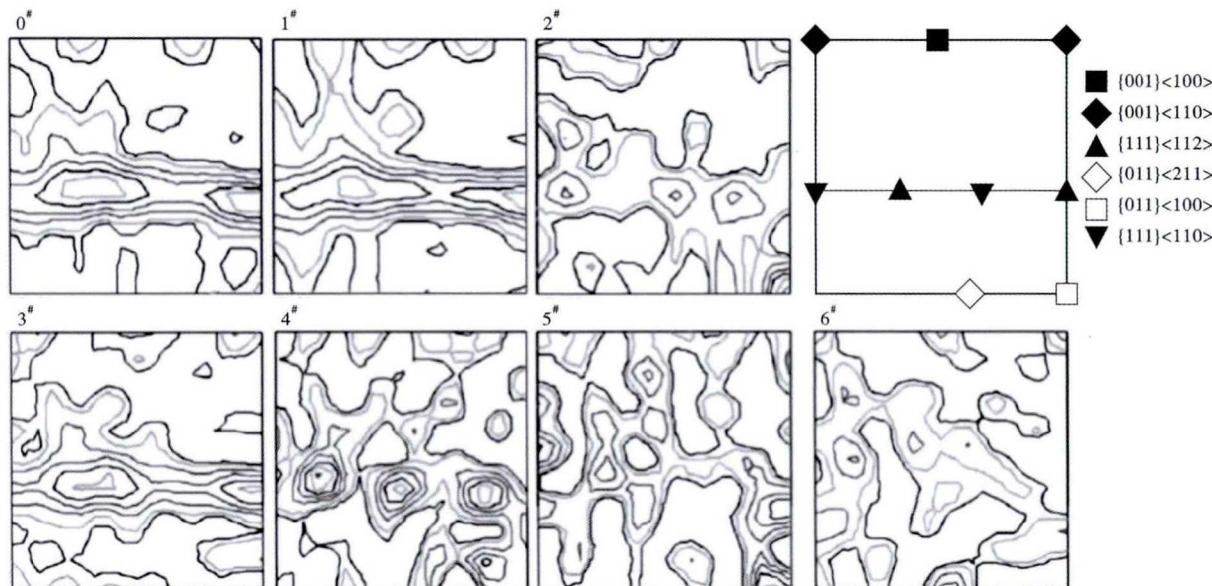


图 3 0# ~ 6# 弯曲加工并退火后钢板织构的取向分布函数 $\Phi_2 = 45^\circ$ 截面图

Fig. 3 Orientation distribution functions $\Phi_2 = 45^\circ$ section diagram of texture of steel sheet by 0# ~ 6# bending process and annealing

试样织构为明显的 $\{111\}$ 面织构, 其中 $\{111\} < 112 >$ 织构组分更加突出。经过变形成试样出现粗大晶粒组织的同时钢板织构发生了明显变化, 如 2#、4#、5#、6# 主要表现为原钢板中的 $\{111\}$ 面织构明显减弱, $\{111\} < 112 >$ 织构组分也不再突出; 变形次数较多的 2# 和 5# 试样中还出现了一定量的 Goss ($\{110\} < 001 >$) 织构。

2# 与 4# 试样退火后尚保留一定的 $\{111\}$ 面织构, 其中 4# 试样 $\{111\}$ 面织构略多。这应该与检测试样晶粒组织的不均匀性有一定关系。当检测区域含有一定细等轴晶粒区时就可以检测到明显的 $\{111\}$ 面织构。

观察发现, 不是所有弯曲变形试样都可以观察到粗大晶粒组织以及 $\{111\}$ 织构明显减弱的现象。当弯曲变形次数超过 20 次时, 原试样中的 $\{111\}$ 织构明显减弱或变得不再连续。

2.4 电磁性能

表 3 是弯曲退火后测试的电磁性能情况, 退火工艺模拟电机用户冲压后去应力退火工艺制度 $750^\circ\text{C} \ 2 \ \text{h}$ 。不同弯曲条件下的各试样退火后铁损相差 $0.2 \ \text{W/kg}$ 左右, 弯曲处理退火后试样铁损性能有一定改善。当弯曲次数达到 20 次以上的试样的磁感退火后改善较多, 较未弯曲试样提高约 $300 \ \text{Gs}$ ($0.03 \ \text{T}$), 磁感有明显提高。

3 结果讨论

根据所观察的原始晶粒组织及其在不同条件弯

表 3 0# ~ 6# 弯曲加工退火后钢板磁性性能

Table 3 Magnetic properties of steel sheet by 0# ~ 6# bending process and annealing

编号	$P_{1.5/50}/$ ($\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$P_{1.25/50}/$ ($\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$B_{5000/50}/\text{T}$
0#	5.016 4	3.451 1	1.724 9
1#	5.024 6	3.442 5	1.733 4
2#	4.934 6	3.386 5	1.755 8
3#	5.059 7	3.463 1	1.734 4
4#	4.893 6	3.395 5	1.760 7
5#	4.818 9	3.334 1	1.758 8
6#	4.776 7	3.310 2	1.762 1

曲变形后退火试样的晶粒组织和织构的观察可以初步判断, 部分钢板试样中出现的粗大晶粒组织是在弯曲变形所引起的组织内部储存能的驱动下发生新的再结晶过程所造成的。属于常规的再结晶晶粒长大, 不属于晶粒的异常长大行为所导致的二次再结晶结果。

图 4 给出了钢板弯曲示意图, 当钢带弯曲时内部应力发生变化, 靠近弯曲中心一侧表面产生压应力, 远离弯曲中心表面产生拉应力。表面应力最大, 中心中性面没有产生应力。当达到临界变形时造成了粗大的晶粒组织, 表面组织较心部易于长大。当金属的冷变形量和内部的储存能接近驱动再结晶的最低值、并在加热条件下发生再结晶时, 有限的缺陷密度使得再结晶的形核率比较低, 进而在随后加热过程中生长的再结晶晶粒数目很少, 造成了再结晶后粗大的晶粒组织。

从所实施的弯曲变形条件看, 20 次的弯曲变形

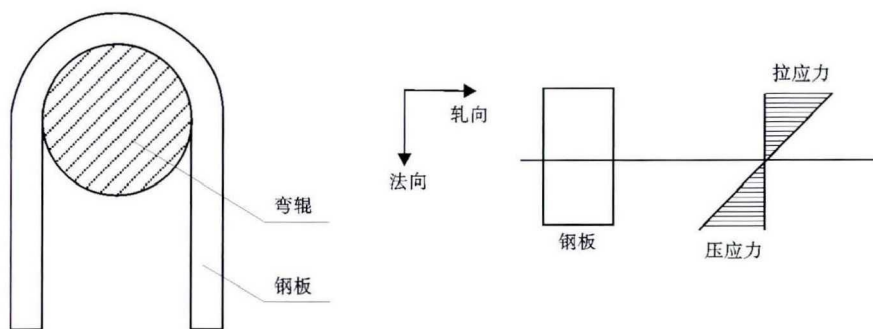


图4 钢板弯曲示意图及厚度方向应力分布

Fig. 4 Schematic of bending of steel sheet and distribution of strain along thickness direction

大约可达到临界变形所要求的最低变形量,低于20次弯曲不能造成明显的再结晶现象。

弯曲变形之后的再结晶形核过程中,当再结晶核的取向大体不处于原始试样中的主要织构组分内时,可以在再结晶过程中与基体基本保持高的取向差,既其晶界可基本保持与基体始终是大角度晶界,因而易于长得非常粗大。

一般认为,在非氧化性气氛中加热时晶粒的 $\{110\}$ 面作为表面时其表面能比较低^[8]。如此不能排除退火后钢板中出现的 $\{110\} <001>$ Goss 织构与其 $\{110\}$ 低表面能有一定关系;即有一定程度的表面能诱发晶粒异常长大的可能。但是不是所有粗大晶粒组织的钢板试样都显示出明显的 $\{110\} <001>$ Goss 织构。这可能与 Goss 织构产生的位置有关,一般认为,Goss 织构产生于钢表面的次表面。而当钢板弯曲时,应力由表面向心部逐渐减小,所以次表面的 Goss 得到了优先长大条件。钢板厚度方向织构分布不均匀,遗传给成品板,造成成品板厚度方向织构不均匀^[9]。表面的有利织构优先长大,使钢板有不利织构减弱,这是退火后磁感明显提高的原因。

4 结论

(1) 弯曲变形使随晶粒长大磁滞损耗降低,但涡流损耗增加,铁损有一定改善。不利织构强度的减弱,使磁感明显提高,磁感改善较明显。钢板退火后电磁性能改善明显。当平均晶粒尺寸达到 $150 \mu\text{m}$ 时,铁损 $P_{1.5}$ 达到 4.80 W/kg 左右,磁感 B_{5000} 达到 1.76 T 左右,磁性能达到最优。

(2) 弯曲变形增加了退火晶粒位错密度,从而使强度提高,提高了冲片时铆接强度,有利于叠铆性能。

(3) 再结晶晶粒弯曲变形后,退火过程表面晶粒的长大使钢板中的不利 $\{111\}$ 面织构明显减弱, $\{111\} <112>$ 织构组分也不再突出;还出现了一定量有利的 Goss ($\{110\} <001>$) 织构。

(4) 无取向硅钢经弯曲退火,当弯曲次数达到20次以上,平均晶粒尺寸由 $28 \mu\text{m}$ 长大到 $150 \mu\text{m}$ 。弯曲变形使表面与应变状态不同,表面晶粒优先长大,上下表面晶粒接触后停止长大,晶粒的长大到 $200 \mu\text{m}$ 以上。晶粒长大是受弯曲变形的储能增加,促进晶粒继续长大,这与二次再结晶不同。弯心在 $10 \sim 20 \text{ mm}$ 变化时,弯曲半径影响不大,晶粒长大受弯曲次数影响较大。

参考文献

- [1] 何忠治. 电工钢[M]. 北京:冶金工业出版社,1997:84-86.
- [2] 毛卫民. 金属材料的晶体学结构与各向异性[M]. 北京:科学出版社,2002:118-125.
- [3] Ray R K and Jonas J J. Transformation textures in steels[J]. International Materials Reviews,1990,35(1):1-36.
- [4] Wolfgang Bleck, Rolf Gro Bterlinden and Ulrich Lotter, et al. Textures in Steel Sheets[J]. Steel Research,1991,62(12):580-586.
- [5] Inagaki Hirotsuke. Fundamental Aspect of Texture Formation in Low Carbon Steel[J]. ISIJ International,1994,34(4):313-321.
- [6] Toth L S, Jonas I J and Daniel D, et al. Development of Ferrite Rolling Textures in Low and Extra Low-Carbon Steels[J]. Metallurgical Transactions,1990,21(4):2985-3000.
- [7] 张玉刚,孙建宝. 成分及热处理工艺对无取向硅钢冲片铆接质量的影响[J]. 金属热处理,2019,44(8):90-94.
- [8] 毛卫民,杨平,陈冷,等. 材料织构分析原理与检测技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2008:41-48.
- [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.

张智义(1974-),男,硕士(2009年北京科技大学),高级工程师,2000年佳木斯大学(本科)毕业,冷轧无取向硅钢研究。E-mail:ZHIYI-ZHANG@163.com

收稿日期:2020-05-03