

· 组织和性能 ·

高牌号无取向硅钢热变形条件下动态再结晶组织特征

光红兵 林 媛 张文康

(山西太钢不锈钢股份有限公司,太原 030003)

摘 要 为了进一步降低高牌号无取向硅钢制造成本,通过优化热变形工艺,促进动态再结晶,实现不常化“一次冷轧”法生产低成本高牌号硅钢成为一种可能。实验室以 2.5% (Si + Al) 硅钢为基,为尽可能地接近实际粗轧情况,通过 Gleeble-1500D 热模拟试验机以 0.1 s^{-1} 恒应变速率对加热温度 1 100 ~ 1 200 °C,热变形温度 900 ~ 1 050 °C,变形量 20% ~ 65%,进行模拟。通过显微组织的观察,结果表明:在恒变形速率下,原始组织为等轴晶,热变形温度越高、变形量越大则越有利于动态再结晶的发生,而加热温度 ($\leq 1\ 200\text{ °C}$) 对动态再结晶无显著影响。

关键词 高牌号硅钢 动态再结晶 变形温度 变形量

Dynamic Crystal Structure Characteristics of High Grade Non-Oriented Silicon Steel under Hot Deformation Condition

Guang Hongbing, Lin Yuan and Zhang Wenkang

(Shanxi Taigang Stainless Steel Co. Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract In order to further decrease the manufacturing costs of high grade non-oriented silicon steel, through optimizing process of hot deforming, dynamic crystal was promoted, low-cost high grade non-oriented producing by the method of no-normalizing “one-step cold rolled” would be one possibility. Based on silicon steel of 2.5% (Si + Al), as close as possible to the actual production situation, the process were simulated by Gleeble-1500D thermal simulation test machine, with constant strain rate 0.1 s^{-1} and the heating temperature of 1 100 ~ 1 200 °C, the thermal deformation temperature of 900 ~ 1 050 °C, deformation amount of 20% ~ 65%. Through the observation of microstructure, the results showed that, The higher thermal deformation temperature and the larger the deformation amount, the more conducive to the occurrence of dynamic recrystallization. But the heating temperature ($\leq 1\ 200\text{ °C}$) had no significant effect on the dynamic recrystallization

Material Index High Grade Silicon Steel, Dynamic Recrystallization, Deformation Temperature, Deformation Amount

高牌号无取向硅钢产品,一般含 $\geq 2\%$ (Si + Al),是制造中、大型电机和发电机铁芯不可缺少的核心材料,但采用连铸法生产遇到的主要困难就是冷轧后产品表面沿轧向常出现凸凹不平的瓦垅状缺陷,这使叠片系数降低约 2%,磁性恶化和绝缘膜层间电阻明显降低,直接影响了电机或发电机产品的使用寿命^[1]。

$\leq 0.01\%$ C 和 $\geq 2\%$ (Si + Al) 高牌号冷轧硅钢处于 α 单相区,铸坯中(100)柱状晶尺寸粗大,热轧过程中由于动态回复和再结晶缓慢而不能彻底破碎,热轧板在板厚中心附近为十分粗大的伸长形变晶粒或纤维组织,经冷轧、最终退火难以再结晶,成品表面出现了瓦垅状缺陷^[2]。已经证明热轧板中板厚中心附近伸长的形变晶粒数量小于 30% 时,产品无此缺陷^[3]。

当前本文研究了在 10 s^{-1} 恒变形速率下热模拟压缩试验,找出热变形工艺对微观组织的影响规律。

1 试验材料及试验方法

1.1 试验材料

试验材料选用大生产 2.5% (Si + Al) 高牌号硅钢连铸坯,从铸坯不同部位加工成 $\Phi 8\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 的圆柱体标准试样,化学成分如表 1 所示。

1.2 试验方法

硅钢铸坯尺寸 $230\text{ mm} \times 1\ 060\text{ mm} \times L$,从铸坯上取下一块横断面试样,试样尺寸 $230\text{ mm} \times 1\ 060\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,将断面经磨光酸浸后,观察其低倍组织。根据断面低倍组织分别从等轴晶区域和柱状晶区域加工 $\Phi 8\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 的圆柱体试样,且圆柱体高度方向要求垂直于铸坯表面,如图 1 所示。

将加工好的圆柱体试样在 Gleeble-1500D 热模

表 1 试验钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of test steel/%

C	Mn	Si	S	P	Al	N
0.002	0.30	2.2	0.002	0.009	0.3	0.002

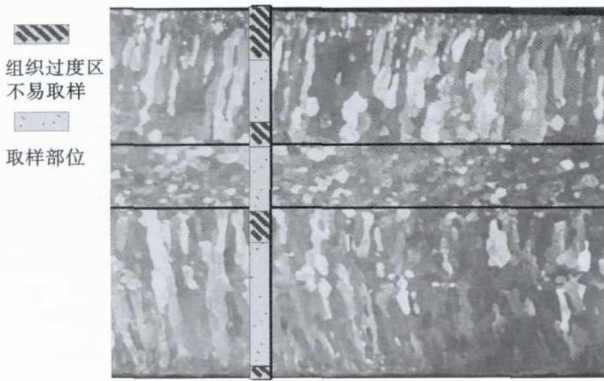


图 1 230 mm 铸坯低倍组织和热模拟取样点

Fig. 1 Macrostructure and sampling point of 230 mm casting slab

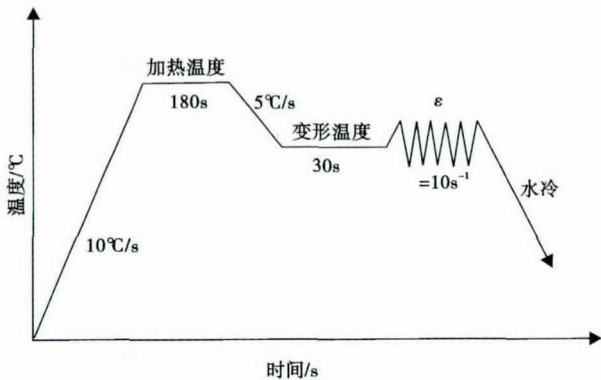


图 2 Gleeble-1500D 热模拟试验工艺

Fig. 2 Testing process by Gleeble-1500D thermal simulation machine

试验机上进行单道次压缩试验,试验工艺如图 2 所示。

2 试验结果及分析讨论

2.1 加热温度对显微组织的影响

林均品等人研究了镁铝合金在热轧过程中加热温度对杂质或析出相的影响,以及这些析出相对热轧动态再结晶的影响^[4]。为此,按变形量设计了两组不同加热温度的对比压缩试验:第一组,等轴晶试样分别于 1 100 °C、1 200 °C 下加热,在 950 °C (变形温度) - 10 s⁻¹ (变形速率) - 65% (变形量) 条件下单道次压缩变形;第二组,等轴晶试样分别于 1 100 °C、1 150 °C 下加热,在 950 °C (变形温度) - 10 s⁻¹ (变形速率) - 20% (变形量) 条件下单道次压缩变形。两组试验后金相组织对比如图 3 所示。

从 65% 的变形量看,1 100 °C 加热变形后的组织图 3 (a) 与 1 200 °C 加热变形后的组织图 3 (b) 非常相似,多为细小的等轴晶粒,与原始组织相比明显细化。压缩变形后形变组织本应主要为变形晶粒,而且在大应变量的条件下,应该为变形严重的伸长晶粒,然而本实验中却得到了主要为等轴晶粒的变形组织。其原因是发生了动态再结晶。

从 20% 的变形量看,1 100 °C 加热变形后的组织图 3 (c) 与 1 150 °C 加热变形后的组织图 3 (d) 也非常相似,均为粗大的等轴晶,晶粒大小与变形前原

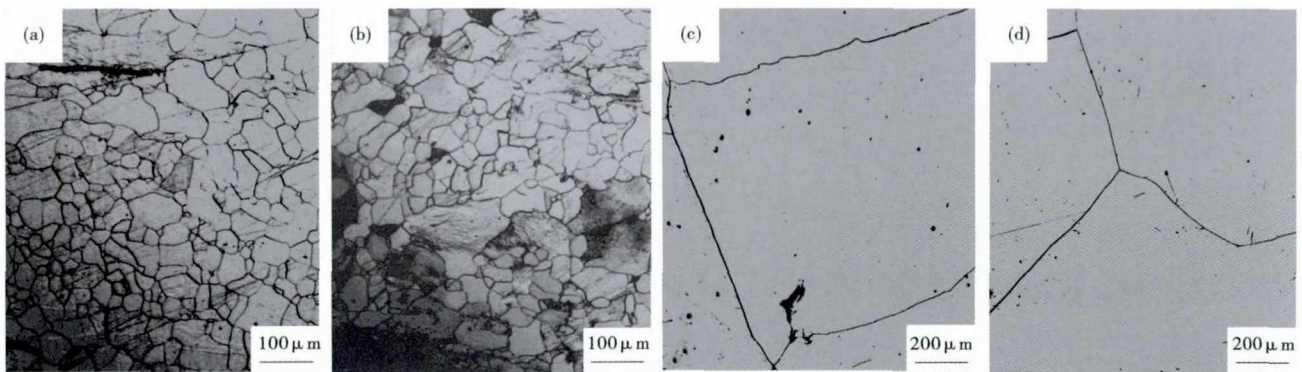


图 3 1 100 °C (a)、1 200 °C (b)、1 100 °C (c) 和 1 150 °C (d) 加热 950 °C - 10s⁻¹, 65% (a) (b) 和 20% (c) (d) 热模拟对试验钢组织的影响

Fig. 3 Influence of thermal simulation with heating at 1 100 °C (a), 1 200 °C (b), 1 100 °C (c) and 1 150 °C (d), 950 °C - 10s⁻¹, 65% (a) (b) and deformation at 20% (c) (d) on structure of test steel

始等轴晶粒相当,无明显细化,只能认为试样变形量较小,且变形温度较高,组织发生了动态“完全回复”。

从以上每组试验看,加热温度低于 1 200 °C 时对粗轧板坯动态回复和再结晶无显著影响。这可能与

高牌号硅钢钢质纯净,有害杂质含量均较低, [C] + [S] + [N] + [O] ≤ 0.012%, 因此在热轧过程中析出相含量较少,甚至仍以固溶态存在,不足以影响动态回复和再结晶行为所致。从以上两组试验对比看,变形量对粗轧板坯动态再结晶影响显著。

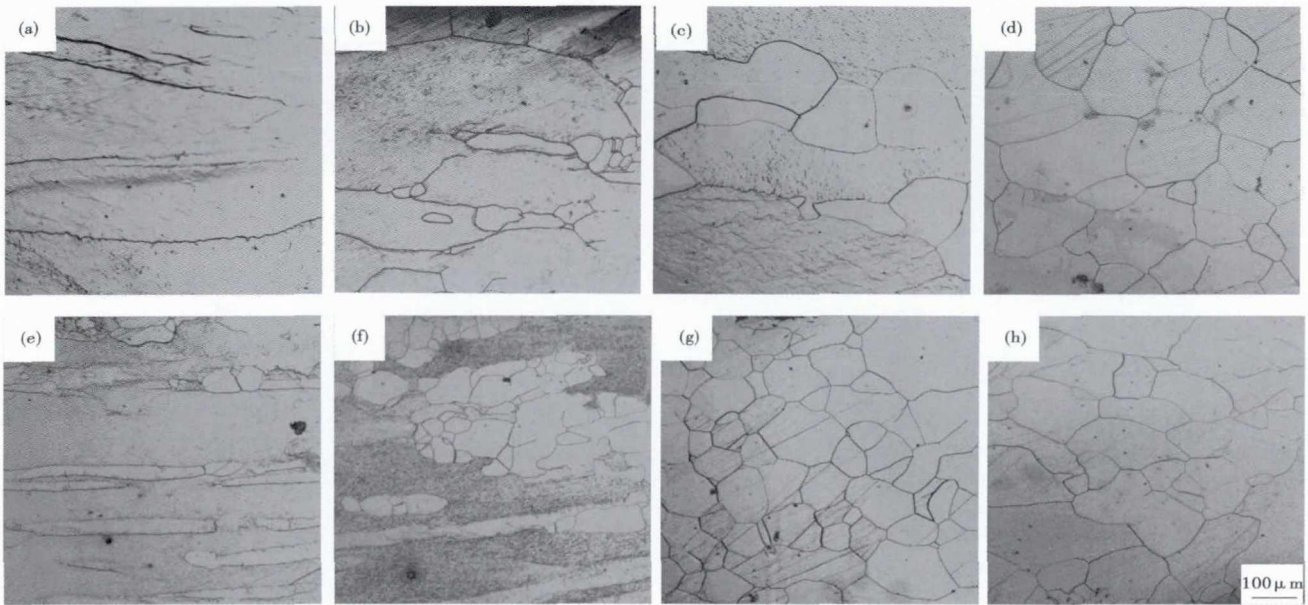


图4 1 100 ℃加热,900 ℃(a),950 ℃(b),1 000 ℃(c)和1 050 ℃(d)35%变形和900 ℃(e),950 ℃(f),1 000 ℃(g)和1 050 ℃(h)50%变形对试验钢组织的影响

Fig. 4 Influence of heating at 1 100 ℃, deforming at 900 ℃ (a), 950 ℃ (b) 1 000 ℃ (c) and 1 050 ℃ (d) with 35% and deforming at 900 ℃ (e), 950 ℃ (f), 1 000 ℃ (g) and 1 050 ℃ (h) with 50% on structure of test steel

2.2 变形温度对显微组织的影响

按变形量设计了两组不同变形温度的对比压缩试验:第一组,等轴晶试样于1 100 ℃下加热,分别在900 ℃、950 ℃、1 000 ℃、1 050 ℃(变形温度) - 10s^{-1} (变形速率) - 35%(变形量)条件下单道次压缩变形;第二组,等轴晶试样于1 100 ℃下加热,分别在900 ℃、950 ℃、1 000 ℃、1 050 ℃(变形温度) - 10s^{-1} (变形速率) - 50%(变形量)条件下单道次压缩变形,试验后金相组织如图4所示。

从35%的变形量看,变形温度为900 ℃时,主要表现为纹理清晰的粗大、伸长纤维状组织;变形温度为950 ℃时,粗大伸长纤维组织内开始出现个别细小的新晶粒,但新晶粒受变形的影响呈扁平状;然而在同样条件下(变形温度900 ℃、950 ℃,变形速率 10s^{-1} ,变形量35%)热变形的普碳钢变形组织均为完全动态再结晶组织^[5],可见高牌号硅钢动态再结晶较困难。

当变形温度在1 000 ℃和1 050 ℃时,变形组织中出现了细化的等轴再结晶晶粒,其中:1 000 ℃-35%的变形时,等轴晶比例约占50%;1 050 ℃-35%的变形时,等轴晶比例100%。总之,35%变形量的试验,从900 ~ 1 050 ℃热变形后的组织从回复型图4(a,b)向部分再结晶型图4(c)再到完全再结晶型图4(d)转变。

从50%的变形量看,在试验温度范围内变形组

织全产生了再结晶新晶粒,只是变形温度为900 ℃时,温度较低,出现的个别细小新晶粒,受大变形的影响与粗大纤维组织一样沿流变方向伸长,此时加工硬化较强,动态回复效果弱;变形温度为950 ℃时,变形组织除以上粗大和细长的纤维组织外,已出现细化且聚集的约占整个晶粒40%的等轴再结晶晶粒,且呈孤岛状分布于变形的纤维组织中;变形温度在1 000 ℃和1 050 ℃时,变形组织为完全等轴再结晶晶粒,只是1 050 ℃变形后等轴晶粒较1 000 ℃等轴晶晶粒要大近一倍。这表明加大变形量促进了铁素体动态再结晶行为;同时,从950 ~ 1 050 ℃随着温度的升高,变形组织等轴晶比例增多,且等轴晶晶粒逐渐增大。

从35%、50%变形量的不同变形温度试验中,从900 ℃升至1 050 ℃,变形组织由回复型向再结晶型,由部分再结晶向完全再结晶逐渐转变。这可以通过Zener-Hollomon参数来解释,该参数越小,动态再结晶越易发生。Zener-Hollomon参数就是综合描述在热加工过程形变温度及应变速率等影响的一个重要参数,一般可表示为:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \quad (1)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ -应变速率, Q -表观形变激活能, R -气体常数, T -形变温度。

从公式(1)可见,在 $\dot{\epsilon}$ 、 Q 一定的条件下, Z 随 T 的升高而降低,也即提高变形温度使动态再结晶容

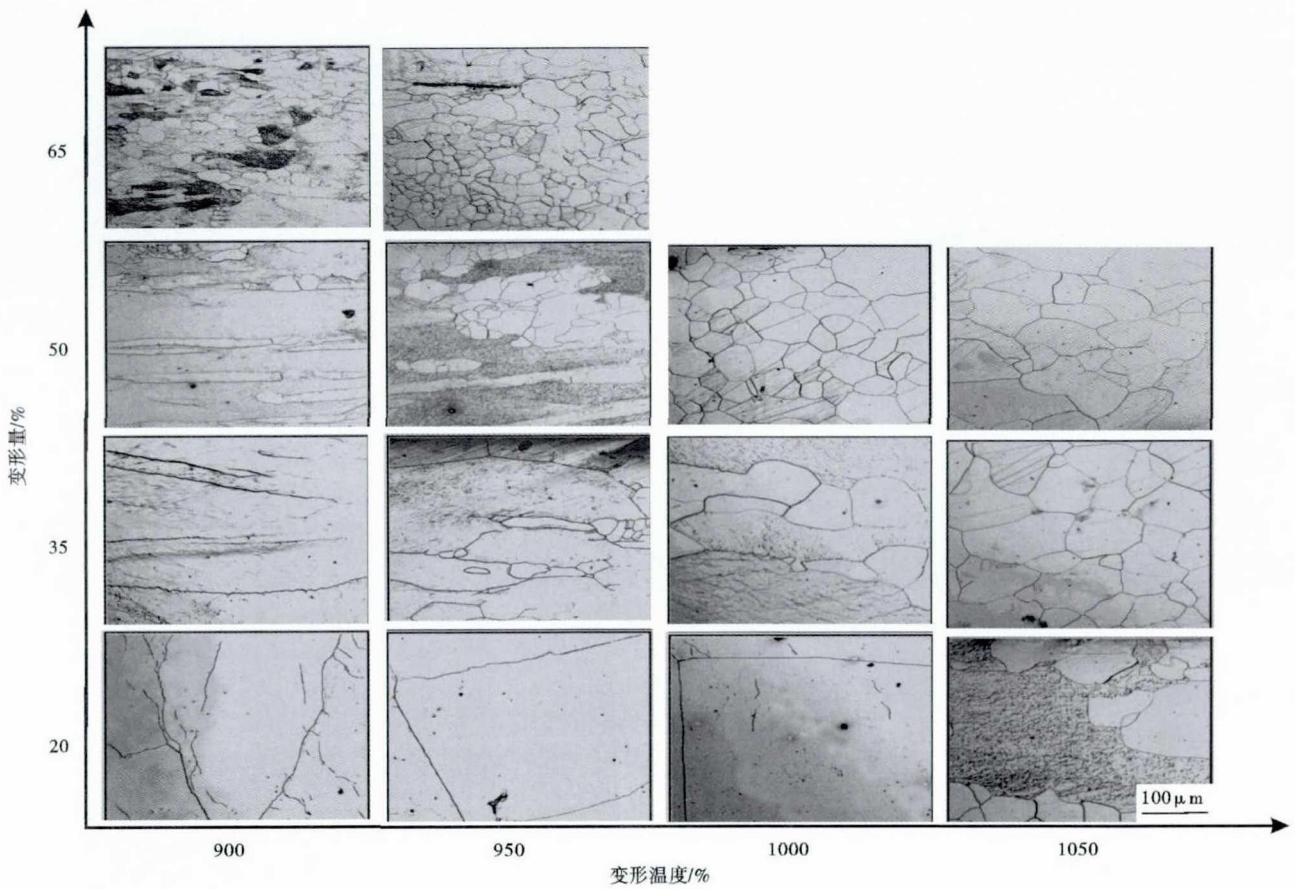


图 5 变形温度和变形量对试验钢金相组织的影响

Fig. 5 Influence of deformation temperature and reduction on structure of test steel

易发生。

2.3 变形量对显微组织的影响

为了研究变形量对动态再结晶的影响,为此按变形温度设计了两组不同变形量的对比压缩试验:第一组,等轴晶试样于1100℃下加热,变形温度900℃,变形速率 $10s^{-1}$,变形量分别在20%、35%、50%、65%条件下单道次压缩变形;第二组,等轴晶试样于1100℃下加热,变形温度950℃,变形速率 $10s^{-1}$,变形量分别在20%、35%、50%、65%条件下单道次压缩变形。

从图5可见,变形温度为900℃时,20%~35%的变形量的变形组织为伸长变形的回复组织,50%的变形量开始出现细小再结晶新晶粒,但新晶粒受变形量增大的影响也出现伸长变形,65%的变形量在原粗大变形晶粒的晶界处出现了约28%的细小再结晶等轴晶粒;而变形温度在950℃时,20%的变形量的变形组织仍为粗大的等轴晶粒,由于该晶粒尺寸与原始晶粒尺寸相当,称之为完全回复组织,35%的变形量开始出现细小再结晶晶粒,同样受变形的影响呈扁平状,50%的变形量出现了约30%细

小、聚集、等轴的再结晶晶粒,65%的变形量变形组织为细小的完全再结晶等轴晶粒。

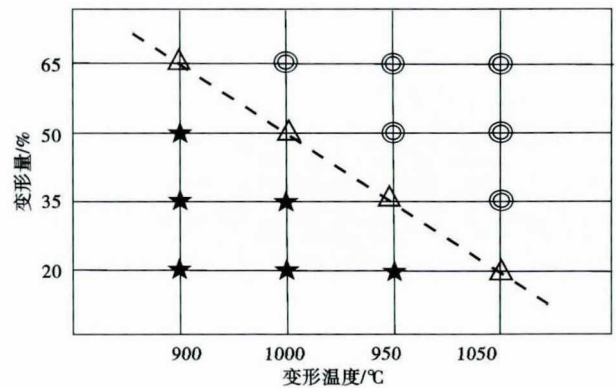


图 6 变形温度和变形量对等轴晶组织演变的影响

注:◎变形组织完全再结晶;△变形组织部分再结晶(出现细小等轴晶);★变形组织以回复组织为主

Fig. 6 Influence of deformation temperature and reduction on equi-axial crystal structure evolution

Notes: ◎complete recrystallization of deformation microstructure; △partial recrystallization of deformation microstructure (fine equiaxial crystal appearing); ★main deformation structure is recovery structure

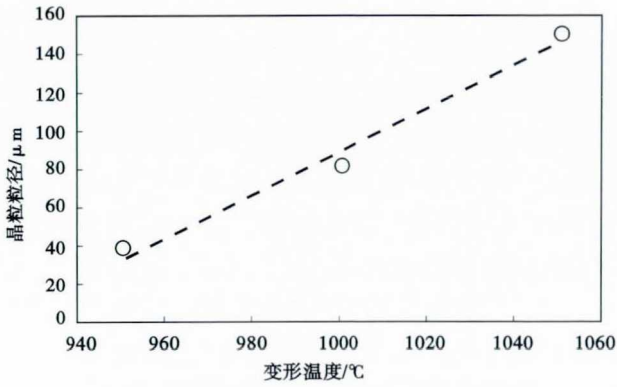


图7 变形温度对试验钢完全再结晶晶粒尺寸的影响

Fig. 7 Influence of deforming temperature on complete recrystallization grain size of test steel

图5发现随着变形温度的升高,发生动态再结晶的临界变形量(ε_c)降低,如图6所示,900 °C发生动态再结晶所需变形量 $\geq 65\%$,950 °C发生再结晶所需变形量则降低为50%,1 000 °C进一步降低为35%,1 050 °C降低为20%。

另外,如图7所示,变形温度950 °C,变形量65%时发生完全再结晶,平均粒径38 μm ;变形温度1 000 °C,变形量50%时发生完全再结晶,平均粒径83 μm ;变形温度1 050 °C,变形量35%时发生完全

再结晶,平均粒径150 μm 。这同样可通过Zener-Hollomon参数来解释,Z参数与变形温度T、变形速率、真应力-真应变曲线上应力峰值 σ_p 之间符合以下关系:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp(Q/RT) = F(\sigma_p) \quad (2)$$

在真应力-真应变曲线上应力峰值与其对应的应变变量 ε_p 之间符合以下关系:

$$\sigma_p = A(\varepsilon_p) \quad (3)$$

临界应变变量 ε_c 与真应力-真应变曲线上应力峰值对应的应变变量 ε_p 之间又符合以下关系:

$$\varepsilon_c \approx 0.83\varepsilon_p \quad (4)$$

因此,当变形速率一定时,变形温度T越高,则Z因子越小,相应的 σ_p 就越小,即对应的 ε_p 、 ε_c 也越小。

2.4 原始组织对热变形组织的影响

为了研究铸坯组织对动态再结晶的影响,为此,进行了原始组织为柱状晶粒的试样分别于950 °C、1 000 °C、1 050 °C温度下变形量为35%、50%、65%的单道次压缩试验。试验后金相组织如图8所示。

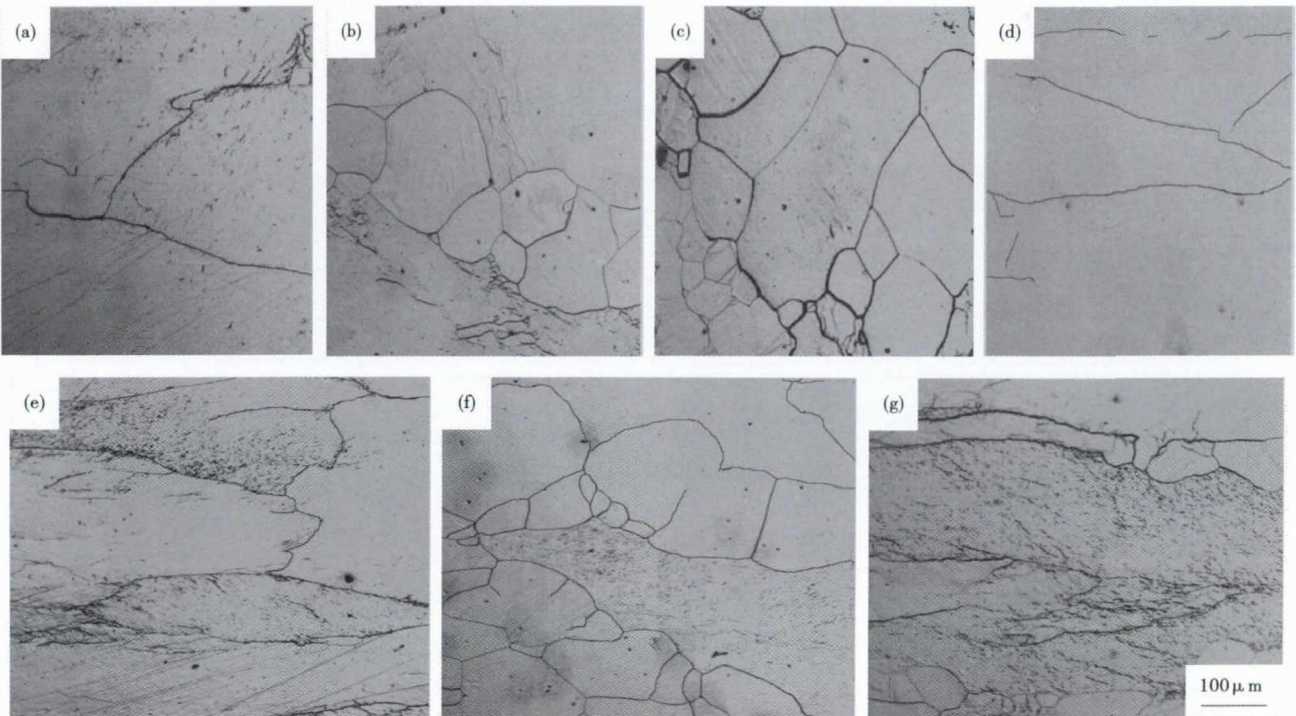


图8 试验钢柱状晶试样1 100 °C应变速率10 s^{-1} ,1 050 °C变形35% (a),50% (b)和65% (c),1 000 °C变形35% (d),50% (e)和65% (f),950 °C变形65% (g)的组织形貌

Fig. 8 Morphology of structure of test steel columnar crystal sample heating at 1 100 °C, strain rate 10 s^{-1} , deforming 35% (a), 50% (b) and 65% (c) at 1 050 °C, deforming 35% (d), 50% (e) and 65% (f) at 1 000 °C, and deforming 65% at 950 °C (g)

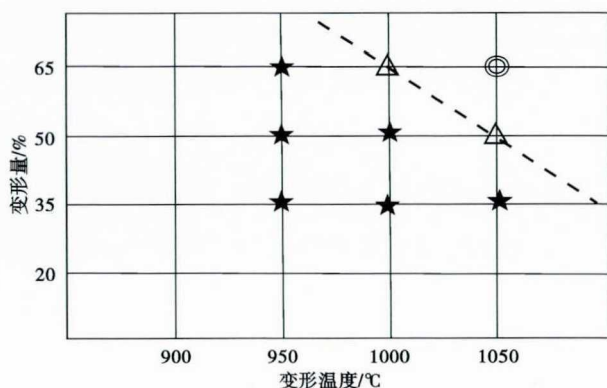


图9 变形温度和变形量对等轴晶组织演变的影响
注:⊙变形组织完全再结晶;△变形组织部分再结晶(出现细小等轴晶);★变形组织以回复组织为主

Fig. 9 Influence of deformation temperature and reduction on columnar crystal structure evolution

Notes: ⊙ complete recrystallization of deformation microstructure; △ partial recrystallization of deformation microstructure (fine equiaxial crystal appearing); ★ main deformation structure is recovery structure

变形温度为 950 °C 时 65% 的变形量, 变形组织虽有个别细小的新晶粒, 但仍以纤维状回复组织为主; 变形温度为 1 000 °C 时, 35% 和 50% 变形量, 变形组织明显为变形纤维回复组织, 而变形量 65% 时变形组织为纤维组织中出现了约 60% 大小不一的小晶粒, 稍大晶粒带有轻稍变形, 这表明已为部分再结晶组织; 变形温度为 1 050 °C 时, 35% 变形量变形组织为粗大变形晶粒, 典型的回复组织, 变形量 50% 变形组织为纤维组织中出现了大小不一的等轴晶粒, 这表明已出现部分再结晶组织; 变形量为 65% 时变形组织为 100% 新晶粒, 但大小不均, 大晶粒带有变形, 小晶粒等轴, 该组织为完全动态再结晶组织。

将不同变形温度(950 °C、1 000 °C、1 050 °C)、不同变形量(35%、50%、65%)的所有试验金相组织图进行比较。发现随着变形温度的升高, 发生动态再结晶的临界变形量(ϵ_c)降低, 如图 9 所示。

图 6 与图 9 进行比对, 发现原始组织不同, 也会对动态再结晶有明显影响。如, 在 1 050 °C 下变形, 原始等轴晶粒试样发生动态再结晶的临界变形量为 20%, 而原始柱状晶试样发生动态再结晶的临界变

形量提高到了 50%; 同样, 在 1 000 °C 下变形, 原始等轴晶粒试样约 35% 的变形就能发生动态再结晶, 而原始柱状晶试样发生动态再结晶所需变形量则提高到了 65%。可见, 粗大的柱状晶组织与相对较小的等轴晶组织相比, 粗大的柱状晶不利于热变形过程中的动态再结晶。

这可能与柱状晶尺寸较大有关。柱状晶与等轴晶相比晶粒更粗大, 晶界就相对较少, 此时晶界对位错滑移的阻力就小, 也即原始晶粒尺寸越大, 变形位错的滑移过程易进行, 因此热加工容易发生动态回复, 而不利于动态再结晶。

3 结论

(1) 2.5% (Si + Al) 高牌号硅钢钢质纯净度高, 当加热温度低于 1 200 °C 时, 加热温度对粗轧板坯动态回复和再结晶无显著影响。

(2) 2.5% (Si + Al) 高牌号硅钢随着变形温度的升高, 发生动态再结晶的临界变形量(ϵ_c)降低, 900 °C 再结晶的临界变形量为 65%, 950 °C 再结晶的临界变形量降低为 50%, 1 000 °C 降为 35%, 1 050 °C 则降为 20%。

(3) 2.5% (Si + Al) 高牌号硅钢原始组织不同, 对动态再结晶有明显影响。相同变形温度发生动态再结晶时, 柱状晶组织的临界变形量远高于等轴晶组织的临界变形量。

参考文献

- [1] 何忠治. 电工钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
- [2] Shimoyama, Yoshiaki, Miyoshi, et al. Method for Manufacturing Non-oriented Electrical Steel Sheet and Strip Having no Ridging, U. S. Patent No. 3925038[P]. 1976-1-27.
- [3] 西本昭彦, 占部俊明, 具有优良表面质量的无取向硅钢板制造方法. 日本公开特许公报, 平 2-221355A[P]. 1990-9-2.
- [4] 林均品, 程荆卫. Al-2Mg 合金的动态再结晶[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(3): 41-47.
- [5] 杨王玥. 不同形态第二组织低碳钢的铁素体动态再结晶[J]. 金属学报, 2003, 39(7): 71-77.

光红兵(1972-), 男, 硕士(2011年北京科技大学), 高级工程师, 1996年太原理工大学本科毕业, 硅钢00新产品及涂层开发与研究. E-mail: guanghb@tisco.com.cn

收稿日期: 2018-09-06