

冷轧变形率对超纯铁素体不锈钢 Cr22Mo 组织和成形性能的影响

周 杰^{1,2} 赵振铎^{1,2} 廉晓洁^{1,2} 范光伟^{1,2} 王立新³ 张晶晶^{1,2} 成生伟^{1,2}

(太原钢铁(集团)有限公司 1 先进不锈钢材料国家重点实验室; 2 技术中心, 太原 030003;

3 太原钢铁(集团)有限公司, 太原 030003)

摘 要 试验研究的 Cr22Mo 钢(成分: 0.005C, 0.40Si, 0.20Mn, 0.020P, 0.010S, 22.0Cr, 1.0Mo, 0.41Cu, 0.14Nb, 0.19Ti, 0.012ON)经 90 t BOF-VOD-LF-200 mm 板坯连铸-热轧成 5.0 mm 板-退火并冷轧成 1.5 ~ 0.5 mm 板, 冷轧变形率为 70% ~ 90%, 冷轧板经 1 000 °C 退火。利用光学显微镜、X-射线衍射仪(XRD)和万能拉伸试验机研究了冷轧变形率对 Cr22Mo 钢组织、组织和力学性能的影响。结果显示, 随着冷轧变形率的增大, 冷轧和冷轧退火板的组织细化, 再结晶组织 {111} <112> 强度增加, 平均塑性应变比 \bar{r} 值增加, 平面各向异性 Δr 降低, 冷轧压下率的增大显著改善了 Cr22Mo 钢冷轧退火薄板的成形性能。

关键词 超纯铁素体不锈钢 Cr22Mo 组织 成形性 织构 冷轧压下率

Effect of Cold Rolling Reduction on Texture and Formability of Ultra-Clean Ferrite Stainless Steel Cr22Mo

Zhou Jie^{1,2}, Zhao Zhenduo^{1,2}, Lian Xiaojie^{1,2}, Fan Guangwei^{1,2}, Wang Lixin³,

Zhang Jingjing^{1,2} and Cheng Shengwei^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Advanced Stainless Steel Materials, 2 Technology Center, Taiyuan Iron and Steel (Group) Co Ltd, Taiyuan 030003; 3 Taiyuan Iron and Steel (Group) Co Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract The tested and studied steel Cr22Mo (成分: 0.005C, 0.40Si, 0.20Mn, 0.020P, 0.010S, 22.0Cr, 1.0Mo, 0.41Cu, 0.14Nb, 0.19Ti, 0.012ON) is produced by 90 t BOF-VOD-LF-200 mm slab casting-hot rolling to 5.0 mm plate-annealing and cold rolling to 1.5 ~ 0.5 mm sheet with cold rolling reduction 70% ~ 90%, and the cold-rolled sheet is annealed at 1 000 °C. The effect of cold rolling reduction on structure, texture and mechanical properties of steel Cr22Mo is studied by optical microscope, X-ray diffractometer (XRD) and universal tensile testing machine. The results show that with increasing cold rolling reduction the structure of cold-rolled and cold-rolled-annealed sheet is finer, the intensity of recrystallized texture {111} <112> increases, average plastic strain ratio \bar{r} value increases and the plane anisotropy Δr decreases, and the increase of cold rolling reduction markedly improves the formability of cold-rolled annealed sheet of steel Cr22Mo.

Material Index Ultra-Clean Ferrite Stainless Steel Cr22Mo, Structure, Formability, Texture, Cold Rolling Reduction

铁素体不锈钢作为节 Ni 经济型不锈钢, 与以 304 不锈钢为代表的奥氏体不锈钢相比, 拥有许多优点, 例如: 热膨胀系数小、成本低、价格受国际 Ni 价波动影响小、耐高温氧化和应力腐蚀等, 因此被广泛应用于家用电器、汽车排气系统、建筑和装饰材料^[1-4]。在许多用途上可替代 304 不锈钢。但由于受铁素体不锈钢成形性能的影响, 它的推广和应用受到了很大程度限制。因此改善铁素体不锈钢的成形性能对其应用推广是极其重要的。

影响铁素体不锈钢成形性能因素有很多, 例如合金成分、凝固组织、热轧工艺、冷轧工艺以及润滑条件等^[5-9]。本文从冷轧变形和退火后的不锈钢薄板金相组织、组织和力学性能 3 个方面, 研究了不同压下率对 Cr22Mo 超纯铁素体不锈钢的影响。

1 材料实验与方法

研究材料相关试验均在大生产进行, 材料成分

如表 1 所示。冶金工艺流程: 90 t 转炉-VOD-LF-板坯连铸, 连铸板坯尺寸为 200 mm × 1 240 mm, 再将铸坯加热至 1 050 °C 后, 经过粗轧、精轧若干道次轧制后, 轧制成 5 mm 的热轧板, 终轧温度控制为 900 °C, 冷却至 700 °C 后进行卷曲。卷曲后的热轧板进行退火(保温时间 1.5 min, 退火温度 1 020 °C)、酸洗, 去除热轧板表面氧化皮, 之后用 20 辊的单机架冷轧机进行冷轧, 分别轧至 1.5、1.0、0.5 mm, 冷轧变形量分别达到 70%、80% 和 90%。冷轧板在连续退火线进行冷轧退火, 退火温度为 1 000 °C。

对不同厚度的冷轧态和冷轧退火态试样进行金相观察和织构测试。金相观察沿材料横截面进行, 金相试样用 200# ~ 1 500# 的砂纸进行打磨后, 用帆布和抛光布抛光, 用 4% FeCl₃ 酒精溶液进行侵蚀, 金相观察在 Leica DM400 型光学显微镜上进行; 织构测试在材料轧面进行, 织构试样用 200# ~ 1 500#

的砂纸进行打磨后,用帆布抛光,用5%的盐酸溶液进行侵蚀,去除表面应力。织构测试在 PANalytical X'Pert PRO X射线衍射仪上进行,采用 CoK α 辐射,通过测量样品的 $\{110\}$ 、 $\{200\}$ 、 $\{211\}$ 3 个不完整极,通过软件计算取向分布函数(ODF)。

使用 Zwick Z250 型万能拉伸试验机进行力学性能测试,分别在与轧制方向呈 0° 、 45° 和 90° 的 3 个方向制取常规拉伸试样,测定材料的屈服强度、抗拉强度、伸长率和 r 值,并按下式计算平均塑性应变比 \bar{r} 值和平面各向异性指数 Δr :

$$\bar{r} = (r_0 + 2r_{45} + r_{90}) / 4 \quad (1)$$

$$\Delta r = (r_0 - 2r_{45} + r_{90}) / 2 \quad (2)$$

式中: r_0 、 r_{45} 、 r_{90} 代表钢板轧向与轧向成 0° 、 45° 和 90° 方向的 r 值。

2 实验结果

2.1 显微组织

图 1 为不同厚度的冷轧和冷轧退火两种状态的金相组织,冷轧态组织均为变形带状纤维组织,退火态组织均为完全再结晶的等轴晶。但随着压下率的增大,轧制态的带状组织中纤维更细小,同时,退火后的晶粒也得到了细化而且更加均匀,晶粒尺寸从 $50 \mu\text{m}$ 减小到 $20 \mu\text{m}$ 。这是因为再结晶过程的原动力主要是变形晶粒的畸变能,即形变储能。所谓形变储能是指在金属变形后,变形组织存在着以位错为主的晶体缺陷,这使金属基体内保留了一定的能量,即形变储能。低压下率冷轧时形变储能较低,局部具有高度点阵弯曲,易产生再结晶晶粒的地区少,高压下率冷轧时形变储能高,有许多地方可作为形核位置,形核点的增加会促进晶粒的细化^[10]。压下率的增大,不仅细化了冷轧态组织,而且使轧态组织具有更多的形核位置和形变储能^[11-12]。细化冷轧组织,增加了再结晶的形核位置;更多的形变储能,为再结晶提供能量。两方面的因素共同促进了后续的再结晶的进行,最终使冷轧退火态晶粒得到细化。

2.2 织构组织

图 2 所示为经过不同压下率冷轧后的冷轧板和冷轧退火板恒 $\Phi_2 = 45^\circ$ ODF 图。冷轧织构主要由 α 织构和 γ 织构组成, α 纤维织构密度水平较高, γ 纤维织构密度水平较低,而且 α 纤维织构组分取向密度随冷轧压下率的变化而变化。板厚 1.5 mm 冷轧压下率 70% 的冷轧板,其最强点 $\{115\} \langle 1-10 \rangle$ 的取向密度 $f(g) = 13.56$;板厚 1.0 mm 冷轧压下率

表 1 试验 Cr22Mo 不锈钢化学成分/%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Cu	Nb	Ti	Mo
0.005	0.40	0.20	0.020	0.010	22.0	0.16	0.012	0.41	0.14	0.19	1.0

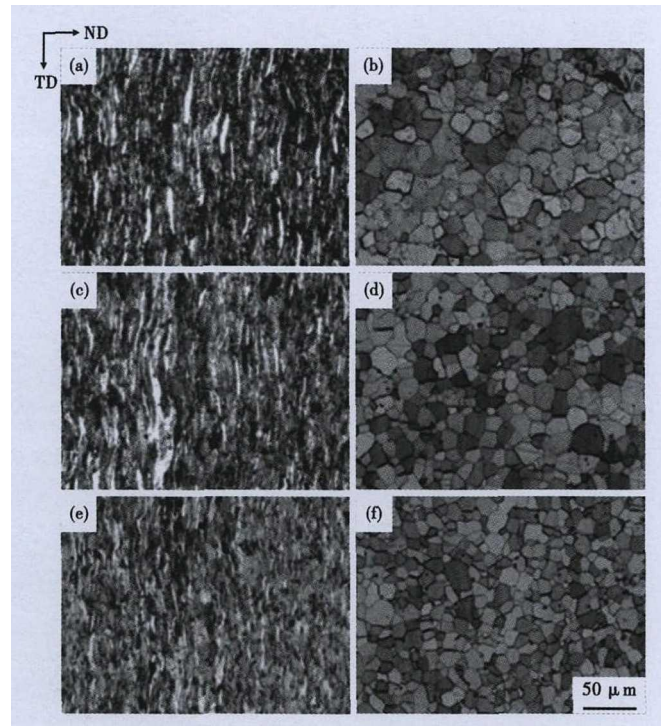


图 1 冷轧变形率对 Cr22Mo 钢冷轧态(a)(c)(e)和冷轧退火态(b)(d)(f)组织形貌的影响,变形量/%-板厚/mm:(a)(b)70-1.5;(c)(d)80-1.0;(e)(f)90-0.5

Fig.1 Effect of cold rolling reduction on morphology of structure of cold-rolled (a) (c) (e) and cold-rolled-annealed (b) (d) (f) steel Cr22Mo, reduction /% - sheet thickness /mm: (a) (b) 70-1.5; (c) (d) 80-1.0 and (e) (f) 90-0.5

80% 的冷轧板,其最强点 $\{115\} \langle 1-10 \rangle$ 的取向密度 $f(g) = 8.9$,次强点 $\{112\} \langle 1-10 \rangle$ 取向密度 $f(g) = 7.6$;板厚 0.5 mm 冷轧压下率 90% 的冷轧板,其最强点的取向密度 $f(g) = 8.05$;即随着冷轧压下率的增大,冷轧板厚度减薄, α 织构组分从 $\{001\} \langle 110 \rangle \sim \{115\} \langle 1-10 \rangle$ 向 $\{112\} \langle 1-10 \rangle$ 、 $\{223\} \langle 1-10 \rangle$ 、 $\{111\} \langle 1-10 \rangle$ 转动聚集。冷轧 γ 织构取向密度较低,其取向密度 $f(g)$ 在小范围内波动,无明显变化;随着压下率的增大, γ 织构在向 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 聚集。

冷轧退火后, γ 织构得到了发展, γ 织构集中于 $\{111\} \langle 1-21 \rangle$ 和 $\{111\} \langle -1-12 \rangle$,并有一定角度偏转至 $\{334\} \langle 483 \rangle$ 和 $\{554\} \langle 225 \rangle$, α 织构受到了抑制并削弱,但板厚 1.5 mm 压下率为 70% 的冷轧退火织构是个例外。板厚 1.5 mm 压下率为 70% 的冷轧退火织构仍旧延续了冷轧织构组分和强度,强

点仍为 $\{115\} \langle 110 \rangle$,其取向密度 $f(g) = 12.52$, γ 织构取向密度仍旧处于较低水平,其取向密度 $f(g) = 4.0$ 。板厚 1.0 mm 压下率为 80% 的冷轧退火 γ 织构得到发展, γ 织构强点位于 $\{111\} \langle -1-12 \rangle$,其取向密度 $f(g) = 10.5$,次强点位于 $\{111\} \langle 0-11 \rangle$,其取向密度 $f(g) = 9.0$,同时仍有少量 α 织构 $\{115\} \langle 110 \rangle$ 。板厚 0.5 mm 压下率为 90% 的冷轧退火 γ 织构得到充足的发展, γ 织构强点位于 $\{111\} \langle -1-12 \rangle$,其取向密度 $f(g) = 12.3$,次强点位于 $\{111\} \langle 0-11 \rangle$,其取向密度 $f(g) = 8.3$,同时 α 织构也得了充足的抑制,其取向密度水平小于 2。随着压下率的增大, $\{111\} \langle 112 \rangle$ 织构取向 $f(g)$ 从 4.0 增强至 12.3; α 织构强度被很大程度的削弱, $\{115\} \langle 110 \rangle$ 取向密度 $f(g)$ 从 12.52 将至 2 以下。

2.3 力学性能

表 2 所示为不同压下率的冷轧退火板力学性能。从表 2 中可以得出,不同压下率对抗拉强度、屈服强度、延伸率和 n 值并没有大的影响,但对塑性各向异性 \bar{r} 值和平面塑性各向异性 Δr 却有较大影响。而且这两个参数也是反映材料的成形性能重要参数。随着冷轧压下率的增加, \bar{r} 值从 1.4 提高至 1.87,得到了明显提高,而且 Δr 值从 0.69 降低至 0.15,也有了明显降低,从而改善了薄板的成形性能。

3 分析与讨论

冷轧变形织构的形成是由于冷轧轧制力驱使晶粒沿着某些特定的滑移系进行滑移和转动。对于体

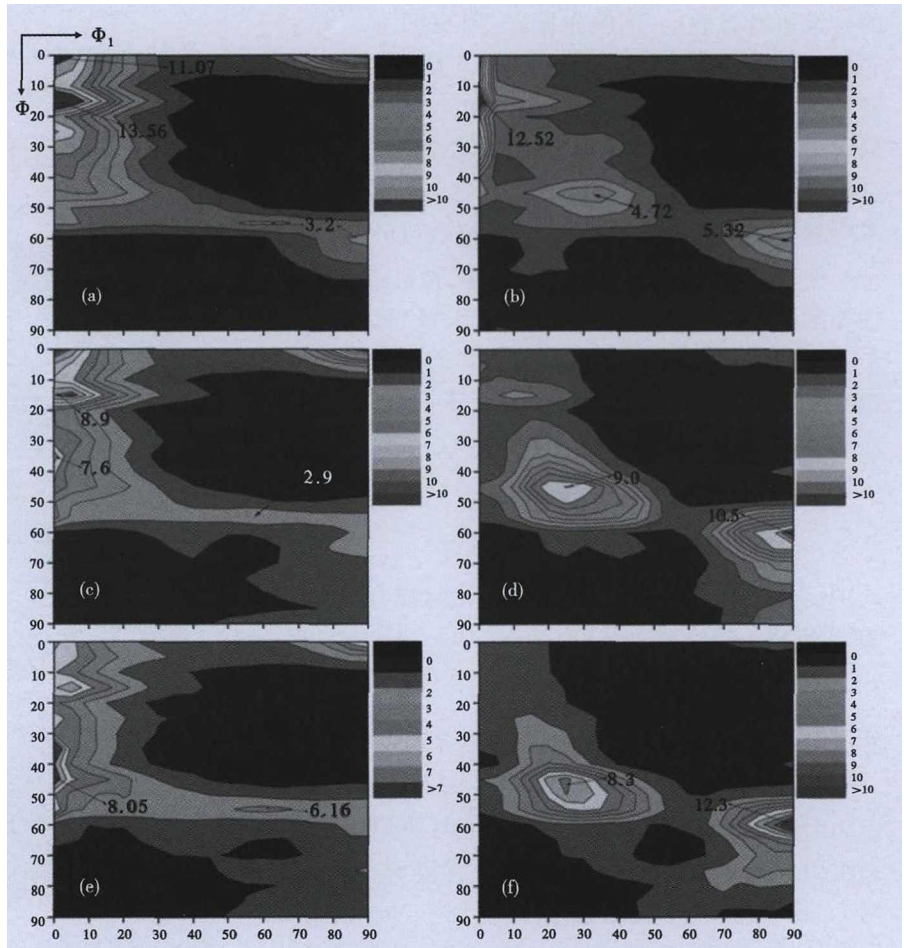


图 2 Cr22Mo 钢冷轧变形率/%-板厚/mm: (a) (b) 70-1.5, (c) (d) 80-1.0 和 (e) (f) 90-0.5 的冷轧态 (a) (c) (e) 和冷轧退火态 (b) (d) (f) 恒 $\Phi_2 = 45^\circ$ ODF (取向分布函数) 截面图

Fig. 2 $\Phi_2 = 45^\circ$ orientation distribution function (ODF) diagram of cold-rolled (a) (c) (e) and cold-rolled-annealed (b) (d) (f) steel Cr22Mo with cold-rolling reduction /% - sheet thickness /mm: (a) and (b) 70-1.5; (c) and (d) 80-1.0; and (e) and (f) 90-0.5

心立方结构的超纯铁素体不锈钢滑移面包括 $\{110\}$ 、 $\{112\}$ 和 $\{123\}$,滑移方向为 $\langle 111 \rangle$ ^[13] 。3 种滑移系的开动与否决定于轧制力的大小。其中 $\{110\} \langle 111 \rangle$ 滑移系所需轧制力最小,其开动后,主要形成 $\{112\} \langle 110 \rangle$ 和 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 织构组分; $\{112\} \langle 111 \rangle$ 滑移系所需轧制力次之,主要形成 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 和 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 织构组分; $\{123\} \langle 111 \rangle$ 滑移系所需轧制力最大,开动后主要形成 $\{114\} \langle 110 \rangle$ 和 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 。

刘海涛^[6]指出随着压下率的增大,冷轧织构随着 α 取向线移动,演变路径为: $\{001\} \langle 110 \rangle \rightarrow \{114\} \langle 110 \rangle \rightarrow \{223\} \langle 110 \rangle$ 。 Bai Yang^[14] 等研究含 Sn 和不含 Sn 超纯铁素体不锈钢不同冷轧压下率对织构演变影响时提出,随着压下率的增大, α 织构会从不稳定状态 $\{001\} \langle 1-10 \rangle$ 向稳定状态

表 2 Cr22Mo 钢冷轧退火板的力学性能

Table 2 Mechanical properties of cold-rolled-annealed sheet of steel Cr22Mo

板厚/mm	压下率/%	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A_{50} mm/%	n	\bar{r}	Δr
1.5	70	319.6	482.1	34.1	0.20	1.40	0.69
1.0	80	313.8	474.3	30.5	0.20	1.68	0.34
0.5	90	315.3	476.9	31.0	0.20	1.87	0.15

{112} <1-10> 转变。研究发现,随着冷轧压下率的提高,α 织构组分从 {001} <1-10> ~ {115} <1-10> 向 {112} <1-10>、{223} <1-10>、{111} <1-10> 转动聚集,如图 2 和图 3 所示。Inagaki^[15] 认为,由于位错运动是导致晶体转动的根本原因,所以影响位错运动的因素都是影响织构演变的重要因素。因此,可认为大的压下率开动了更多的滑移系,从而得到多种稳定的冷轧 α 织构取向,而且,压下率越大,各冷轧稳定取向的取向密度水平越高。Bai Yang^[14] 等还提出冷轧压下率越大,冷轧 γ 织构组分从 {111} <-1-12> 向 {111} <1-10> 转变聚集。实验结果显示,压下率 ≤ 80% 时,γ 织构组分无明显变化;压下率为 90% 时,γ 织构组分 {111} <110> 明显增强,如图 2 所示。

Ray^[16] 等研究指出,晶体中每个取向的形变储能不同: $E_{|110|<001>} < E_{|001|<110>} < E_{|112|<uvw>} < E_{|111|<uvw>}$,取向 {111} <uvw> 具有较高的形变储能,可促进其退火时再结晶的形核和长大。

刘海涛^[6] 指出,在退火初期 {112} <1-10> ~ {223} <1-10> ~ {111} <1-10> 取向的部分基体将进一步向 {111} <1-10> 取向附近调整,从而导致织构强点沿 α 取向线下移并逐渐靠近 {111} <1-10> 取向,使 {111} <1-10> 组分的取向密度水平提高。根据再结晶织构选择生长理论,当变形基体与生长着的再结晶晶核之间有某种特定取向关系时,这一晶核生长速率达到最大值。对于体心立方金属的超纯铁素体不锈钢而言,{111} <1-10> 与 {111} <-1-12> 取向满足 $30^\circ < 111 \rangle$ 即 Σ13b,变形基体以 {111} <1-10> 取向为主时,{111} <-1-12> 取向晶粒生长速率最大。因此在冷轧退火过程中,{111} <1-10> 取向与 {111} <-1-12> 取向的再结晶晶核易于在其冷轧基体中形核,因为它们具有更多的形变储能。

根据选择生长理论,{111} <-1-12> 再结晶晶核较 {111} <1-10> 再结晶晶核易于长大,所以,最终退火织构是以 {111} <112> 组分为主的 γ 织构。实验中,增大冷轧压下率,促进了冷轧过程中 α 织构的转变:{001} <1-10> ~ {115} <1-10> 向 {112} <1-10>、{223} <1-10>、{111} <1-10> 转动聚集,随着冷轧压下率的提高,冷轧 α 织构组分 {112} <1-10>、{223} <1-10>、{111} <1-10> 取向密度水平也得到了提高,冷轧 γ 织构稍有提高,如图 3 所示;在退火初期,{112} <1-10>、{223} <1-10> 向 {111} <1-10> 转变,形成了更多的

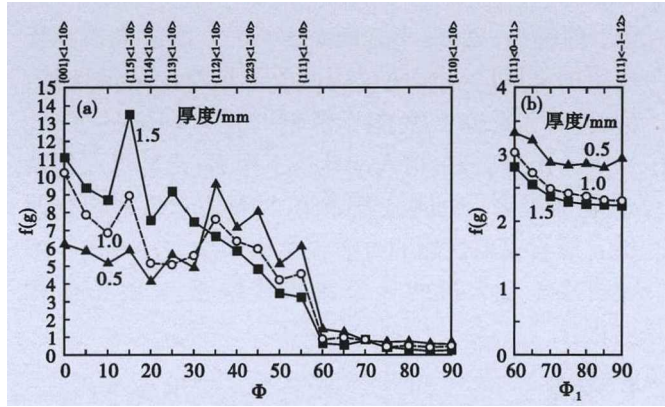


图 3 Cr22Mo 钢冷轧变形率 70%,板厚 1.5 mm;80%,1.0 mm 和 90%,0.5 mm 冷轧态织构取向密度分布图:(a) α 取向,(b) γ 取向

Fig. 3 Distribution diagram of texture orientation density of cold-rolled steel Cr22Mo with cold-rolling reduction 70% and sheet thickness 1.5 mm, 80% and 1.0 mm, and 90% and 0.5 mm: (a) α orientation and (b) γ orientation

{111} <1-10> 取向,同时 {111} <1-10> 和 {111} <-1-12> 取向由于具有较高的形变储能,因此更容易形核和长大;由于选择生长理论,{111} <-1-12> 再结晶晶核较 {111} <1-10> 再结晶晶核易于长大,在退火过程中吞并其他取向,最终提高了 {111} <112> 取向密度水平,如图 4 所示。因此,提高冷轧压下率,促进了冷轧 α 织构组分向 {112} <1-10>、{223} <1-10>、{111} <1-10> 转动聚集,降低了最终退火态 α 织构密度水平,提高了最终退火 γ 织构密度水平。

铁素体不锈钢的 r 值与 γ 纤维织构的强度有密不可分的关系,而且两者成线性关系,即 γ 织构越

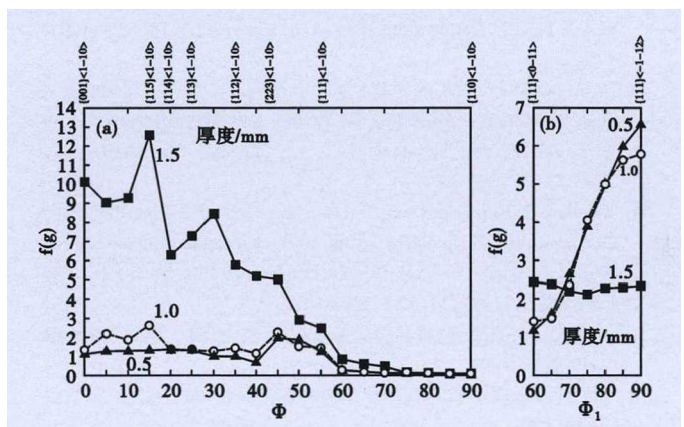


图 4 Cr22Mo 钢冷轧变形率 70%,板厚 1.5 mm;80%,1.0 mm 和 90%,0.5 mm 的冷轧退火态织构取向密度分布图:(a) α 取向,(b) γ 取向

Fig. 4 Distribution diagram of texture orientation density of cold-rolled-annealed steel Cr22Mo with cold-rolling reduction 70% and sheet thickness 1.5 mm, 80% and 1.0 mm, and 90% and 0.5 mm: (a) α orientation and (b) γ orientation

强, \bar{r} 值越高, Δr 越小。Hutchinson^[17] 报道称提高板材中的 $\langle 111 \rangle // ND$ 织构可改善板材的成形性能, Yazawa^[18] 研究铁素体不锈钢时也有同样的发现。从表 2 中可看出, 增大冷轧压下率后, 冷轧退火板的 \bar{r} 值显著提高, Δr 值显著降低, 材料成形性能得到改善。试验成形性能的改善也是由于增大冷轧压下率使得冷轧退火板的 γ 纤维织构增强, α 纤维织构弱化。

4 结论

(1) 细化冷轧组织, 增加了再结晶的形核位置; 增大了形变储能, 为再结晶提供能量。两方面的因素共同促进了后续的再结晶的进行, 最终使冷轧退火态晶粒得到细化, 使退火后的等轴晶从 50 μm 减小到 20 μm 。

(2) 改善了冷轧和冷轧退火织构组分, 使冷轧 α 织构在 $\{112\} \langle 1-10 \rangle$ 、 $\{223\} \langle 1-10 \rangle$ 、 $\{111\} \langle 1-10 \rangle$ 组分富集, 从而促进了退火初期 $\{223\} \langle 1-10 \rangle$ 向 $\{111\} \langle 1-10 \rangle$ 的转变; 由于选择生长理论, $\{111\} \langle 110 \rangle$ 与 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 取向满足 $30^\circ \langle 111 \rangle$ 即 $\Sigma 13b$, $\{111\} \langle 112 \rangle$ 优先形核生长, 使退火 γ 织构的 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 组分密度水平提高, α 织构密度水平降低。

(3) 提高了退火态的 \bar{r} 值, 降低了 Δr 值, 当压下率达到 90% 时, 退火态的 \bar{r} 值最大, Δr 值最小, 改善了材料成形性能。

山西省第四批青年拔尖人才支持计划项目 (2016006) 资助

参考文献

- [1] Yazawa Y, Kato Y and Kobayashi M. Development of Ti-bearing High Performance Ferritic Stainless Steel R43OXT and RSX-1 [R]. Kawasaki Steel Technical Report, 1990 (40): 40-48.
- [2] 杜伟, 郑淮北, 江来珠, 等. 终轧温度对铁素体不锈钢织构和成形性的影响 [J]. 轧钢, 2010, 27 (4): 5-9.
- [3] Bautista A, Centeno A G and Blanco G. Application of EIS to the Study of Corrosion Behaviour of Sintered Ferritic Stainless Steels Before and After High-Temperature Exposure [J]. Materials Characterization, 2008, 59 (1): 32-39.
- [4] 张淑敏, 高飞, 张向军, 等. 超纯铁素体不锈钢织构演变与成形性能的研究 [J]. 轧钢, 2015, 32 (1): 12-16.
- [5] 杜伟. 冶金工艺对超低碳铁素体不锈钢微观组织和成形性的影响 [D]. 沈阳: 东北大学博士论文, 2010.
- [6] 刘海涛. Cr17 铁素体不锈钢的组织、织构及成形性能研究 [D]. 沈阳: 东北大学博士论文, 2009.
- [7] Shin H J, An J K and Park S H, et al. The Effect of Texture on Ridging of Ferritic Stainless Steel [J]. Acta Mater, 2003, 16 (51): 4693-4706.
- [8] De Abreu H F G, Bruno A D S and Tavares S S M, et al. Effect of High Temperature Annealing on Texture and Microstructure on an AISI_444 Ferritic Stainless Steel [J]. Materials Characterization, 2006, 57 (1): 342-347.
- [9] Nobuhiro T, Kan eaki T and Tadashi M. Effects of Rolling Reduction and Annealing Temperature on the Recrystallization Structure of Solidified Columnar Crystals 19% Cr Ferritic Stainless Steel [J]. ISIJ International, 1994, 34 (12): 1008-1017.
- [10] 赵新兵, 毛卫民. 金属的再结晶和晶粒长大 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.
- [11] 毛卫民. 金属材料的晶体学织构和各向异性 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [12] Shen K B and Duggan J. Microbands and Crystal Orientation Metastability in Cold Rolled Interstitial-Free [J]. Acta Materialia, 2007, 55 (4): 1137-1144.
- [13] Kestens L and Jonas J J. Modeling Texture Change During the Static Recrystallization of a Cold Rolled [J]. ISIJ International, 1997, 37 (8): 807-814.
- [14] Bai Yang, He Tong and Liu Yandong. Effects of Sn Microalloying on Cold Rolling and Recrystallization Textures and Microstructure of a Ferritic Stainless Steel [J]. Materials Characterization, 2018, 137: 142-150.
- [15] Inagaki H. Fundamental Aspect of Texture Formation in Low Carbon Steel [J]. ISIJ International. 1994, 34 (4): 313-321.
- [16] Ray R K, Jonas J J and Hook R E. Cold Rolling and Annealing Textures in Low Carbon and Extra Low Carbon Steels [J]. Metallurgical Reviews. 1994, 39 (4): 129-172.
- [17] Hutchinson W B. Development and Control of Annealing Textures in Low Carbon Steels [J]. International Metals Reviews, 1984, 29 (1): 25-42.
- [18] Yazawa Y M, Ozaki Y and Furukimi O. Development of Ferritic Stainless Steel Sheet with Excellent Deep Drawability by $\{111\}$ Recrystallization Texture Control [J]. JASE Review, 2003, 24 (4): 483-488.

周杰 (1987-), 男, 硕士 (2012 年北京科技大学), 副研究员, 工程师, 2010 年山西省中北大学 (本科) 毕业, 不锈钢加工制造与组织研究。E-mail: zhoujie@tisco.com.cn

收稿日期: 2018-04-23