

# 终轧温度对 Cr22Mo 超纯铁素体不锈钢织构和成形性能的影响

邹勇<sup>1,2</sup> 卫英慧<sup>1,3</sup> 张晶晶<sup>2</sup>

(1 太原理工大学材料与工程学院,太原 030024; 2 山西太钢不锈钢股份有限公司,太原 030003;  
3 山西工程技术学院,阳泉 045000)

**摘要** 试验 Cr22Mo 钢 200 mm 铸坯 1 150 °C 150 min 加热经 7 道次粗轧-7 道次精轧成 4.0 mm 热轧卷,经 980 ~ 1 030 °C 退火和冷轧成 0.8 mm 板,并经 950 ~ 1 020 °C 退火。试验研究了终轧温度 850 °C 和 800 °C 对 Cr22Mo 钢显微组织、织构及成形性的影响。试验结果表明,降低终轧温度,冷轧板的组织细化、再结晶织构强度增加、平均塑性应变比  $r$  值增加、平面各向异性  $\Delta r$  值降低,降低终轧温度可显著改善冷轧板的成形性能。

**关键词** 超纯铁素体不锈钢 Cr22Mo 4 mm 热轧板 0.8 mm 冷轧板 终轧温度 成形性 织构

## Effect of Finishing Rolling Temperature on Texture and Formability of Ultra-Purified Ferritic Stainless Steel Cr22Mo

Zou Yong<sup>1,2</sup>, Wei Yinghui<sup>1,3</sup> and Zhang Jingjing<sup>2</sup>

(1 School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024; 2 Shanxi Taigang Stainless Steel Co Ltd, Taiyuan 030003; 3 Shanxi Institute of Technology, Yangquan 045000)

**Abstract** The tested steel Cr22Mo 200 mm cast slab is heated at 1 150 °C for 150 min, hot-rough-rolled with 7 passes- finishing rolled with 7 passes to 4.0 mm hot-rolled coil, annealed at 980 ~ 1 030 °C and cold-rolled to 0.8 mm sheet and annealed at 950 ~ 1 020 °C. The effect of finishing rolling temperature 850 °C and 800 °C on structure, texture and formability of steel Cr22Mo has been tested and studied. Experimental results show that with decreasing finishing rolling temperature the structure of cold-rolled sheet fines, the recrystallized texture increases, the average plastic strain ratio  $r$  value increases and the plane anisotropy  $\Delta r$  value decreases, therefore the formability of cold-rolled sheet markedly improves by decreasing finishing rolling temperature.

**Material Index** Ultra-Purified Ferritic Stainless Steel Cr22Mo, 4.0 mm Hot-Rolled Plate, 0.8 mm Cold-Rolled Sheet, Finishing Rolling Temperature, Formability, Texture

作为资源节约型的超纯铁素体不锈钢与以 304 为代表的奥氏体不锈钢相比具有诸多优点,比如热膨胀系数小、耐点腐蚀和应力腐蚀能力强,并且成本低、价格波动小。因此该类不锈钢广泛应用于家电、制品、汽车排气系统、建筑装饰等领域<sup>[1-2]</sup>。但受铁素体不锈钢加工成形性能的影响,其推广和应用受到了一定程度的限制。

影响超纯铁素体不锈钢成形性能的因素比较复杂,比如合金成分、凝固组织、热轧工艺、冷轧工艺以及润滑条件等<sup>[3-4]</sup>。本文研究了终轧温度对超纯铁素体不锈钢显微组织、织构演化和性能的影响。

### 1 试验材料与方法

试验钢种成分如表1所示,冶金工艺流程: 90 t 转炉-VOD-LF-板坯连铸。将 200 mm × 1 240 mm 的两块铸坯加热至

1 150 °C 保温 150 min 后经 7 道次粗轧 + 7 道次精轧制成 4.0 mm 的热卷,终轧温度分别为 850 °C 和 800 °C,卷取温度 600 °C。热卷(18 t)经退火(保温时间 1.5 mm/min,退火温度 980 ~ 1 030 °C)酸洗,去除表面氧化皮。退火酸洗后的热卷经廿辊轧机轧至 0.8 mm 薄板,然后在 950 ~ 1 020 °C 退火。

金相试样用 200 ~ 1 500# 的砂纸进行打磨,用帆布和抛光布抛光,最后用 4% FeCl<sub>3</sub> 酒精溶液进行浸蚀;织构试样用 200 ~ 1 500# 的砂纸进行打磨,用帆布抛光,最后用 5% 的盐酸溶液进行浸蚀,去除表面应力。织构测试在 PANalytical X'Pert PRO X 射线

表 1 试验 Cr22Mo 钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of tested steel Cr22Mo / %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Cu	Nb	Ti	N
0.01	0.40	0.25	0.025	0.001	22.5	1.2	0.35	0.15	0.20	0.015

通讯作者:卫英慧,教授,博士生导师,太原理工大学材料与工程学院,太原 030024  
E-mail:weiyinghui@tyut.edu.cn

衍射仪上进行,采用 CoK $\alpha$  辐射测量样品的 {110}、{200}、{211} 3 个不完整极,并用软件计算取向分布函数(ODF)。

分别在与轧制方向呈 0°、45°和 90°制取常规拉伸试样,测定材料的屈服强度、抗拉强度、伸长率和塑性应变比  $r$  值,并按下式计算平均塑性应变比  $r$  值和平面各向异性指数  $\Delta r$ :

$$r = (r_0 + 2r_{45} + r_{90})/4$$

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

式中: $r_0$ 、 $2r_{45}$ 、 $r_{90}$ - 钢板与轧向成 0°、45°和 90°方向的  $r$  值。

## 2 结果及分析

### 2.1 冷板成形性能

冷轧退火板的成形性能如表 2 所示。随着终轧温度的降低,不仅  $r$  值从 1.68 增加到 1.80 (提高 7%),而且  $\Delta r$  从 0.34 降低到 0.26 (降低 23.5%)。

提高热轧及其退火板的  $\gamma$  织构强度有利于改

善低碳钢冷轧退火板的成形性能<sup>[5]</sup>,亦有利于改善铁素体不锈钢的深冲性能,而铁素体不锈钢的  $r$  值与  $\gamma$  纤维织构的强度密不可分<sup>[6]</sup>。从表 2 中可看出,降低终轧温度后,冷轧退火板的  $r$  值显著提高。本文成形性能的改善主要是由于降低终轧温度使得冷轧退火板的  $\gamma$  纤维织构强度、 $\alpha$  纤维织构弱化所致。

### 2.2 显微组织分析

图 1(a<sub>1</sub>)(b<sub>1</sub>)(c<sub>1</sub>)(d<sub>1</sub>)为不同终轧温度的热轧及热轧退火板的金相组织。当终轧温度为 850 °C 时,热轧板组织由完全的变形组织组成,变形带连续、粗大、晶界平滑,越靠近板料厚向心部,变形组织越粗大。热轧板经退火后,变形组织并未完全发生再结晶,靠近边部的组织大部分完成了再结晶,但靠近心部依旧呈连续、粗大、晶界平滑的变形组织。当终轧温度为 800 °C 时,热轧态组织也由完全的变形组织组成,但变形组织更细化、变形带更窄且短,明显增加了晶界。退火后组织完全发生再结晶,形成了均匀的等轴晶组织。

图 1(a<sub>2</sub>)(b<sub>2</sub>)(c<sub>2</sub>)(d<sub>2</sub>)为不同终轧温度的冷轧及冷轧退火板的金相组织。冷轧态的组织均为变形组织,但降低终轧温度,冷轧态的变形组织得到了细化、晶界明显增多。冷轧退火态的组织均由等轴晶组成,但降低终轧温度,晶粒得到了明显细化。

终轧温度高时局部具有高度点阵弯曲,易产生

表 2 4 mm 热轧板终轧温度对 0.8 mm 冷轧退火板塑性应变比  $r$  值的影响

Table 2 Effect of finishing rolling temperature of 4 mm hot-rolled plate on plastic strain ratio  $r$  value of 0.8 mm cold-rolled annealed sheet

终轧温度/°C	$r_0$	$r_{45}$	$r_{90}$	$r$	$\Delta r$
850	1.59	1.51	2.10	1.68	0.34
800	1.66	1.67	2.19	1.80	0.26

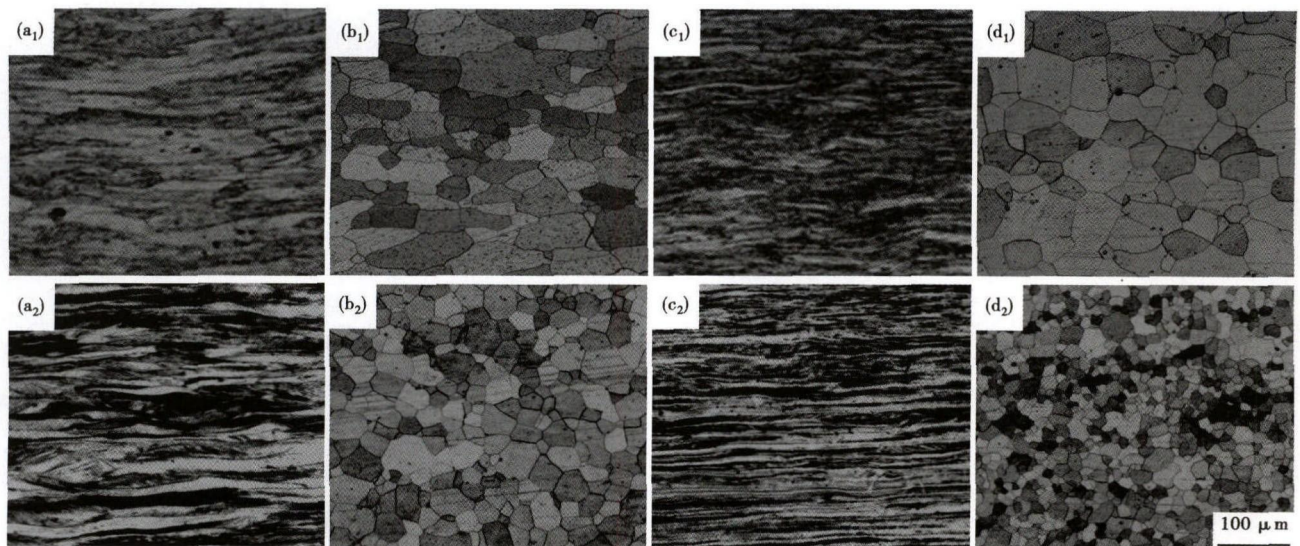


图 1 终轧温度 850 °C (a<sub>1</sub>)(b<sub>1</sub>)(a<sub>2</sub>)(b<sub>2</sub>)和 800 °C (c<sub>1</sub>)(d<sub>1</sub>)(c<sub>2</sub>)(d<sub>2</sub>)时热轧板(a<sub>1</sub>)(c<sub>1</sub>)、热轧退火板(b<sub>1</sub>)(d<sub>1</sub>)和冷轧(a<sub>2</sub>)(c<sub>2</sub>)、冷轧退火板(b<sub>2</sub>)(d<sub>2</sub>)的组织形貌

Fig. 1 Morphology of structure of hot-rolled plate (a<sub>1</sub>)(c<sub>1</sub>) and hot-rolled annealed plate (b<sub>1</sub>)(d<sub>1</sub>), as well as cold-rolled sheet (a<sub>2</sub>)(c<sub>2</sub>) and cold-rolled annealed sheet (b<sub>2</sub>)(d<sub>2</sub>), hot-rolled plate finishing rolling temperature at 850 °C (a<sub>1</sub>)(b<sub>1</sub>)(a<sub>2</sub>)(b<sub>2</sub>) and at 800 °C (c<sub>1</sub>)(d<sub>1</sub>)(c<sub>2</sub>)(d<sub>2</sub>)

再结晶晶粒的区域较少。而降低终轧温度使形核点增加,促进了热轧组织的细化,从而促进了冷轧退火组织晶粒的细化<sup>[1,7]</sup>。铁素体不锈钢具有高的层错能,位错在高温下极易产生滑移,加速了高温下的回复。降低终轧温度,回复速率减小,在回复速率减小和高抗变形能力条件下,更多的形变储能储存在基体中,从而使更多的滑移系被启动,增加了因变形造成的剪切带变形。大应变会引起剪切带的产生,与基体相比,剪切带中的位错密度更大,具有更多用于再结晶的形变储能<sup>[8]</sup>。因此,低温热轧具有更多的用于再结晶的形变储能,从而加速了再结晶。因此,与高温终轧退火板相比,低温终轧的退火板晶粒更细。

### 2.3 宏观织构分析

图 2 为不同终轧温度条件下的热轧板、热轧退火板和冷轧退火中心层织构的恒  $\phi_2 = 45^\circ$  ODF 截面图。两种热轧工艺条件下,热轧织构均以  $\alpha$  纤维织构为主,强点都在  $\{115\} \langle 110 \rangle$ 。其区别在于:热轧板织构,终轧温度  $800^\circ\text{C}$  条件下强点  $\{115\} \langle 110 \rangle$  的取向密度  $f(g) = 8.55$ ,终轧温度  $850^\circ\text{C}$  条件下强点  $\{115\} \langle 110 \rangle$  的取向密度  $f(g) = 9.94$ ,并沿  $\alpha$  取向线向下移动至  $\{223\} \langle 110 \rangle$ ;热轧退火板织构,终轧温度  $800^\circ\text{C}$  条件下出现了较强的  $\gamma$  纤维织构,强点在  $\{111\} \langle 110 \rangle$ ,取向密度  $f(g) = 10.54$ ,并伴有  $\alpha$  纤维织构,强点在  $\{223\} \langle 110 \rangle$ ,终轧温度  $850^\circ\text{C}$  条件下只有  $\alpha$  纤维织构,强点在  $\{115\} \langle 110 \rangle$ ,取向密度  $f(g) = 8.96$ ;冷轧退火板织构,终轧温度  $800^\circ\text{C}$  条件下只有  $\gamma$  织构,强点在  $\{111\} \langle 112 \rangle$ ,取向密度  $f(g) = 16.28$ ,终轧温度  $850^\circ\text{C}$  条件下  $\gamma$  织构与  $\alpha$  织构并存,但以  $\gamma$  织构为主,强点在  $\{111\} \langle 112 \rangle$ ,取向密度  $f(g) = 11.19$ 。

可见,降低终轧温度,热轧板的  $\alpha$  纤维织构的取向密度明显降低, $\gamma$  纤维织构的取向密度显著增强;热轧退火板的  $\alpha$  纤维织构的取向密度逐渐降低,并且强点沿  $\alpha$  取向线逐渐下移,同时  $\gamma$  纤维织构强度增加。

图 3(a<sub>1</sub>)(b<sub>1</sub>)为热轧态的取向密度分布图。热

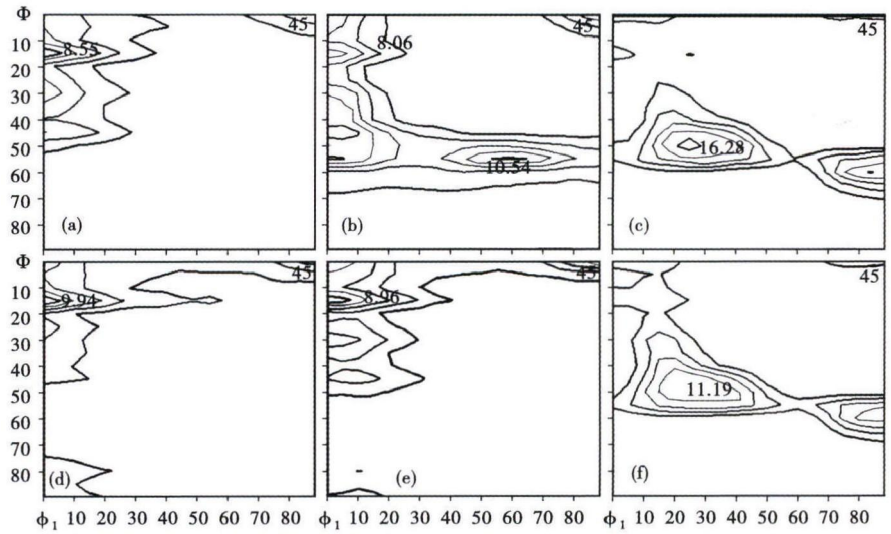


图 2 终轧温度  $800^\circ\text{C}$  (a) (b) (c) 和  $850^\circ\text{C}$  (d) (e) (f) 的热板和冷板织构的恒  $\phi_2 = 45^\circ$  ODF 截面图: (a) (d) 热轧中心层; (b) (e) 热轧退火中心层; (c) (f) 冷轧退火  
Fig. 3 Diagram of ODF  $\phi_2 = 45^\circ$  sections of hot-rolled plate and cold-rolled sheet with finishing hot-rolling temperature at  $800^\circ\text{C}$  (a) (b) (c) and at  $850^\circ\text{C}$  (d) (e) (f): (a) and (d) central layer of hot-rolled plate; (b) and (e) central layer of hot-rolled annealed plate; and (c) and (f) cold-rolled annealed sheet

轧板由强的  $\alpha$  和弱的  $\gamma$  纤维织构组成,降低终轧温度, $\alpha$  纤维织构的强度明显降低,尤其  $\{001\} \langle 110 \rangle \sim \{112\} \langle 110 \rangle$  织构的取向密度降低的幅度最大,同时  $\gamma$  纤维织构的强度明显增强。

降低终轧温度可在基体中形成剪切带,从而改变了织构演变路径<sup>[9]</sup>。因为热轧剪切带是由局部应变所引起的,优先在 Talyor 因子高的取向产生<sup>[10]</sup>,与基体相比,阻止了基体在热轧过程中形成  $\{001\} \langle 110 \rangle$  稳定织构,让织构最强点向其它取向转变。低温轧制时,产生了大量的剪切带,所以降低终轧温度可使  $\{001\} \langle 110 \rangle$  织构强度降低,并向其它不稳定织构转变。

图 3(a<sub>2</sub>)(b<sub>2</sub>)为热轧退火板的取向密度分布。降低终轧温度,热轧退火板的  $\alpha$  织构强度减弱, $\gamma$  织构强度增强。低温热轧比高温热轧板退火板具有更强的  $\gamma$  织构和更弱的  $\alpha$  织构,因为  $\{111\} \langle 112 \rangle$  取向的再结晶晶粒优先在  $\{111\} \langle 110 \rangle$  取向的剪切带中生成<sup>[9]</sup>。IF 钢在铁素体区轧制形成的变形组织有利于退火过程中  $\gamma$  纤维织构的形成<sup>[11]</sup>。热轧板再结晶的驱动力主要由织构的储蓄能决定的,  $\{111\}$  组分具有高的储存能,优先形核,首先开始再结晶<sup>[11]</sup>。降低终轧温度,细化了热轧组织,增加了晶界数量,基体中的形变储能增大,从而抑制了热轧板退火过程中的静态回复而且促进了静态再结晶。同时  $\gamma$  纤维织构具有高的 Talyor 因子, $\gamma$  纤维织构

的晶粒经过热轧后形变储能高,因而在退火时更容易形核长大。本次试验的结果也证明了降低终轧温度有助于热轧退火板中 $\gamma$ 织物的形成。

图3(a<sub>3</sub>)(b<sub>3</sub>)是不同终轧温度下冷轧退火板的 $\alpha$ 和 $\gamma$ 取向线的取向密度。经冷轧和退火后, $\alpha$ 织物的强度非常弱,可以认为是随机分布; $\gamma$ 织物则显著增强。降低终轧温度,冷轧退火板获得了最强的 $\gamma$ 织物。因降低终轧温度,细化了冷轧组织,增加了晶界数量,为再结晶提供了更多的形核位置,利于 $\gamma$ 再结晶织物的增强;同时由于织物的遗传特性,为冷轧退火板织物改变提供了条件。

### 3 结论

降低试验钢种的终轧温度有利于细化热轧组织,使热轧退火、冷轧和冷轧退火态组织得到细化;改善热轧和热轧退火态的组织,降低 $\alpha$ 纤维织物,增强 $\gamma$ 纤维织物,进而改善了冷轧退火板的组织;并显著提高了冷轧退火板的成形性能。

“典型极端环境下超级不锈钢服役行为及其制备技术”项目资助(2015AA034301)

#### 参考文献

- [1] 杜伟,郑淮北,江来珠,等.终轧温度对铁素体不锈钢组织和成形性的影响[J].轧钢,2010,27(4):5-9.
- [2] 张淑敏,高飞,张向军,等.超纯铁素体不锈钢组织演变与成形性能的研究[J].轧钢,2015,32(1):12-16.
- [3] 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,2010.
- [4] 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,2009.
- [5] Hutchinson W B. Development and Control of Annealing Textures in Low-Carbon Steels[J]. International Metals Reviews, 1984, 29: 25-42.
- [6] Yazawa Y, Kato Y, Kobayashi M. Development of Ti-Bearing High Performance Ferritic Stainless Steels R430XT and RSX-1 [J]. Kawasaki Technical Report, 1999, 40: 23-19.
- [7] Doherty R D, Hughes D A, Humphreys F J, et al. Current Issues in Recrystallization: a Review [J]. Materials Science and Engineering, 1997, A238(2): 219-274.
- [8] Akbari G H, Sellars C M, Whiteman J A. Microstructural Development during Warm Rolling of an IF Steel [J]. Acta Materialia, 1997, 45: 5047-5058.

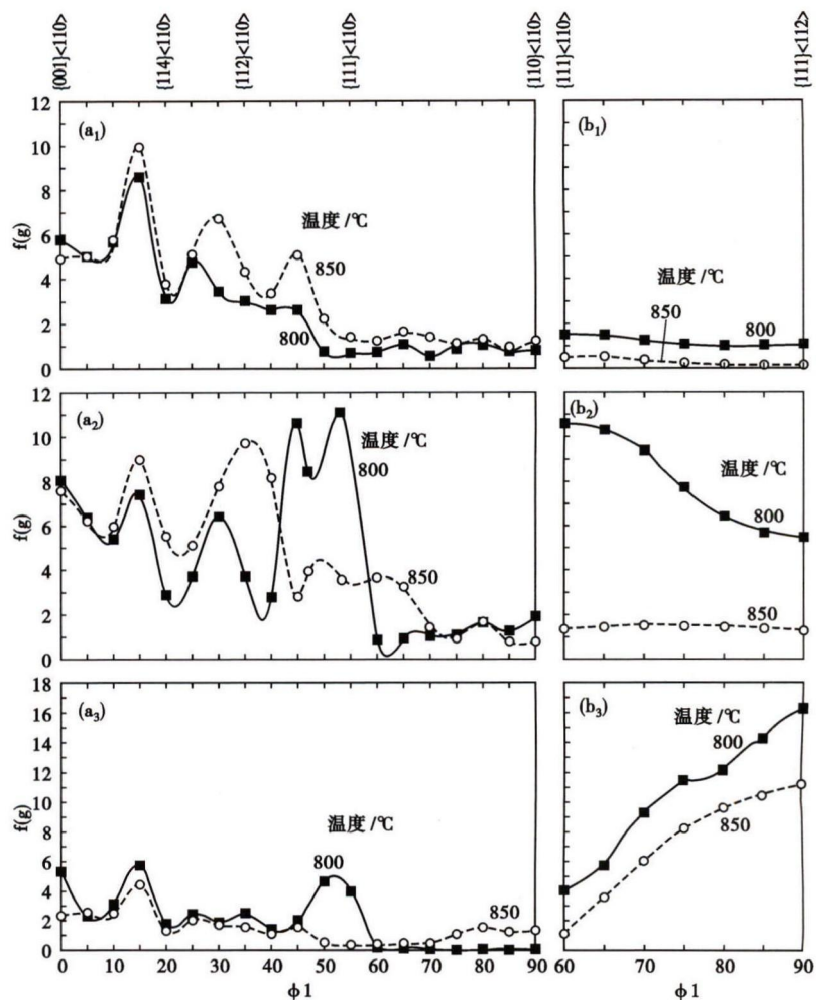


图3 终轧温度对热轧板(a<sub>1</sub>)(b<sub>1</sub>),热轧退火板(a<sub>2</sub>)(b<sub>2</sub>)和冷轧退火板(a<sub>3</sub>)(b<sub>3</sub>)的 $\alpha$ 和 $\gamma$ 取向线的取向密度值的影响:(a<sub>1</sub>)(a<sub>2</sub>)(a<sub>3</sub>) $\alpha$ 取向,(b<sub>1</sub>)(b<sub>2</sub>)(b<sub>3</sub>) $\gamma$ 取向

Fig. 4 Effect of finishing rolling temperature on orientation intensities of  $\alpha$ - and  $\gamma$ -fiber of hot-rolled plate (a<sub>1</sub>) and (b<sub>1</sub>), hot-rolled annealed plate (a<sub>2</sub>) and (b<sub>2</sub>), and cold-rolled annealed sheet (a<sub>3</sub>) and (b<sub>3</sub>): (a<sub>1</sub>) (a<sub>2</sub>) and (a<sub>3</sub>)  $\alpha$  orientation; (b<sub>1</sub>) (b<sub>2</sub>) and (b<sub>3</sub>)  $\gamma$  orientation

- [9] Zhang Chi, Liu Zhenyu, Wang Guodong. Effects of Hot Rolled Shear Bands on Formability and Surface Ridging of an Ultra Purified 21% Cr Ferritic Stainless Steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211: 1051-1059.
- [10] Barnett M R. Role of in-Grain Shear Bands in the Nucleation of {111} // ND Recrystallization Textures in Warm Rolled Steel [J]. ISIJ International, 1998, 38: 78-85.
- [11] Barnett M R, Jonas J J. Influence of Ferrite Rolling Temperature on Microstructure and Texture in Deformed Low C and IF Steels [J]. ISIJ International, 1997, 37: 697-705.

邹勇(1975-),男,在读硕士(太原理工大学),高级工程师,2000年北京科技大学(本科)毕业,不锈钢产品及工艺开发。E-mail: zouyong@tisco.com.cn

收稿日期:2017-02-20