

# 冷轧工艺对铁素体不锈钢成形性能的影响

刘后龙, 刘玲玲, 李 兴, 陈礼清  
(东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 为了研究冷轧工艺对新型铁素体不锈钢 19Cr2Mo1W 成形性能的影响,采用 XRD、EBSD 技术以及平均塑性应变比与粗糙度测量等手段,研究了不同压下率冷轧及随后退火过程中的织构演变和微观组织变化,并讨论了织构和微观组织对成形性能的影响。结果表明:随着冷轧压下率的增加,铁素体不锈钢中的  $\alpha$  和  $\gamma$  纤维织构均有所增强,且  $\alpha$  和  $\gamma$  纤维织构最终稳定取向分别为  $\{223\} \langle \bar{1}10 \rangle$  和  $\{111\} \langle 0\bar{1}1 \rangle$ 。冷轧板  $\alpha$  纤维织构中  $\{223\} \langle \bar{1}10 \rangle$  组分越强,退火后  $\gamma$  再结晶织构强度越高。冷轧板在 1 050 ℃ 退火时,薄板的  $\gamma$  再结晶织构强度高,再结晶组织均匀且尺寸较小,表面粗糙度最小,综合成形性能最佳。

**关 键 词:** 铁素体不锈钢;冷轧;织构演变;微观组织;成形性能

中图分类号: TG 142.71      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2019)08-1099-06

## Influence of Cold Rolling Process on Formability of a Ferritic Stainless Steel

LIU Hou-long, LIU Ling-ling, LI Xing, CHEN Li-qing  
(State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
Corresponding author: CHEN Li-qing, E-mail: lqchen@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** In order to study the effect of cold rolling process on the formability of 19Cr2Mo1W ferritic stainless steel, the micro structure and texture evolution of this steel during cold-rolling and annealing processes were investigated by X-ray diffraction (XRD), electron back-scatter diffraction (EBSD), roughness and plastic strain ratio analytical methods. The results indicated that the amount of  $\alpha$  and  $\gamma$  fiber textures in cold-rolled sheet increased with the increase of cold rolling reduction, and the stable orientation of  $\alpha$  and  $\gamma$  fiber textures during cold rolling was  $\{223\} \langle \bar{1}10 \rangle$  and  $\{111\} \langle 0\bar{1}1 \rangle$  component, respectively. In addition, the strength of the  $\gamma$  recrystallization texture became higher, when the amount of  $\{223\} \langle \bar{1}10 \rangle$  component increased. After annealing at 1 050 ℃ for 1 min, the recrystallized ferritic grains in the sheet distributed uniformly with a fine grain size, the surface roughness was small and the strength of the  $\gamma$  fiber texture was relatively high, i. e., the formability of the cold-rolled steel sheet was the best.

**Key words:** ferritic stainless steel; cold rolling; texture evolution; microstructure; formability

节镍型低成本铁素体不锈钢具有一系列的优点,如低的热膨胀系数、良好的耐腐蚀性能及抗高温氧化和抗高温疲劳性能等,正逐渐替代奥氏体不锈钢而广泛应用于家电、厨卫、汽车及固体燃料电池等领域中<sup>[1-2]</sup>。

19Cr2Mo1W 铁素体不锈钢,是在 19Cr2Mo (444 型)铁素体不锈钢基础上添加一定量的高熔点合金元素 W 和稀土 Ce 而发展起来的,主要用

于制造汽车排气系统热端部件,能够满足高温力学性能、抗热疲劳性能和抗高温氧化性能等需要<sup>[3]</sup>。在排气系统热端加工成形过程中,有必要保持 19Cr2Mo1W 铁素体不锈钢适度的室温成形性,这将涉及到铁素体不锈钢的轧制工艺过程及其织构的控制<sup>[4]</sup>。就目前的研究来看,有关铁素体不锈钢冷轧及冷轧退火过程中织构的演变及其与成形性能之间的关系研究较少。此外,铁素体不

锈钢冷轧退火工艺方面的研究目前主要集中在退火温度为 850 ~ 950 °C 范围内<sup>[5-6]</sup>,而针对含 Mo, W 等高熔点合金元素的铁素体不锈钢在更高温度下退火工艺与成形性能的研究则没有开展. 本文以铁素体不锈钢 19Cr2Mo1W 为实验材料,重点研究不同压下率冷轧过程中的织构演变及冷轧退火温度对其微观组织、织构及成形性能的影响,并分析影响其成形性能的工艺因素,为确定合理的轧制和热处理工艺奠定基础.

## 1 实验过程

实验用 19Cr2Mo1W 铁素体不锈钢采用真空感应炉冶炼并浇铸成 50 kg 圆柱形钢锭,其化学成分(质量分数,%)为: C 0.008, N 0.008, Cr 19.4, Ti 0.14, Nb 0.45, Mo 2.03, W 1.03, Si 0.52, Mn 0.32, Ce 0.049, Fe 余量. 钢锭在 1 200 °C 锻造后,得到厚度为 40 mm 的锻坯,经重新加热至 1 200 °C 保温 1 h 后,在二辊可逆热轧实验机上热轧至 5 mm 厚板坯,开轧温度为 1 150 °C,终轧温度为 900 °C,轧后空冷备用.

将 5 mm 热轧板坯机械除鳞后在 1 050 °C 退火 5 min,在四辊冷轧机上进行压下率分别为 20%, 40%, 60% 和 80% 的冷轧,对 60% 和 80% 压下率的冷轧板在 1 050 °C 下退火 1 min,检测其中心层宏观织构,并测量其成形性能,以研究冷轧压下率对该钢织构和成形性能的影响. 对 80% 压下率的冷轧板在 950, 1 000, 1 050 和 1 100 °C 下分别退火 1 min,用上述相同的方法检测其中心层宏观织构和成形性能,以获得冷轧退火工艺对织构、微观组织和成形性能的影响规律.

宏观织构测量是在 Bruker D8 Discover X 射线衍射仪上进行,采用 Co K $\alpha$  辐射,测量样品的  $\{110\}$ ,  $\{112\}$  和  $\{200\}$  等 3 个晶面的不完整极图,采用级数展开法计算取向分布函数(orientation distribution function, ODF),取向分布函数  $f(g)$  表达了三维取向空间内不同取向  $g(\varphi_1, \Phi, \varphi_2)$  上的取向密度. 利用扫描电镜 OIM 4000 EBSD 系统进行花样采集,研究不同冷轧退火板的显微组织及微织构演变. 薄板成形性能采用平均塑性应变比  $\bar{r}$  值、各向异性度  $\Delta r$  及平均粗糙度  $R_a$  和最大粗糙度  $R_l$  来表征. 按照 GB/T5027—2016《金属材料薄板和薄带 塑性应变比( $r$  值)试验方法》,沿与板轧向呈 0°, 45° 和 90° 方向制成拉伸试样,在拉伸试验机上测得各方向上塑性应变比  $r_{0^\circ}$ ,  $r_{45^\circ}$  和  $r_{90^\circ}$ ,按  $\bar{r} = (r_{0^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ})/4$  计算平均塑性应变

比,按照  $\Delta r = (r_{0^\circ} + r_{90^\circ} - 2r_{45^\circ})/2$  计算各向异性度. 沿与退火板轧向呈 0° 的方向截取标准试样,拉伸到工程应变为 15% 时停止,然后利用 TR300 便携式粗糙度测量仪测量其板面上沿与轧向相垂直的表面  $R_a$  及  $R_l$ .

## 2 实验结果与讨论

铁素体不锈钢在轧制和退火过程中的织构主要分布在  $\alpha$  和  $\beta$  取向线上,其中  $\alpha$  取向线( $\varphi_1 = 0^\circ, \Phi = 0 \sim 90^\circ, \varphi_2 = 45^\circ$ ) 上主要织构组分有  $\{001\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$ ,  $\{112\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$  和  $\{223\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$  等;  $\gamma$  取向线( $\varphi_1 = 0 \sim 90^\circ, \Phi = 54.7^\circ, \varphi_2 = 45^\circ$ ) 上的主要织构组分有  $\{111\} \langle 1\bar{1}2 \rangle$ ,  $\{111\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$  等. 另外,  $\{334\} \langle 4\bar{8}3 \rangle$  和  $\{554\} \langle 2\bar{2}5 \rangle$  等织构组分也易在退火过程中形成. 这些典型织构组分均在  $\varphi_2 = 45^\circ$  ODF 截面上显示,如图 1 所示.

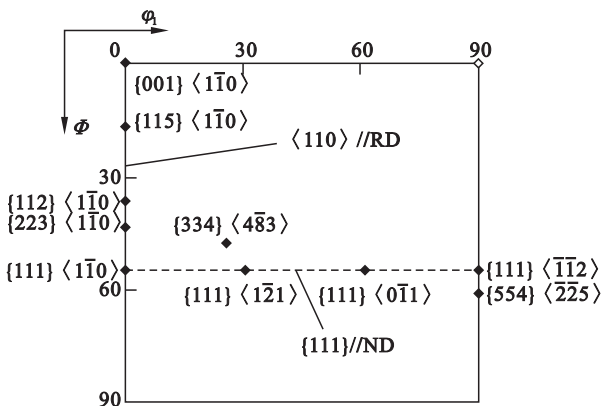


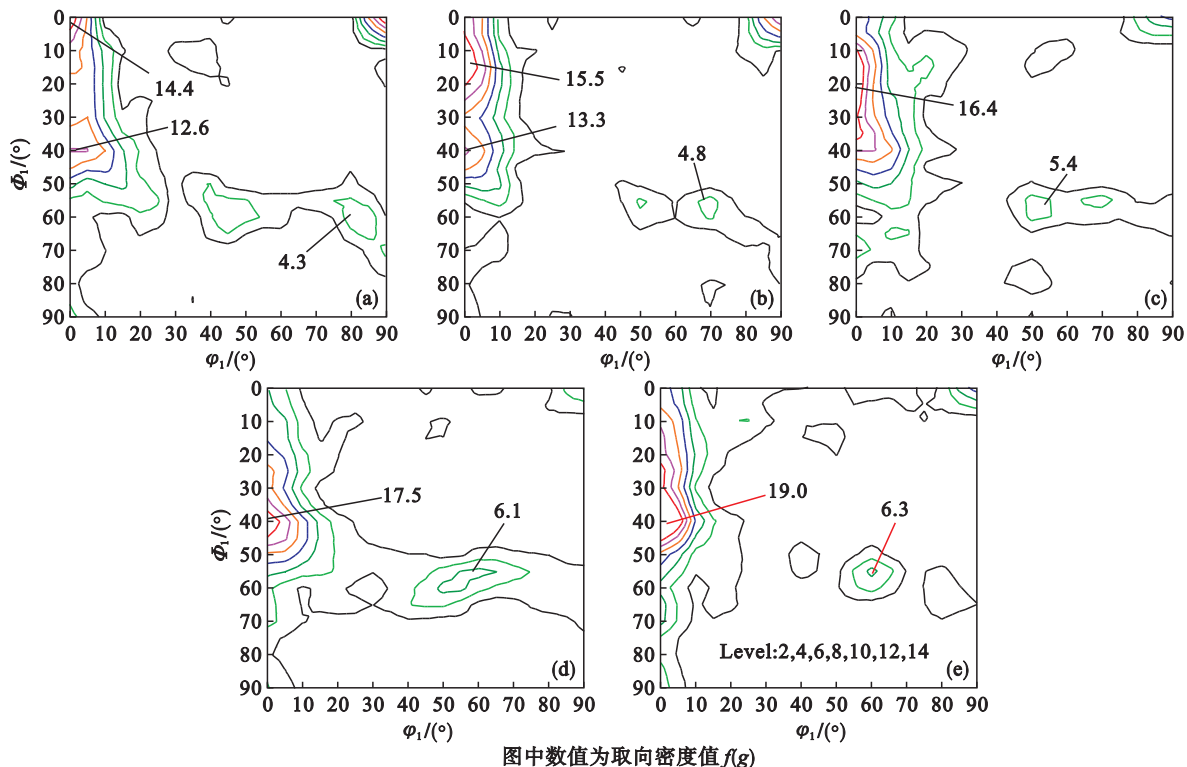
图 1 恒  $\varphi_2 = 45^\circ$  ODF 截面图和主要织构组分  
Fig. 1 Constant  $\varphi_2 = 45^\circ$  ODF section and the major texture orientation components

### 2.1 冷轧过程中的织构演变

图 2 所示为热轧退火板经不同冷轧工艺后织构的演变情况. 初始热轧退火板中织构以强烈的  $\alpha$  纤维织构为主,强点位于  $\{001\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$  附近,取向密度值为  $f(g) = 14.4$ ,次强点位于  $\{223\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$  附近,取向密度值为  $f(g) = 12.6$ ; 而  $\gamma$  纤维织构较弱,主要组分  $\{111\} \langle 1\bar{1}2 \rangle$  的取向密度值为  $f(g) = 4.3$ . 冷轧压下率为 20% 时,  $\alpha$  纤维织构得到一定程度的发展,但强点仍位于  $\{001\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$  附近,取向密度值为  $f(g) = 15.5$ ,次强点仍位于  $\{223\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$  附近,取向密度值为  $f(g) = 13.3$ ;  $\gamma$  纤维织构依旧较弱且有向  $\{111\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$  组分偏转趋势,主要组分  $\{111\} \langle 1\bar{1}4 \rangle$  的取向密度值为  $f(g) = 4.8$ . 当压下率增大至 40% 时,强点沿  $\alpha$  取向线下移至  $\{114\} \langle 1\bar{1}0 \rangle$ ,取向密度值为  $f(g) = 16.4$ ,  $\alpha$  纤维织构进一步得到增强,  $\gamma$  纤维织构强

度有所增强,主要组分仍为 $(111)[\bar{1}46]$ ,取向密度值为 $f(g)=5.4$ 。当压下率为 60% 时, $\alpha$  纤维织构强点下移至 $(223)[\bar{1}10]$ 附近,取向密度值为 $f(g)=17.5$ , $\gamma$  纤维织构进一步增强,组分偏转至 $\{111\}\langle\bar{1}10\rangle$ ,取向密度值为 $f(g)=6.1$ 。当冷轧压下率进一步增加至 80% 时, $\alpha$  纤维织构强点仍位于 $\{223\}\langle\bar{1}10\rangle$ 附近,取向密度值为 $f(g)=19.0$ , $\gamma$

纤维织构略有增强,主要组分仍为 $\{111\}\langle\bar{1}10\rangle$ ,取向密度值为 $f(g)=6.3$ 。可见,冷轧织构主要由强烈的 $\alpha$  纤维织构和相对较弱的 $\gamma$  纤维织构构成。冷轧过程中随着压下率的不断增加, $\alpha$  纤维织构和 $\gamma$  纤维织构都有所增强。冷轧过程中 $\alpha$  纤维织构组分最终稳定取向为 $\{223\}\langle\bar{1}10\rangle$ , $\gamma$  纤维织构最终稳定取向为 $\{111\}\langle\bar{1}10\rangle$ 。



图中数值为取向密度值 $f(g)$

图 2 热轧退火板经不同压下率冷轧后的中心层恒 $\varphi_2=45^\circ$  ODF 截面图

Fig. 2 Constant  $\varphi_2=45^\circ$  ODF sections for the central layer in the hot-rolled and annealed sheets after cold rolling with different reductions

(a)—0% ; (b)—20% ; (c)—40% ; (d)—60% ; (e)—80% .

## 2.2 冷轧退火过程中的织构演变

图 3 为 80% 压下率的冷轧板经不同温度退火后的中心层宏观织构以及 60% 压下率的冷轧退火板的中心层宏观织构的恒 $\varphi_2=45^\circ$  ODF 截面图,退火时间均为 1 min。由图可知,当退火温度为 950℃ 时,试样中存在 $\alpha$  纤维织构和 $\gamma$  再结晶织构, $\alpha$  纤维织构强点位于 $\{223\}\langle\bar{1}10\rangle$ 附近,取向密度值为 $f(g)=8.9$ , $\gamma$  再结晶织构强点位于 $\{111\}\langle\bar{0}11\rangle$ 附近,取向密度值为 $f(g)=6.8$ 。结合图 2e 可知,退火过程中部分 $\{223\}\langle\bar{1}10\rangle$ 取向的基体向 $(111)[\bar{0}11]$ 取向转变。当退火温度为 1 000℃ 时, $\gamma$  再结晶织构增强,但强点位置发生改变,强点位置由 $\{111\}\langle\bar{0}11\rangle$ 移至 $\{111\}\langle\bar{1}21\rangle$ 附近,取向密度值为 $f(g)=8.3$ , $\alpha$  纤维织构强度减弱,强点位于 $\{223\}\langle\bar{1}10\rangle$ 附近,取向密度值为 $f(g)=5.5$ 。这表明,随再结晶程度的升高, $\{111\}$

$\langle\bar{0}11\rangle$ 组分向 $\{111\}\langle\bar{1}12\rangle$ 组分转变。当退火温度为 1 050℃, $\gamma$  再结晶织构进一步得到增强,强点位于 $\{111\}\langle\bar{1}21\rangle$ 附近,取向密度值为 $f(g)=14.6$ , $\alpha$  纤维织构强度显著减小。当退火温度为 1 100℃ 时, $\gamma$  再结晶织构继续增强,强点偏转至 $\{334\}\langle\bar{4}83\rangle$ 附近,取向密度值为 $f(g)=16.8$ ,次强点由 $\{111\}\langle\bar{1}12\rangle$ 偏转到 $\{554\}\langle\bar{2}25\rangle$ 附近,取向密度值增至 $f(g)=16.5$ 。可见,随着冷轧板退火温度的提高, $\gamma$  再结晶织构不断增强。冷轧退火过程中,首先是 $\{223\}\langle\bar{1}10\rangle$ 取向的基体向 $\{111\}\langle\bar{0}11\rangle$ 取向转变,接着 $\{111\}\langle\bar{0}11\rangle$ 取向的基体向 $\{111\}\langle\bar{1}12\rangle$ 转变。退火温度过高时, $\{111\}\langle\bar{1}21\rangle$ 取向基体会向 $\{334\}\langle\bar{4}83\rangle$ 取向附近偏转, $\{111\}\langle\bar{1}12\rangle$ 取向基体会向 $\{554\}\langle\bar{2}25\rangle$ 取向附近偏转。提高退火温度有利于增强 $\gamma$  再结晶织构,但过高的退火温度导致 $\gamma$  再结晶织构发生偏转,Kang 和

Sinclair 等<sup>[7-8]</sup>认为这种偏转不利于材料的成形性能.

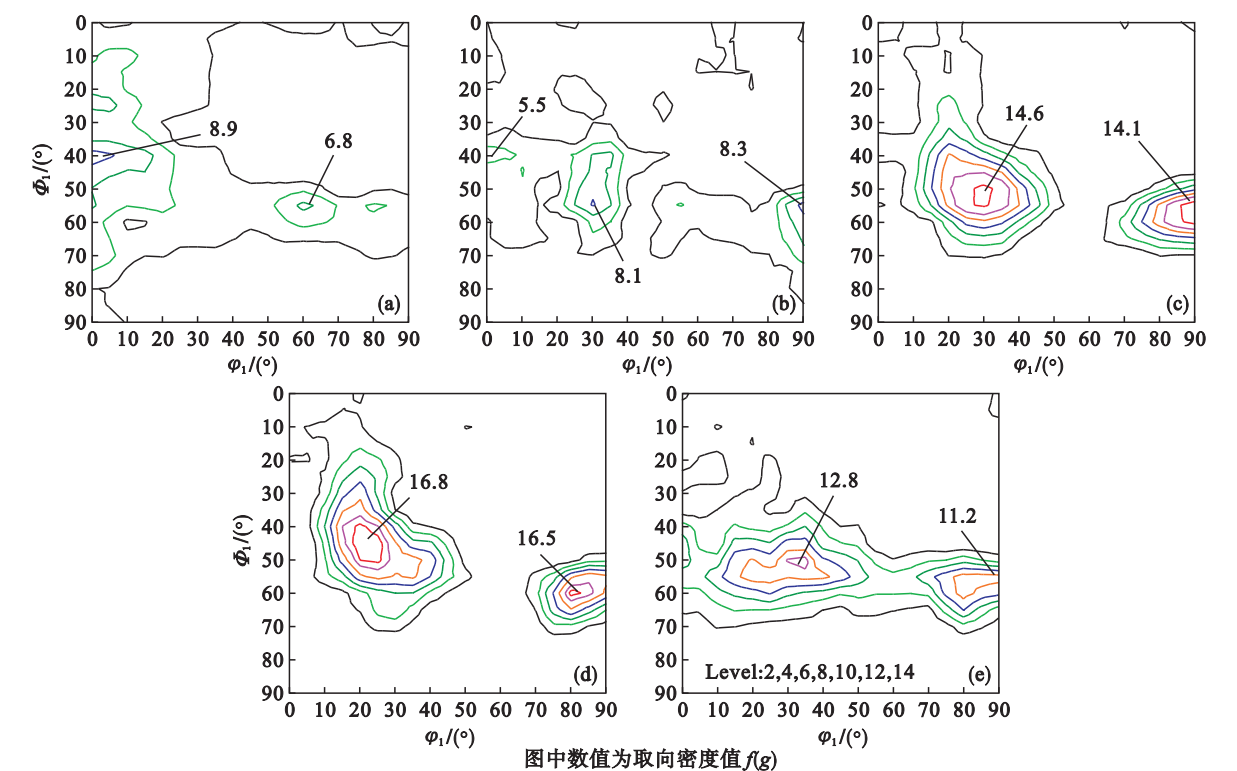


图 3 不同压下率的冷轧板在不同温度退火后中心层结构恒  $\varphi_2 = 45^\circ$  ODF 截面图  
Fig. 3 Constant  $\varphi_2 = 45^\circ$  ODF sections for the central layer in the cold-rolled and annealed sheets with different reductions and annealing temperatures  
(a)—80% , 950 °C ; (b)—80% , 1 000 °C ; (c)—80% , 1 050 °C ; (d)—80% , 1 100 °C ; (e)—60% , 1 050 °C .

### 2.3 不同冷轧压下率及退火对成形性能影响

表 1 为 60% 和 80% 压下率的冷轧板经相同工艺退火后的成形性能. 可见,80% 压下率冷轧退火板比 60% 压下率冷轧退火板的平均塑性应变比  $\bar{r}$  值高. 这是因为,60% 压下率的冷轧退火板中  $\gamma$  再结晶织构强点位于  $\{111\} \langle 1\bar{2}1 \rangle$  附近,取向密度值为  $f(g) = 12.8$ ,如图 3e 所示. 与 60% 压下率相同工艺退火的冷轧板相比,80% 压下率的退火板具有更高的  $\gamma$  再结晶织构强度,这归功于其冷轧过程形成了更强的  $\{223\} \langle 110 \rangle$  组分,如图 3c 所示.  $\bar{r}$  值越高,成形性能越好<sup>[9]</sup>,且两种状态下薄板的  $\Delta r$ 、表面粗糙度  $R_a$  和  $R_t$ ,以及延伸率  $\delta$  相差较小,故 80% 压下率的冷轧退火板具有更好的成形性能.

表 1 不同冷轧压下率退火板的成形性能					
Table 1 Formability of the cold-rolled and annealed sheets with different reductions					
压下率/%	$\bar{r}$	$\Delta r$	$R_a/\mu\text{m}$	$R_t/\mu\text{m}$	$\delta/\%$
60	1.40	0.04	0.38	2.87	29.8
80	1.56	0.02	0.35	2.66	29.2

图 4 为 80% 压下率的冷轧板经不同工艺退火后所测量的 EBSD 的晶体取向图. 由图可见,当

退火温度为 950 °C 时,微观组织严重不均匀,存在部分未再结晶的带状变形晶粒. 当退火温度为 1 000 °C 时,再结晶程度提高且晶粒略微增大,带状晶粒数目明显减少,中心区域仍存在少量  $\langle 001 \rangle // \text{ND}$  取向的带状晶粒,这是由于晶体取向为  $\langle 001 \rangle // \text{ND}$  的晶粒形变储能低<sup>[10]</sup>,不容易发生再结晶. 当退火温度为 1 050 °C 时,再结晶晶粒明显增大且组织较为均匀,此时平均晶粒尺寸为 26.7  $\mu\text{m}$ ,扁长的晶粒消失. 当退火温度为 1 100 °C 时,再结晶晶粒严重粗化,部分晶粒异常粗大,导致组织不均匀,此时平均晶粒尺寸为 79.7  $\mu\text{m}$ . 可见,在温度为 950 ~ 1 050 °C 范围内,随着退火温度的升高,冷轧退火组织中再结晶程度不断增加,平均再结晶晶粒尺寸不断增大,微观组织的不均匀性不断降低. 当退火温度升高到 1 100 °C 时,晶粒会发生异常长大且微观组织不均匀性增大.

表 2 为 80% 压下率的冷轧板经不同退火工艺后的成形性能. 随着冷轧退火温度的升高, $\bar{r}$  值逐渐增大. 当退火温度为 950 °C 时, $\bar{r}$  仅为 1.03. 而当退火温度升高到 1 100 °C 时, $\bar{r}$  值高达 1.72. 这是由于随着退火温度的提高, $\gamma$  再结晶织构强度



不断增强(如图 3 所示), $\alpha$  纤维织构强度不断减弱,而提高  $\gamma$  再结晶织构强度是提高冷轧退火板  $\bar{r}$  值的最有效手段<sup>[11]</sup>.

退火温度在 950 ~ 1 050 ℃ 范围时,随着退火温度的增加, $|\Delta r|$  值由 0.20 不断减小到 0.02. 而当温度升高到 1 100 ℃ 时, $|\Delta r|$  值反而增加到 0.18. 由松弛约束模型计算的单一取向的  $\Delta r$  值可知<sup>[12]</sup>, $\{223\}\langle\bar{1}10\rangle$ , $\{334\}\langle4\bar{8}3\rangle$  和  $\{554\}\langle\bar{2}25\rangle$

组分的减少,有利于 $|\Delta r|$ 值的降低. 所以,随着退火温度的升高,冷轧板中 $\{223\}\langle\bar{1}10\rangle$ 组分不断减少, $|\Delta r|$ 值不断减小. 当退火温度过高时,再结晶织构 $\{111\}\langle1\bar{2}1\rangle$ 组分会向 $\{334\}\langle4\bar{8}3\rangle$ 组分偏转, $\{111\}\langle112\rangle$ 组分向 $\{554\}\langle\bar{2}25\rangle$ 偏转,这会导致 $|\Delta r|$ 值增大,而 $|\Delta r|$ 值的增大会加剧深冲过程中的凸耳倾向,从而降低材料的成形性能.

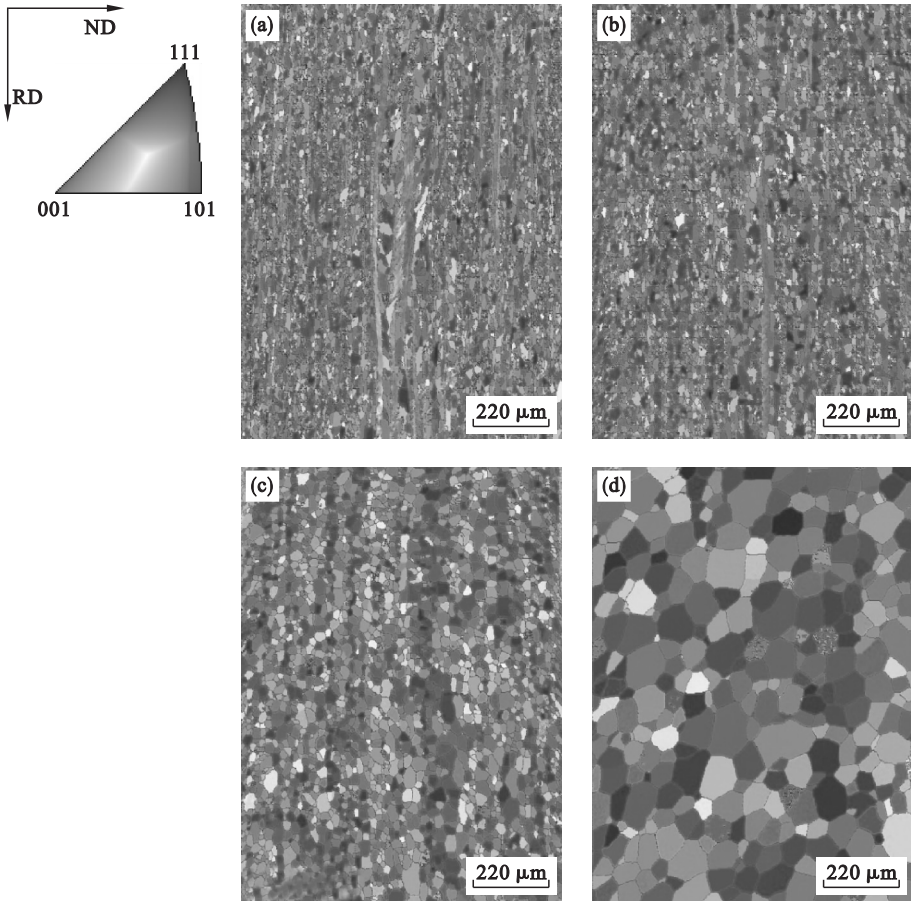


图 4 冷轧板不同温度退火后的晶体取向图(纵截面)

Fig. 4 Crystallographic orientation maps for the cold-rolled sheets after annealing at different temperatures (a)—950 ℃; (b)—1 000 ℃; (c)—1 050 ℃; (d)—1 100 ℃.

在 950 ~ 1 050 ℃ 范围内,随退火温度的增加,材料的平均粗糙度  $R_a$  和最大粗糙度  $R_t$  分别从 0.73  $\mu\text{m}$  和 4.85  $\mu\text{m}$  减小到 0.35  $\mu\text{m}$  和 2.66  $\mu\text{m}$ ,如表 2 所示. 但当温度升高到 1 100 ℃ 时,材料的平均粗糙度  $R_a$  和最大粗糙度  $R_t$  分别

增大到 0.85  $\mu\text{m}$  和 6.23  $\mu\text{m}$ . 铁素体不锈钢薄板的皱折与组织中存在各向异性的取向晶粒簇密切相关<sup>[13-14]</sup>;由于在拉伸变形过程中,未再结晶的带状变形晶粒与异常粗大的晶粒变形行为易与相邻基体不一致,降低了晶粒的变形协调性,造成局部塌陷或隆起,最终导致表面皱折. 从表 2 中还可以看出,随着退火温度的升高,材料的延伸率不断增加. 这是因为,随着退火温度的提高,未变形的带状组织明显减少,再结晶晶粒尺寸逐渐增大(如图 4 所示). 未变形的带状晶粒可变形程度小,拉伸过程中容易开裂,造成材料的延伸率降低;而晶粒尺寸越大,晶粒可变形程度越大,故材料的延伸率随着退火温度的升高而不断增加.

表 2 冷轧板不同温度退火后的成形性能					
Table 2 Formability of the cold-rolled and annealed sheets with different annealing temperatures					
退火温度/℃	$\bar{r}$	$\Delta r$	$R_a/\mu\text{m}$	$R_t/\mu\text{m}$	$\delta/\%$
950	1.03	- 0.20	0.73	4.85	15.4
1 000	1.21	- 0.11	0.53	3.91	25.6
1 050	1.56	0.02	0.35	2.66	29.2
1 100	1.72	0.18	0.85	6.23	31.1

综上可知,冷轧压下率为 80% 且在 1 050 ℃ 退火 1 min 时,冷轧板具有较高的 $\bar{r}$ 值和较低的 $|\Delta r|$ 值,组织细小且各取向晶粒均匀分散,变形过程中协调性高,拉伸变形过程中表面粗糙度低,具有良好的综合成形性能。

### 3 结 论

1) 19Cr2Mo1W 铁素体不锈钢冷轧织构主要由强烈的  $\alpha$  纤维织构和相对较弱的  $\gamma$  纤维织构构成。随着压下率的不断增加,冷轧过程中  $\alpha$  纤维织构和  $\gamma$  纤维织构均有所增加。在压下率不断增加的冷轧过程中, $\alpha$  纤维织构组分最终稳定取向为  $\{223\}\langle\bar{1}10\rangle$ , $\gamma$  纤维织构组分最终稳定取向为  $\{111\}\langle 011\rangle$ 。

2) 随着冷轧压下率的增加, $\alpha$  纤维织构中  $\{223\}\langle\bar{1}10\rangle$  组分增强,造成随后退火后的  $\gamma$  再结晶织构强度增加。因此,提高冷轧压下率有助于提高冷轧退火板的 $\bar{r}$ 值。

3) 随着冷轧退火温度的升高,冷轧退火板中再结晶晶粒尺寸不断增大, $\gamma$  再结晶织构不断增强,冷轧板的 $\bar{r}$ 值也逐渐增大。但退火温度过高则引起再结晶组织和晶粒尺寸严重不均匀,降低材料的变形协调能力,导致拉伸过程中薄板表面粗糙度的增大和 $|\Delta r|$ 值增加,降低材料的成形性能。所以,19Cr2Mo1W 铁素体不锈钢冷轧板退火温度应控制在 1 050 ℃ 左右。

### 参考文献:

- [1] Zhang X, Fan L J, Xu Y L, et al. Texture, microstructure and mechanical properties of aluminum modified ultra-pure 429 ferritic stainless steels [J]. *Materials and Design*, 2016, 89: 626 – 635.
- [2] Gurram M, Adepu K, Reddy R, et al. Effect of copper and aluminum addition on mechanical properties and corrosion behavior of AISI 430 ferritic stainless steel gas tungsten arc welds [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2013, 2(3): 238 – 249.
- [3] Wei L L, Chen L Q, Ma M Y, et al. Oxidation behavior of ferritic stainless steels in simulated automotive exhaust gas containing 5 vol. % water vapor [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2018, 205: 508 – 517.
- [4] Abreu H F G, Bruno A D S, 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(4): 342 – 347.
- [5] Gao F, Liu Z Y, Liu H T, et al. Evolution of through-thickness texture in ultra-purified 17% Cr ferritic stainless steels [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2013, 20(4): 31 – 38.
- [6] 贺英, 金红明, 褚于良, 等. 铁素体不锈钢再结晶织构与表面起皱比较研究 [J]. *材料热处理学报*, 2017, 38(2): 83 – 90.  
(He Ying, Jin Hong-ming, Chu Yu-liang, et al. Comparison of recrystallization texture and surface ridging of ferritic stainless steels [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2017, 38(2): 83 – 90.)
- [7] Kang H G, Huh M Y, Park S H. Effect of lubrication during hot rolling on the evolution of through-thickness texture in 18% ferritic stainless steel sheet [J]. *Steel Research International*, 2008, 79(6): 489 – 496.
- [8] Sinclair C W, Mithieux J D, Schmitt H J. Recrystallization of stabilized ferritic stainless steel [J]. *Metallurgical and Materials*, 2005, 36(11): 3205 – 3215.
- [9] 高飞, 刘海涛, 刘振宇, 等. 高纯 Cr17 钢板厚方向织构演变、成形性能及表面皱折 [J]. *材料热处理学报*, 2012, 33(4): 38 – 43.  
(Gao Fei, Liu Hai-tao, Liu Zhen-yu, et al. Through-thickness texture evolution, formability and ridging in high purified 17% Cr ferritic stainless steel [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2012, 33(4): 38 – 43.)
- [10] Ray R K, Jonas J J, Hook R E. Cold rolling and annealing textures in low carbon and extra low carbon steels [J]. *International Materials Reviews*, 1994, 39(4): 129 – 172.
- [11] Du W, Jiang L Z, Sun Q S, et al. Effect of hot band annealing processes on microstructure, texture and  $r$ -value of ferritic stainless steel [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2010, 17(7): 58 – 62.
- [12] Daniel D, Jonas J J. Measurement and prediction of plastic anisotropy in deep-drawing steels [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1990, 21(1): 331 – 343.
- [13] Shin H J, An J K, Park S H. The effect of texture on ridging of ferritic stainless steel [J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(16): 4693 – 4706.
- [14] Park S H, Kim K Y, Lee Y D. Evolution of microstructure and texture associated with ridging in ferritic stainless steels [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2002, 42(1): 100 – 105.