

冷轧变形量及退火温度对 $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ 板材织构和性能的影响

冯昭伟¹, 米绪军², 王江波¹, 袁志山¹, 缪卫东¹, 周瑾¹

(1. 有研亿金新材料股份有限公司, 北京 102200;

2. 北京有色金属研究总院 有色金属材料制备加工国家重点实验室, 北京 100088)

摘要: 使用 X 射线衍射技术研究冷轧变形量和退火温度对 $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ 合金一次冷轧和二次冷轧板织构和性能的影响。结果表明, 在冷轧变形量小于 35% 时, 一次冷轧板的织构主要为 $\{111\}\langle 110 \rangle$, 与热轧态织构不同, 随冷轧变形量的增加, 织构取向密度略有提高; 二次冷轧板主要织构为 $\{111\}\langle 110 \rangle$, 在 $\langle 110 \rangle // \text{RD}$ 取向线上从 $\{111\}\langle 110 \rangle$ 延伸到 $\{110\}\langle 110 \rangle$, 二次冷轧使织构取向密度获得较大提高。当二次冷轧板材在高于 500 °C 退火时, 其主要织构为 $\{111\}\langle 112 \rangle$ 再结晶织构, 700 °C、60 min 炉冷样品织构的取向密度明显高于相同制度下水淬样品织构的取向密度。

关键词: $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ 形状记忆合金; 冷轧板材; 退火温度; 织构

中图分类号: TG139.6

文献标志码: A

Influence of cold rolling reduction and annealing temperature on texture and properties of $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ plate

FENG Zhao-wei¹, MI Xu-jun², WANG Jiang-bo¹, YUAN Zhi-shan¹, MIAO Wei-dong¹, ZHOU Jin¹

(1. Grikin Advanced Materials Co., Ltd., Beijing 102200, China;

2. State Key Laboratory for Fabrication and Processing of Nonferrous Metals,

General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China)

Abstract: The effects of the cold rolling reduction and annealing temperature on the texture and properties of $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ first and secondary cold-rolled plate were investigated by using XRD method. The results show that the major texture of the first cold-rolled plate is $\{111\}\langle 110 \rangle$ that is different from the hot-rolled texture and the orientation density increases slightly with increase of cold reduction when the cold reduction is less than 35%. The orientation density of the secondary cold-rolled plate is greatly enhanced and the major texture is $\{111\}\langle 110 \rangle$ and spreads from $\{111\}\langle 110 \rangle$ to $\{110\}\langle 110 \rangle$ in a $\langle 110 \rangle // \text{RD}$ fiber. When the annealing temperature of the secondary cold-rolled plate is above 500 °C the major texture is $\{111\}\langle 112 \rangle$ recrystallization texture. The orientation density is obviously higher in the secondary cold-rolled plate after furnace cooling at 700 °C for 60 min than that of water quenching texture.

Key words: $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ shape memory alloy; cold-rolled plate; annealing temperature; texture

NiTi 合金以其优良的形状记忆性能、超弹性和生物相容性而受到广泛的关注, 在工业应用中也取得了较大的进展, 目前在医疗、驱动器等方面获得广泛应用^[1-3]。由于 $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ 形状记忆合金宽滞后效应, 制成的器件可在常温储存, 因此, 在管接头等紧固件工程上具有广泛应用^[4-5]。

NiTi 合金的形状记忆效应和伪弹性与晶体取向和织构有密切关系。计算表明, 对于 B2→B19' 相变, 沿 $[233]\text{B2}$ 和 $[111]\text{B2}$ 方向可恢复拉伸应变较大, 分别为 10.7% 和 9.8%^[6], 该理论预测已被单晶拉伸试验所证实^[7]。NiTi 热轧板和冷轧板中基本具有与体心立方轧制近似的 $\langle 110 \rangle // \text{RD}$ (α 取向线) 和/或 $\langle 111 \rangle // \text{ND}$ (γ 取向线)

织构^[8-9], 最强织构在 {332}<110>, 织构从 {332}<110> 延伸到 {110}<110> 是 B2 结构 NiTi 合金织构的特点^[8], NiTi 合金中也存在 {111}<112> 织构^[10]。

目前, 对 Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ 合金织构的研究不多, 不同研究给出的织构类型不同。颜莹等^[11-12]研究了 Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ 管接头用热挤压管材及冷轧管材的组织与织构, 认为在热挤压管及冷轧管中多数晶粒的<111>取向接近管材的径向。杨冠军等^[13-14]对初始轧向无择优取向 Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ 冷轧板材的织构及退火温度对织构演变的影响进行了研究, 冷轧板材的主要织构组分为 {001}<uv0> 面织构, 再结晶退火时织构随温度的升高由 {001}<100> 立方织构变为 {001}<110> 织构, 但文献^[13-14]中给出的织构强度较弱, 最大取向密度仅为 2.5。颜莹等^[15]研究表明, Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ 热轧板织构主要为 {001}<uv0> 和 {111}<uvw>, 当与轧向成不同角度取样测试织构时, 强织构组分不同。冷轧板材主要形成较强的 γ 丝织构和 {332} 丝织构, γ 丝中的组分强度较高, 尤其是 {111}<110> 组分, 而 {332} 丝织构中只有 {332}<110> 组分强度较高^[16]。

颜莹等^[15]的研究表明, 热轧 {001}<uv0> 织构不稳定, 在冷轧后消失, 文中未给出织构演变的机理。杨冠军等^[13]采用的冷轧变形量为 33%, 颜莹等^[16]未给出冷轧变形量, 两次冷轧的总变形量为 33%, 而系统研究冷轧变形量对织构的影响未见报道。目前, 冷轧变形量及退火温度对板材织构影响的研究不系统, 为此, 本文作者研究冷加工量、二次冷加工及退火制度对 Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ 板材织构及性能的影响。

1 实验

Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ (摩尔分数, %) 铸锭采用二次真空自耗熔炼, 直径为 120 mm。铸锭在 850 °C、60 min 保温后锻成厚度为 20 mm 的板坯, 在 850 °C、60 min 保温后单向热轧成 2.0 mm 板。2.0 mm 热轧板经 850 °C、90 min 炉冷热处理后进行一次冷轧, 冷轧变形量分别为 9%、18%、24% 和 35%。选取一次冷轧变形量为 24% 的板坯经 700 °C、60 min 真空炉冷处理后进行二次冷轧, 冷轧变形量为 33%, 所得产品称为二次冷轧板材。轧机的轧辊直径为 320 mm, 轧制过程中轧辊与试样接触弧长度与样品厚度之比大于 2, 可保证样品均匀变形。在轧制板材中间宏观变形相对均匀的区间内切取试样进行织构测量。

对一次冷轧板及在 350~750 °C 保温 60 min、水淬

处理后的二次冷轧板材, 分别取样进行硬度检测。硬度检测在 432SVD 维氏硬度计上进行, 测试时载荷为 98 N, 作用时间为 30 s。

在 CSS44200 电子万能实验机上测量二次冷轧板材沿与轧向成 0°、45°、90° 方向试样的室温力学性能, 拉伸试样标距为 25 mm, 拉伸速率为 $6.7 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。

对一次冷轧板、二次冷轧板取样进行冷轧织构测定, 选取二次冷轧板材在 500 °C、60 min, 600 °C、60 min, 700 °C、60 min 水淬样品及 700 °C、60 min 炉冷样品测定热处理后的织构。在 SIEMENS D5000 型 X 射线衍射仪上进行织构测定, 测试样品的尺寸为 15 mm × 10 mm, 长方向为轧向。为保证测试织构的一致性, 将各试样轧面磨光至约 0.85 厚度位置测试织构。取 Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ 合金粉末作为无取向样品, 其测定结果作为背底在板材织构测量时进行扣除。织构测定采用 Mo K α 辐射, 测定 BCC 结构 NiTi 基体 (B2 相) 的 {110}、{200}、{211} 和 {220} 4 个不完整极图, 选择 4 个不完整极图是由于 Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ 板材存在双相, 增加一个晶面, 收集的信息更多, 可提高取向分布函数 (ODF) 的计算精度。极图测量范围为 $\alpha=0\sim 70^\circ$ 、 $\beta=0\sim 360^\circ$, 利用 Bunge 法计算 ODF。

2 结果及讨论

2.1 冷轧板材的硬度

Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ 一次冷轧板在不同冷轧变形量下的硬度如图 1 所示。

由图 1 可知, 随冷轧变形量的增加, 板材硬度持

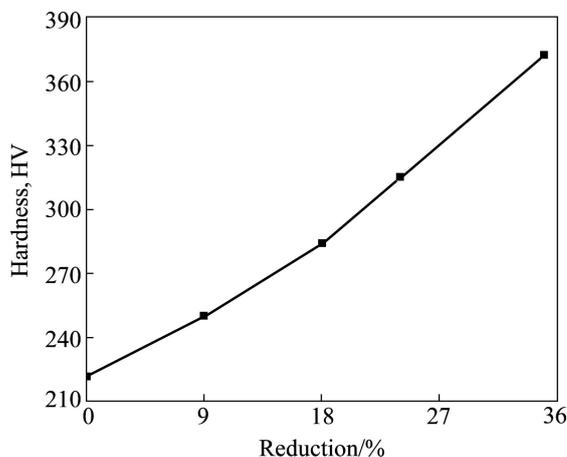


图 1 一次冷轧板硬度与变形量的关系

Fig. 1 Relationship between hardness and reduction of the first cold-rolled plates

续增加, 近似呈线性, 在较小冷轧压下量时增长稍缓, 大变形量时增速加快, 当冷轧压下量增加到 35% 时, 硬度增加 150HV, 增幅为 68%, 产生了明显的加工硬化现象。

$\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ 冷轧板在 700 °C 退火后硬度与轧制前热处理态的硬度相差不大, 证明已进行了充分退火。选取一次冷轧变形量为 24% 的板坯经 700 °C、60 min 真空炉冷处理后进行冷轧变形量为 33% 的二次冷轧, 二次冷轧板材在不同温度下退火后的硬度如图 2 所示。

从图 2 可知, 随退火温度的升高, 板材硬度持续下降。在较低温度退火时, 板材硬度先缓慢下降; 当退火温度高于 400 °C 时, 硬度急剧下降; 在 600 °C 温度以上继续提高退火温度, 硬度缓慢下降。

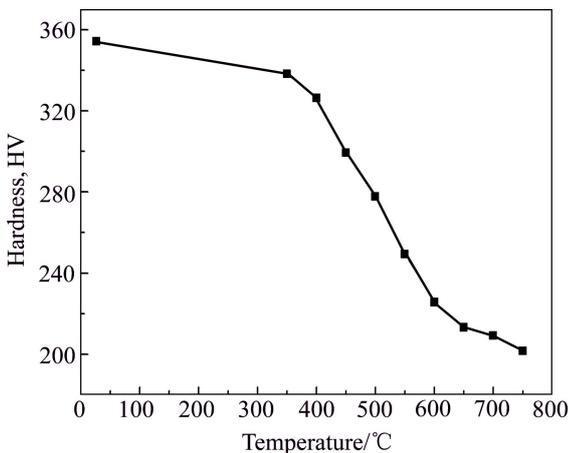


图 2 退火温度对二次冷轧板材硬度的影响

Fig. 2 Effect of annealing temperature on hardness of secondary cold-rolled plates

2.2 二次冷轧板材的力学性能

对二次冷轧板进行力学性能测试, 二次冷轧板材与轧向成不同角度的室温力学性能曲线见图 3。

由图 3 可知, 二次冷轧板材与轧向成 90° 方向的断裂伸长率最小, 与轧向成 45° 方向的断裂伸长率最大。轧向的抗拉强度最高, 达到 1.4 GPa, 与轧向成 45° 方向的抗拉强度最低。二次冷轧板材维氏硬度达到 354HV, 屈服强度高于 1 GPa, 存在较严重的加工硬化。

2.3 轧制变形量对织构的影响

图 4 所示为 $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ 板材在 $\varphi_2=45^\circ$ 及不同轧制变形量下的 ODF 截面图; 图 5 所示为不同冷轧量 $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ 冷轧板的取向线分析图。

由图 4(a)可知, $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ 热轧板材退火后存在

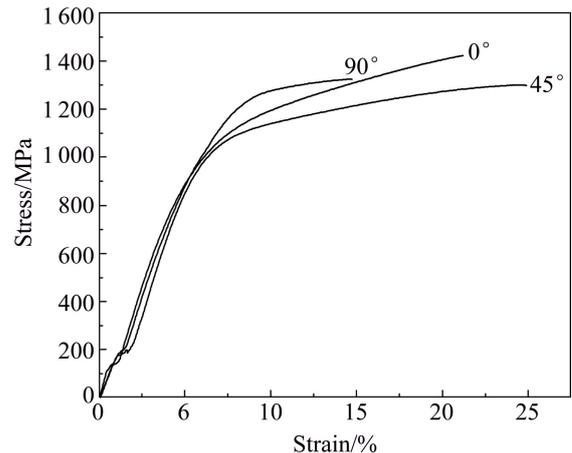


图 3 与轧向成不同角度二次冷轧板室温应力—应变曲线
Fig. 3 Room temperature stress—strain curves of secondary cold-rolled plates along different angles to rolling direction

织构, 主要织构类型为近似面织构, 有 3 条取向, 分别接近 $\{114\}\langle uvw \rangle$, $\{223\}\langle uvw \rangle$ 和 $\{221\}\langle uvw \rangle$, 对应的欧拉角分别接近 $(0^\circ \sim 90^\circ, 20^\circ, 45^\circ)$ 、 $(0^\circ \sim 90^\circ, 35^\circ, 45^\circ)$ 和 $(0^\circ \sim 90^\circ, 70^\circ, 45^\circ)$ 。最强织构为 $\{221\}\langle uvw \rangle$ 面织构, 集中在 $\{221\}\langle 114 \rangle$ 取向, 其他几条取向较弱。

由图 4(b)~(d)可知, $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ 一次冷轧板织构与初始织构不同, 随变形量的增大, 主要织构为逐渐增强的 $\{111\}\langle uvw \rangle$, 最强织构转向 $\{111\}\langle 110 \rangle$ 。

体心立方金属主要织构分布在 α 取向线与 γ 取向线上。从图 5 可知, 随冷轧变形量的增加, α 和 γ 取向线织构的取向密度逐渐增高, γ 取向线织构强度增速更快, $\{221\}\langle uvw \rangle$ 面织构消失。当冷轧变形量大于 24% 时, 最强织构均由 $\{332\}\langle 110 \rangle$ 延伸到 $\{110\}\langle 110 \rangle$ 。从图 4 和 5 可知, 当冷轧制变形量小于 35% 时, $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ 合金变形织构与初始织构相比已发生较大改变, 逐渐由 $\{221\}\langle uvw \rangle$ 面织构转向 $\{111\}\langle uvw \rangle$ 面织构。

2.4 二次冷加工对织构的影响

为研究多次冷轧对织构的影响, 对 $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ 合金板材进行二次冷轧, 图 6 所示为 $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ 一次冷轧板材退火态及二次冷轧板加工态在 $\varphi_2=45^\circ$ 时的 ODF 截面图; 图 7 所示为一次冷轧板加工态、退火态及二次冷加工板取向线分析图。

从图 6 和 7 可以看出, 二次冷轧 33% 时主要为 α 取向线和 γ 取向线织构, $\{111\}\langle 110 \rangle$ 织构最强, 取向密度达 10.2。一次冷轧 24% 板材退火后取向密度有所加强, 二次冷轧 33% 时织构强度得到显著增强, 沿 α 取

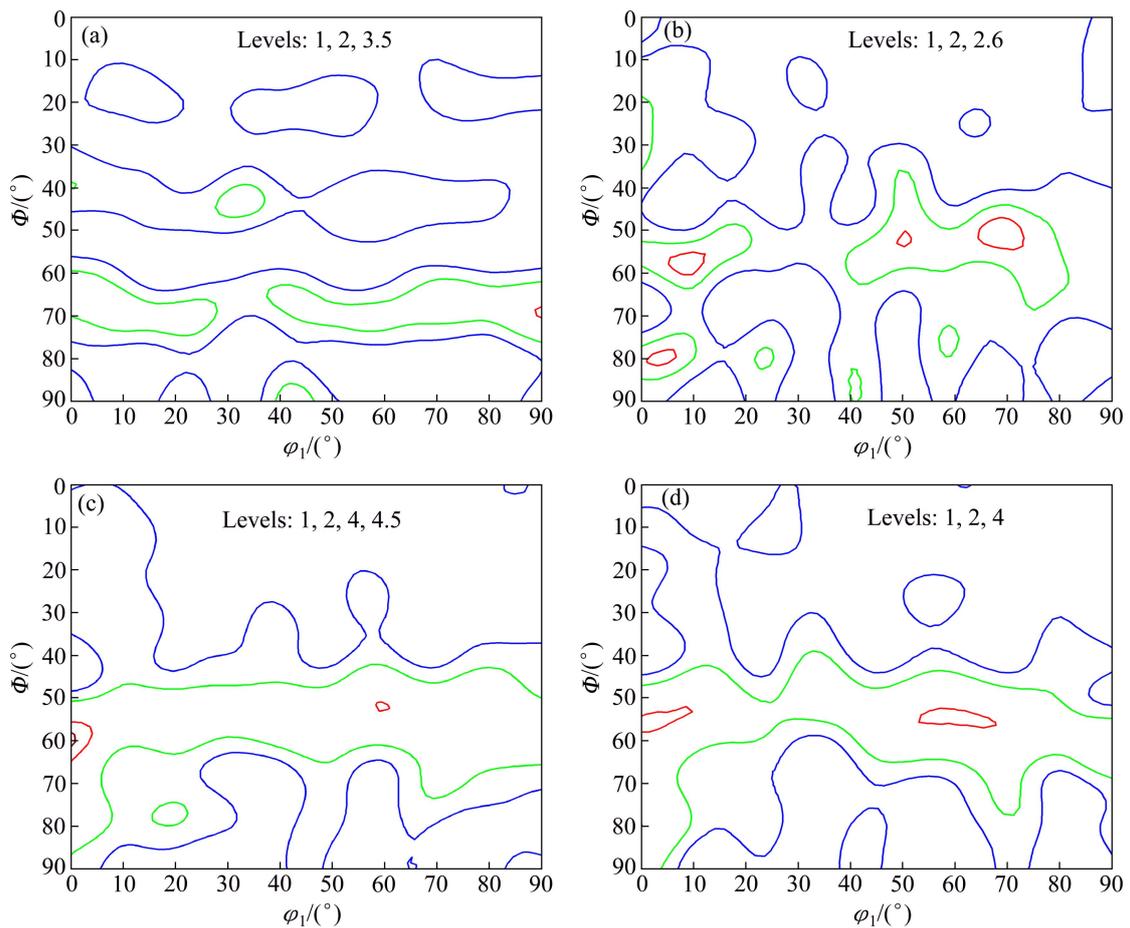


图 4 Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ 板材在 $\phi_2=45^\circ$ 及不同形变量下 ODF 截面图

Fig. 4 ODF sections of Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ plates at $\phi_2=45^\circ$ and different cold-rolled reductions ($\{221\}\langle 114 \rangle(90^\circ, 70^\circ, 45^\circ)$; $\{111\}\langle 110 \rangle(0^\circ, 55^\circ, 45^\circ)$ ($60^\circ, 55^\circ, 45^\circ$): (a) Hot-rolled plate; (b) 18%; (c) 24%; (d) 35%

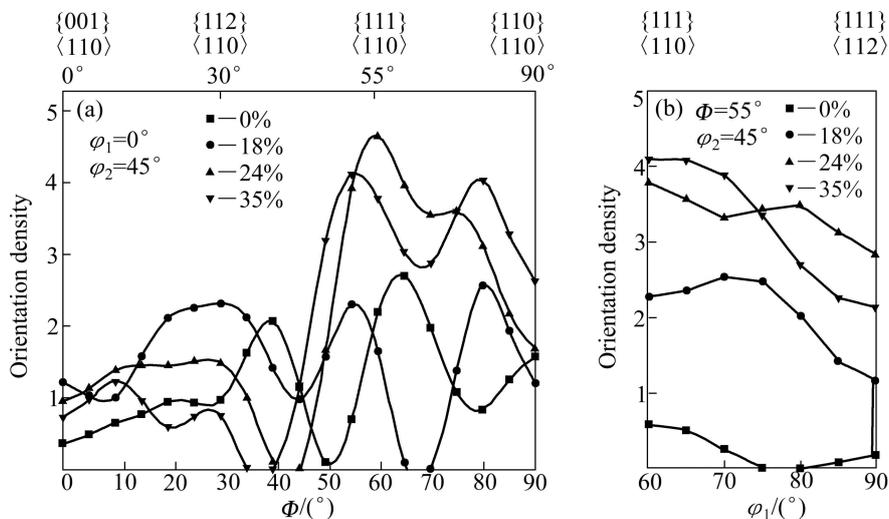


图 5 一次冷轧板在不同形变量下的取向线分析

Fig. 5 Orientation lines analysis at different reductions of the first cold-rolled plates: (a) α -fiber; (b) γ -fiber

向线 $\phi_1=0^\circ$, $\phi=55^\circ\sim 90^\circ$ 的取向密度较强, 由 $\{111\}\langle 110 \rangle$ 延伸到 $\{110\}\langle 110 \rangle$, $\{110\}\langle 110 \rangle$ 处取向密度达到 6.6。

一次冷轧板退火和二次冷轧使 $\{111\}\langle 110 \rangle$ 织构强度增加, 而对 $\{111\}\langle 112 \rangle$ 织构基本无影响。

2.5 退火温度对二次冷加工板材织构的影响

对二次冷轧板在不同退火温度的织构进行测试。图 8 所示为二次冷轧板在不同退火温度下的 ODF 图；图 9 所示为 $\phi_2=45^\circ$ 时二次冷轧板的 ODF 截面图；图 10 所示为二次冷加工不同退火制度下的 α 和 γ 取向线分析图。

由图 9 和 10 可知，二次冷轧板材退火后织构类型发生了明显的变化， $\{110\}\langle 110\rangle$ 织构消失， α 取向线取向密度大幅降低， γ 取向线上 $\{111\}\langle 112\rangle$ 取向密度明显提高， $\{111\}\langle 110\rangle$ 减弱，退火后板材有较强的 G 织构 $\{110\}\langle 001\rangle(90^\circ, 90^\circ, 45^\circ)$ 。随着退火温度的升高， α 取向线上取向密度稍有增高， γ 取向线上取向密度增高。700 °C 炉冷样品中 γ 取向线密度高于同制度下水

淬样品的 γ 取向线密度。

2.6 讨论

$\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ 合金板材在冷加工时发生塑性变形，形成高密度的位错，强度与硬度增加，产生加工硬化。二次冷轧板材在不同温度下退火时发生回复再结晶，根据冷变形金属回复再结晶组织和性能的变化规律，推断 350~400 °C 为回复过程，再结晶的开始温度约为 400 °C，再结晶终止温度约为 600 °C。

$\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ 合金热轧板及冷轧板织构由 $\{332\}\langle 110\rangle$ 延伸到 $\{110\}\langle 110\rangle$ ，与 NiTi 合金的织构一致^[8-9]，但与文献[13-14]中 $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ 的织构不同。 $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ 合金在冷轧制变形量小于 35% 时，随变形

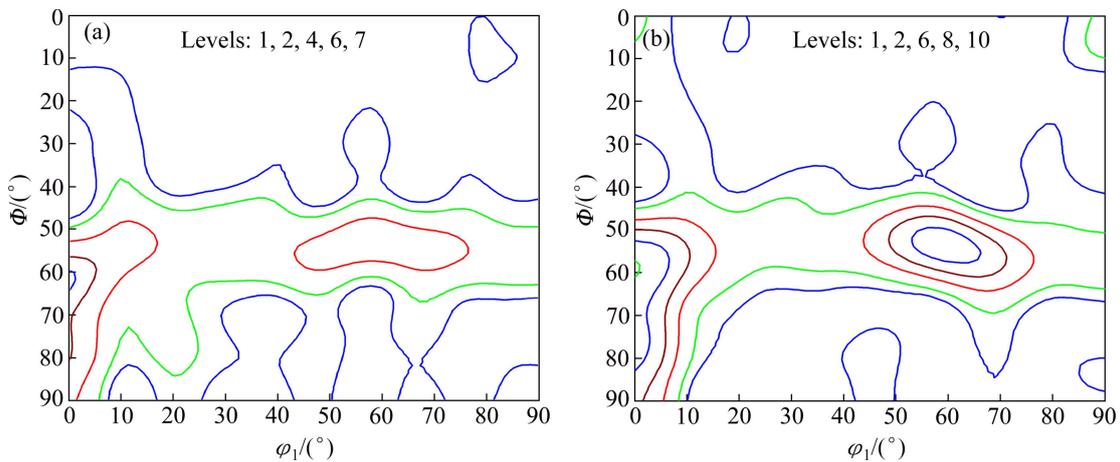


图 6 一次冷轧板退火态及二次冷轧板在 $\phi_2=45^\circ$ 时的 ODF 截面图

Fig. 6 ODF sections of annealed state of the first cold-rolled plate (a) and the secondary cold-rolled plate (b) at $\phi_2=45^\circ$ ($\{332\}\langle 110\rangle(0^\circ, 65^\circ, 45^\circ)$; $\{111\}\langle 110\rangle(0^\circ, 55^\circ, 45^\circ)$ ($60^\circ, 55^\circ, 45^\circ$); $\{110\}\langle 110\rangle(0^\circ, 90^\circ, 45^\circ)$)

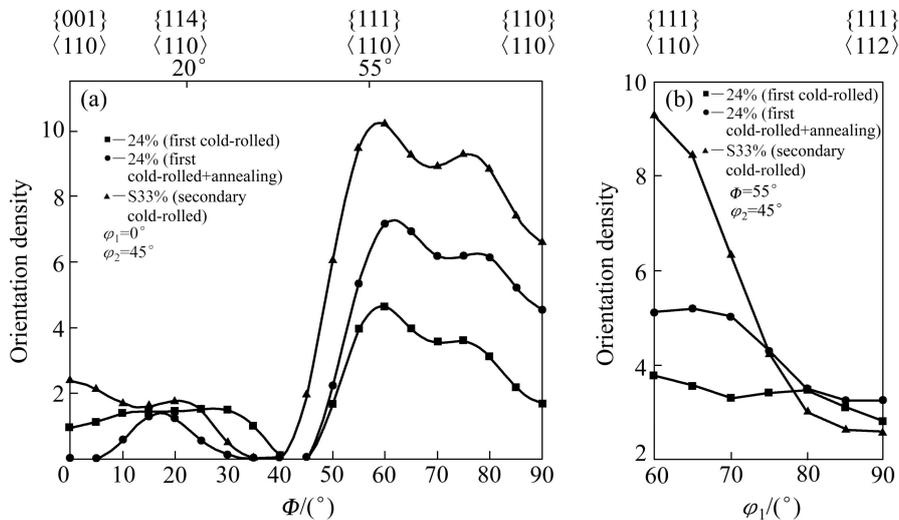


图 7 一次冷轧板加工态、退火态及二次冷加工板取向线分析

Fig. 7 Orientation lines analysis of cold working and annealing state of first cold-rolled plate and secondary cold-rolled plate: (a) α -fiber; (b) γ -fiber

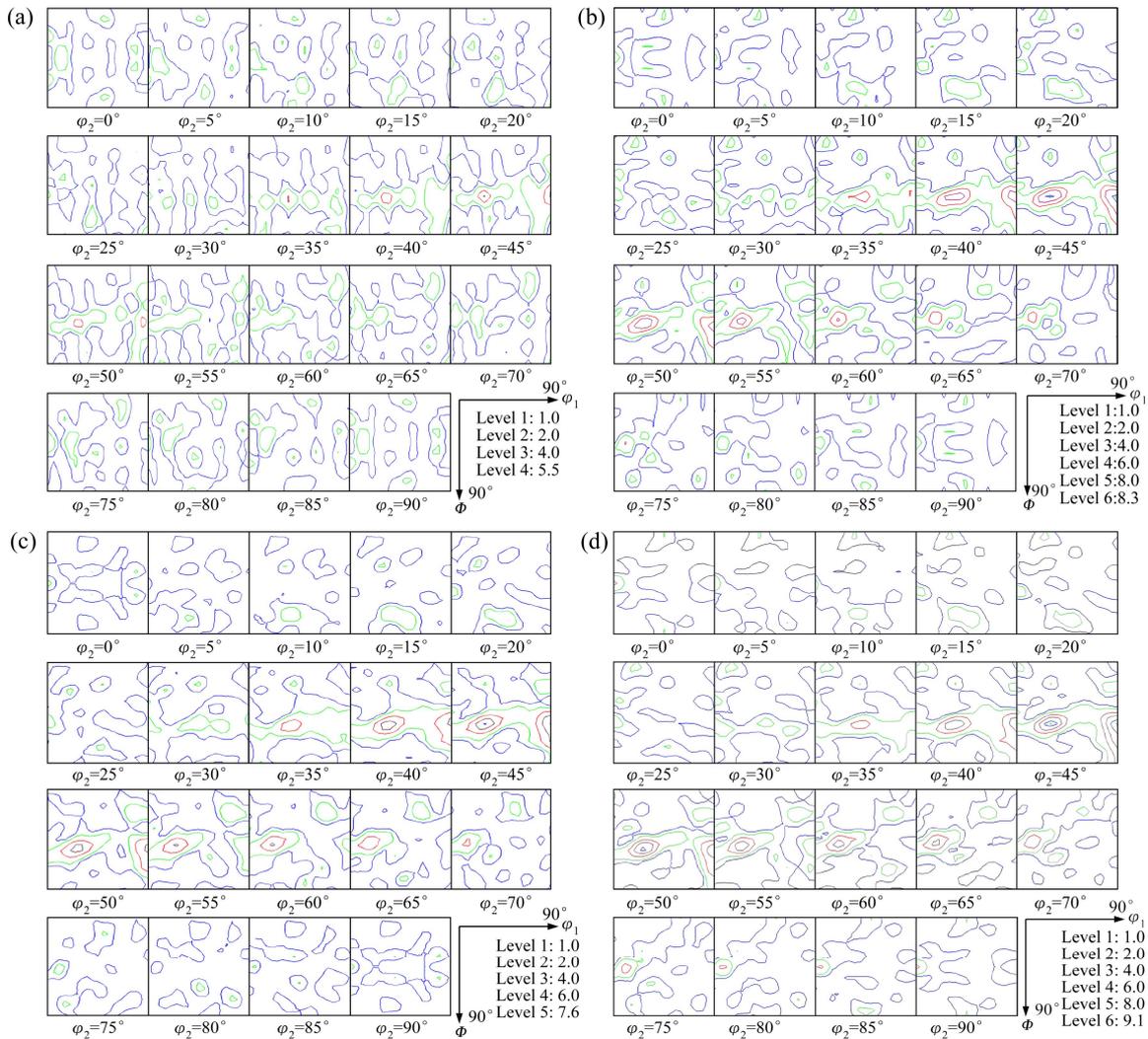


图 8 不同退火制度下二次冷轧板的 ODF 图

Fig. 8 ODFs of secondary cold-rolled plates under different annealing states: (a) 500 °C, 60 min, WQ; (b) 600 °C, 60 min, WQ; (c) 700 °C, 60 min, WQ; (d) 700 °C, 60 min, FC

量的增大, 由 {221}⟨uvw⟩ 面织构转向 {111}⟨uvw⟩, 取向集中在 {111}⟨110⟩, 二次冷轧可进一步增加织构强度。根据文献[15]报道, 体心立方多晶低碳钢形变时, 晶粒取向变化路径为 {110}⟨001⟩→{554}⟨225⟩→{111}⟨112⟩→{111}⟨110⟩→{223}⟨110⟩, {111}⟨112⟩取向是亚稳的形变取向, 在中等形变量下稳定存在, 最终取向集中在 {112}⟨110⟩附近。对于 Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ 合金, 转动路径可能为 {221}⟨114⟩→{111}⟨112⟩→{111}⟨110⟩, 当冷加工变形量大于 18% 时, 取向逐渐向 {111}⟨110⟩聚集, 在 Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ 合金板中未检测到低碳钢中体心立方合金中等变形稳定织构 {111}⟨112⟩^[17], 其织构演变机理有待深入研究。Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ 二次冷轧时出现较强的 {110} 织构, 可能是由于二次冷轧时板材表面受到较大的摩擦力, 在板材

表面形成较大剪切力, 形成体心立方典型的剪切织构 {110} 织构。

TEM 及 XRD 分析显示, 不同取向晶粒内形变储存能的分布关系为 $E_{\{110\}\langle 001 \rangle} < E_{\{001\}\langle 110 \rangle} < E_{\{112\}\langle uvw \rangle} < E_{\{111\}\langle 112 \rangle} < E_{\{111\}\langle 110 \rangle} < E_{\{110\}\langle 110 \rangle}$, 形变储存能越高, 驱动力越大, 再结晶晶粒也就越优先形核并长大^[18-19]。在 500 °C 退火时, Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ 二次冷轧板未完全再结晶, 织构主要是由再结晶晶粒的取向形核决定。冷加工板材中 {110}⟨110⟩及 {111}⟨110⟩的储能较高, {111}⟨112⟩的储能略低, 再结晶晶粒最先在此形核, 因此, 原取向变形晶粒在退火后先消失。对于在 600 和 700 °C 退火的样品, 退火温度高于其再结晶温度, 织构类型主要由再结晶取向长大决定。{111}⟨112⟩再

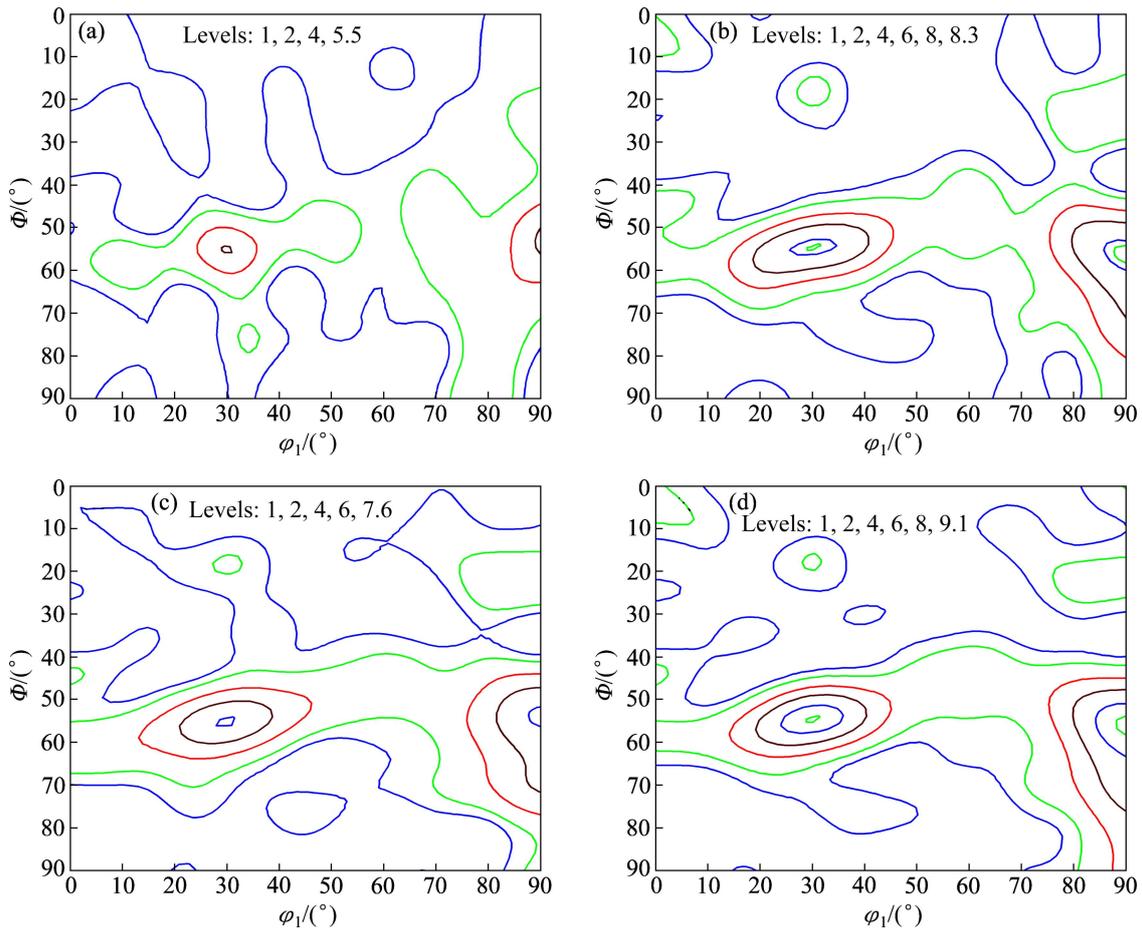


图9 $\phi_2=45^\circ$ 时不同退火制度下二次冷轧板的ODF截面图

Fig. 9 ODF sections of secondary cold-rolled plates at $\phi_2=45^\circ$ under different annealing states ($\{111\}\langle 112\rangle(30^\circ, 55^\circ, 45^\circ)$ ($90^\circ, 55^\circ, 45^\circ$); $\{110\}\langle 001\rangle(90^\circ, 90^\circ, 45^\circ)$): (a) 500 °C, 60 min, WQ; (b) 600 °C, 60 min, WQ; (c) 700 °C, 60 min, WQ; (d) 700 °C, 60 min, FC

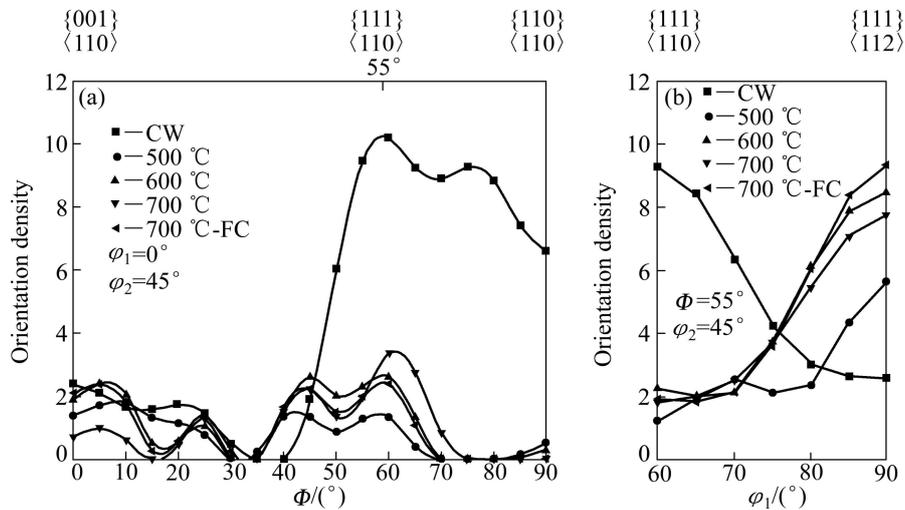


图10 二次冷轧板材在不同退火制度下织构取向线分析

Fig.10 Orientation lines analysis of secondary cold-rolled plates under different annealing states (CW means cold rolled plate): (a) α -fiber; (b) γ -fiber

结晶在形变的{111}<112>晶粒内“原位”形核,形核率高,虽然其形核速度低于{111}<110>的形核速率,但在晶粒长大阶段有优势^[20],充分退火后形成较强的{111}<112>织构。在700℃炉冷时,随冷却时间的延长,再结晶与晶粒长大充分进行,亚稳取向的晶粒向稳定取向转动,织构取向密度得到提高。Ni₄₇Ti₄₄Nb₉板材中形成{111}<112>退火织构,这与文献[11-14]中得出的Ni₄₇Ti₄₄Nb₉退火织构不同。

当NiTi合金中存在{111}<uvw>织构时,记忆恢复应变的各向异性较小,沿板材不同方向应变均较高^[8]。Ni₄₇Ti₄₄Nb₉二次冷轧板在退火时形成较强的{111}<112>织构,{111}<uvw>织构也有一定强度,轧板各个方向的记忆性能都较优,各向异性小,有利于工程应用。

3 结论

1) 当变形量小于35%时,Ni₄₇Ti₄₄Nb₉板材冷轧织构由{221}<uvw>变为最强点为{111}<110>的{111}<uvw>织构。

2) 二次冷轧可增强Ni₄₇Ti₄₄Nb₉合金板材织构,最强织构为{111}<110>,在 α 取向线由{111}<110>延伸到{110}<110>。

3) Ni₄₇Ti₄₄Nb₉合金二次冷轧板材经退火后织构由{111}<110>变为{111}<112>再结晶织构。随着退火温度的升高,织构强度增加,700℃炉冷处理样品的织构强度高于同温度水淬样品的织构强度。

致谢

承蒙北京科技大学冯惠平老师在XRD测试上的大力协助,特致谢意。

REFERENCES

[1] HUMBEECK J V. Non-medical applications of shape memory alloys[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1999, 273/275: 134-148.

[2] DUERIG T, PELTON A, STÖCKEL D. An overview of nitinol medical applications[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1999, 273/275: 149-160.

[3] 赵连城,蔡伟,郑玉峰.合金的形状记忆效应与超弹性[M].北京:北京国防工业出版社,2002:243.

ZHAO Lian-cheng, CAI Wei, ZHENG Yu-feng. Shape memory

effect and superelasticity of alloys[M]. Beijing: Beijing National Defense Industry Press, 2002: 243.

- [4] 杨冠军,邓炬. Ti-Ni-Nb宽滞后记忆合金的研究进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 1998, 27(6): 322-326.
- YANG Guan-jun, DENG Jiu. Recent advances in the study of the Ti-Ni-Nb shape memory alloy with wide hysteresis[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 1998, 27(6): 322-326.
- [5] SIMPON J A, MELTON K, DUERIG T. Method of processing a nickel/titanium-based shape memory alloy and article produced therefrom: US, 4631094[P]. 1986-12-23.
- [6] SUBURI T, YOSHIDA M, NEMMO S. Deformation behavior of shape memory Ti-Ni alloy crystals[J]. *Scripta Metallurgy*, 1984, 18: 363-366.
- [7] MIYAZAKI S, KIMURA S, OTSUKA K, SUZUKI Y. The habit plane and transformation strains associated with the martensitic transformation in Ti-Ni single crystals[J]. *Scripta Metallurgy*, 1984, 18: 883-888.
- [8] INOUE H, MIWA N, INAKAZU N. Texture and shape memory strain in TiNi alloy sheets[J]. *Acta Materialia*, 1996, 44(12): 4825-4834.
- [9] MIYAZAKI S, NO V H, KITAMURA K, KHANTACHAWANA A, HOSODA H. Texture of Ti-Ni rolled thin plates and sputter-deposited thin films[J]. *International Journal of Plasticity*, 2000, 16(10/11): 1135-1154.
- [10] LI D Y, WU X F, KO T. The texture of Ti-51.5 at.% Ni rolling plate and its effect on the all-around shape memory effect[J]. *Acta Metallurgica Materialia*, 1990, 38(1): 19-24.
- [11] 颜莹,金伟,曹名洲. Ni₄₇Ti₄₄Nb₉形状记忆合金冷轧管材的组织、织构和相变[J]. *金属学报*, 2008, 44(2): 139-144.
- YAN Ying, JIN Wei, CAO Ming-zhou. Microstructure, texture and phase transformation of Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ shape memory alloy cold-rolled tube[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2008, 44(2): 139-144.
- [12] 颜莹,金伟.再结晶对Ni₄₇Ti₄₄Nb₉形状记忆合金棒相变和织构的影响[J]. *稀有金属*, 2008, 32(4): 404-408.
- YAN Ying, JIN Wei. Influence of recrystallization on phase transformation and texture of Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ shape memory alloy bar [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2008, 32(4): 404-408.
- [13] 杨冠军,谢丽英,胡文英,邓炬,郝士明.再结晶退火对Ni₄₇Ti₄₄Nb₉合金冷轧板相组成及板材织构的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 1994, 23(3): 13-16.
- YANG Guan-jun, XIE Li-ying, HU Wen-ying, DENG Ju, HAO Shi-ming. Effect of recrystallization annealing on constitutional phases and texture of cold-rolled Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ sheet[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 1994, 23(3): 13-16.
- [14] YANG Guan-jun, XIE Li-ying, HU Wen-ying, DENG Ju, HAO Shi-ming. Effect of annealing temperature on texture of

- cold-rolled $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ sheet[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 1995, 5(1): 88–93.
- [15] 颜莹, 金伟, 周亭俊. 热轧 $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ 形状记忆合金板材的组织及其对拉伸和恢复性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(11): 2148–2153.
- YAN Ying, JIN Wei, ZHOU Ting-jun. Texture and its influence on tensile and recoverable properties of hot-rolled $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ shape memory alloy sheet[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(11): 2148–2153.
- [16] 颜莹, 金伟, 王健, 周亭俊. $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ 形状记忆合金轧制板材的组织、相变和性能[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): s483–s486.
- YAN Ying, JIN Wei, WANG Jian, ZHOU Ting-jun. Texture, transition and properties of rolled $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ shape memory alloy sheet[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): s483–s486.
- [17] INAGAKI H. Fundamental aspect of texture formation in low carbon steel[J]. ISIJ International, 1994, 34(4): 313–321.
- [18] 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: 129–172.
- [19] NAGATAKI Y, HOSOYA Y. Origin of the recrystallization texture formation in an interstitial free steel[J]. ISIJ International, 1996, 36(4): 451–460.
- [20] 杨平, 李志超, 毛卫民, 赵子苏. 钢中 $\{111\}\langle 112 \rangle$ 再结晶组织的形成[J]. 材料热处理学报, 2009, 30(3): 46–52.
- YANG Ping, LI Zhi-chao, MAO Wei-min, ZHAO Zi-su. Formation of the $\{111\}\langle 112 \rangle$ annealing texture in steels[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2009, 30(3): 46–52.

(编辑 陈卫萍)