

Ni-Cr-Al-Fe 合金冷轧变形组织及织构演变

张真¹ 孙志杰¹ 曹世举¹ 许言午¹ 李登云² 姚力³ 周峰² 朱凯² 徐韬³ 章江铭³ 魏海根¹

(1. 合肥工业大学材料科学与工程学院, 合肥 230009; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 武汉 430074; 3. 国网浙江省电力有限公司, 杭州 310000)

摘要 采用电子背散射衍射(EBSD)方法研究了冷轧变形量(10%、20%、30%、50%)对Ni-Cr-Al-Fe合金的显微组织、晶体特征分布及织构演变规律的影响。结果表明,随变形量增加,晶粒组织沿着轧制方向被拉长或弯曲;小角度晶界占比不断增加,并在变形量为30%时到达峰值。随变形量继续增加,小角度晶界和孪晶界向大角度晶界转变。Ni-Cr-Al-Fe合金在冷轧过程中主要存在 $\{111\}<112>$ 织构、立方织构、铜型织构和黄铜型织构, $\{111\}<112>$ 织构强度不断减弱并在变形量为30%时基本消失,同时黄铜型织构及立方织构的强度逐渐增强,铜型织构开始出现;变形量达到50%时,立方织构完全消失,黄铜型织构和铜型织构逐渐增强, $\{111\}<112>$ 织构出现并且强度达到峰值。

关键词 Ni-Cr-Al-Fe合金;织构;冷轧;显微组织

中图分类号 TG146.1⁺5;TG335.12

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20250175

Microstructure and Texture Evolution of Ni-Cr-Al-Fe Alloy During Cold Rolling Deformation

ZHANG Zhen¹, SUN Zhijie¹, CAO Shiju¹, XU Yanwu¹, LI Dengyun², YAO Li³, ZHOU Feng², ZHU Kai², XU Tao³, ZHANG Jiangming³, WEI Haigen¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009; 2. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430074; 3. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000)

Abstract: The effects of cold rolling deformation rate on microstructure evolution, crystal characteristic distribution, and texture evolution of Ni-Cr-Al-Fe alloy under different strain rates (10%, 20%, 30%, 50%) were investigated by EBSD. The results indicate that as deformation rate rise, grains are elongated or bent along the rolling direction, and proportion of small-angle grain boundaries is continuously increased, reaching the peak value at a strain rate of 30%. As deformation increase, small-angle grain boundaries and twin boundaries are transformed to larger-angle grain boundaries. During the cold rolling process, Ni-Cr-Al-Fe alloy is composed of $\{111\}<112>$ texture, cubic texture, copper-type texture, and brass-type texture. The strength of $\{111\}<112>$ texture is gradually decreased to disappear at a strain rate of 30%, while that of brass-type and cubic textures are gradually enhanced, and copper-type texture emerges. At a strain rate of 50%, cubic texture completely disappears, and the strength of brass-type and copper-type textures is gradually enhanced, meanwhile $\{111\}<112>$ texture appears with peak strength.

Key Words: Ni-Cr-Al-Fe Alloy, Texture, Cold Rolling, Microstructure

21世纪以来,军事、航空航天和通信等领域对高精度、高稳定性的电阻材料需求急剧增加。Ni-Cr-Al-Fe合金因其优异性能而被广泛应用在航空航天、深海探索、3C产品等领域精密电阻元器件的生产制造中^[1-3]。随着电阻元器件向精密化和小型化方向发展,Ni-Cr-Al-Fe合金精密电阻合金的应用场景越来越多。

为保证优良的性能,合金的加工流程一般为热轧-冷轧-淬火-回火^[4]。Ni-Cr-Al-Fe合金的性能不仅受到冶炼工艺、热处理和化学成分的影响,还受到塑性变形的影响。合金在塑性变形及热处理过程中会形成变形织构及再结晶织构,而材料的性能与其微观组织密不可分,因此实现微观结构的调控具有积极意义^[5-8]。轧制工艺

收稿日期:2025-04-21;修订日期:2025-05-22

基金项目:国家电网有限公司科技资助项目(5700-202219210A-1-1-ZN)

第一作者:张真,男,1984年出生,教授,E-mail:turkeyzz@126.com

引用格式:张真,孙志杰,曹世举,等.Ni-Cr-Al-Fe合金冷轧变形组织及织构演变[J].特种铸造及有色合金,2026,46(5):744-749.

ZHANG Z, SUN Z J, CAO S J, et al. Microstructure and texture evolution of Ni-Cr-Al-Fe alloy during cold rolling deformation[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(5): 744-749.

不同以及轧制道次增加会导致合金中织构种类和密度发生改变,从而改变力学性能^[9-10]。胡紫阳等^[11]发现合金冷轧过程中发生的大塑性变形导致位错等缺陷的显著增加,同时导致合金内部储存的变形能量增加,使得合金的应力水平显著提升。薛智博等^[12]利用电子背散射衍射(EBSD)和X射线衍射仪(XRD),对TA1钛板不同冷轧压下率下微观组织、织构及形变孪晶的演变规律进行了研究,发现随冷轧压下率增大,钛板表层和中心层等轴晶粒均逐渐转变为纤维状组织,中心层的织构组分含量变化较小,而表层的织构组分变化较大,且呈现逐步增强的趋势,最终表层和中心层织构的组分含量趋于一致。CHUN Y B等^[13]发现在较小变形量的冷轧过程中,产生的形变孪晶相互交叉且分割了孪晶内部,显著细化了显微组织,改变了组织性能。Ni-Cr-Al-Fe合金属于面心立方结构,轧制过程对FCC金属材料织构的演变有重要影响^[14-15]。利用极图和反极图只能对织构进行定性分析,因此需要建立三维空间描述多晶体取向分布的取向分布函数(ODF)法对织构进行定量分析^[16-17]。

目前,对Ni-Cr-Al-Fe合金冷变形行为的研究较少,更多研究集中于化学成分及热处理工艺对合金性能的影响方面^[18]。本研究对Ni-Cr-Al-Fe合金进行不同变形量(0、10%、20%、30%和50%)的冷轧处理,采用EBSD测试分析方法,研究Ni-Cr-Al-Fe合金在冷轧加工过程中的显微组织演变、晶界特征分布以及各织构含量演变,为Ni-Cr-Al-Fe合金实际生产中的冷变形设计提供参考。

1 试验材料及方法

试验Ni-Cr-Al-Fe合金具体成分见表1。将质量分数 $\geq 99.8\%$ 的Ni、Al、Fe、Cr、Mn纯金属块体和质量分数 $\geq 99.9\%$ 的Si粉放入坩埚中在真空环境下进行熔炼,随后浇注成 $\phi 8\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的坯锭。将试样表面的夹杂物打磨去除干净,放入箱式燃气退火炉中进行 $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}$ 的退火处理。均匀化处理结束后,在YQ32-200吨液压机下将铸锭沿多向锻造,锻造成厚度为20 mm的板坯。经过 $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热30 min,轧制成厚6 mm的板材。对热轧板材经过 $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}\times 30\text{ min}$ 的退火处理后,打磨掉表面的氧化皮。利用LG240双辊轧机

将块状试样由最初的厚度5.83 mm,经单道次0.2 mm的压下量逐步轧至预定变形量,轧制试样实物图见图1。

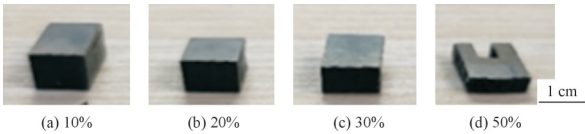


图1 不同轧制变形量下Ni-Cr-Al-Fe合金实物图
Fig.1 Products of Ni-Cr-Al-Fe alloy under different rolling deformation rates

使用LAP-2X金相研磨机对观察面依次采用320~1 500目砂纸粗磨,再用2 000~5 000目砂纸精磨,最后采用绒布进行抛光,直至表面光亮无划痕。金相试样经由HNO₃、冰乙酸、HCL、去离子水以体积比为1:1:1:1配置的溶液腐蚀后在Axio Lab.A1型光学显微镜上进行金相观察。采用LAP-2X金相磨抛机打磨试样观察面,然后利用电解抛光的方式进行制样,电解抛光液成分由H₃PO₄、H₂SO₄、HCL和H₂O组成,体积配比为64:15:1:20,电解抛光后立刻用酒精清洗烘干。采用蔡司Gemini 500热场扫描电镜在形貌观测界面选择典型的测试区域,以3.5 μm 的步长进行测试。结束后利用Channel 5软件对数据进行处理分析。

2 试验结果及分析

2.1 显微组织演变规律

Ni-Cr-Al-Fe合金为面心立方晶体结构,具有较高的层错能,因此在晶粒长大的过程中易形成退火孪晶。图2为晶粒生长时晶界角处退火孪晶的形成及长大过程示意图。可以看出,当晶粒通过晶界的移动而增长时,晶界处的原子层在(111)晶面上的堆叠顺序发生错位,形成共格的孪晶界,并随之产生了退火孪晶,退火孪晶进一步利用大角度晶界的移动而不断长大,原本在(111)面上的错堆再次错堆而恢复为正常的堆垛次序,会形成第二个共格孪晶界,二者构成了孪晶带。

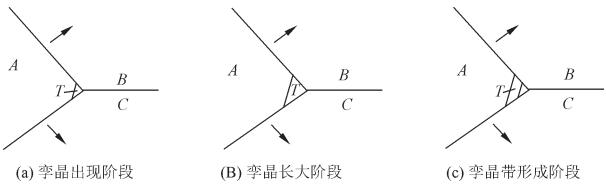


图2 晶粒生长时晶界角处退火孪晶的形成及长大示意图^[19]
Fig.2 Formation and growth of annealing twins at grain boundary corners during grain growth^[19]

立方晶系金属的孪晶和基体间存在 $60^{\circ}\langle 111 \rangle$ 转轴关系。退火态Ni-Cr-Al-Fe合金金相组织见图3。对图中疑似退火孪晶的孪晶界进行分析,发现其确实与基体之间存在 $60^{\circ}\langle 111 \rangle$ 转轴关系。因此可以断定退

表1 Ni-Cr-Al-Fe合金名义化学成分

Tab. 1 Nominal Chemical components of Ni-Cr-Al-Fe alloy %

w_B					
Cr	Al	Fe	Mn	Si	Ni
20.25	2.95	2.50	1.00	0.13	余量

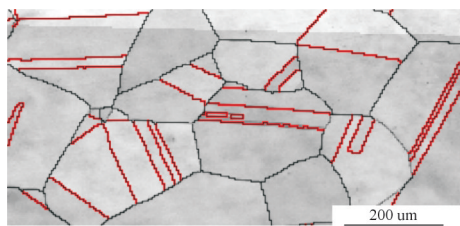


图3 退火态Ni-Cr-Al-Fe合金晶界形貌

Fig.3 Grain boundaries in as-annealed Ni-Cr-Al-Fe alloy

火态Ni-Cr-Al-Fe合金中形成的孪晶为退火孪晶。

Ni-Cr-Al-Fe合金在原始态、10%、20%、30%和50%轧制过程中,每个道次轧制所得合金的金相组织见图4。由图4a可以发现,退火态的Ni-Cr-Al-Fe

合金晶粒呈现典型等轴形貌,尺寸为300~500 μm。从图4b~图4e可以发现,随轧制变形量增大,晶粒沿着轧制的方向逐渐被拉长,晶粒内的孪晶也被沿着轧制方向拉长或弯曲,同时晶粒内部出现大量滑移带。观察图4e可以发现,金相图中部分区域被腐蚀发黑,这主要是由于在轧制过程中塑性变形行为使得金属中的结构缺陷(点阵畸变、空位、位错等)不断增多,自由焓升高,从而导致金属的化学活性增大,腐蚀速度加快。图4a中区域Ⅰ~Ⅲ代表退火孪晶的3种典型形态,分别为晶界交角处的退火孪晶(Ⅰ)、一端终止于晶内的不完整退火孪晶(Ⅱ)、贯串完整晶粒的完整退火孪晶(Ⅲ)。

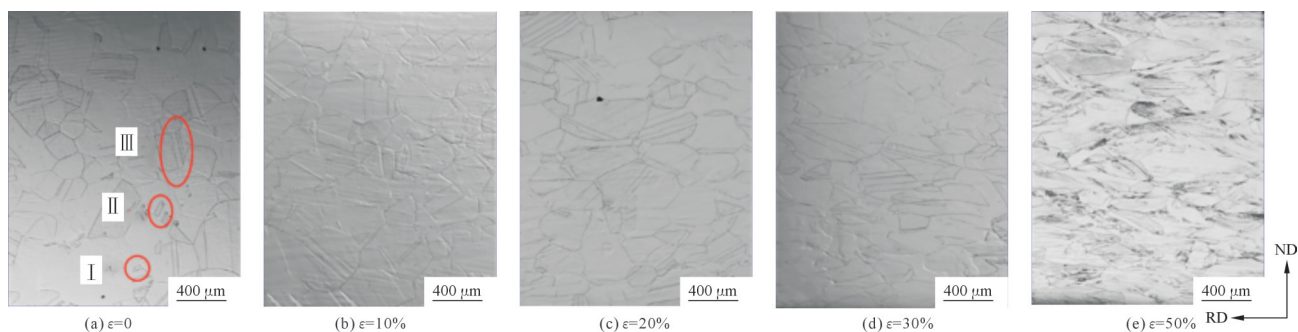


图4 不同冷变形程度下Ni-Cr-Al-Fe合金的金相组织

Fig.4 Metallographic structure of the Ni-Cr-Al-Fe alloy under different cold deformation degree

2.2 晶界特征分布规律

Ni-Cr-Al-Fe合金冷轧过程中的取向分布差演变规律见图5。从图5a可见,退火态Ni-Cr-Al-Fe合金晶界以大角度晶界(HAGB)为主,占比为94.1%,这是由于Ni-Cr-Al-Fe合金在退火过程中产生了大量的退火孪晶,孪晶界占比近50%。当变形量为10%时,小角度晶界(LAGB)比例由5.9%提升至75.5%,这是由于在

外力作用下,处于软取向的晶粒滑移系开动,位错密度迅速上升,位错之间交互作用增强,大量位错堆积在晶界附近,造成位错缠结,形成不均匀的分布,使晶粒内分化为许多位向略有不同的小晶块,在晶粒内产生亚晶粒,从而使得小角度晶界大幅提升。随变形量的进一步提升,小角度晶界的占比继续提升,当变形量达到30%时(见图5d),小角度晶界的占比达到峰值,为

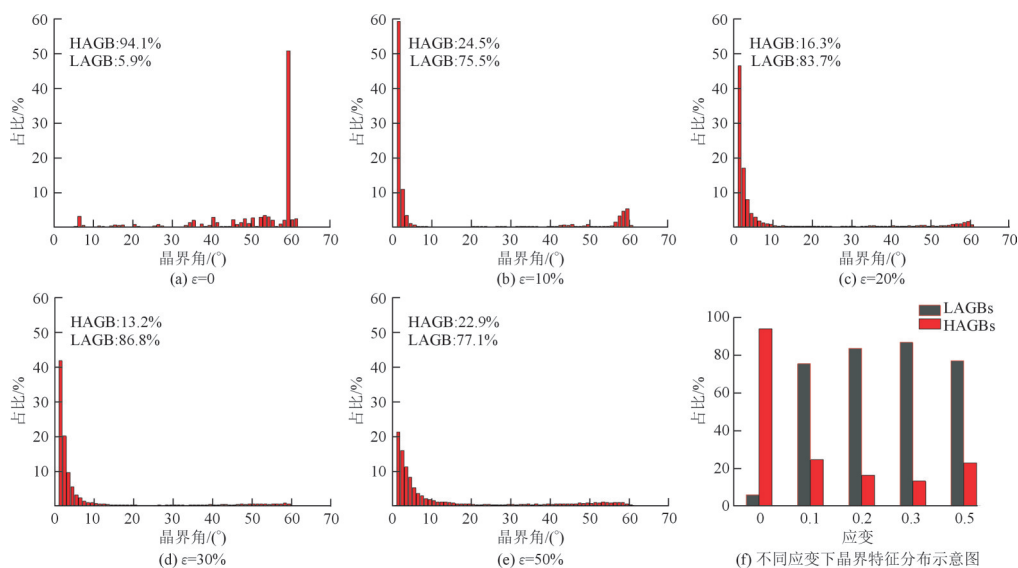


图5 不同变形量对晶界特征分布的影响

Fig.5 Influence of deformation amounts on grain boundary characteristic distribution

86.8%。当变形量提升至50%时,小角度晶界的占比下降至77.1%(见图5e),大角度晶界的占比有所提升。这是由于变形量增加,亚晶的数量也在不断增加,2°及以下的小角度晶界占比随变形量增加在持续下降,晶界向着高角度方向(2°~15°)扩张。有研究表明,随应变增加,亚晶界的取向偏差增加,并最终大到足以使亚晶界转变为小角度晶界或大角度晶界^[20]。由图5f可知,随变形量增加,大角度晶界占比明显下降,小角度晶界比例显著升高,当变形量达到50%后,亚晶界的偏差达到了一定的程度,使得小角度晶界向大角度晶界

转换,小角度中的低角度晶界亦不断向高角度转变,与文献[20]结果一致。

Ni-Cr-Al-Fe合金中的退火孪晶与基体之间存在 $60^\circ\langle 111\rangle$ 转轴关系。不同变形量下合金的晶界变化图见图6。图6a中红线表示未经变形合金孪晶的晶界分布情况。从图6b和图6c中可以看出,随变形量增加红线部分明显减少, $60^\circ\langle 111\rangle$ 转轴关系占比不断降低。当变形量达到50%时, $60^\circ\langle 111\rangle$ 转轴关系只有零星分布,该现象表明孪晶结构在变形的过程中逐渐被破坏,向着一般的大角度晶界发展。

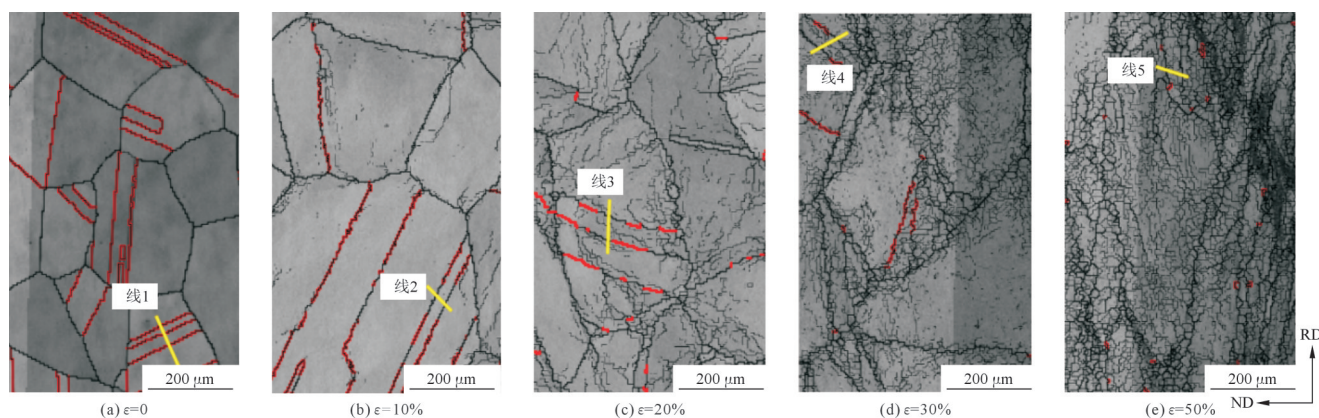


图6 不同变形量对孪晶界的影响

Fig.6 Effects of deformation rates on twin grain boundaries

对图6中线1~5处的孪晶界角度进行分析,不同变形量下晶界角的变化见图7。可以发现,未变形金属的

孪晶角度基本为 60° ,随变形量增加,孪晶界的角度在逐渐降低,由最初的 60° 下降至 53.1° (见图7e)。

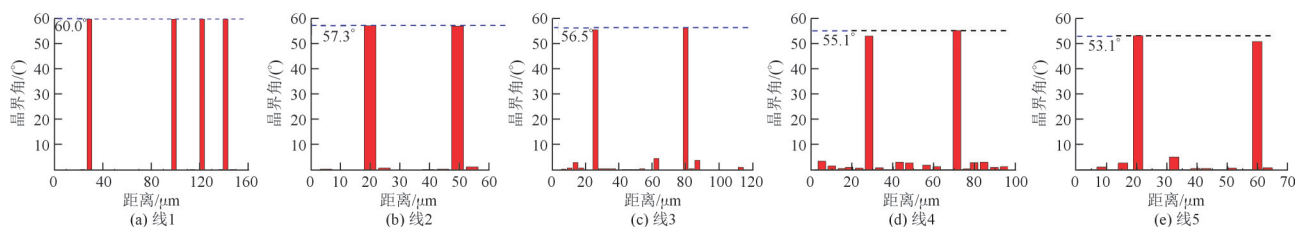


图7 不同变形量下孪晶界角度变化

Fig.7 Variation of twin boundary angles under different deformation amounts

2.3 织构演变规律

Ni-Cr-Al-Fe合金在原始态、10%、20%、30%和50%轧制过程中,每个道次轧制所得试样的反极图见图8。在轧向反极图中,晶向轴密度最高的可能与轧向平行。而在轧面法向反极图中,极点密度最高的晶面可能与轧面平行。通过分析这两种情况的组合,并结合晶带定理和试验法,可以估算出一个或多个可能的织构类型。图中X0、Y0、Z0分别表示轧向、横向和轧面法向。当变形量为10%时(见图8a),在X0方向有 $\langle 112\rangle$ 取向与轧向平行,在Z0方向存在 $\{111\}$ 面平行于轧面,推测可能有 $\{111\}\langle 112\rangle$ 织构的产生;当变形量为20%时(见图8b),在X0方向有 $\langle 001\rangle$ 、 $\langle 112\rangle$

和 $\langle 111\rangle$ 取向与轧面平行,在Z0方向可能存在 $\{111\}$ 、 $\{101\}$ 和 $\{001\}$ 晶面与轧面平行,推断在变形量为20%时有立方织构($\{001\}\langle 100\rangle$)、黄铜织构($\{110\}\langle 112\rangle$)及高斯织构($\{110\}\langle 001\rangle$)形成;当变形量为30%时(见图8c),在轧向方向上有 $\langle 112\rangle$ 、 $\langle 111\rangle$ 取向与轧面平行,在轧面法向方向, $\{001\}$ 、 $\{110\}$ 晶面与轧面平行,推测可能有黄铜型织构($\{110\}\langle 112\rangle$)的形成;当变形量为50%时,在轧向方向有 $\langle 111\rangle$ 取向与轧向平行,在轧面法向方向有 $\{101\}$ 和 $\{111\}$ 晶面与轧面平行,此时并不能推测出一些典型织构的存在。

Ni-Cr-Al-Fe合金取向分布函数(ODF)截面图见图9,图10为面心立方金属标准取向空间截面图。对比可以看出,当变形量为10%时,Ni-Cr-Al-Fe合金内出

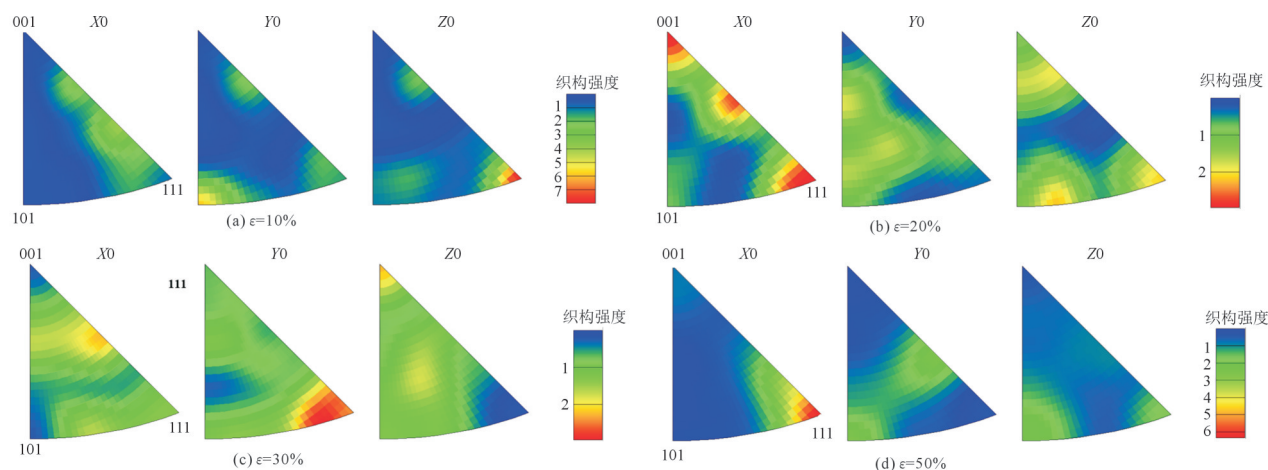


图8 不同轧制变形量下反极图

Fig.8 Reverse pole figure under different rolling deformation amounts

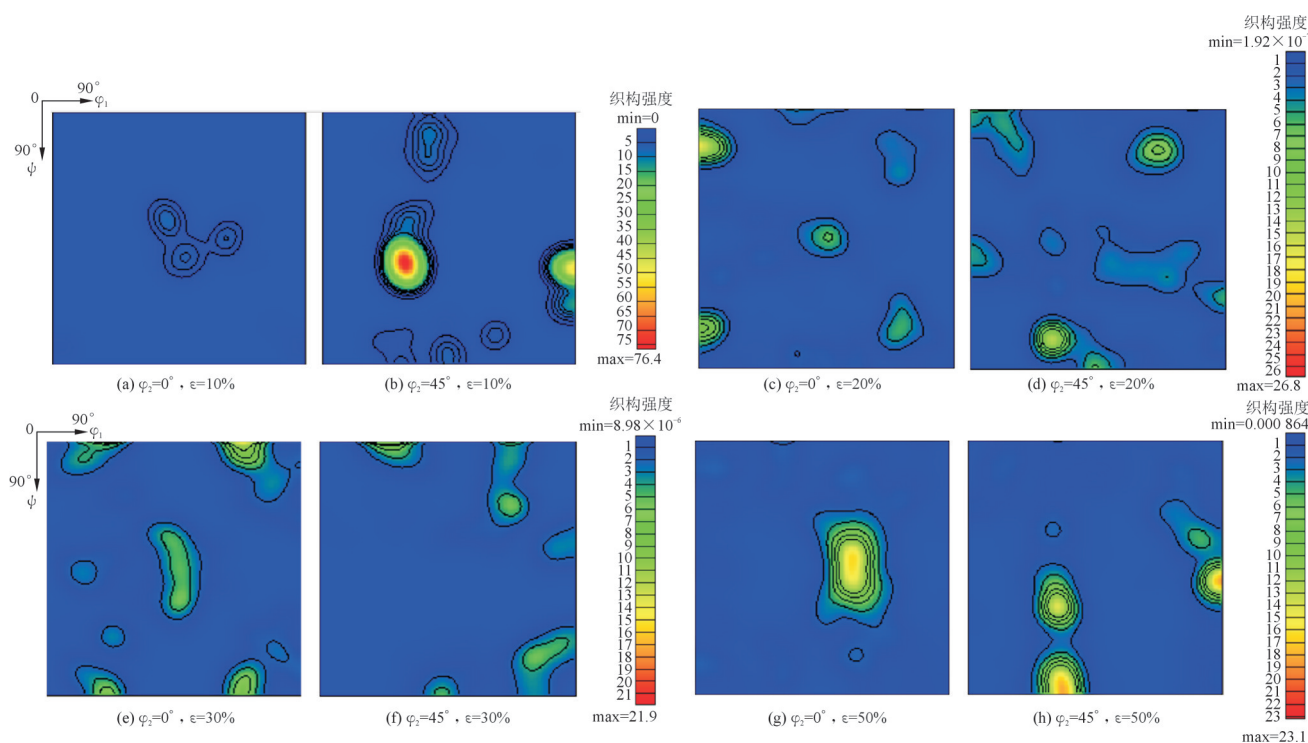


图9 不同变形量晶粒取向分布函数(ODF)截面图

Fig.9 Cross-sectional view of grain orientation distribution function (ODF) with different deformation amounts

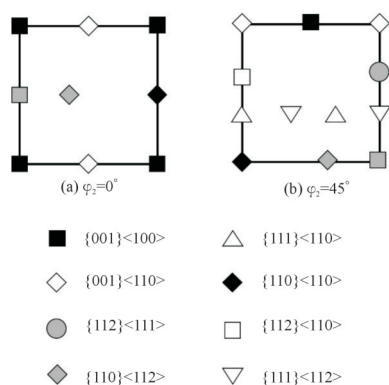


图10 面心立方金属标准取向空间截面图^[21]

Fig.10 Cross-sectional view of standard orientation space of face-centered cubic metal^[21]

现了显著的 $\{111\}\langle 112\rangle$ 织构,以及相对微弱的立方织构($\{001\}\langle 100\rangle$)和黄铜型织构($\{110\}\langle 112\rangle$)。当变形量为20%时,先前微弱的黄铜型织构($\{110\}\langle 112\rangle$)及立方织构($\{001\}\langle 100\rangle$)的强度在增大,相反的 $\{111\}\langle 112\rangle$ 织构的强度却下降明显。同时,也伴随一定旋转织构的形成。当变形量达到30%时,黄铜型织构($\{110\}\langle 112\rangle$)及立方织构($\{001\}\langle 100\rangle$)的强度无明显变化, $\{111\}\langle 112\rangle$ 织构基本消失,铜型织构($\{112\}\langle 111\rangle$)逐渐显现,表现出一定的强度。最后变形量达到50%时,立方织构($\{001\}\langle 100\rangle$)完全消失,黄铜型织构($\{110\}\langle 112\rangle$)显著增强,铜型织构($\{112\}\langle 111\rangle$)的强度也得到了

小幅的提升。此外, $\{111\} \langle 112 \rangle$ 织构再次出现并达到了强度峰值。

3 结 论

(1) 退火态 Ni-Cr-Al-Fe 合金中存在退火孪晶, 随轧制变形量增加, 晶粒及晶粒内的孪晶被沿着轧制方向拉长或弯曲。

(2) 变形初期合金内初始状态的小角度晶界迅速增加, 在变形量为 30% 时, 小角度晶界的占比达到峰值, 变形量继续增加, 小角度晶界的转变向着大角度晶界转变, 导致小角度晶界的占比开始下降; 孪晶界在变形过程中被不断破坏直至转变为大角度晶界。

(3) 冷变形过程中的织构类型发生了变化。由变形初期 ($\epsilon=10\%$) 形成的强度较大的 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 织构, 以及相对微弱的立方织构和黄铜型织构组成; 继续变形 ($\epsilon=20\%$), 先前微弱的黄铜型织构及立方织构的强度增大, 相反的 $\{111\} \langle 112 \rangle$ 织构的强度却下降明显; 当变形量达到 30% 时, 黄铜型织构及立方织构的强度无明显变化, $\{111\} \langle 112 \rangle$ 织构基本消失, 铜型织构逐渐显现, 表现出一定的强度; 当变形量达到 50% 时, 立方织构完全消失, 黄铜型织构显著增强, 铜型织构的强度也得到了小幅的提升。此外, $\{111\} \langle 112 \rangle$ 织构再次出现并达到了强度峰值。

参 考 文 献

- [1] 郭卫民. 精密高电阻合金的研究现状及发展趋势[C]//全国精密合金技术交流会. 北京, 2009.
- [2] 杨贤军, 王勇, 徐永红, 等. 高精精密金属箔电阻及电阻合金箔材研究[J]. 自动化仪表, 2018, 39(6): 54-57.
- [3] WANG Y, JIANG D C, YU W X, et al. Short-range ordering in a commercial Ni-Cr-Al-Fe precision resistance alloy [J]. Materials and Design, 2019, 181: 107 981.
- [4] 李亚敏, 范树通, 吴显崑, 等. NiCrAlFe 合金薄带制备过程织构的遗传及其与电阻方向性的关系[J]. 锻压技术, 2024, 49(11): 62-69.
- [5] OJO OLUWAGBEMIGA P, THOMPSON A, NOLAS G S. Grain orientation and transport properties of textured Bi_2Te_3 alloys [J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2021, 133: 105 979.
- [6] GENG Y F, BAN Y J, LI X, et al. Excellent mechanical properties and high electrical conductivity of Cu-Co-Si-Ti alloy due to multiple strengthening [J]. Materials Science & Engineering, 2021, A821: 141 639.
- [7] HU L, TIAN Z A, LIANG Y C, et al. The role of TCP structures in glass formation of Ni50Ag50 alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 897: 162 743.
- [8] LUO Z W, TIAN Z A, LIANG Y C, et al. Crystallization behavior of $\text{Fe}_{70}\text{Ni}_{10}\text{Cr}_{20}$ during rapid solidification under different cooling rates [J]. Materials Today Communications, 2021, 27: 102 255.
- [9] 徐春, 饶小华, 安星州, 等. 轧制方式对工业纯钛 TA2 轧板织构演变的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(4): 1 195-1 201.
- [10] 吴艳东. 形变与热处理对 NiCrAlFe 合金组织及性能的影响[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.
- [11] 胡紫阳, 都贝宁, 张小明, 等. 塑性变形和热处理对 NiCrAlFe 合金温度系数的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(9): 182-188.
- [12] 薛智博, 贾涓, 谢举霞, 等. 冷轧 TA1 钛板的塑性变形行为研究[J]. 武汉科技大学学报, 2024, 47(6): 420-426.
- [13] CHUN Y B, YU S H, SEMIATIN S L, et al. Effect of deformation twinning on microstructure and texture evolution during cold rolling of CP-titanium [J]. Materials Science and Engineering, 2005, A398(1/2): 209-219.
- [14] BRACKE L, VERBEKEN K, KESTENS L, et al. Microstructure and texture evolution during cold rolling and annealing of a high Mn TWIP steel[J]. Acta Materialia, 2009, 57(5): 1 512-1 524.
- [15] LAPEIRE L, SIDOR J, VERLEYSEN P, et al. Texture comparison between room temperature rolled and cryogenically rolled pure copper[J]. Acta Materialia, 2015, 95: 224-235.
- [16] 高钰璧, 丁雨田, 陈建军, 等. 挤压态 GH3625 合金冷变形过程中的组织和织构演变[J]. 金属学报, 2019, 55(4): 123-130.
- [17] LIU W C, MORRIS J G. Kinetics of the formation of the fiber rolling texture in continuous cast AA5xxx series aluminum alloys[J]. Scripta Mater, 2002, 47(11): 743-748.
- [18] 王勇, 杨贤军, 喻文新, 等. 化学成分及时效处理对镍铬铝铁精密电阻合金性能的影响[J]. 材料导报, 2019, 33(24): 4 131-4 135.
- [19] 胡赓祥, 蔡珣, 戎咏华. 材料科学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2010.
- [20] HUANG J Y, ZHU Y T, JIANG H, et al. Microstructures and dislocation configurations in nanostructured Cu processed by repetitive corrugation and straightening [J]. Acta Materialia, 2001, 49(9): 1 497-1 505.
- [21] 毛卫民. 金属材料塑性变形晶体学[M]. 北京: 科学出版社, 2022.

(编辑: 刘晨辉)

欢迎登陆期刊官网

投稿、查稿、审稿

欢迎登陆《特种铸造及有色合金》杂志官方网站投稿、阅读、审稿, 期刊论文彩色版本均可在网站免费在线阅读或下载 pdf 文件, 并可体验 AI 导读功能, 网址: www.special-cast.com, 欢迎访问!