



冷轧及退火工艺对 Ni36 因瓦合金热膨胀性能的影响

贺仰强¹, 贾涛¹, 窦晓尧², 王闯²

(1 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110819; 2 浙江龙盛薄板有限公司, 绍兴 312369)

摘要:研究了 Ni36 因瓦合金冷轧及退火工艺对微观组织与热膨胀性能的影响。结果表明, 30%~75% 压下率的冷轧处理使得热膨胀系数 (CTE) 大幅降低, 随着冷轧压下率的增加, 平均热膨胀系数 $\alpha_{25-200^\circ\text{C}}$ 和 $\alpha_{25-300^\circ\text{C}}$ 均呈现出先减小后增加的趋势, 在 60% 压下率时 $\alpha_{25-200^\circ\text{C}}$ 达到最低, 即 $1.43 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, 相比原料降低了 49.8%; 当退火温度由 700 °C 升高到 900 °C 时, $\alpha_{25-200^\circ\text{C}}$ 由 $2.59 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 逐渐升高到 $2.70 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, 而后在 1 000 °C 时下降至 $2.47 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$; 在 700 °C 退火不同时间内, 热膨胀系数随着退火时间的增加而持续增加, $\alpha_{25-200^\circ\text{C}}$ 由退火 0.5 h 的 $2.46 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 增加至退火 6 h 的 $2.74 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 。对热膨胀系数随冷轧压下率、退火工艺变化的现象, 从冷轧织构、位错与空位密度、冷轧组织的回复与再结晶和晶粒长大的不同角度进行了深入讨论与分析。

关键词: Ni36 因瓦合金; 冷轧; 退火温度和时间; 热膨胀系数

DOI: 10. 20057/j. 1003-8620. 2024-00281 **中图分类号:** TG132. 1

Effect of Cold Rolling and Annealing Process on the Thermal Expansion Properties of Ni36 Invar Alloy

He Yangqiang¹, Jia Tao¹, Dou Xiaoyao², Wang Chuang²

(1 State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
2 Zhejiang Lonsen Steel Strip Co., Ltd., Shaoxing 312369, China)

Abstract: The effects of cold rolling and annealing process on the microstructure and thermal expansion properties of Ni36 Invar alloy were studied in this work. The results show that the coefficient of thermal expansion (abbreviated as CTE) is greatly reduced by the cold rolling treatment with a depression rate of 30%~75%. The average CTE i. e., $\alpha_{25-200^\circ\text{C}}$ and $\alpha_{25-300^\circ\text{C}}$ decrease first and then increase with the increasing reduction rate of cold rolling. At reduction rate of 60%, $\alpha_{25-200^\circ\text{C}}$ is the lowest i. e., $1.43 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, which is 49.8% lower than that of raw material. As the annealing temperature increases from 700 °C to 900 °C, the $\alpha_{25-200^\circ\text{C}}$ gradually increases from $2.59 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ to $2.70 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, and then decreases to $2.47 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ at 1 000 °C. When annealed at 700 °C for different period, the CTE increases continuously with the increasing time, the $\alpha_{25-200^\circ\text{C}}$ increases from $2.46 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ at 0.5 h to $2.74 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ at 6 h. The variation of CTE with cold rolling and annealing process are deeply discussed and analyzed from the perspective of cold rolling texture, density of dislocation and vacancy, recovery and recrystallization of cold-rolled microstructure, and grain growth.

Key Words: Ni36 Invar Alloy; Cold Rolling; Annealing Temperature and Time; Coefficient of Thermal Expansion

因瓦合金 (Invar Alloy) 是一种具有极低热膨胀系数的特殊合金。近年来, 为响应国家大力发展清洁能源的战略, 大型液化天然气 (LNG) 船舶迅速增加^[1]。该合金的主要应用场景为薄膜型 LNG 船液货舱内胆, 由于其超低温的液化条件以及 LNG 船运输过程中存在海上航行时间长, 昼夜温差大等苛刻条件, 因此, 对薄膜型因瓦合金板材的热膨胀性、强度和低温韧性提出了较高要求。

关于因瓦效应的机理, 有众多的解释, 包括 1963 年魏斯首次提出的 Fe 原子状态模型^[2], 近年来提出的纳米尺度化学成分起伏模型^[3], 而更多学者

认为因瓦合金的低膨胀性能与磁体积效应有关^[4]。磁性结构具有从高体积的铁磁性状态转变到低体积的无序非共线结构的特征, 导致因瓦现象的产生。

目前, 关于 Ni36 因瓦合金的研究, 主要集中在冷轧或退火单工序工艺对显微组织与性能的影响^[5-6], 而对整个生产过程中因瓦合金组织和性能的演变行为研究较少, 因此, 本文针对冷轧压下率、退火温度与退火时间对显微组织及热膨胀性能的影响开展了系统的研究。

作者简介: 贺仰强 (2000—) 男, 硕士; **E-mail:** 13734191360@163.com; **收稿日期:** 2024-12-24

通信作者: 贾涛 (1981—) 男, 博士, 副教授; **E-mail:** jiatao@ral.neu.edu.cn

1 试验材料与方法

试验所用材料为国内某钢厂提供厚度 1.5 mm 的 Fe-36Ni 冷轧退火板。合金成分见表 1, 试验所用因瓦合金接近理想的奥氏体(γ)单相组织。

表 1 Ni36 因瓦合金的主要化学成分(质量分数)

Table 1 The main chemical compositions of Ni36 Invar alloy								%
C	Si	Mn	Al	P	S	Ni	Fe	
0.034	0.11	0.32	0.038	0.003	0.006	36.39	Bal	

在合金板上依次剪取 200 mm×100 mm 的板块, 分别进行 30%, 45%, 60%, 75% 压下率的冷轧实验; 选取 60% (0.6 mm) 冷轧压下率的冷轧板, 分别进行 700、800、900、1 000 °C 不同温度 1 h 预退火; 结合实际生产工艺, 在 700 °C 下进行 0.5、1、3、6 h 不同时长的退火。由于因瓦合金易在高温空气中氧化, 因此, 试验材料均密封在真空石英管并在箱式炉中进行热处理。

为了观察冷轧压下率、退火工艺对微观组织的影响, 分别从冷轧和退火板上切取 10 mm×8 mm 的试样, 经砂纸研磨后再进行机械抛光, 冷轧组织用 4% 硝酸酒精溶液浸蚀 2 min, 使用 Olympus (BX53MRF) 光学显微镜进行微观组织观察。退火组织用饱和苦味酸在 70 °C 水浴锅中侵蚀 5 min 后进行微观组织观察, 并用 IPP 软件统计晶粒尺寸。采用配有电子背散射衍射 (EBSD) 探头的 SU8020 场发射扫描电镜 (SEM) 沿 TD 方向进行微观组织的观察, 分析回复再结晶情况, 并统计晶粒尺寸。将各状态

试样沿轧制方向切取 10 mm×4 mm 试样进行热膨胀性能测试, 测试设备为德国耐驰 DIL402 热膨胀仪, 测试气氛为 He 气, 测试温度范围为 20~310 °C, 升温速率 5 °C/min。平均线膨胀系数的计算以室温温度 (25 °C) 为基准, 计算公式如式(1)。

$$\alpha = \frac{(L_T - L_{25^\circ\text{C}})}{L_{25^\circ\text{C}}(T - 25^\circ\text{C})} \quad (1)$$

式中, $L_T, L_{25^\circ\text{C}}$ 分别是温度为 T 和 25 °C 时的样品长度, μm 。

2 试验结果与讨论

2.1 冷轧压下率对组织和性能的影响

图 1 为冷轧退火原料板以及经不同冷轧压下率冷轧试样的横截面显微组织 (TD 平面)。图 1(a) 显示冷轧退火原料板的组织为均匀分布的等轴晶, 并伴有大量的退火孪晶。如图 1(b) 所示, 经过 30% 压下量轧制, 奥氏体晶粒变形不明显。当压下率达到 45% 时, 晶粒被压扁拉长, 同时, 可观察到明显的变形带, 原奥氏体晶界仍可分辨; 轧制压下率增加到 60% 时, 变形带特征更加明显, 晶界模糊不清; 当压下率进一步达到 75% 时, 晶界被轧制塑性变形流线完全覆盖。

图 2 为经不同压下率冷轧变形后试样的热膨胀曲线。图 2(a) 为合金长度相对变化量 (dL/L_0) 随温度 (T) 的变化曲线。可以发现, 冷轧退火原料板和经过不同冷轧压下率的试样呈现出几乎相同的变化趋势。在室温到居里温度 (约 230 °C) 范围内, 长度相对变化量随温度变化曲线的斜率较低, 随着温

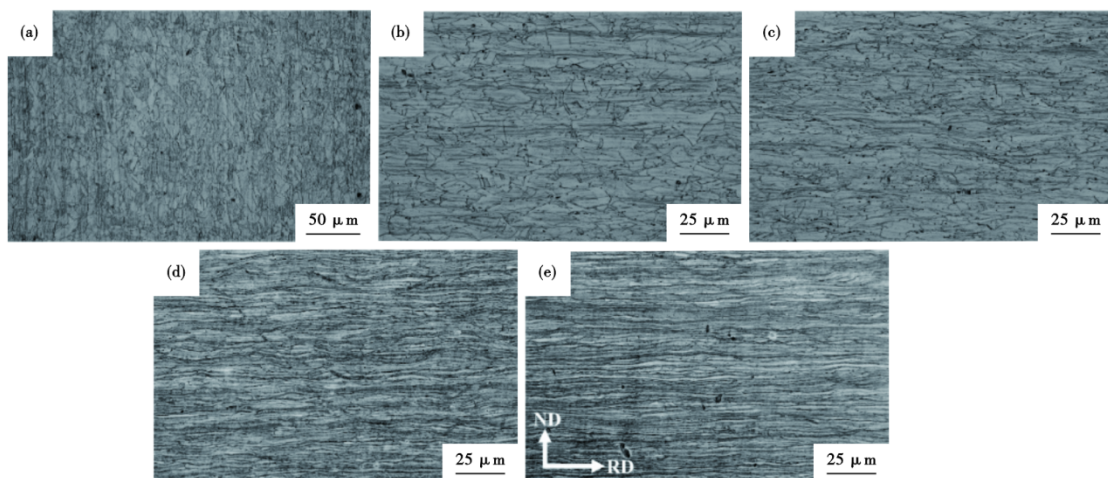


图 1 不同冷轧压下率 Ni36 因瓦合金的金相组织: (a) 0%, (b) 30%, (c) 45%, (d) 60%, (e) 75%

Fig. 1 Optical microstructure of Ni36 Invar alloys with different cold-rolled reduction rates : (a) 0%, (b) 30%, (c) 45%, (d) 60%, (e) 75%

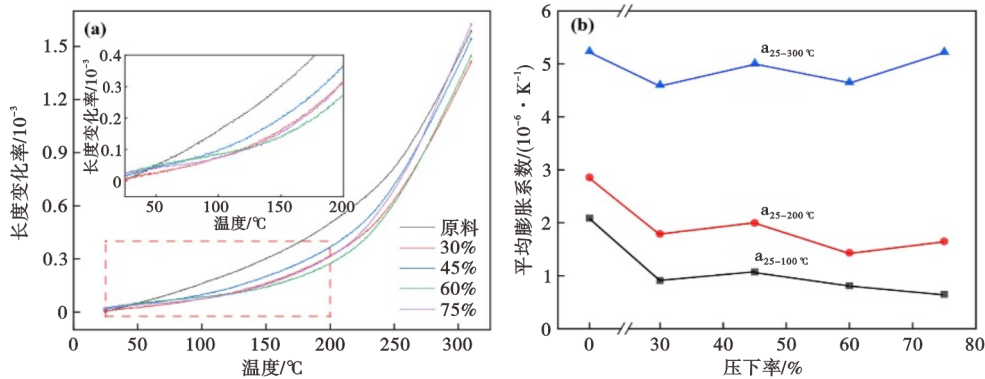


图 2 不同冷轧压下率 Ni36 因瓦合金的热膨胀系数: (a) 长度相对变化量与温度的关系, (b) 平均线膨胀系数与冷轧压下率的关系

Fig. 2 Coefficient of thermal expansion of Ni36 Invar alloys with different cold-rolled reduction rates : (a) relative change in length as a function of temperature, (b) the relationship between the average linear expansion coefficient and the cold-rolled depressing rate

度的升高,斜率持续地缓慢增加;当超过居里温度后,斜率明显增加,直到接近普通合金的热膨胀系数。图 2(b)为经不同冷轧压下率试样在 25~100 °C、25~200 °C、25~300 °C 温度平均线膨胀系数,即 $\alpha_{25-100^\circ\text{C}}$ 、 $\alpha_{25-200^\circ\text{C}}$ 和 $\alpha_{25-300^\circ\text{C}}$ 。冷轧退火原料板经过冷轧后,热膨胀系数明显降低,其中, $\alpha_{25-100^\circ\text{C}}$ 随冷轧压下率的增加总体上呈现下降趋势,而 $\alpha_{25-200^\circ\text{C}}$ 和 $\alpha_{25-300^\circ\text{C}}$ 表现为先减小后增加的趋势,并在压下率为 60% 时取得最低值。以 $\alpha_{25-200^\circ\text{C}}$ 为例,60% 压下率时对应的最低值为 $1.43 \times 10^6 \text{K}^{-1}$,比原料的膨胀系数 $2.86 \times 10^6 \text{K}^{-1}$ 降低了 49.8%。

据文献研究表明^[5,7-9],冷轧变形导致热膨胀系数降低的现象可以通过冷轧织构对磁性能作用,进而影响热膨胀系数来解释。如图 3 所示,冷轧后产品相比退火后产生三种主要的冷轧织构,包括: $\{112\} \langle 111 \rangle$ 铜型织构, $\{110\} \langle 112 \rangle$ 黄铜型织构和 $\{136\} \langle 634 \rangle$ S 型织构。研究表明,冷轧压下率增加,三种织构的体积占比逐渐增多,其中, S 型织构占比最大,织构的变化导致饱和磁化强度逐渐降低,进而影响热膨胀系数^[5]。此外,冷轧形变会向基体中引入位错、空位等缺陷,也可能使热膨胀系数降低^[5]。有关研究表明, Fe-Ni 因瓦合金和 Fe-Ni-Co 超因瓦合金分别在 50%、60% 冷轧压下率时获得膨胀系数的最小值,而后随着压下率的继续增加,热膨胀系数反常增大。大压下量引起的剧烈的织构转变对磁性能产生了一定的影响,并进一步对热膨胀系数产生作用^[5]。

2.2 退火温度对组织和性能的影响

图 4 为 0.6 mm 冷轧板 (60% 压下率) 分别在

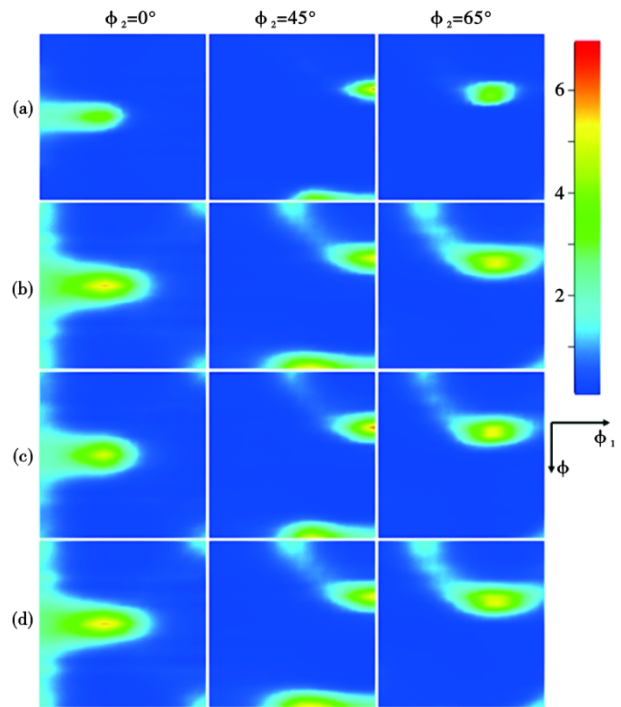


图 3 不同冷轧压下率 Ni36 因瓦合金的 ODF 图: (a) 30%, (b) 45%, (c) 60%, (d) 75%

Fig. 3 ODF plots of Ni36 Invar alloys with different cold-rolled depressive rates : (a) 30%, (b) 45%, (c) 60%, (d) 75%

700、800、900、1 000 °C 退火 1 h 的热膨胀性能。与前述相似,显示为合金长度相对变化量随温度的变化曲线仍呈现出低温段增长缓慢,高温段迅速增加的趋势,如图 4(a) 所示;由图 4(b) 可以看出,平均线膨胀系数在 700~900 °C 随着退火温度增加缓慢增大, $\alpha_{25-200^\circ\text{C}}$ 由 $2.59 \times 10^6 \text{K}^{-1}$ 逐渐升高到 $2.70 \times 10^6 \text{K}^{-1}$,而后在 1 000 °C 时降低至 $2.47 \times 10^6 \text{K}^{-1}$ 。

图 5 为不同温度退火 1 h 后微观组织的金相照

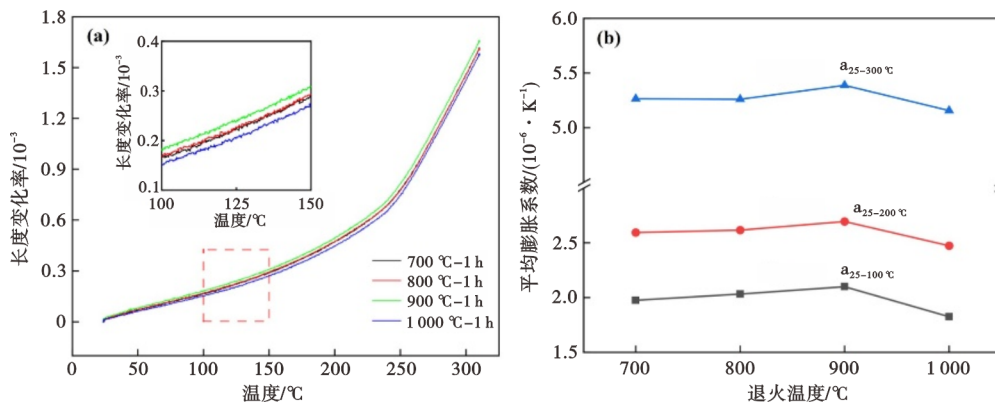


图 4 退火温度对 Ni36 0.6 mm 冷轧板热膨胀系数的影响: (a) 长度相对变化量与温度的关系, (b) 平均线膨胀系数与温度的关系

Fig. 4 Effect of annealing temperature on the thermal expansion coefficient of Ni36 0.6 mm cold-rolled sheet : (a) relative change in length as a function of temperature, (b) average linear coefficient of expansion as a function of temperature

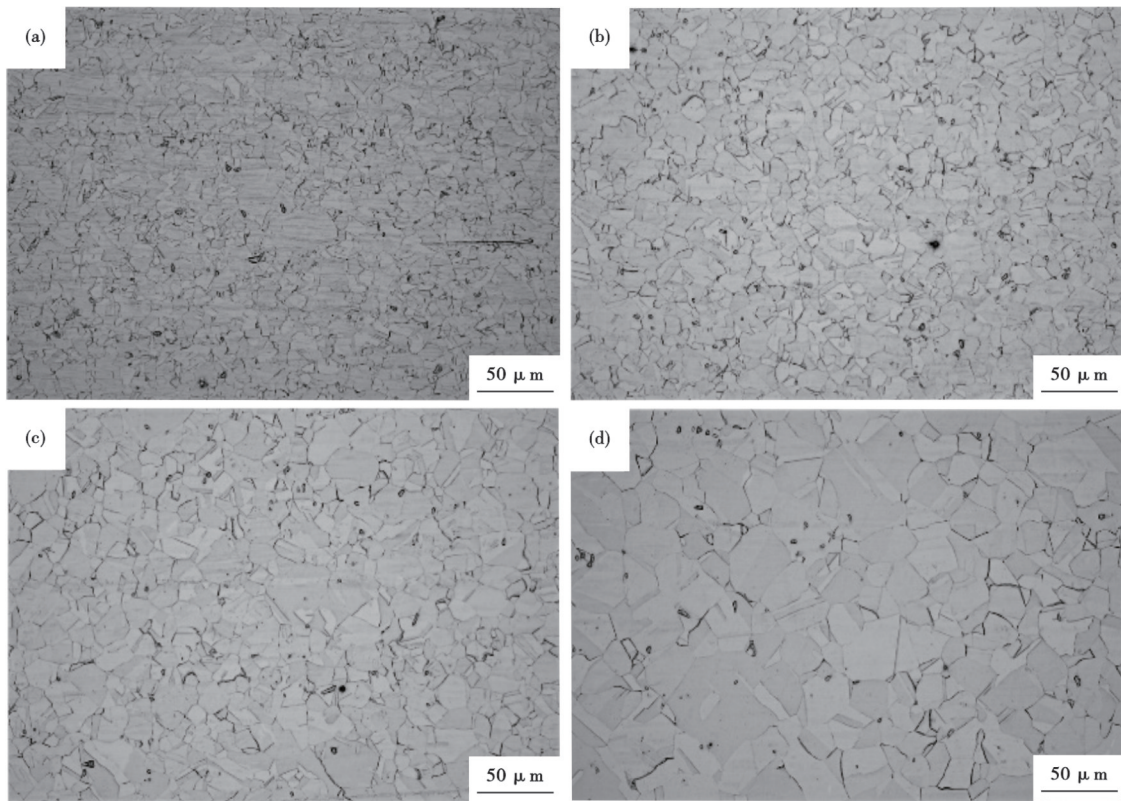


图 5 Ni36 0.6 mm 冷轧板不同温度退火 1 h 的显微组织: (a) 700 °C, (b) 800 °C, (c) 900 °C, (d) 1000 °C

Fig. 5 Microstructure of Ni36 0.6 mm cold-rolled sheet annealed at different temperatures for 1 h : (a) 700 °C, (b) 800 °C, (c) 900 °C, (d) 1000 °C

片。通过随机选取观察位置,每个试样统计不低于 500 个晶粒得出晶粒尺寸,统计结果见表 2。随着温度升高,晶粒明显长大,特别是在 1000 °C 退火后晶粒尺寸达 27.49 μm,是 700 °C 退火后的近 3 倍,800、900 °C 退火时晶粒尺寸增长缓慢。

相同退火时间内,温度越高,冷轧组织回复与再结晶速率越快也更充分,对热膨胀系数的减小作

用越小,因此,由 700 °C 升温到 900 °C 的过程中,热膨胀系数呈现增加的趋势。而 1000 °C 退火热膨胀系数的降低主要受晶粒尺寸的影响。

由于晶界的热膨胀系数大于晶内,因此,细晶材料热膨胀系数普遍偏高^[10]。在刘意春等^[11]关于 Fe-Ni 合金晶粒尺寸对热膨胀系数影响的研究中发现,晶内的原子在自身受热发生非简谐振动的同时

表2 Ni36 0.6 mm 冷轧板在不同温度退火1 h的晶粒尺寸
Table 2 Grain size of Ni36 0.6 mm cold-rolled sheet annealed at different temperatures for 1 h

温度/℃	晶粒尺寸/ μm
700	8.92
800	11.01
900	14.93
1000	27.49

受因瓦效应的影响,从而表现出低的热膨胀系数,因此,晶粒尺寸越大,热膨胀系数越小。此外,更多学者在纳米多晶Cu,纳米Ni-P,纳米Ni薄膜中均发现了热膨胀系数对晶粒尺寸的依赖性^[12-13]。而800、900℃退火后线膨胀系数的缓慢增加可能和晶粒长大、冷轧组织回复与再结晶的竞争有关,即退火处理一方面促进晶粒长大进而减小热膨胀系数,另一方面退火过程伴随回复、再结晶,位错密度降低,随机取向的晶粒增加,作用于合金的自发磁化和磁致伸缩系数^[7,14-15],进而导致合金的热膨胀系数增加,两者的综合作用使800、900℃退火后试样的线膨胀系数仅呈现为略微增大。而1000℃退火样品晶粒尺寸显著增加,一维方向上晶界占比仅为700℃样品的三分之一,900℃样品的二分之一(晶粒尺寸分别为700、900℃样品的3倍和2倍),此时,晶界比例的显著减少对热膨胀系数的改变占主导作用,平均线膨胀系数降低,使得 $\alpha_{25-200^\circ\text{C}}$ 从900℃的 $2.70 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 减少至1000℃的 $2.47 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$,降低8.5%。

2.3 退火时间对组织和性能的影响

图6为0.6 mm冷轧板(60%压下率)在700℃不同时间退火后的热膨胀性能。可以发现,如图6(a)

所示,同样在室温到居里温度的范围内,长度相对变化量随温度变化曲线的斜率较低,随着温度的升高,斜率持续缓慢地增加。图6(b)为平均线膨胀系数随700℃退火时间的变化趋势。可以看出,所考察的温度范围越靠近室温,平均线膨胀系数越小,即 $\alpha_{25-100^\circ\text{C}}$ 比 $\alpha_{25-200^\circ\text{C}}$ 、 $\alpha_{25-300^\circ\text{C}}$ 更小, $\alpha_{25-100^\circ\text{C}}$ 在700℃-0.5 h退火条件下仅为 $1.68 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 。同时,随着保温时间的增加,平均线膨胀系数逐渐增加, $\alpha_{25-100^\circ\text{C}}$ 由保温0.5 h的 $1.68 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 增加到6 h的 $2.09 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, $\alpha_{25-200^\circ\text{C}}$ 由0.5 h的 $2.46 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 增加到6 h的 $2.74 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, $\alpha_{25-300^\circ\text{C}}$ 由0.5 h的 $5.17 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 增加到6 h的 $5.36 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 。

图7为700℃退火不同时间微观组织的EBSD检测结果。如图7所示,晶粒尺寸(排除孪晶)随保温时间的增加而缓慢增大,由退火0.5 h时的6.72 μm 增大至退火6 h时的7.91 μm 。文献[10-11]研究表明,增大晶粒尺寸有利于降低线膨胀系数。但在700℃退火温度下,晶粒尺寸约10%的略微增加对热膨胀系数影响较小。

利用XRD衍射峰,根据W-H方法可以估算700℃不同退火时间合金的位错密度,如图8所示。考虑到晶粒尺寸 d 为微米级,因此,可忽略晶粒尺寸对衍射峰宽化的影响^[16]。衍射峰半峰宽(FWHM)即 β 、布拉格角 θ 和微应变 ε 的关系如式(2)。

$$\beta \frac{\cos \theta}{\lambda} \approx 2\varepsilon \frac{\sin \theta}{\lambda} \quad (2)$$

式中, λ 为Cu靶辐射波长($\lambda=0.15406 \text{ nm}$)。因此, ε 可以通过拟合不同衍射峰的 $\beta \frac{\cos \theta}{\lambda}$ 和 $\frac{2\sin \theta}{\lambda}$ 的斜率

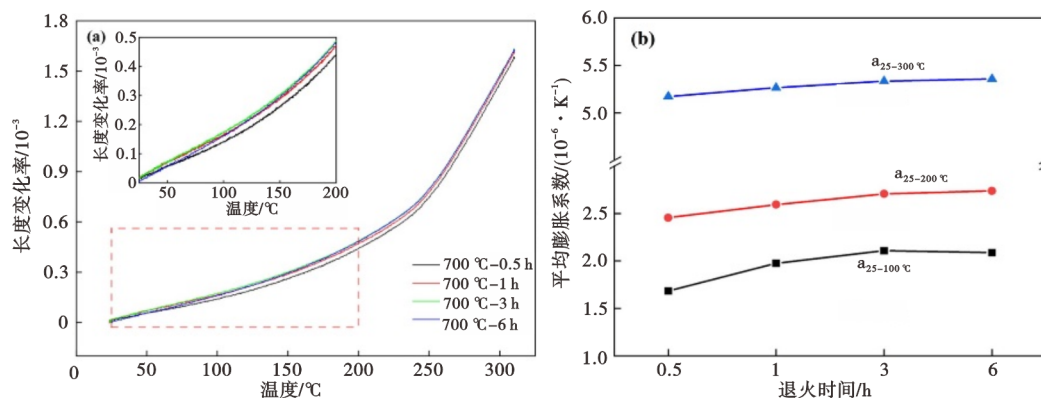


图6 退火时间对Ni36 0.6 mm冷轧板700℃退火热膨胀系数的影响:(a)长度相对变化量与温度的关系,(b)平均线膨胀系数与退火时间的关系

Fig. 6 Effect of annealing time on the thermal expansion coefficient of Ni36 0.6 mm cold-rolled sheet at 700 °C annealing : (a) relative change in length as a function of temperature, (b) the relationship between the average linear expansion coefficient and the annealing time

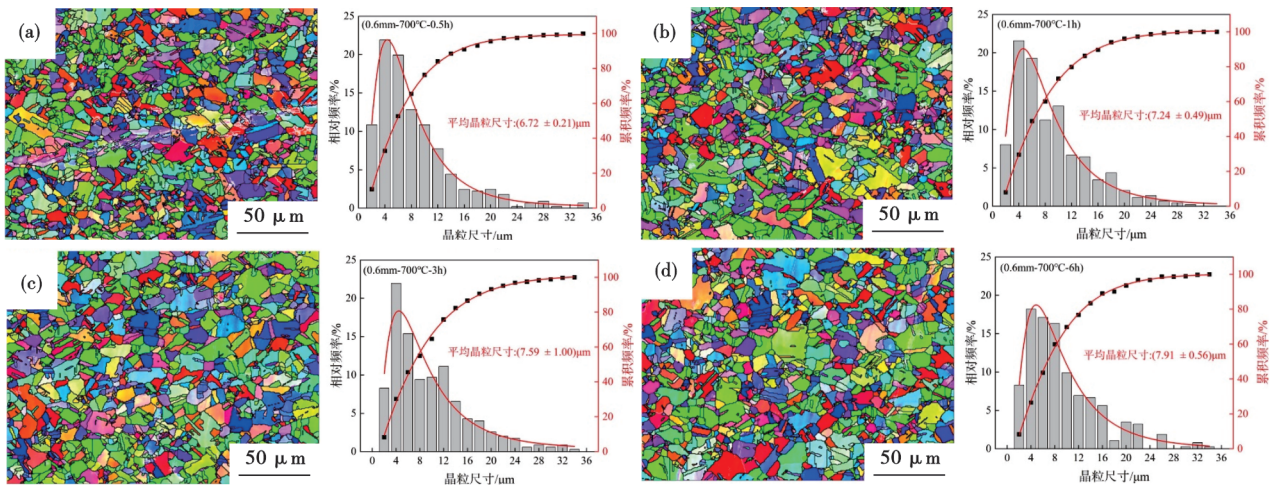


图7 Ni36 0.6 mm冷轧板 700 °C不同时间退火的EBSD结果和晶粒尺寸:(a) 0.5 h,(b) 1 h,(c) 3 h,(d) 6 h

Fig. 7 EBSD results and grain size of Ni36 0.6 mm cold-rolled sheet annealed at different times at 700 °C : (a) 0.5 h, (b) 1 h, (c) 3 h, (d) 6 h

得到。进一步,位错密度^[17]可通过式(3)求得:

$$\rho = \frac{2\sqrt{3}\epsilon}{db} \quad (3)$$

式中, ρ 为位错密度, m^{-2} ;b为位错的伯氏矢量,为0.225 nm。

在退火6 h时,位错密度降低至 $1.87 \times 10^{12} m^{-2}$ 。因此,退火过程中微观组织的回复与再结晶导致的位错密度降低和随机取向晶粒增加使得热膨胀系数持续增加。随着退火时间的增加,回复与再结晶分数增多,位错密度明显降低,晶粒随机取向增多,导致合金的热膨胀系数逐渐增加^[18]。

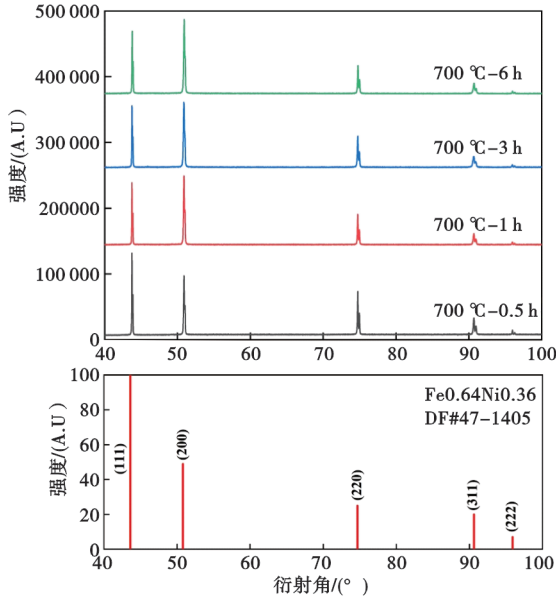


图8 Ni36 0.6 mm冷轧板 700 °C不同时间退火的XRD检测结果

Fig. 8 XRD test results of Ni36 0.6 mm cold-rolled plate after annealing at different times at 700 °C

位错密度计算结果见表3,在700 °C退火0.5 h,位错密度为 $3.26 \times 10^{15} m^{-2}$,此时,冷轧组织发生不完全再结晶;在退火3 h时,合金发生大量回复,位错密度大幅降低至 $2.83 \times 10^{12} m^{-2}$,即再结晶基本完成,

表3 Ni36 0.6 mm冷轧板 700 °C不同时间退火的位错密度
Table 3 Dislocation density of Ni36 0.6 mm cold-rolled sheet after annealing at different times at 700 °C

退火时间/h	位错密度/ m^{-2}
0.5	3.26×10^{15}
1	3.19×10^{15}
3	2.83×10^{12}
6	1.87×10^{12}

试验表明,冷轧压下率和热膨胀系数的这些变化和冷轧组织的回复与再结晶、晶粒长大的相互竞争有关。一方面,通过冷轧组织的回复与再结晶,随机取向晶粒增多,作用于磁致伸缩和自发磁化,导致热膨胀系数的增大;而另一方面,热膨胀系数随再结晶晶粒的长大而减小。

3 结论

1)冷轧处理使得Ni36合金的热膨胀系数大幅降低,随着冷轧压下率的增加,平均线膨胀系数 $\alpha_{25-200^\circ C}$ 和 $\alpha_{25-300^\circ C}$ 表现为先减小后增加的趋势,当压下率为60%时 $\alpha_{25-200^\circ C}$ 最低,最低值为 $1.43 \times 10^{-6} K^{-1}$,相比原料降低了49.8%。这可以通过织构随冷轧压下率的演变以及位错、空位等缺陷密度的增大来

解释。

2)在相同退火时间即1 h时,热膨胀系数随着退火温度的增加呈现先增加后减小的趋势,当退火温度由700 °C升高到900 °C时, $\alpha_{25-200\text{C}}$ 由 $2.59\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$

逐渐升高到 $2.70\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$,而后在1000 °C时下降为 $2.47\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$;在700 °C不同时间退火时,热膨胀系数随着退火时间的增加而持续增大, $\alpha_{25-200\text{C}}$ 由0.5 h的 $2.46\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$ 持续增加至6 h的 $2.74\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$ 。

参考文献

- [1] 刘朝霞, 孙宪进, 刘俊, 等. 热处理工艺及Nb微合金化对9Ni钢组织性能的影响[J]. 特殊钢, 2024, 45(3): 70-74.
- [2] Weiss R J. The origin of the Invar'effect [J]. Proceedings of the Physical Society, 1963, 82(2): 281-288.
- [3] 孙悦. Fe-Ni合金因瓦效应影响因素探究[D]. 北京: 中国石油大学, 2019.
- [4] Hausch G, Bächer R, Hartmann J. Influence of thermomechanical treatment on the expansion behavior of invar and superinvar [J]. Physica B: Condensed Matter, 1990, 161(1-3): 22-24.
- [5] 何承渝, 蔡晨, 谷宇, 等. 不同冷轧压下率对因瓦合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49(2): 120-127.
- [6] 蔡晨, 谷宇, 李静媛. 热处理对Fe-36Ni因瓦合金箔热膨胀及力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(12): 19-28.
- [7] Huang L, Zhou Y J, Guo T W, et al. Investigation of temperature-dependent magnetic properties and coefficient of thermal expansion in invar alloys[J]. Materials, 2022, 15(4): 1504.
- [8] Rao Z Y, Ponge D, Körmann F, et al. Invar effects in FeNiCo medium entropy alloys: From an Invar treasure map to alloy design [J]. Intermetallics, 2019, 111: 106520.
- [9] 宋红宇, 刘海涛, 王国栋. 薄带连铸因瓦合金的组织、织构及力学性能研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(5): 723-728.
- [10] Yim T H, Choe B H, Jeong H T. Effect of nano grain growth on coefficient of thermal expansion in electroplated Fe-Ni invar alloy [J]. Korean Journal of Materials Research, 2014, 24 (10) : 515~519.
- [11] Liu Y C, Liu L, Wu Z, et al. Grain growth and grain size effects on the thermal expansion properties of an electrodeposited Fe-Ni invar alloy[J]. Scripta Materialia, 2010, 63(4): 359-362.
- [12] Birringer R. Nanocrystalline materials[J]. Materials Science and Engineering: A, 1989, 117: 33-43.
- [13] Klam H J, Hahn H, Gleiter H. The thermal expansion of grain boundaries[J]. Acta Metallurgica, 1987, 35(8): 2101-2104.
- [14] 沈鑫腾, 王春国, 朱剑威, 等. 二次热处理对超因瓦合金磁性能与热膨胀系数的影响[J]. 金属功能材料, 2024, 31(4): 1-7.
- [15] 罗林根, 张铭桦, 庞建明, 等. 塑性变形及热处理工艺对因瓦型低膨胀合金性能影响的研究进展[J]. 江西冶金, 2022, 42(6): 15-23.
- [16] Kril C E, Birringer R. Estimating grain-size distributions in nanocrystalline materials from X-ray diffraction profile analysis [J]. Philosophical Magazine, Part A, 1998, 77(3): 621-640.
- [17] Chen W J, Gao P F, Wang S, et al. Strengthening mechanisms of Nb and V microalloying high strength hot-stamped steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 797: 140115.
- [18] 白超垒, 高天逸飞, 于湘涛, 等. 冷却方式对超因瓦合金热膨胀与软磁性能的影响研究[J]. 导航定位与授时, 2023, 10(6): 122-130.