

冷轧变形量对 Ti-5Cu 合金微观组织和力学性能的影响

张军红¹ 贺永东¹ 邹金涛¹ 卢静静²

(1. 新疆大学材料科学与工程学院, 乌鲁木齐 830017; 2. 新疆湘润科技新材料有限公司, 哈密 839000)

摘要 以 Ti-5Cu 钛合金冷轧板材为对象, 利用金相显微镜、X 射线衍射、扫描电镜、电子背散射衍射、透射电镜等手段研究了冷轧变形量对 Ti-5Cu 钛合金微观组织和力学性能的影响。结果表明, 随冷轧变形量增加, X 射线衍射峰宽化并且向低角度移动, α 和 β 两相沿着轧制方向先被拉长, 之后晶粒逐渐破碎, 尺寸不断减小。在冷轧变形中, 几何必要位错随变形量增加而增加, 从而使小角度晶界不断增加, 导致合金的塑性变形阻力增加。退火态合金的抗拉强度为 504.9 MPa, 屈服强度为 396.4 MPa, 伸长率为 11.8%, 当冷轧量达到 60% 时抗拉强度为 839.2 MPa, 屈服强度为 831.7 MPa, 伸长率为 6.9%, 退火态合金的断口特征为韧窝大而深的韧性断裂, 而冷轧变形量为 60% 的断口出现了明显的撕裂棱, 表现为韧性加脆性的混合型断裂。随冷轧变形量增大, 合金强度增大, 断口处韧窝由深变浅, 大变形量下出现撕裂棱, 塑性逐渐下降。

关键词 Ti-5Cu 合金; 冷轧变形; 几何必要位错; 微观组织; 力学性能

中图分类号 TG146.2⁺3; TG113.25

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250201

Effects of Cold Rolling Deformation on Microstructure and Properties of Ti-5Cu Alloy

ZHANG Junhong¹, HE Yongdong¹, ZOU Jintao¹, LU Jingjing²

(1. School of Materials Science and Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017; 2. Xinjiang Xiangrun Technology New Materials Co., Ltd., Hami 839000)

Abstract: Taking cold rolled Ti-5Cu alloy sheet as research object, effects of cold rolling deformation on the microstructure and mechanical properties of Ti-5Cu alloy were investigated by means of metallographic microscope, X-ray diffraction, scanning electron microscope, electron backscatter diffraction and transmission electron microscope. The results indicate that X-ray diffraction peak is broadened and moved to a low angle with the increase of cold rolling deformation. α and β phases are elongated along the rolling direction, then the grains are gradually broken with size refinement. During the cold rolling deformation, the geometrically necessary dislocations are increased with the increase of deformation amount, leading to the continuous rising of small angle grain boundaries as well as the increase of plastic deformation resistance. The tensile strength, yield strength and elongation of as-annealed alloy reach 504.9 MPa, 396.4 MPa, and 11.8%, respectively. When the cold rolling amount reaches 60%, the tensile strength, yield strength and elongation of the alloy are 839.2 MPa, 831.7 MPa, and 6.9%, respectively. The fracture of as-annealed alloy is characterized by ductile fracture with large and deep dimples, while obvious tearing ridges occur at cold rolling deformation of 60%, presenting mixed fracture of toughness and brittleness. In summary, the strength of the alloy is increased continuously with increase of cold rolling deformation, and the dimples at the fracture are varied from deep to shallow. Tearing ridge appears under large deformation, and the plasticity is gradually reduced.

Key Words: Ti-5Cu Alloy, Cold Rolling Deformation, Geometrically Necessary Dislocations, Microstructure, Mechanical Properties

钛合金因具有良好的力学性能、优异的比强度、耐腐蚀性和良好的生物相容性, 在航空航天、生物医学和化学工程等领域有广阔的应用前景^[1-3]。目前, 纯 Ti 的

力学性能不能满足某些极端工况下的应用需求, 因此通过合金化和塑性加工手段来提高其综合性能成为主要的方法, 其中 $\alpha+\beta$ 型钛合金由于 α 相的高温稳定性

收稿日期: 2025-05-15; 修订日期: 2025-06-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51861033); 新疆大学横向合作资助项目(XJXS-YJY-HX202401); 新疆维吾尔自治区重点研发计划资助项目(2023B01002)

第一作者简介: 张军红, 男, 1999 年出生, 硕士研究生, E-mail: 3081647532@qq.com

通信作者: 贺永东, 男, 1965 年出生, 教授, E-mail: hdyongq@126.com

引用格式: 张军红, 贺永东, 邹金涛, 等. 冷轧变形量对 Ti-5Cu 合金微观组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(11): 1700-1707.

ZHANG J H, HE Y D, ZOU J T, et al. Effects of cold rolling deformation on microstructure and properties of Ti-5Cu alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(11): 1700-1707.

和β相的加工硬化能力而成为具有工程应用潜力的钛合金体系之一^[4-5]。Ti-5Cu合金(α+β型)通过在纯Ti中添加Cu元素,利用Cu元素的固溶强化作用和热处理过程中形成的析出相,以及后续的冷、热加工工艺综合提高合金的力学性能^[6-8]。

冷轧作为一种生产中常见的塑性加工工艺,可通过位错增殖、晶粒细化和组织演变显著提升合金的强度与硬度,同时调控其延展性与各向异性。蒋孟玲等^[9]研究了不同冷轧量对Gr.39钛合金带卷组织性能的影响,发现当冷轧变形量从0升高到59.4%时,显微组织由完全退火的等轴组织逐渐变形为被拉长的纤维状组织,并且随变形量增加,材料加工硬化程度逐渐增加,同时考虑到轧制过程的稳定性,建议变形量控制在60%以内。刘志强等^[10]研究了冷轧变形量对TC16钛合金微观组织与力学性能的影响,发现大幅度冷轧变形后,TC16合金组织为分布均匀的纤维状结构,存在少量未变形α晶粒,并伴有应变诱导的α"马氏体相产生,抗拉强度和屈服强度均得到大幅提升,发生较大冷变形强化。胡革全等^[11]研究了冷轧工艺对ATI425钛合金管材质量的影响,发现随变形量增加管材强度和硬度提高,伸长率下降,并且变化趋势逐渐减缓。王春阳等^[12]研究了冷轧变形量对Ti-Nb-Zr-O高弹性钛合金的组织 and 性能的影响,发现冷轧过程中,合金存在{332}〈113〉孪生变形、应力诱发马氏体α'相变、滑移变形3种变形机制,当变形量为42.3%时,应力诱发马氏体相变,较强的〈110〉织构和晶体缺陷密度较多的松散结构导致其弹性模量较低,实现了单一材料高强度和低弹性模量的有机调和。

综上,钛合金冷轧过程中变形量的逐渐增加,会对合金微观组织和力学性能产生显著的影响。因此,研究Ti-5Cu合金冷轧过程中微观组织和力学性能之间的关系对其冷轧工艺的制定有积极意义。本研究通过进行不同变形量的冷轧试验,结合各种微观组织表征手段和力学性能测试,对Ti-5Cu合金的冷轧变形机理进行深入的探究,揭示其微观组织和力学性能之间的关联,为Ti-5Cu合金的冷轧工艺及工程应用提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验材料为Ti-5Cu合金,由海绵钛和T2紫铜按一定比例混合配制而成,通过(EBCHM 2 400 kW)EB炉熔炼进行合金化获得,合金的相变点温度为810℃,化学成分见表1。冷轧前,先将厚度为25 mm的板材涂满防氧化涂料并在热处理炉中加热到860℃保温30 min,

之后快速取出在两辊可逆热轧机上进行轧制,经过80%的变形量使板材厚度变为5 mm,随后空冷。图1为冷轧试样的制备流程图。将空冷后的5 mm热轧板材放入热处理炉加热至700℃保温2 h进行退火处理,空冷后将板材表面进行打磨,通过两辊冷轧机进行下压量为20%、40%和60%的冷轧,分别得到厚度为4、3及2 mm的冷轧板材,试样全部在板材的中间切取,拉伸试样沿RD方向切取。将厚度为5、4、3及2 mm的板材分别记为退火态(Annealing sample)、CR20%、CR40%、CR60%。

表1 Ti-5Cu合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of Ti-5Cu alloy %								
w _B								
Cu	Fe	Si	C	H	O	N	S	Ti
5.50	0.02	0.25	0.011	0.005	0.000 7	0.000 04	0.000 6	余量

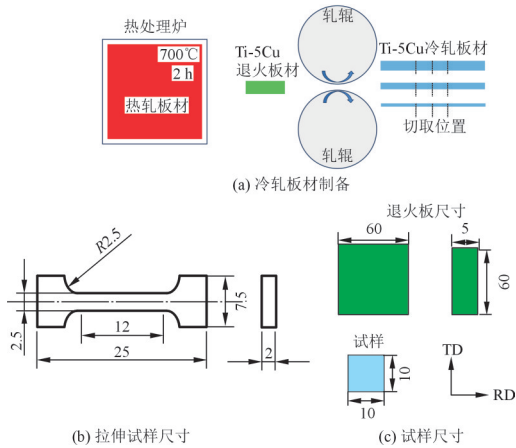


图1 冷轧试样制备流程图

Fig.1 Flow chart of preparation of cold rolled specimens

1.2 材料表征

采用X射线衍射分析仪(XRD, Smartlab 9 kW)对合金物相进行分析,采用Cu-Kα,波长约为0.154 06 nm,能量约为8.14 keV。以10(°)/min进行扫描,扫描范围为20°~90°。金相试样在冷轧板材中间取样,对其依次用200、400、600、800、1 000、1 500和2 000号的金相砂纸进行粗磨,然后进行机械抛光,之后选用HF、HNO₃、H₂O体积比为13:26:100的腐蚀液对抛光后的试样表面腐蚀3~5 s,使用光学显微镜(OM, RX-BH200M)对腐蚀后的金相形貌进行观察。使用电子背散射衍射分析(EBSD, EDAX Hikari Plus)对冷轧试样的晶粒取向、晶粒尺寸等进行表征,EBSD试样采用电解+振动抛光的方法制备。使用极高分辨冷场发射扫描电镜(SEM, HITACHI-SU8600)观察合金的微观形貌和拉伸试样的断口特征。使用场发射透射电镜(TEM, Tecnai G2 F30)对试样的亚结构、衍射花样等进行了表征,TEM试样采用离子减薄仪(GATAN-695)将试样减薄至50 μm

以下。使用万能拉伸试验机(ETM 105D)在室温下进行拉伸试验,拉伸速率为 0.5 mm/min,试验均重复 3 次以避免偶然性。硬度测试采用 401MVA 数显自动转塔显微硬度计,按照 ASTM E92 标准评定合金的硬度,载荷为 9.8 N,保持 15 s,试验重复 15 次以保证数据的可靠性。

2 试验结果与讨论

2.1 物相表征

为了确定 Ti-5Cu 合金退火态、CR20%、CR40%、CR60% 的物相组成变化,对其分别进行了 XRD 检测,见图 2。通过与 PDF 卡片数据库对比可以观察到不同物相明显的特征峰,PDF 对比数据中绿色为 α -Ti,蓝色为 β -Ti,紫色为 Ti_2Cu (基于原图为彩色描述,下同)。退火态试样中 α -Ti 在 (101) 和 (100) 方向、 β -Ti 在 (110)

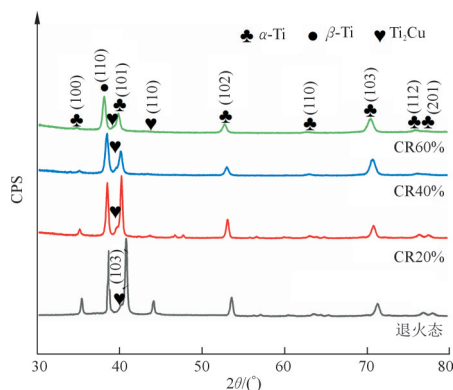


图 2 Ti-5Cu 合金退火态、CR20%、CR40%、CR60% XRD 图

Fig.2 XRD patterns of as-annealed, CR20%, CR40%, CR60% Ti-5Cu alloy specimens

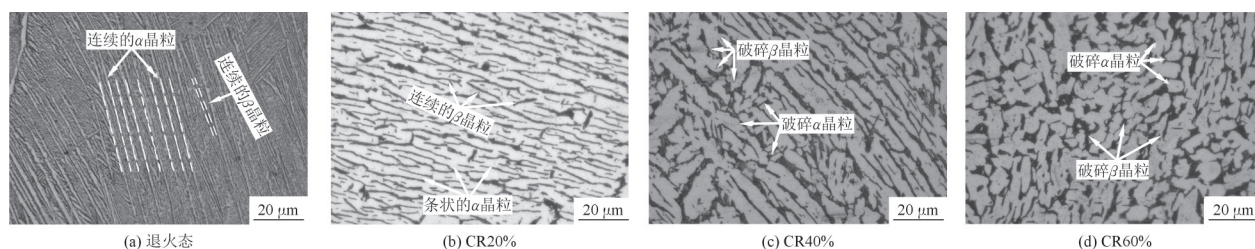


图 3 不同状态的 Ti-5Cu 合金金相图

Fig.3 Metallographic structure of Ti-5Cu alloy under different states

图 4 为 Ti-5Cu 合金退火态和不同冷轧变形量下的 SEM 图。可以看出,退火态试样的形貌表现为 α 相和 β 相均为长条状,两种相沿着特定的取向生长并且相间分布,相邻 β 晶粒的大小基本一致,这是因为退火过程中提供了足够的能量,促使 β 晶粒能够充分长大。经 20% 冷轧变形后的 Ti-5Cu 合金由于变形量较小, β 晶粒的细化不明显,只是在外力作用下被分解为较大的块状,这些块状由大小不同的 β 晶粒聚集而成。经 40% 冷轧变形后,Ti-5Cu 合金中的 β 晶粒明显被拉长,整体的宽度均

方向、 Ti_2Cu 在 (103) 方向的衍射峰强度最高,是因为退火过后晶体完整性好,结晶度高,从而表现出强的衍射峰。在冷轧试样中,随冷轧变形量增加, α -Ti 在 (101) 和 (100)、 β -Ti 在 (110)、 Ti_2Cu 在 (103) 和 (110) 方向的衍射峰强度逐渐下降、宽度逐渐增加并且向小角度区移动,位于高角度区域的 α -Ti 衍射峰也遵循此规律。因为随轧制变形量增加会使退火长大后的晶粒破碎,位错密度增加,从而导致衍射峰宽化,而衍射角 θ 向低角度移动时,根据布拉格方程 $2d\sin\theta = n\lambda$,晶面间距 d 增大,这与冷轧过程中引入的内应力和发生的晶格畸变有关,因此,不同试样的衍射峰均出现了不同程度的变化^[13-14]。

2.2 微观结构和组织

图 3 为 Ti-5Cu 合金退火态、CR20%、CR40%、CR60% 的金相显微组织。由图 3a 可以看出,退火态 Ti-5Cu 合金表现为连续的长条状 α 相和 β 相均匀相间分布并且沿一定的取向生长。当冷轧量为 20% 时,Ti-5Cu 合金表现为 α 相被拉长为片状,并发生一定角度的弯曲变形, β 相由退火态的连续状态开始变为不连续,出现了明显的断口,部分很小的 β 相开始分散到 α 相基体中。当冷轧量为 40% 时,Ti-5Cu 合金已经出现局部区域的 α 相和 β 相破碎,一块完整的晶粒开始分解成几块不同取向的小晶粒,小晶粒的占比开始上升。当冷轧量为 60% 时,Ti-5Cu 合金中可明显看到破碎的 α 相和 β 相,晶粒大小和取向表现均不一致, α 相和 β 相呈无序分布。可见随冷轧变形量增加, α 相和 β 相的晶粒由一开始的长条状逐渐转变为破碎后的小晶粒,进一步证明了图 2 中衍射峰宽化的合理性。

变窄,晶粒不再是聚集在一起,而是沿一定的方向拉长,有明显的破碎感。经 60% 冷轧变形后,Ti-5Cu 合金的 β 晶粒明显细化,有部分晶粒被拉长,晶粒内部出现严重的破碎感。对冷轧态合金的晶粒尺寸进行统计,见表 2,1~15 表示 15 个区域。可以看出,冷轧态平均晶粒尺寸由 CR20% 的 3.202 μm 细化为 CR60% 的 1.424 μm 。

通过组织分析可知,Ti-5Cu 合金随冷轧变形量增加晶粒发生破碎,晶粒尺寸明显细化,为进一步说明该过程的发生,对退火态和不同变形量的冷轧试样进行

了EBSD测试,得到不同试样的IPF(Inverse Pole Figure)图、PF(Pole Figure)图,结果见图5。从图5a和图5b可看出,退火态试样的晶粒尺寸粗大,各晶粒间呈不同取向,极图中织构均匀分布,出现了个别取向较强的择优取向,极密度值最高为6.535。当变形量为20%时,晶粒开始沿着一定的晶体学取向被拉长,出现择优取向,这在极图中能清晰地反映,相较于退火态,此时板材出现了垂直于投影面的基面织构,极密度最高达到8.639,同时还伴随着局部区域晶粒的破碎。随着变形量增加到40%,晶粒出现明显的破碎,原来的板条状晶粒已经变为大小不一致的等轴状晶粒,等轴状晶粒

又表现为小晶粒聚集在大晶粒的晶界附近,整体上均匀分布。小晶粒在图中的颜色趋于一致,说明其取向也随变形量增加逐渐向相同的取向转变,在极图中可以明显看到强织构,织构在投影面上的占比相较于CR20%明显变大,说明更多的晶粒在外力作用下择优。当变形量增加到60%时,部分大的等轴晶粒开始进一步破碎,小晶粒的占比明显比之前变形量下的占比进一步增加,而且晶粒尺寸变得比变形量为40%时更细小。通过IPF图的观察,可以看到随变形量增加晶粒尺寸逐渐减小的过程,晶粒取向也逐渐由开始的无序向<0001>方向有序转变,极图中织构占比更大,此时随变形量增加,择优取向更加明显。

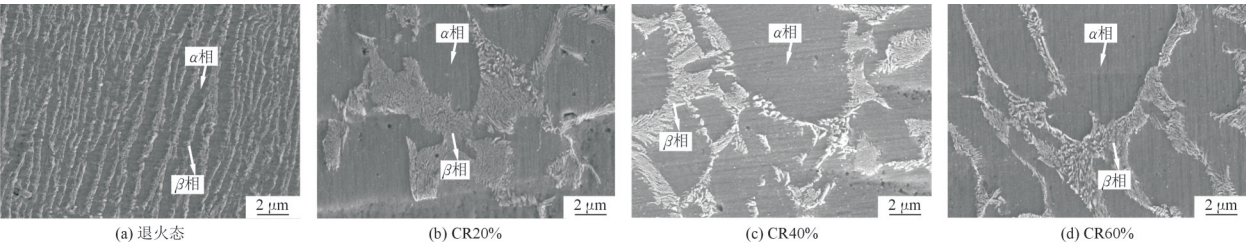


图4 不同状态的 Ti-5Cu 合金 SEM 图
Fig.4 SEM images of Ti-5Cu alloy under different states

表2 Ti-5Cu 合金晶粒尺寸统计
Tab.2 Grain size statistics of Ti-5Cu alloy

状态	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均值
CR20%	2.18	2.29	2.16	2.42	3.82	4.49	4.45	3.52	3.92	2.81	3.28	2.71	3.49	3.28	3.21	3.202
CR40%	2.54	2.76	2.91	1.00	1.48	1.48	3.63	2.86	2.07	2.58	2.34	1.77	1.24	1.56	1.56	2.118
CR60%	0.74	0.82	1.09	1.44	1.76	2.23	1.12	1.04	1.15	1.85	2.35	1.26	1.78	1.42	1.31	1.424

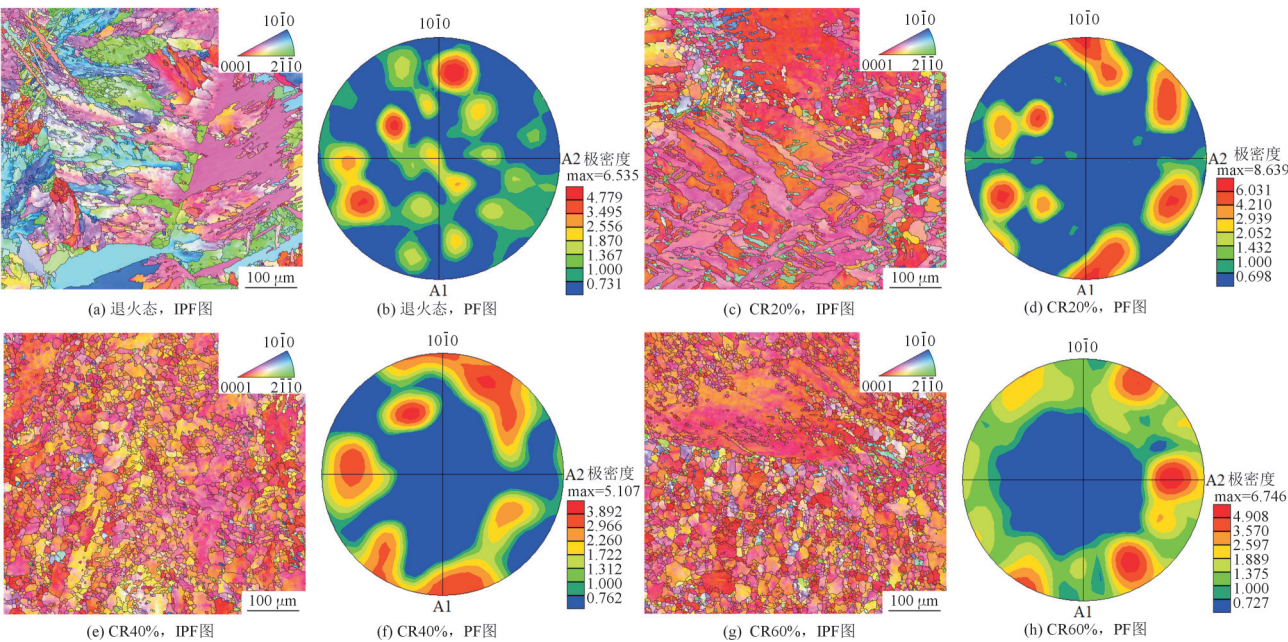


图5 Ti-5Cu 合金 IPF 和 PF 图
Fig.5 IPF and PF figures of Ti-5Cu alloy

图6为退火态和不同冷轧变形量下的晶粒尺寸统计图。由图6a可知,退火态试样晶粒尺寸为5~

200 μm,部分晶粒尺寸达300 μm,整体晶粒的平均晶粒尺寸为13.506 μm,因为退火过程中晶粒有充足的时间

和能量来长大,从而导致其晶粒尺寸大。当变形量为 20% 时,合金大部分晶粒尺寸在 100 μm 以内,仍有小部分晶粒尺寸为 200 μm ,整体晶粒的平均晶粒尺寸为 8.24 μm ,此时晶粒尺寸较大可能是轧制初期变形量不大,晶粒细化效果不明显。当变形量为 40% 时,合金晶粒尺寸大部分小于 50 μm ,小晶粒占比明显上升,平均晶粒尺寸为 6.84 μm 。当变形量为 60% 时,合金晶粒尺寸集中在 30 μm 以内,小晶粒占比很大,平均晶粒尺寸为 6.08 μm ,此时晶粒尺寸最小。

随冷轧变形量增加,几何必要位错(GNDs)在晶界处塞积,大晶粒便会破碎形成晶粒尺寸更小的亚晶,亚晶的形成会使相邻晶粒的取向差减小^[15]。不同冷轧变形量下材料的取向差分布见图 7。由图 7a 可以看出,退火态试样中小角度晶界和大角度晶界的占比

分别为 37.5% 和 62.5%,因为退火使晶粒再结晶并长大,能很好地消除热轧过程中产生的位错,使小角度晶界有足够的驱动力向大角度晶界转变,从而使大角度晶界占比较高。当轧制变形量从 20% 增至 40% 时,小角度晶界从 57% 增至 68.9%,大角度晶界从 43% 减小至 31.1%,此时由于轧制变形量较小,位错运动阻力较小,塑性变形能很好地发生,几何必要位错(GNDs)能够在晶界处快速增殖,形成小角度晶界,从而取向差较小,直观的反映就是小角度晶界的数量增加。当变形量从 40% 增至 60% 时,小角度晶界从 68.9% 增至 75.2%,而大角度晶界从 31.1% 减小至 24.8%,此时轧制变形量较大,在小角度晶界附近几何必要位错(GNDs)大量累积,形成高密度位错区域,晶粒内部取向梯度显著。

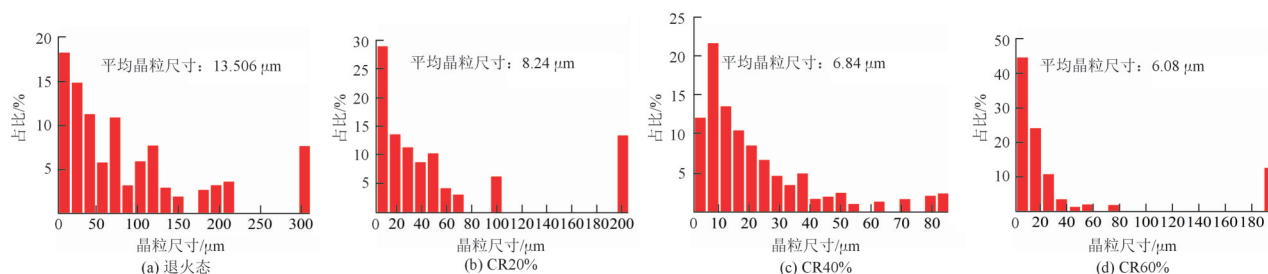


图 6 Ti-5Cu 合金晶粒尺寸图
Fig.6 Grain sizes of Ti-5Cu alloy

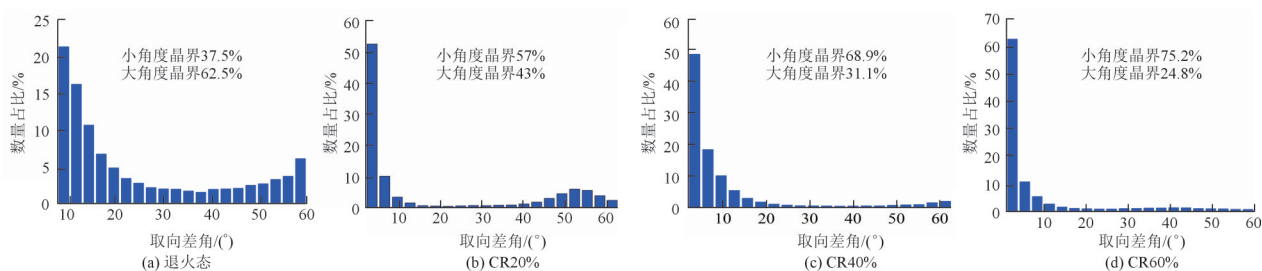


图 7 Ti-5Cu 合金取向差分布图
Fig.7 Misorientation distribution of Ti-5Cu alloy

通过分析 EBSD 数据得到了不同冷轧变形量试样的 KAM(Kernel Average Misorientation)图,见图 8,图中红色位置表示高 KAM 值,蓝色位置表示低 KAM 值。KAM 值的大小与材料非均匀变形程度和位错密度有

关,其值表示每个检测点与其相邻检测点间的平均取向差角度。可以看出,退火态试样的 KAM 值为 0.86,证明其晶粒变形程度和位错密度较低,这与退火过程中位错重排和晶粒长大形成新的无畸变晶粒有关。随

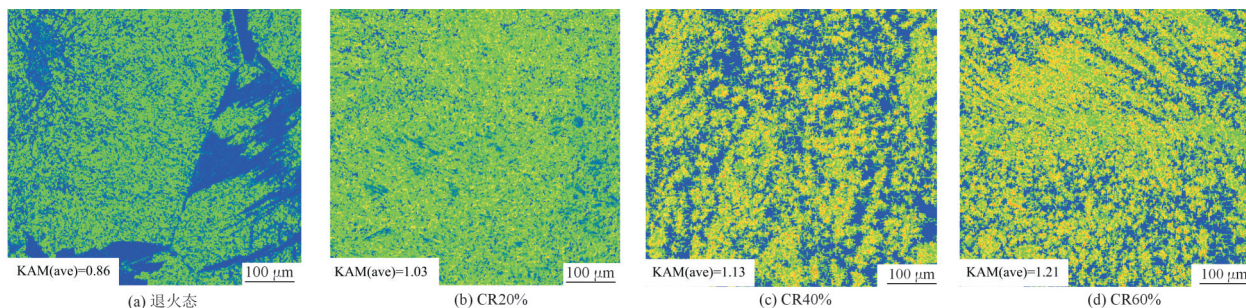


图 8 Ti-5Cu 合金 KAM 图
Fig.8 KAM images of Ti-5Cu alloy

轧制变形量增加, KAM 值从冷轧变形量为 20% 的 1.03 增至变形量为 40% 的 1.13, 到变形量为 60% 的 1.21。此过程中颜色的变化和 KAM 值的升高与冷轧时几何必要位错(GNDs)密度增加有关, 见图 8d, 图中红色区域的占比很高, 而颜色越深表示位错密度越大, 经历的塑性变形就越显著。因此随冷轧变形量增加, 几何必要位错密度增加, 小角度晶界数量增加, KAM 值随之升高^[16-17]。综上, 冷轧开始后位错激活产生塑性变形, 随变形量增加, 位错密度呈指数级增长, 位错运动在晶界或第二相处受到阻碍, 形成位错缠结或者位错塞积群, 这些位错障碍提高了位错滑移的阻力, 导致加工硬化。当变形进行到中期, 位错通过攀移和交滑移进行重排, 形成位错胞或亚晶界, 将原始晶粒分解为微米级小晶粒, 当变形量达到 60% 时, 位错密度接近饱和, 动态回复机制增强, 位错通过攀移和湮灭部分重组, 形成稳定的亚晶, 使加工硬化能力减弱, 此时小角度晶界占

比较高, 晶界强化效果显著, 材料强度达到峰值塑性显著降低, 冷轧变形机理是以位错滑移、增殖、累积、缠结到最后形成亚结构为主线, 微观的位错行为导致了宏观的性能强化。

为进一步观察 Ti-5Cu 合金中的组织形貌、位错分布、析出相等情况, 对冷轧量为 60% 的合金进行了 TEM 观察, 见图 9。图 9a 中基体由长条状的 α 晶粒和 β 晶粒交替分布构成, 其中 α 晶粒占主要部分, 白色框中的组织放大见图 9b 和图 9c, 可清楚观察到两种晶粒的分布和占比, 并且在两种晶粒交替的位置产生了位错胞, 因为细化后的晶粒会对位错运动产生阻碍, 导致位错在晶界处堆积, 无法绕过晶界从而堆积形成位错胞, 说明随冷轧变形量增加位错密度会随之增加, 与图 8 中 KAM 值的变化相对应。从图 9d~图 9f 可以看出, 基体主要的构成元素是 Ti、Cu 元素, 且富集在 β 晶粒的附近, 由于 Ti-5Cu 合金在热处理过程中会析出中间相

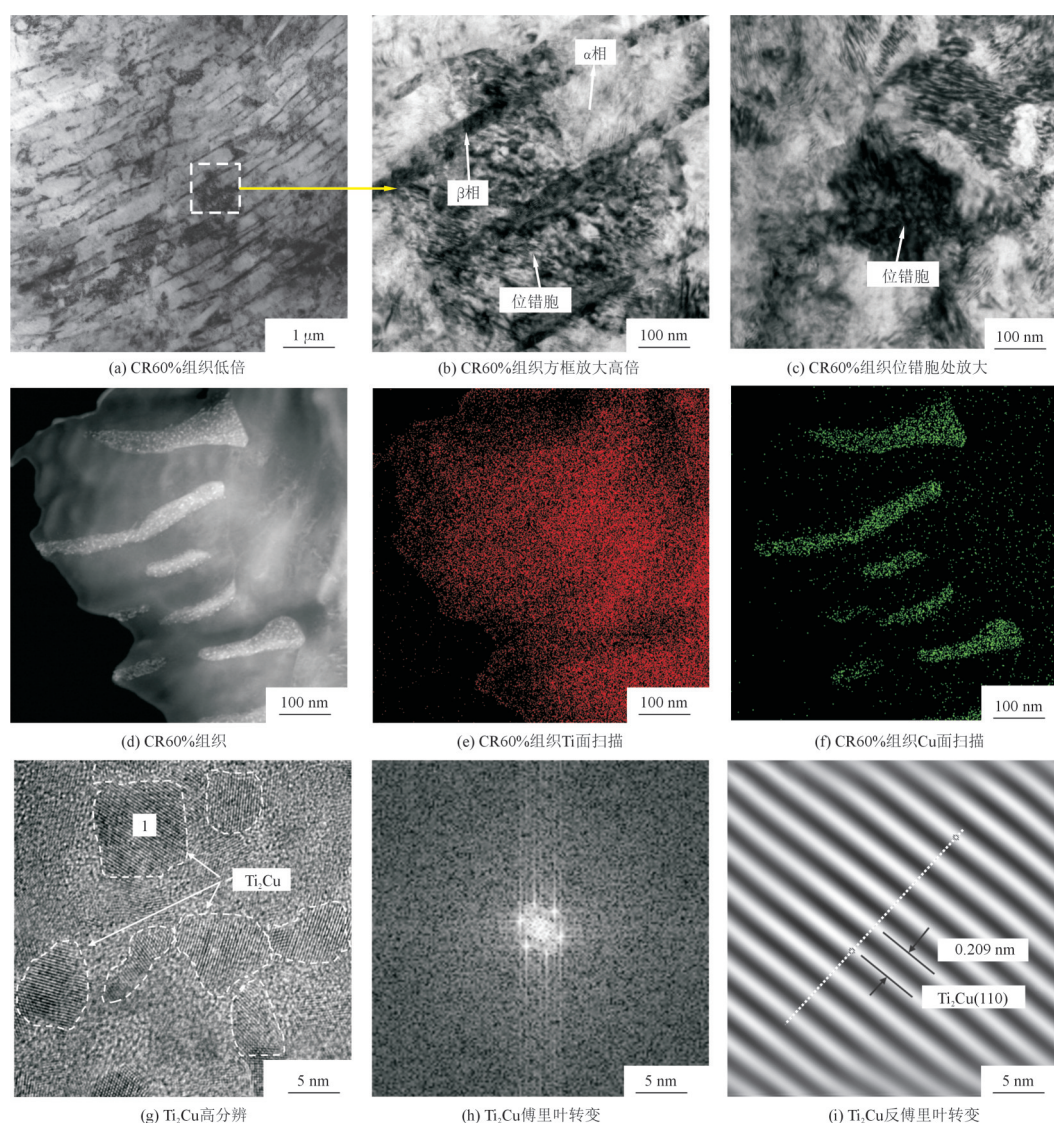


图 9 冷轧变形量 60% Ti-5Cu 合金的 TEM 图

Fig.9 TEM images of Ti-5Cu alloy with cold-rolled deformation of 60%

Ti_2Cu , 因此为验证是否有 Ti_2Cu 的析出, 故在 Cu 元素富集的位置做了 HRTEM, 见图 9g, 可清晰地观察到基体中存在的纳米析出相, HRTEM 图片中纳米析出相的原子排列规则, 呈有序排列, 而基体由于轧制施加外力, 从而变为细小的不规则排列结构。为了进一步验证纳米析出相是 Ti_2Cu , 对图 9g 中的位置 1 进行傅里叶变换 (FFT), 见图 9h, 从衍射花样图片可以看到明显的单晶衍射斑点, 对图 9h 进行反傅里叶变换 (IFFT) 后可以得到相邻晶面间的晶面间距, 见图 9i。通过测量得到其晶面间距为 0.209 nm, 该结果与 XRD 分析中 Ti_2Cu 的标准 PDF 卡片 (110) 晶面的晶面间距相等, 因此进一步证明该纳米析出相是 Ti_2Cu 。

2.3 力学性能和断口分析

图 10 为 Ti-5Cu 合金的力学性能。可以看出, 退火态试样的抗拉强度 (σ_b) 为 504.9 MPa, 屈服强度 ($\sigma_{0.2}$) 为 396.4 MPa, 伸长率约为 11.8%。随轧制变形量增加, 试样抗拉强度从 CR20% 的 593.2 MPa 增至 CR60% 的 839.2 MPa, 屈服强度从 CR20% 的 396.4 MPa 增至 CR60% 的 831.7 MPa, 而伸长率则从 11.49% 降至 6.9%。随冷轧变形量增大, 材料中的位错不断增殖, 通过缠结和塞积等交互作用, 严重阻碍了后续位错的运动, 此时需要更大的外力才能使位错开动, 产生了加工

硬化^[18-20]。同时, 轧制变形量的增大会使晶粒破碎形成更多的小晶粒, 对位错的运动同样产生严重阻碍, 因为其数量占比多, 导致其晶界面积大, 对位错运动的阻碍也就大, 这就是细晶强化^[21]。因此试样的抗拉强度和屈服强度随冷轧变形量增加而增加, 伸长率则随变形量增加而减小。在金属材料中屈服强度和抗拉强度的比值 $\sigma_{0.2}/\sigma_b$, 称为屈强比。屈强比反映材料的均匀塑性变形能力和应变硬化能力, 屈强比大, 材料抵抗均匀塑性变形的能力强, 塑性低, 反之则证明材料均匀、塑性变形能力强^[22-23]。随轧制变形量增加, 合金屈强比从 0.785 增至 0.995, 说明此时屈服强度和抗拉强度接近, 加工硬化能力逐渐增加。由图 10d 可知, 合金硬度也随变形量增加而增加, 值得注意的是, 从退火态到 CR40%, 合金硬度的增加比较缓慢, 但从 CR40% 到 CR60% 硬度 (HV) 从 297 上升至 398, 这可能是位错密度达到饱和, 加工硬化导致^[24]。

经过不同轧制变形量的 Ti-5Cu 合金室温拉伸断口形貌见图 11。可以看出, 退火态试样的断口由大量的韧窝和孔洞组成, 表现为韧窝大孔洞深, 均匀地分布在基体上, 此时合金呈现良好的塑性但强度较低, 断口特征表现为明显的韧性断裂。经过 20% 轧制变形后, 合金断口与退火试样基本相同, 无明显变化, 此时韧窝和

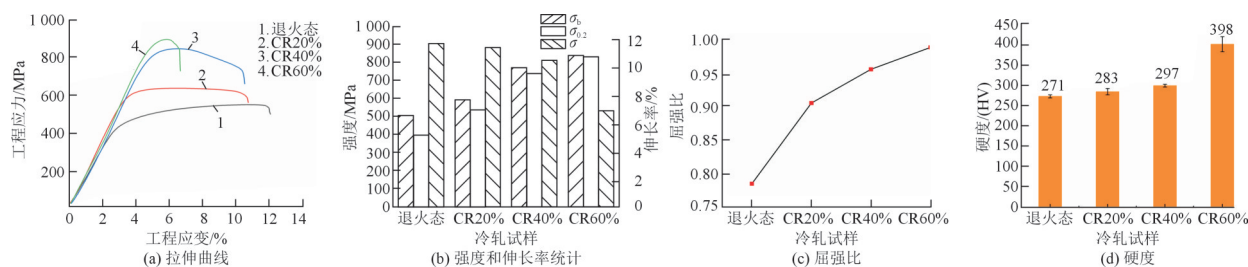


图 10 Ti-5Cu 合金的力学性能

Fig.10 Mechanical properties of Ti-5Cu alloy

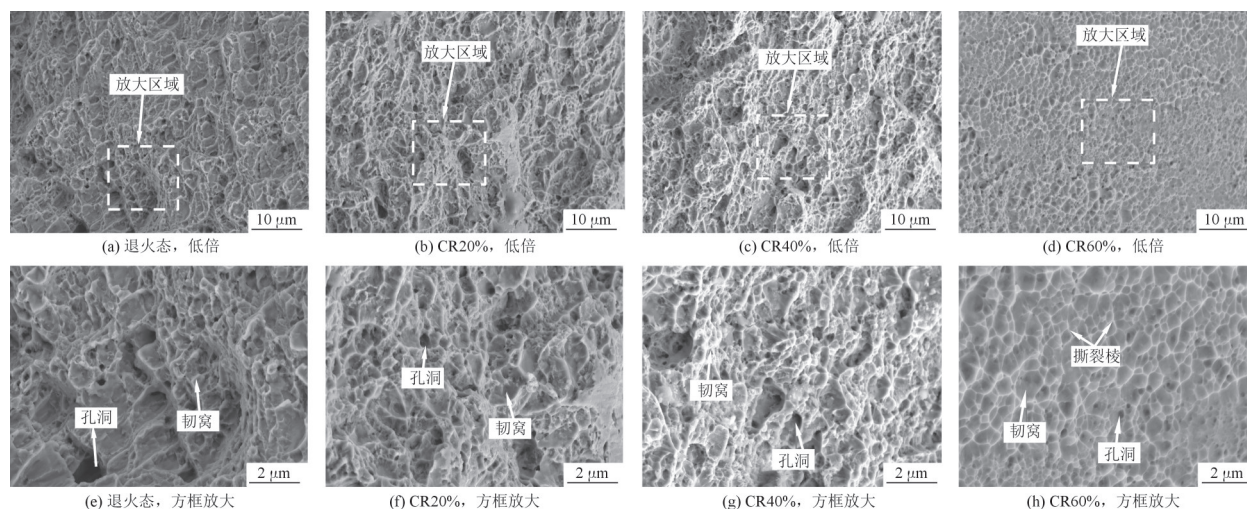


图 11 Ti-5Cu 合金拉伸断口图

Fig.11 Tensile fracture of Ti-5Cu alloy

孔洞的大小相对减小但分布还是均匀的,此时断口特征继续保持为韧性断裂。经 40% 轧制变形后,断口表面的韧窝和孔洞相较于退火态和 20% 轧制变形量的韧窝和孔洞明显变小变浅,但相对还是均匀分布,此时合金的塑性有所降低,但整体上变化不大,断口特征也表现为韧性断裂。当轧制变形量达到 60% 以后,合金的断口出现了明显的变化,此时韧窝变得很浅,孔洞变得很小,出现了明显的断裂棱,此时合金塑性显著下降,断口特征表现为韧性和脆性的混合型断裂。

3 结 论

(1) 经过不同冷轧变形以后, Ti-5Cu 合金中 α 和 β 相晶粒由退火态均匀相间分布的长条状, 逐渐向不连续长条状转变, 局部区域出现破碎晶粒, 当变形量达到 60% 以后, α 相和 β 相晶粒出现明显的破碎, 晶粒明显变小, 取向完全随机。

(2) 随着变形量的不断增加, 几何必要位错在晶界处塞积, 大晶粒逐渐向小晶粒转变, 位错在晶界处增殖, 形成小的取向差, 从而使合金中位错运动的阻力增加, 塑性变形能力下降, 加工硬化能力上升。

(3) Ti-5Cu 合金抗拉强度、屈服强度和硬度 (HV) 随冷轧变形量增加而增加, 从退火态的 504.9 MPa、396.4 MPa 和 271 到冷轧变形量为 60% 的 839.2 MPa、831.7 MPa 和 398, 伸长率则从退火态的 11.8% 到冷轧变形量为 60% 的 6.9%, 随变形量增加而减小。说明随冷轧变形量增加, 合金强度、硬度上升, 塑性下降。

参 考 文 献

- [1] 张红菊, 郭荣贵, 张东晖, 等. 钛合金相变点与微观组织研究[J]. 稀有金属, 2024, 48(10): 1 388-1 395.
- [2] 刘克敌, 张凌峰, 熊毅, 等. Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo 合金片层组织热加工行为[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(6): 227-234.
- [3] 赵永庆. 我国创新研制的主要船用钛合金及其应用[J]. 中国材料进展, 2014, 33(7): 398-404.
- [4] 陈冠方, 张金勇, 钟艺, 等. 相变/孪晶诱发塑性的 β 钛合金加工硬化行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(1): 297-303.
- [5] 朱丽, 孔融, 吴伟平, 等. TC1 钛合金板材热加工性能研究[J]. 精密成形工程, 2022, 14(4): 154-161.
- [6] 刘向宏, 赵宁, 王涛, 等. 固溶处理对 TB18 钛合金微观组织和力学性能的影响规律[J]. 稀有金属材料与工程, 2024, 53(11): 3 101-3 110.
- [7] HUANG C W, WANG F M, WEN X, et al. Tensile performance and impact toughness of Ti-55531 alloy with multilevel lamellar microstructure[J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(14): 8 848-8 870.
- [8] 李少强, 弓站朋, 李辉, 等. TB18 钛合金热变形行为及动态再结晶机制[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49: 3 045-3 051.
- [9] 蒋孟玲, 陈彦辉, 孔玢, 等. 冷轧变形量及退火工艺对 Gr.39 钛合金带卷组织性能的影响[J]. 钛工业进展, 2023, 40(4): 35-39.
- [10] 刘志强, 张青来, 韩伟东, 等. TC16 钛合金板材冷轧工艺及组织性能研究[J]. 钛工业进展, 2021, 38(1): 20-24.
- [11] 胡革全, 曾卫东, 李永林, 等. 冷轧工艺对 AT1425 钛合金管材质量的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(3): 48-51, 56.
- [12] 王春阳, 王玉会, 李野, 等. 冷轧 Ti-Nb-Zr-O 高弹性钛合金的组织演变和力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(12): 3 544-3 551.
- [13] SHI H Y, LU H R, TANG Y H, et al. High dislocation density TWIP steel with an excellent combination of strength and plasticity [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30: 7 134-7 144.
- [14] GALLET J, PEREZ M, GUILLOU R, et al. Experimental measurement of dislocation density in metallic materials: A quantitative comparison between measurements techniques (XRD, R-ECCI, HR-EBSD, TEM) [J]. Materials Characterization, 2023, 199: 112 842.
- [15] 冀宣名. 冷轧对高强 Ti-B20 合金组织与性能的影响[J]. 现代机械, 2023(6): 81-84.
- [16] ZHU W G, TAN C S, XIAO R Y, et al. Slip behavior of Bi-modal structure in a metastable β titanium alloy during tensile deformation [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 57: 188-196.
- [17] YANG R D, XU Z F, ZHU M Y, et al. Achieving high work-hardening and high plasticity of metastable β -Ti-xV-5Zr-3Al-2Cr alloy through α'' martensite [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 36: 736-750.
- [18] WANG Z X, YAO K, DU B K, et al. High strength and high work hardening rate in oxygen gradient Ti-15Mo alloy [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 198: 56-62.
- [19] AI-HAJIRI M, YANG F, BOLZONI L. Work hardening of quaternary powder metallurgy Ti alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2024, A897: 146 358.
- [20] LU H R, SHI H Y, ZHANG H, et al. Enhanced yield strength by fine grain strengthening and TRIP/TWIP effect of metastable β -type Ti-4V-2Mo-2Fe alloy with high ductility [J]. Materials Characterization, 2024, 207: 113 591.
- [21] 王海, 魏芬绒, 邓家彬, 等. 影响钛合金屈强比的因素及作用机理探讨[J]. 热加工工艺, 2016, 45(22): 109-111, 115.
- [22] 孙梦桐, 郭金榜, 高飞, 等. 轧制工艺对 TA15 钛合金板微观组织及拉伸力学性能的影响[J]. 有色金属材料与工程, 2024, 45(3): 99-104.
- [23] 杨晶, 任晓龙, 王涛, 等. 热处理对 Ti62A 钛合金显微组织及力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2024, 53(14): 127-129.
- [24] 杨怡婷, 赵秦阳, 贾致远, 等. 冷轧对 CT20 钛合金微观组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(8): 2 593-2 607.

(编辑: 刘晨辉)