

# 低温变形对 2A14 铝合金组织性能影响

蒋 镪, 易幼平, 黄始全, 黄建武

(中南大学机电工程学院, 长沙 410083)

**摘要:** 提出了低温变形与热处理协同的 2A14 铝合金强韧化新方法, 借助透射电镜、扫描电镜、金相显微镜、拉伸试验机等测试手段对比分析了室温和超低温变形工艺对 2A14 铝合金组织性能的影响。结果显示: 与室温变形相比, 超低温变形与热处理协同能够大幅提升合金综合力学性能。当超低温变形量达到 20%, 合金内部位错密度上升, 第二相粒子尺寸更小, 分布更为均匀, 晶粒细化显著, 合金综合力学性能达到最高, 抗拉强度为 474.5 MPa, 屈服强度为 426.5 MPa, 延伸率为 11.6%。

**关键词:** 2A14 铝合金; 超低温变形; 位错; 第二相力学性能

**中图分类号:** TG146.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-4080 (2020) 04-0054-07

## Effect of Low Temperature Deformation on Microstructure and Properties of 2A14 Aluminum Alloy

JIANG Qiang, YI Youping, HUANG Shiquan, HUANG Jianwu

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** A new method for strengthening and toughening 2A14 aluminum alloy with low temperature deformation and heat treatment is proposed. The effects of room temperature and cryogenic temperature deformation process on the microstructure and properties of 2A14 aluminum alloy were analyzed by transmission electron microscopy, scanning electron microscopy, metallographic microscope and tensile testing machine. The results show that compared with the room temperature deformation, the cryogenic temperature deformation and heat treatment synergistically can greatly improve the overall mechanical properties of the alloy. When the cryogenic temperature deformation reaches 20%, the internal dislocation density of the alloy increases, the second phase particle size is smaller, the distribution is more uniform, the grain refinement is remarkable, the alloy has the highest comprehensive mechanical properties. And the tensile strength is 474.5 MPa. The yield strength is 426.5 MPa and the elongation is 11.6%.

**Key words:** 2A14 aluminum alloy; Cryogenic deformation; Dislocation; Second-phase mechanical properties

**收稿日期:** 2019-11-19; **修订日期:** 2020-02-06

**作者简介:** 蒋镪 (1998-), 男, 硕士, 主要研究方向为 2A14 铝合金材料铝合高筒件成型工艺。

E-mail: 378768500@qq.com

**通信作者简介:** 易幼平 (1966-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为航空航天轻合金构件成形工艺与模具、热处理工艺与装备。E-mail: yyp@csu.edu.cn

## 0 引言

为了满足航天运载器轻量化、高性能与高可靠发展,一般选用铝合金制造关键承力构件<sup>[1-2]</sup>。2A14 铝合金属于 Al-Cu-Mg-Si-Mn 系锻造铝合金,具有较好的塑性、强度和良好的抗腐蚀性能、焊接性能,是舱段结构制造的首选材料<sup>[3-6]</sup>。目前 2A14 铝合金主要采用热加工成形工艺,热处理后合金中仍然存在粗大纤维组织和粗大第二相化合物富集,这将导致合金整体力学性能偏低,各向异性突出<sup>[7-9]</sup>。寻找一种新成形工艺来提升合金综合性能具有十分重要的意义。

低温变形协同热处理是提升 2A14 铝合金材料性能的一种重要工艺,国内外学者由此展开了相关研究。国外学者 Shamsavari 等<sup>[10]</sup>、Hussain 等<sup>[11]</sup>研究了低温轧制工艺,发现低温变形对晶粒动态回复有明显的抑制作用,基体积累高密度位错,合金性能得到改善。国内学者侯陇刚等<sup>[12]</sup>、王磊等<sup>[13]</sup>研究了超低温变形对 7050 铝合金组织性能的影响,发现合金在低温下表现出优异的塑性变形能力,随着变形量的增加,热处理后合金再

结晶组织比例上升,晶粒细化效果显著,合金综合性能提高。何海林等<sup>[14]</sup>研究了第二相粒子对 2219 铝合金性能的影响,发现在低温变形对第二相的破碎效果显著,热处理后基体铜含量提高,第二相粒子尺寸更为细小,分布更加均匀,改善了合金的各向异性。

2A14 铝合金在常温下的塑性较差,但在高温和超低温(-196℃)的条件下,合金塑性提高。在超低温变形条件下,晶粒的动态回复效应被抑制,积累的位错密度高,使得晶粒细化,材料性能提高<sup>[15-18]</sup>。超低温变形与热处理协同是调控材料微结构、获得高性能构件的关键,但目前对 2A14 铝合金在低温变形方向的研究较少。本文研究了低温变形与热处理协同新工艺对 2A14 组织性能的影响,得到了 2A14 铝合金在低温变形条件下的工艺参数,为铝合金的低温成形新工艺提供理论基础。

## 1 实验介绍

实验所用材料取自中南大学提供的 2A14 铝合金锻件,材料实际化学成分如表 1 所示。

表 1 2A14 铝合金实际化学成分

Tab. 1 Chemical compositions of aluminum alloy 2A14

Cu	Mg	Si	Mn	Fe	Zn	Ni	Ti	Al
3.9%~4.8%	0.4%~0.8%	0.6%~1.2%	0.4%~1.0%	0.7%	0.3%	0.1%	0.15%	余量

使用电火花线切割机从锻件中取出尺寸为 80 mm (长) × 80 mm (宽) × 80 mm (高) 的 4 块试样。任意取 2 块试样浸没于液氮环境中,待试样完全冷却至液氮温度(-196℃),迅速将试样放至 4 000 t 锻压机下,以 1 mm/s 的速度沿试样高度方向下压,变形量分别为 10% 和 20%。剩余两块试样不做任何处理,在室温下放置锻压机下,以 1 mm/s 的速度沿试样高度方向下压,变形量分别为 10% 和 20%。

待 4 块试样都恢复至室温后,将试样统一进行固溶时效 T6 热处理。固溶制度为 502℃ × 4 h,固溶完成后立即进行室温淬火,淬火转移时间小于 5 s。淬火完成后,马上进行人工时效处理,时效制度为 160℃ × 10h。时效处理完成后将试样取出,空冷至室温。

依据国标 GB/T 228.1—2010 规定将 T6 处理后的试样加工成室温拉伸样,在 WDW-100A 型拉伸实

验机上进行拉伸实验,拉伸速率为 2 mm/min。采用 Phenom 台式扫描电镜 (SEM) 观察第二相形貌,并进行拉伸试样的断口扫描分析。采用 OLYMPUS DSX500 型金相显微镜观察金相组织。将压缩变形后热处理之前的试样厚度磨至 70~90 μm,取 φ3 mm 薄片,TEM 试样采用电解双喷减薄仪制备,电解液为 30% 硝酸与 70% 甲醇的混合溶液,工作电流为 60~90 mA,电压为 11 V,温度为 -25℃。采用 FEI Titan G2 60-300 型透射电子显微镜进行合金内部微结构测试,加速电压为 300 kV。

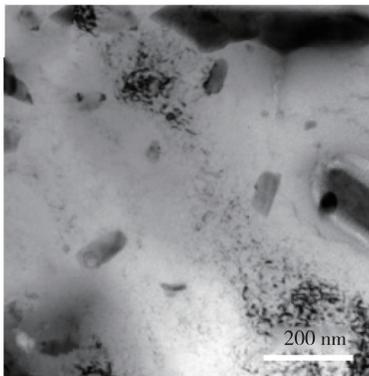
## 2 实验结果与讨论

### 2.1 低温变形对 2A14 铝合金微结构的影响

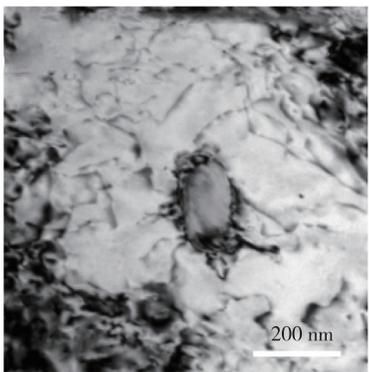
图 1 为 2A14 铝合金在室温和超低温两种状态下变形后的 TEM 图像。如图 1 (a) 所示,在室温下进行压缩,变形量为 10% 的时候,合金内部晶

格畸变程度低,且大部分的合金形变以热能的形式释放;另一方面,合金在变形过程中发生动态回复,位错运动相消和重排作用使得位错密度降低,此时基体内部位错密度较低。如图1(c)所示,当增大变形量时,合金内部晶格畸变程度大大增加,增大变形量有利于提高基体内部位错密度。如图1(b)所示,当降低变形温度时,金属原子处于低能量状态,合金在变形过程中产生的动态回复效应被极大地抑制,进而促进基体内部形成高密度位错;与此同时,合金内部位错运动阻力急剧上升,当位错运动遇到第二相粒子、晶界等障碍,出现位错塞积现象。所以降低变形温度有利于位错的积累。如图1(d)所示,在降低变形温度的同时,增大变形量;基体位错密度达到最大,位错缠结并形成位错胞;高密度的缠结位错构成亚晶的胞壁,其内部位错密度较低。

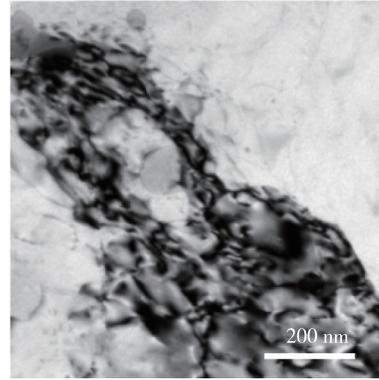
综上所述,在超低温、变形量大的条件下,更有利于合金内部产生高密度位错,并储存更多的能量,为接下来热处理过程中的再结晶晶粒细化、等轴化提供形核点和长大驱动力。



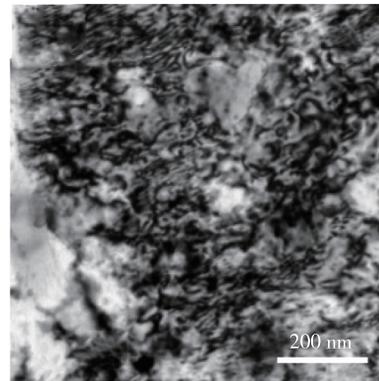
(a) 室温变形 10%



(b) 超低温变形 10%



(c) 室温变形 20%



(d) 超低温变形 20%

图1 不同变形工艺下的2A14铝合金TEM组织

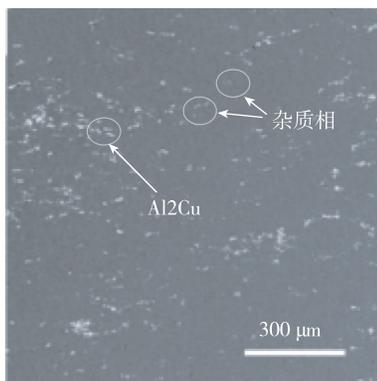
Fig. 1 TEM images of 2A14 aluminum alloy under different deformation processes

## 2.2 低温变形协同热处理对2A14铝合金微观组织影响

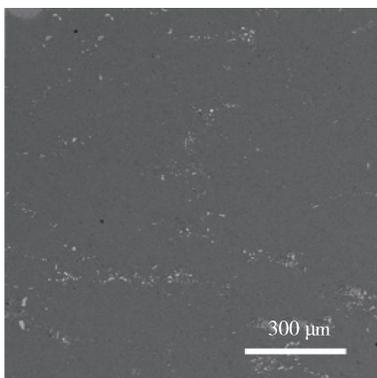
图2为2A14铝合金压缩变形后再经T6热处理的第二相组织。为了定量分析室温和超低温变形对第二相组织的影响,采用Image-ProPlus6.0软件对合金第二相粒子数据进行统计分析并计算,在图2(a)(b)(c)(d)中,第二相化合物在Al基体中所占面积分数分别为5.31%, 1.65%, 7.26%, 0.91%。在室温条件下,铝基体的变形抗力较小,压缩变形对粗大第二相化合物的破碎效果有限,在室温变形后经过固溶处理,合金局部仍然存在粗大化合物富集,分别为 $Al_2Cu$ (图2(a)中白色相)、 $AlCuMgSi$ 以及 $Al-CuMnFeSi$ 杂质相(图2(a)中灰色相)。在超低温压缩条件下,基体位错密度更高。在固溶过程中高密度位错为第二相化合物提供溶解通道,使得第二相化合物更多地溶入基体,随后分散得也更为均匀。随着压缩变形量从10%增加到20%,

第二相化合物所占面积分数降低了 44.85% (从 1.65% 减少到 0.91%)，这是由于在变形量增大的情况下，位错密度更高，能够更好地促进第二相化合物的溶解。

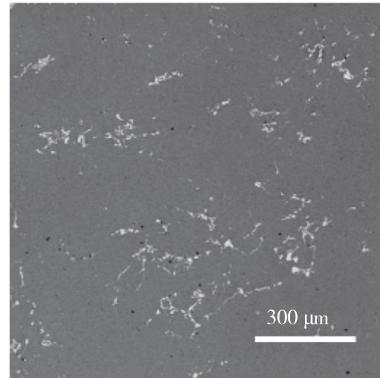
图 3 为 2A14 铝合金压缩变形后再经 T6 热处理的金相组织。如图 3 (a) 所示，单向压缩变形使得整体晶粒明显沿垂直于压缩的方向被拉长，呈现出大量粗大纤维状组织，这将导致合金各向异性突出，整体力学性能偏低。如图 3 (a) (b) 所示，当降低变形温度时，平均晶粒尺寸由 88  $\mu\text{m}$  减小到 65  $\mu\text{m}$ 。如图 3 (a) (c) 所示，一方面，当增大压缩变形量时，平均晶粒尺寸由 88  $\mu\text{m}$  减小到 56  $\mu\text{m}$ ，这是因为降低变形温度能够明显抑制晶粒的动态回复；另一方面，降低变形温度和增大变形量都将使基体累积更高的位错密度，增大变形存储能，增加固溶过程中的静态再结晶形核点，为再结晶晶粒长大提供驱动力。如图 3 (d) 所示，在降低变形温度的同时，增大压缩变形量，细化效果最显著，再结晶组织比例最高，平均晶粒尺寸为 42  $\mu\text{m}$ ，晶粒等轴化趋势明显，均匀性大大提高。



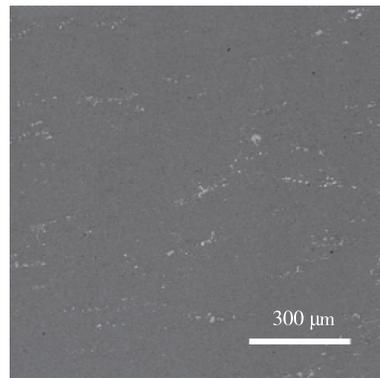
(a) 室温压缩 10%



(b) 超低温压缩 10%

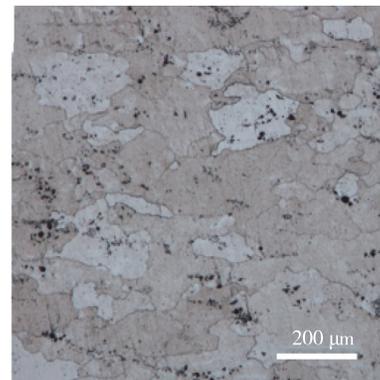


(c) 室温压缩 20%

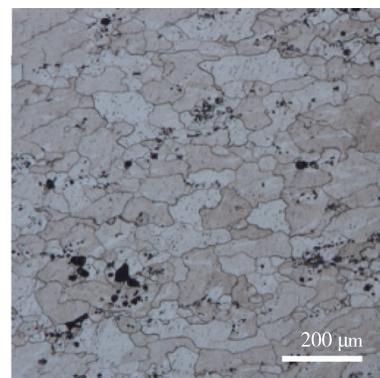


(d) 超低温压缩 20%

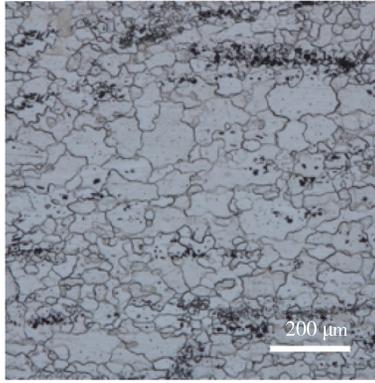
图 2 T6 热处理后 2A14 铝合金 SEM 组织  
Fig. 2 SEM images of 2A14 aluminum alloy after T6 heat treatment



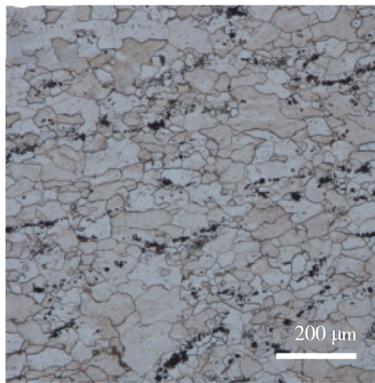
(a) 室温压缩 10%



(b) 超低温压缩 10%



(c) 室温压缩 20%



(d) 超低温压缩 20%

图3 T6 热处理后 2A14 铝合金金相组织

Fig. 3 Metallographic structure of 2A14 aluminum alloy after T6 heat treatment

### 2.3 低温变形协同热处理对 2A14 铝合金力学性能与断裂行为的影响

图 4 为 2A14 铝合金单向压缩再经 T6 热处理后的三向力学性能。如图 4 所示, 取试样宽向性能进行分析, 降低变形温度, 2A14 综合力学性能显著提高。超低温压缩 10% 的抗拉强度为 458.5 MPa, 屈服强度为 392.5 MPa, 延伸率为 11.4%, 与常温压缩 10% 试样相比, 提升幅度分别为 1.7%, 5.5%, 62.9%。在超低温条件下, 增大变形量至 20%, 综合力学性能进一步改善, 抗拉强度为 474.5 MPa, 屈服强度为 426.5 MPa, 延伸率为 11.6%, 与超低温压缩 10% 相比, 提升幅度分别为 3.5%, 8.7%, 1.8%。由图 3 可知, 在超低温压缩 20% 条件下, 平均晶粒尺寸最小。当合金发生受到外力时, 塑性形变可以均匀地分散到更多细小晶粒内部, 大大降低应力集中程度。

平均晶粒尺寸越小, 晶界面积总和就越大, 晶界越曲折, 不利于裂纹的扩展, 这将大大提高材料的综合力学性能。在外力的作用下, 合金很容易在粗大第二相处产生应力集中, 萌生裂纹源。由图 2 可知, 在超低温压缩 20% 条件下, 第二相化合物尺寸最小, 且分布最为均匀, 这将大大提高合金的塑性。室温压缩 20% 的试样性能最差, 抗拉强度为 428.5 MPa, 屈服强度为 335.5 MPa, 延伸率为 7.03%。在室温压缩与热处理协同作用下, 基体中第二相化合物呈现出粗大连续的网状结构, 这大大降低合金的塑性。此外, 单向压缩变形量 20% 已接近该状态下极限变形量 (合金压缩变形量为 30% 将会开裂), 合金内部产生缺陷, 使得合金整体综合力学性能偏低。

为了研究低温压缩变形对 2A14 铝合金各向异性的影响, 分别计算不同变形条件下合金长宽高三向力学性能的总体方差  $\sigma^2$

$$\sigma^2 = \frac{\sum (X - \mu)^2}{N}$$

式中,  $\sigma^2$  为总体方差,  $X$  为三向力学性能,  $\mu$  为三向力学性能平均值,  $N$  取 3。室温压缩 10%、室温压缩 20%、超低温压缩 10%、超低温压缩 20% 的三向抗拉强度总体方差分别为 10.6, 35.6, 2.1, 5.6, 三向屈服强度总体方差分别为 135.6, 329.3, 2.1, 51.58。总体标准偏差  $\sigma$  的物理意义是表征出数据分散程度。 $\sigma$  越小, 则整体数据离散程度越低, 说明三向力学性能越接近。所以超低温压缩变形工艺较室温压缩变形工艺而言, 能够大大降低合金的各向异性。

图 5 为 T6 热处理后 2A14 铝合金拉伸样轴向断口扫描组织。由图 5 可知, 断裂方式主要为穿晶断裂 (表面粗糙部分) 和沿晶断裂 (表面光滑部分) 的混合断裂模式。如图 5 (a) (c) 所示, 在室温压缩条件下, 断裂方式主要以穿晶断裂为主 (约占比 80%)。在穿晶断裂的部位存在大量粗大第二相粒子 (主要为  $\text{Al}_2\text{Cu}$  粒子), 在合金受到外力时, 容易在粗大粒子附近引起应力集中, 加速材料断裂, 导致合金整体性能偏低。如图 5 (b) (d) 所示, 在超低温压缩条件下, 沿晶断裂占比大幅度上升 (分别为约 40%, 60%)。这是因为在 T6 热处理后, 第二相的占比大大降低, 且在基体中分布更为均匀, 此时合金表现为整体塑性提高。

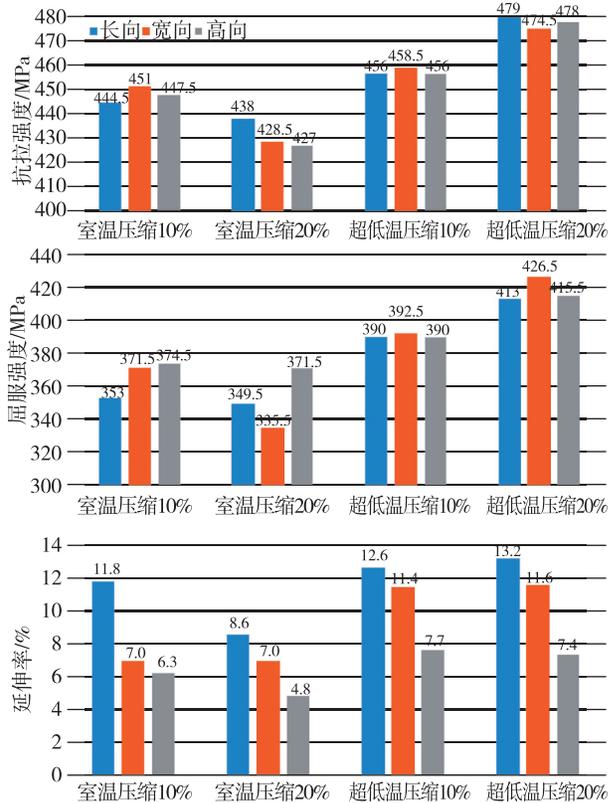
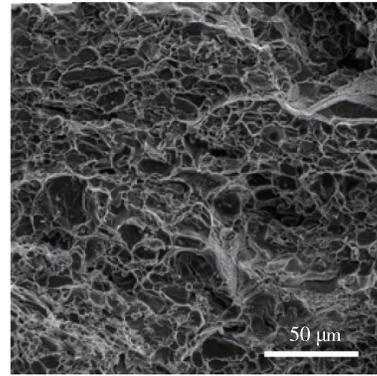
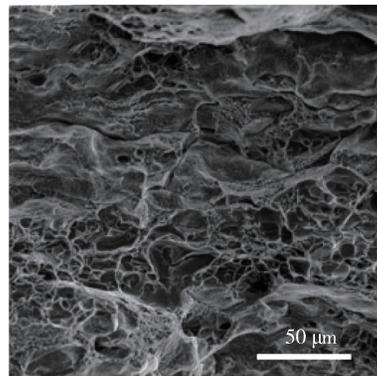


图 4 T6 热处理后 2A14 铝合金力学性能  
Fig. 4 Mechanical properties of 2A14 aluminum alloy after T6 heat treatment



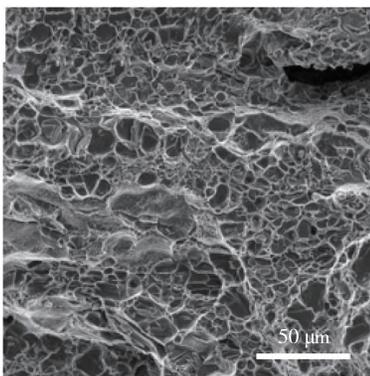
(c) 室温压缩 10%



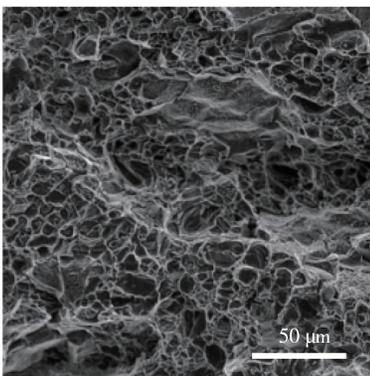
(d) 超低温压缩 20%

图 5 T6 热处理后 2A14 铝合金宽向断口 SEM 图像

Fig. 5 TEM images of 2A14 aluminum alloy after different T6 heat treatment



(a) 室温压缩 10%



(b) 超低温压缩 10%

### 3 结论

1) 在超低温压缩条件下, 基体积累的位错密度更高, 粗大第二相粒子的破碎效果更明显。在 T6 热处理过程中, 高密度位错促进大量第二相粒子溶解, 大大改善了 2A14 铝合金的塑性。

2) 相较于室温压缩, 超低温压缩工艺对晶粒的细化效果更为显著。在超低温压缩 20% 的条件下, 平均晶粒尺寸显著降低, 约为 56 μm。

3) 相较于室温压缩, 超低温压缩工艺能够大幅度提高 2A14 铝合金的综合力学性能并减小合金材料的各向异性。在超低温压缩 20% 的条件下, 材料综合力学性能显著提高。抗拉强度为 474.5 MPa, 屈服强度为 426.5 MPa, 延伸率为 11.6%。

### 参考文献

[1] 邵世纲, 杨泽萱, 邢冠楠, 等. 国外主要战略导弹系列化发展及技术共用研究[J]. 宇航总体技术, 2017, 1

- (3):24-32.
- [2] 王磊,易幼平,黄始全,等.固溶前深冷变形处理对7050铝合金组织和性能的影响[J].材料导报,2019,33(20):3467-3471.
- [3] Lan J, Shen X J, Liu J, et al. Strengthening mechanisms of 2A14 aluminum alloy with cold deformation prior to artificial aging[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 745: 517-535.
- [4] 董非,易幼平,黄始全,等.2A14铝合金TTT曲线及其淬火敏感性[J].材料导报,2017,31(10):77-81.
- [5] Zhang Y X, Yi Y P, Huang S Q, et al. Investigation of the quenching sensitivity of forged 2A14 aluminum alloy by time-temperature-tensile properties diagrams [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 728: 1239-1247.
- [6] 鄢东洋,郭彦明,董曼红,等.贮箱结构用2A14和2219铝合金的特性研究与分析[J].导弹与航天运载技术,2019(3):102-107.
- [7] He H L, Yi Y P, Huang S Q, et al. An improved process for grain refinement of large 2219 Al alloy rings and its influence on mechanical properties[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35 (1): 55-63.
- [8] 杨建海,张玉祥,葛利玲,等.2A14铝合金表面纳米化对第二相颗粒的影响[J].中国表面工程,2016,29(3):109-115.
- [9] 吴长俊,易幼平,何海林.变形温度对2219铝合金组织和力学性能的影响[J].热加工工艺,2017,46(19):19-23.
- [10] Shahsavari A, Karimzadeh F, Rezaeian A, et al. Significant increase in tensile strength and hardness in 2024 aluminum alloy by cryogenic rolling[J]. *Procedia Materials Science*, 2015, 11: 84-88.
- [11] Hussain M, Rao P N, Jayaganthan R. Development of ultrafine-grained Al-Mg-Si alloy through SPD processing[J]. *Metallography Microstructure & Analysis*, 2015, 4(3):219-228.
- [12] 侯陇刚,刘明荔,王新东,等.高强7050铝合金超低温大变形加工与组织,性能调控[J].金属学报,2017,53(9):1075-1090.
- [13] 王磊,易幼平,黄始全,等.固溶前深冷变形处理对7050铝合金组织和性能的影响[J].材料导报,2019,33(20):3467-3471.
- [14] He H L, Yi Y P, Huang S Q, et al. Effects of deformation temperature on second-phase particles and mechanical properties of 2219 Al-Cu alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 712: 414-423.
- [15] 胡彬,易幼平,黄始全,等.冷轧变形量对2A14铝合金高筒件时效析出行为及力学性能的影响[J].材料导报,2019,33(24):4122-4125.
- [16] 刘文胜,刘东亮,马运柱,等.变形温度对2A14铝合金显微组织和力学性能的影响[J].中国有色金属学报,2015,25(2):308-314.
- [17] 余永新,肖代红,周鹏飞,等.等温复合锻造工艺对2A14铝合金轮毂组织与力学性能的影响[J].粉末冶金材料科学与工程,2019,24(1):45-51.
- [18] Zhang Y X, Yi Y P, Huang S Q, et al. Influence of quenching cooling rate on residual stress and tensile properties of 2A14 aluminum alloy forgings[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 674: 658-665.

引用格式: 蒋镗,易幼平,黄始全,等.低温变形对2A14铝合金组织性能影响[J].宇航总体技术,2020,4(4):54-60.

Citation: Jiang Q, Yi Y P, Huang S Q, et al. Effect of low temperature deformation on microstructure and properties of 2A14 aluminum alloy[J]. *Astronautical Systems Engineering Technology*, 2020, 4(4): 54-60.