退火温度对不同 Al-Cu-Mg-Ag 热轧合金板微观组织及疲劳性能的影响①

蒋倩, 刘志义, 柏松, 何光宇
(中南大学 材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 对不同热轧温度(450、470 ℃)所得 Al-Cu-Mg-Ag 合金板材进行不同温度(340、360、380、400 ℃)退火处理,并采用室温拉伸、疲劳裂纹扩展试验,结合金相显微镜、扫描电镜等表征手段,研究了热轧及退火工艺对 T4 态合金显微组织与力学性能的影响。结果表明:热轧温度与退火温度对 T4 态 Al-Cu-Mg-Ag 合金室温性能和疲劳裂纹扩展速率的影响较小;升高热轧温度,静态析出相数量增加,可以细化后续退火时再结晶晶粒尺寸。

关键词: Al-Cu-Mg-Ag 合金; 晶粒细化; 析出相; 晶粒组织; 疲劳性能; 退火
中图分类号: TG156 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.02.029
文章编号: 0253-6099(2026)02-0179-05

Effects of Annealing Temperatures on Microstructure and Fatigue Properties of Different Hot Rolled Al-Cu-Mg-Ag Alloy Sheets

JIANG Qian, LIU Zhiyi, BAI Song, HE Guangyu
(*School of Materials Science and Engineering*, *Central South University*, *Changsha* 410083, *Hunan*, *China*)

Abstract: Al-Cu-Mg-Ag alloy sheets prepared at different hot rolling temperatures (450 ℃ and 470 ℃) were annealed at 340, 360, 380 and 400 ℃ respectively. Subsequently, room-temperature tensile tests, fatigue crack growth tests, metallographic microscope, scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffraction (XRD) were employed to investigate the effects of hot rolling and annealing processes on the microstructure and mechanical properties of the T4-tempered alloy. The results indicate that temperatures of hot rolling and annealing exert little influence on the room-temperature mechanical properties and fatigue crack growth rate of T4-tempered Al-Cu-Mg-Ag alloy. Hot rolling at elevated temperatures leads to the increase in the amount of static precipitates, which can in turn result in finer recrystallized grains during the subsequent annealing process.

Key words: Al-Cu-Mg-Ag alloy; grain refinement; precipitated phase; grain structure; fatigue property; annealing

Al-Cu-Mg-Ag 合金因具有高比强度、良好耐热性和断裂韧性,被广泛应用于航空航天领域,如制作飞机蒙皮、机翼等部位,而这些部位在服役过程中常受到循环载荷的作用,材料易发生疲劳失效[1-3]。研究表明,铝合金的疲劳性能受多重因素共同影响,既包括环境温度、应力比、表面粗糙度等外部因素[4],也包括合金第二相、晶粒尺寸与晶粒取向等内部因素[5]。

为提升合金疲劳寿命,研究人员常通过优化热变形及热处理工艺调控合金组织,从而改善疲劳性能[6-7]。如文献[8]发现,提高 7A04 合金热轧温度可促进动态再结晶,获得细小均匀的再结晶晶粒,同时加速第二相溶解与再分布,从而显著提升材料韧性及疲劳寿命。文献[9]在研究 Al-Cu-Mg 合金时发现,适当提高退火温度能有效细化晶粒、增加晶界密度,通过增强裂纹扩展阻力改善疲劳性能。这些研究证实,通过工艺参数优化实现组织调控是提升疲劳性能的有效途径。

尽管前人针对 Al-Cu-Mg-Ag 合金的高温性能开展

① **收稿日期**: 2025-11-15
基金项目: 国家自然科学基金(51171209);国家重点研发计划(2016YFB0300900)
作者简介: 蒋倩(2000—),女,湖南益阳人,硕士研究生,主要研究方向为 Al-Cu-Mg-Ag 合金疲劳性能。E-mail:2279427234@qq.com
通信作者: 刘志义(1962—),男,湖南邵阳人,二级教授,博士研究生导师,主要研究方向为铝合金基础研究及应用技术开发。E-mail:liuzhiyi@csu.edu.cn

了广泛研究,但该合金疲劳行为特别是热加工工艺-组织-疲劳性能的关联机制尚不明确。本文通过研究热轧温度和退火温度对不同 Al-Cu-Mg-Ag 合金热轧板微观组织的影响规律,从而建立起工艺参数-组织特征-疲劳性能的联系,可为开发高性能铝合金提供理论依据。

1 试验材料与方法

试验用 Al-Cu-Mg-Ag 合金,使用工业纯铝(99.9%,质量分数,下同)、纯镁(99.99%)、纯银(99.99%),以及 Al-50%Cu、Al-10%Mn 和 Al-6%Ti 中间合金,通过铸造制备,其化学成分如表 1 所示。铸锭首先在空气炉中进行三级均匀化处理(480 ℃/48 h+485 ℃/48 h+490 ℃/48 h),然后分别在 450 ℃和 470 ℃下将铸锭热轧成约 2 mm 厚的板材,随后将热轧板材依次进行退火、固溶处理,固溶后立即水淬,最后在室温下进行自然时效(T4 态)。其对应的样品编号和具体热处理工艺参数如表 2 所示。

表 1 Al-Cu-Mg-Ag 合金化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of Al-Cu-Mg-Ag alloy %

Cu	Mg	Ag	Mn	Ti	Fe	Si	Al
4.71	1.33	0.66	0.55	0.093	0.023	0.030	余量

表 2 试验过程中主要热处理工艺参数

Table 2 Major heat treatment parameters in experiment

样品名称	热轧温度/℃	退火工艺	固溶处理
A	450	340 ℃/4 h	
B	450	360 ℃/4 h	
C	450	380 ℃/4 h	490 ℃/15 min
D	450	400 ℃/4 h	
E	470	380 ℃/4 h	

室温拉伸与疲劳裂纹扩展速率测试均在 MTS-810 试验机上进行。疲劳裂纹扩展速率测试中使用的应力比(循环加载中最小应力与最大应力的比值)为 0.1,按载荷频率为 10 Hz 的正弦波进行加载,试验所用的紧凑拉伸试样沿板材的 T-L(裂纹扩展方向与轧制方向平行)方向取样,样品尺寸为 47.5 mm×45.6 mm×2 mm(长×宽×厚)。拉伸试验按照国标 GB/T 4161—2007 的规定进行,加载速率 2 mm/min,拉伸试样沿板材横向取样。

金相试样经过机械研磨抛光后,使用 16.8 g/L 的氟硼酸溶液在 20 V 的直流电下覆膜 1 min 左右,随后在 DMM-900 C 光学显微镜下使用偏振光观察样品的晶粒组织。第二相和疲劳断口形貌则使用 FEI Quanta-200 扫描电镜进行观察,并统计第二相的数量。

2 试验结果与讨论

2.1 热轧协同退火处理对合金力学性能的影响

不同工艺参数下 T4 态合金室温力学性能如图 1 所示。结果表明,热轧温度与退火温度对合金抗拉强度与屈服强度的影响有限。具体而言,热轧温度和退火温度升高,抗拉强度都有轻微降低,屈服强度则有轻微提升,合金延伸率则随退火温度升高先降低后升高,而热轧温度对 T4 态合金延伸率无明显影响。

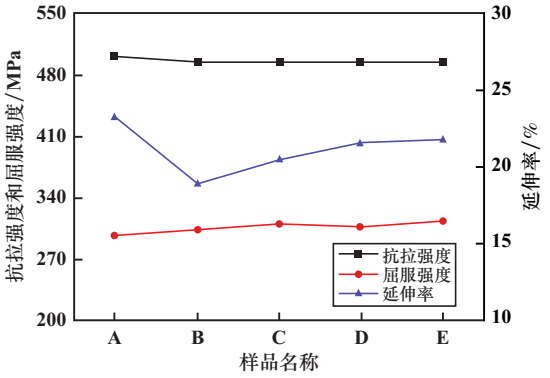


图 1 不同工艺参数下 T4 态合金室温力学性能

Fig. 1 Mechanical properties of T4-tempered alloy at room temperature

2.2 热轧协同退火处理对合金疲劳性能的影响

T4 态合金的疲劳裂纹扩展速率曲线如图 2 所示。可以将曲线分为近门槛区、稳态扩展区和失稳区 3 个区域。当裂纹尖端应力强度因子范围大于门槛值(ΔK_{th})时,疲劳裂纹才会发生扩展。由图 2 可见,热轧温度和退火温度对合金裂纹萌生门槛值的影响不大。随着裂纹尖端应力强度因子幅值(ΔK)增大,裂纹扩展速率增大。5 组样品在稳态扩展初期的裂纹扩展速率无明显差异,但是随着裂纹尖端应力水平增加,当 $\Delta K>25$ MPa·m$^{1/2}$时,样品C表现出更低的裂纹扩展

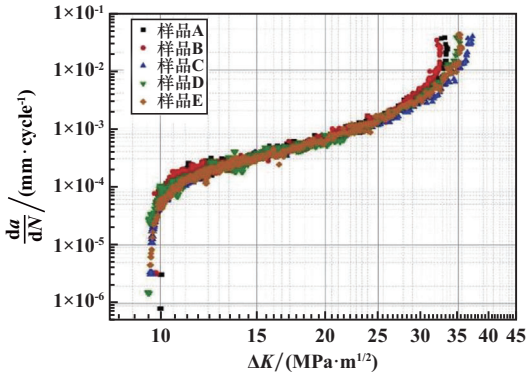


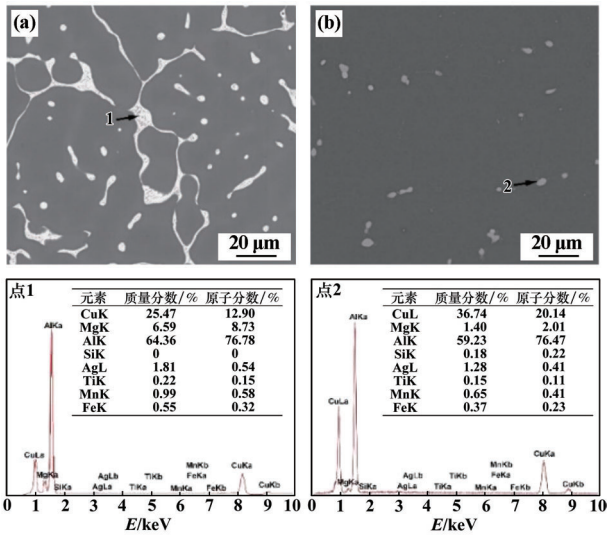
图 2 T4 态合金的疲劳裂纹扩展速率曲线

Fig. 2 Fatigue crack growth rate curves of T4-tempered alloy

速率,同时其临界断裂应力强度因子(ΔK_{max})更高。不过疲劳裂纹的萌生与扩展两个过程占整个疲劳寿命的绝大部分,这表明热轧温度与退火温度对 T4 态合金疲劳寿命的影响十分有限。

2.3　热轧前后合金显微组织

在铝合金板材制备中,均匀化退火作为热轧前的关键预处理步骤,其作用主要包括:① 消除铸态枝晶偏析以优化元素分布;② 溶解大部分的脆性共晶相;③ 降低合金高温变形抗力[10]。铸态及均匀化态合金 SEM 形貌及 EDS 分析结果如图 3 所示。铸态组织中存在大量非平衡凝固时形成的共晶相,点 1 的 EDS 分析结果表明其主要由 S 相(Al_2CuMg)和 θ 相(Al_2Cu)构成。这些非平衡共晶相一部分沿晶界呈连续网状结构分布,一部分分布于晶内呈液滴状。合金经均匀化处理后,晶界连续网状相发生显著溶解,第二相面积分数由 10.52%降至 1.47%。残留相(点 2)的 EDS 分析结果表明,均匀化后合金组织以热稳定性较高的 θ 相为主,而熔点较低的 S 相则已基本溶解[11]。这些粗大相的溶解为后续热轧加工提供了有利条件。

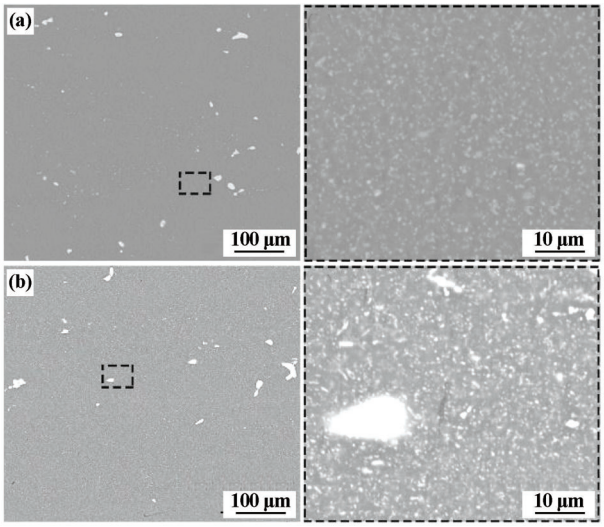


(a) 铸态;(b) 均匀化态

图 3　铸态及均匀化态合金 SEM 形貌及 EDS 分析结果

Fig. 3　SEM images and EDS analysis of as-cast and homogenized alloy

热轧后合金板材组织的 SEM 形貌见图 4。热轧后合金主要由铝基体和第二相组成。热轧温度与均匀化温度相近,高温变形过程中动态析出相易重新溶解,因此静态析出可能占据主导地位。结果表明,升高热轧温度对粗大第二相颗粒的溶解无明显影响,但对静态析出相的形核与生长有促进作用。经统计分析,450 ℃和 470 ℃热轧样品中析出相的面积分数分别为8.9%和 12.6%。众所周知,析出过程一般包括形核、长大与粗化 3 个阶段[12]。升高热轧温度显著加快了原子的扩散速度,这不仅提高了析出相的形核速率,同时也促进了其生长速率。因此,在高温热轧条件下,析出相的体积分数及尺寸均呈现一定程度提高。



(a) 450 ℃;(b) 470 ℃

图 4　热轧后合金板材组织的 SEM 形貌

Fig. 4　SEM images of hot rolled alloy sheets

2.4　热轧及退火温度对显微组织的影响

不同热轧及退火工艺下 T4 态合金的金相组织见图 5。热轧板在退火过程中发生明显再结晶,样品 A、B、C、D、E 的平均晶粒尺寸分别约为 92.6、49.6、41.3、32.1、37.9 μm。结果表明,热轧温度和退火温度均会对再结晶晶粒尺寸产生影响。升高退火温度会使晶粒尺寸细化,这是因为退火温度越高,再结晶时变形储能释放越多,再结晶驱动力更大,形核速率更高[9]。

热轧温度升高同样促进晶粒细化,这可能与静态析出相体积分数的增加相关(如图 5 所示)。析出相对界面钉扎力(P_z)的理论表达式[13]为:

$$P_z = \frac{3F_V\gamma_b}{d} \tag{1}$$

式中:F_V 和 d 分别为析出相体积分数和平均直径;γ_b 为常数。

由式(1)可知,析出相体积分数越大、尺寸越小,对界面的钉扎力越强,即对再结晶晶粒的生长阻碍越大。由图 5 可知,热轧温度升高,析出相体积分数明显提高,而尺寸无明显变化。因此相同热处理条件下,低温热轧样品的再结晶晶粒尺寸更大。屈服强度则随着热轧温度和退火温度升高有轻微提升,这可能与晶粒尺寸的细化有关。

不同热轧和退火工艺下 T4 态合金的疲劳瞬断区

的断口形貌如图 6 所示。各样品断口展现明显的韧性断裂特征,可以观察到大量尺寸不一的韧窝,部分大尺寸韧窝中还可见破碎的第二相颗粒。通常认为:韧窝分布越密集,尺寸越大,表明材料在断裂前经历了更显著的局部塑性变形,吸收了更多的能量,材料韧性更好。由图 6 可观察到,样品 C 的韧窝数量较其他样品更多,且分布更为均匀,因此对应的 ΔK_{max} 最大,这与图 2 结果一致。这是因为晶粒细化增加了晶界面积,为裂纹扩展提供了更多的阻碍,促进了更均匀的塑性变形,从而形成数量更多、尺寸更小的韧窝[14]。尽管样品 C、D 与 E 的晶粒尺寸相近,但对应的 ΔK_{max}(37.2、34.7、35.1 MPa·$m^{1/2}$)仍存在一定差异,这可能与微观组织中的第二相分布、织构等微观因素有关。试验结果证实了晶粒细化对提高材料韧性的积极作用。

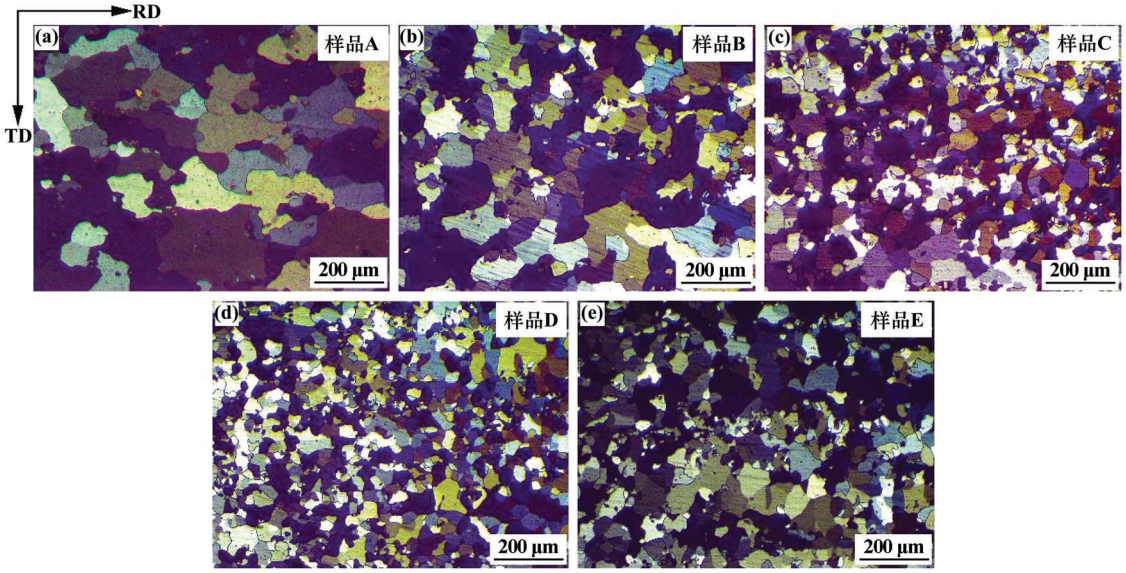


图 5 不同热轧及退火工艺下 T4 态合金的金相组织

Fig. 5 Metallographic structures of T4-tempered alloy after hot rolling and annealing at different temperatures

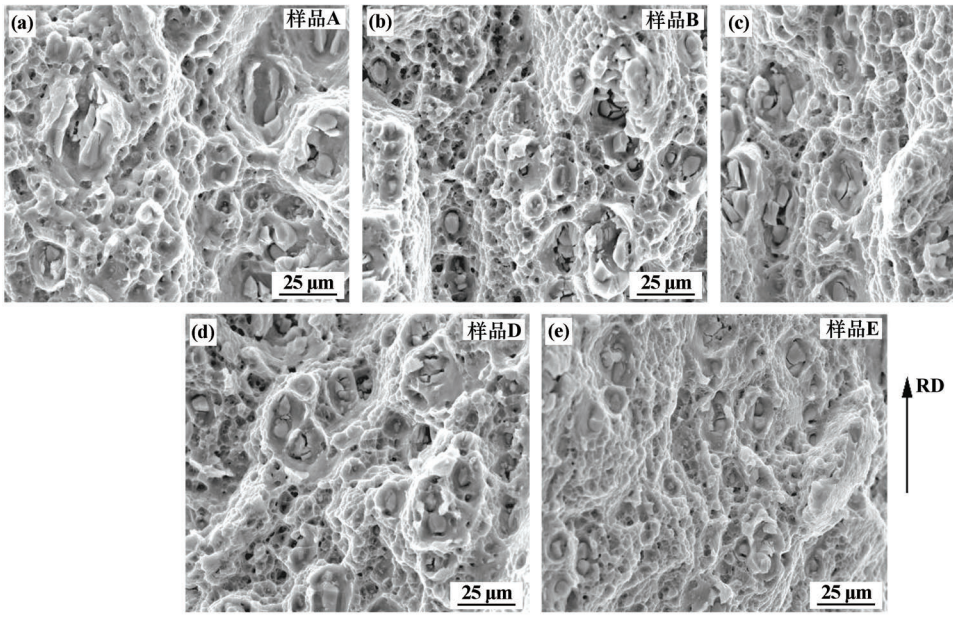


图 6 不同热轧和退火工艺下 T4 态合金的疲劳瞬断区的断口形貌

Fig. 6 Fracture morphology of instantaneous zones of T4-tempered alloy after hot rolling and annealing at different temperatures

3 结论

1) 升高热轧温度可以促进静态析出相形核、增强钉扎效应、细化后续退火再结晶晶粒尺寸。升高退火温度,可以提高再结晶驱动力、显著细化合金晶粒。

2) 热轧温度与退火温度对合金抗拉强度和屈服

强度的影响不明显;提高退火温度,合金延伸率略有提升。

3) 合金的疲劳裂纹扩展速率对热轧/退火温度的敏感性较低,其中门槛区与稳态扩展区的裂纹扩展速率相近。合金晶粒越细小,合金的断裂韧性越好。

参考文献(References):

[1] 何俊龙,郑亚亚,任杰克,等. 新型热机械处理对 Al-Cu-Mg 合金微观组织与综合性能的影响[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):189-193.
HE Junlong, ZHENG Yaya, REN Jieke, et al. Effect of novel thermo-mechanical treatment on microstructure and comprehensive properties of Al-Cu-Mg alloy[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(6):189-193.

[2] SUN L P, IRVING D L, ZIKRY M A, et al. First-principles investigation of the structure and synergistic chemical bonding of Ag and Mg at the Al|Ω interface in a Al-Cu-Mg-Ag alloy[J]. Acta Materialia, 2009,57(12):3522-3528.

[3] GAZIZOV M, KAIBYSHEV R. Effect of pre-straining on the aging behavior and mechanical properties of an Al-Cu-Mg-Ag alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015,625:119-130.

[4] DURSUN T, SOUTIS C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys[J]. Materials & Design, 2014,56:862-871.

[5] ZHAO Q, LIU Z Y, HU Y C, et al. Texture effect on fatigue crack propagation in aluminium alloys: An overview[J]. Materials Science and Technology, 2019,35(15):1789-1802.

[6] ZHENG J, PANG Q, HU Z L, et al. Recent progress on regulating strategies for the strengthening and toughening of high-strength aluminum alloys[J]. Materials, 2022,15(13):4725.

[7] YIN D Y, LIU H Q, CHEN Y Q, et al. Effect of grain size on fatigue-crack growth in 2524 aluminium alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2016,84:9-16.

[8] SUN P, YANG H F, HUANG R S, et al. The effect of rolling temperature on the microstructure and properties of multi pass rolled 7A04 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023,25:3200-3211.

[9] 郑欣. 退火温度对 Al-4.2Cu-1.4Mg 合金的微观结构和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2012,37(11):99-102.
ZHENG Xin. Effect of annealing temperature on microstructure and mechanical properties of Al-4.2Cu-1.4Mg aluminum alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2012,37(11):99-102.

[10] 杨春洋,孙有平,何江美,等. 轧制温度对大应变轧制 Al-4.5Cu-1.5Mg-0.1Sc合金组织与性能的影响[J]. 矿冶工程, 2022, 42(2):132-135.
YANG Chunyang, SUN Youping, HE Jiangmei, et al. Effect of temperature on microstructure and properties of large-strain rolled Al-4.5Cu-1.5Mg-0.1Sc alloy[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(2):132-135.

[11] 李成侣,潘清林,刘晓艳,等. 2124 铝合金的均匀化热处理[J]. 中国有色金属学报, 2010,20(2):209-216.
LI Chenglü, PAN Qinlin, LIU Xiaoyan, et al. Homogenizing heat treatment of 2124 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010,20(2):209-216.

[12] ZHAN X, TANG J G, TU W B, et al. Evolution of microstructure, texture and formability of Al-Mg-Si alloys at different hot rolling finish temperatures[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024,32:318-337.

[13] 左锦荣,侯陇刚,史金涛,等. 两阶段轧制变形过程中高强铝合金析出相与晶粒结构演变及其对性能的影响[J]. 金属学报, 2016,52(9):1105-1114.
ZUO Jinrong, HOU Longgang, SHI Jintao, et al. Precipitates and the evolution of grain structures during double-step rolling of high-strength aluminum alloy and related properties[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016,52(9):1105-1114.

[14] 韩念梅,张新明,刘胜胆,等. 固溶处理对 7050 铝合金强度和断裂韧性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012,43(3): 855-863.
HAN Nianmei, ZHANG Xinming, LIU Shengdan, et al. Influence of solution heat treatment on strength and fracture toughness of aluminum alloy 7050[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012,43(3):855-863.

引用本文:蒋倩,刘志义,柏松,等. 退火温度对不同 Al-Cu-Mg-Ag 热轧合金板微观组织及疲劳性能的影响[J]. 矿冶工程, 2026,46(2):179-183.

JIANG Qian, LIU Zhiyi, BAI Song, et al. Effects of annealing temperatures on microstructures and fatigue properties of different hot rolled Al-Cu-Mg-Ag alloy sheets[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):179-183.