

退火温度对Al-Cu-Mg-Ag合金疲劳性能的影响^①

赖志伟, 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: 通过疲劳裂纹扩展速率测试、室温拉伸试验以及X射线衍射、扫描电镜等表征手段,研究了退火温度对Al-Cu-Mg-Ag合金力学性能和抗疲劳性能的影响。结果表明:420℃/4h退火的T4态试样屈服强度和抗拉强度高,但塑性差。在400~430℃范围内随着退火温度升高,合金中Goss织构取向密度先增后减,420℃/4h的T4态合金疲劳裂纹扩展速率低($\Delta K \approx 25 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 时,疲劳裂纹扩展速率约为 $1.34 \times 10^{-3} \text{ mm/循环}$),抗疲劳性能好。

关键词: 退火温度; Al-Cu-Mg-Ag; 铝铜镁合金; 疲劳裂纹扩展; 织构; 热处理; 疲劳性能

中图分类号: TG146

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.04.035

文章编号: 0253-6099(2025)04-0192-04

Effect of Annealing Temperatures on Fatigue Properties of Al-Cu-Mg-Ag Alloys

LAI Zhiwei, LIU Zhiyi, BAI Song, HE Guangyu

(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: Effect of annealing temperature on the mechanical properties and fatigue properties of Al-Cu-Mg-Ag alloy was explored by performing fatigue crack propagation (FCP) rate testing, room-temperature tensile test and using characterization means such as X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The results show that the T4 state specimen annealed at 420℃ for 4 h presents higher yield and tensile strength, but poor plasticity. As the annealing temperature increases within the range of 400–430℃, the orientation density of the Goss texture in the alloy first increases and then decreases, and the T4 specimen after 4 h annealing at 420℃ presents an optimal fatigue performance, with lower FCP rate around $1.34 \times 10^{-3} \text{ mm per cycle}$ at $\Delta K \approx 20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$.

Key words: annealing temperature; Al-Cu-Mg-Ag; Al-Cu-Mg alloy; fatigue crack propagation (FCP); texture; heat treatment; fatigue performance

Al-Cu-Mg-Ag合金具有较高强度、较低密度和良好抗疲劳性能,是一种很有前途的航空航天结构材料^[1-3]。研究表明,晶粒取向即织构对铝合金疲劳裂纹扩展行为具有显著影响,其中Goss、P晶粒与相邻晶粒之间存在较大扭转角,疲劳裂纹通过时可以发生较大偏转,因此,同时具有高强度Goss织构或P织构以及细小Goss取向晶粒的合金表现出较低的疲劳裂纹扩展速率^[4-5]。Al-Cu-Mg合金是时效强化型合金,往往在时效状态下使用,此时合金中的织构主要是退火和固溶处理期间形成的再结晶织构^[6]。本文研究退火过程中Al-Cu-Mg-Ag合金的织构变化及其对合金疲劳

性能的影响,以期找到适宜的退火温度。

1 实验材料及方法

采用工业纯Al、Mg、Ag和Al-50%Cu、Al-10%Mn、Al-6%Ti、Al-4%Zr和Al-4%Cr中间合金制备实验合金,表1为Al-Cu-Mg-Ag合金化学成分。

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	Zr	Cr	Fe	Si	Al
3.15	1.95	0.53	0.59	0.15	0.13	0.08	0.097	0.069	余量

① 收稿日期: 2025-01-25

作者简介: 赖志伟(1997—),男,江西赣州人,硕士研究生,主要从事铝合金腐蚀及疲劳性能的机理研究。E-mail: lzw15367487319@163.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,主要从事铝合金的基础研究及应用技术开发。E-mail: liuzhiyi@csu.edu.cn

原料在电阻炉中 750 °C 下熔化后,倒入钢模中,冷却至室温得到铸锭。接着将铸锭置于空气炉中进行均匀化处理(420 °C/24 h+480 °C/48 h),在 480 °C 下热轧成 2 mm 厚的板材,压下量为 95%。然后将板材置于盐浴炉中在不同温度(400、420 和 430 °C)下退火 4 h,这是考虑到 Zr 的添加会促进细小弥散分布的 Al₃Zr 析出,进而钉扎晶界抑制再结晶组织的形成,因此选取了较高的退火温度以保证再结晶组织的顺利形成。此外,参考课题组之前的工作,退火 4 h 可以保证组织转变得足够充分。退火样品空冷至室温后,再在盐浴炉中进行固溶处理(500 °C/6 min),接着水淬后自然时效 96 h 以上。

室温拉伸试验和疲劳裂纹扩展速率测试均在 MTS-810 万能电子拉伸试验机上进行,其中室温拉伸速率为 2 mm/min,两者的加载方向均与轧制方向垂直。使用 Bruker D8-Discover X 射线衍射(XRD)对合金的组织进行分析。在 JMS-7610F Plus 扫描电子显微镜(SEM)二次电子成像模式下对合金的疲劳稳态扩展区(Paris)进行观察。电子背散射衍射(EBSD)在加速电压为 20 kV 的 Zeiss EVO MA10 扫描电子显微镜上进行。

2 实验结果及讨论

2.1 力学性能

表 2 为不同退火温度下 T4 态合金的力学拉伸性能。结果表明,随着退火温度升高,合金屈服强度和抗拉强度先减小后增大,相应地,延伸率先增大后减小。但是 3 种 T4 态合金整体上的力学性能差别很小,屈服强度、抗拉强度以及延伸率的差别均在 5% 以内。

表 2 不同退火温度下 T4 态合金的力学拉伸性能

Table 2 Tensile property of T4 alloy annealed at different temperatures

退火温度/°C	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%
400	387.3	441.1	19.5
420	382.3	433.6	20.1
430	390.4	439.8	19.7

2.2 疲劳裂纹扩展速率曲线

图 1 为不同退火温度下 T4 态合金的疲劳裂纹扩展速率曲线(da/dN 与 ΔK 关系曲线)。结果表明,不同退火温度下 T4 态合金板材在 Paris 区疲劳裂纹扩展速率从大到小排列为:430 °C/4 h 板材 > 400 °C/4 h 板材 > 420 °C/4 h 板材。在 $\Delta K = 25 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 时,400、420、

430 °C 下 T4 态合金板材的疲劳裂纹扩展速率分别为 1.38×10^{-3} 、 1.34×10^{-3} 和 $3.35 \times 10^{-3} \text{ mm/循环}$ 。这说明合金的疲劳裂纹扩展速率随着退火温度升高先减小后增大。

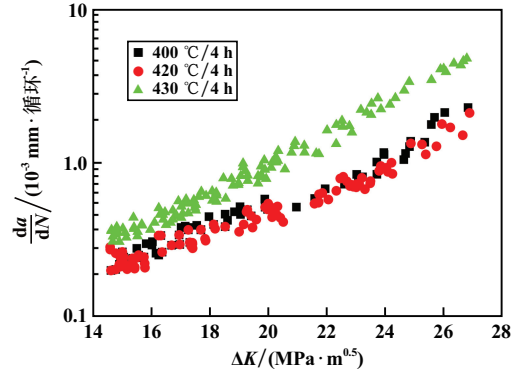


图 1 不同退火温度下 T4 态合金的疲劳裂纹扩展速率曲线
Fig. 1 FCP rate curve of T4 alloy annealed at different temperatures

2.3 组织分析

一般情况下,热轧大变形后的铝合金组织主要由 β 取向线织构以及强度较弱的 α 取向线织构组成^[7-8]。热轧大变形下形成的形变织构作为退火前的起始组织,其组分会显著影响退火后的织构类型^[9]。图 2 为热轧态合金板材中心位置织构的取向分布函数(ODF)图,合金的组织组分及取向密度见表 3。从图 2 和表 3 可以看出,合金在热轧过程中形成了形变织构,包含 Brass、S、Copper 等织构类型。其中,Brass 织构的取向密度达 5.35。

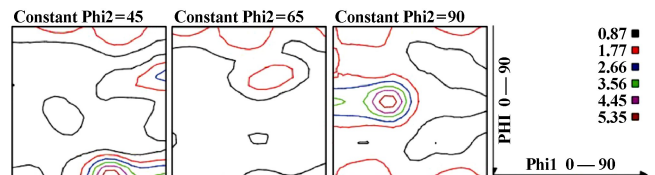


图 2 热轧态合金的织构 ODF 图

Fig. 2 ODF of textures in rolled alloy

表 3 板材的组织组分及取向密度

Table 3 Composition and orientation density of textures in plates

板材名称	不同织构取向密度						rGoss
	Brass	S	Copper	Goss	P	Cube	
热轧板	5.35	1.77	2.66	3.56	0	1.77	0
400 °C 退火板	2.93	2.04	0.70	5.60	2.93	4.71	0
420 °C 退火板	0	2.39	1.83	6.89	3.53	4.08	0
430 °C 退火板	0	3.00	0.70	0	3.00	5.29	9.12

通常经过退火和固溶处理后,合金板材中主要的再结晶织构为 Goss、Cube 和 P 织构^[10-11]。图 3 为不同退火温度下 T4 态合金板材中心位置织构 ODF 图,相应的

织构组分及取向密度亦列于表3中。结果表明,经过退火和固溶处理后,热轧织构向再结晶织构发生转变,Goss和Cube织构取代Brass织构成为主要的织构^[6]。400℃退火后,合金中还存在较强的Brass织构,说明还需要升高温度促进形变织构进一步转化为再结晶织构。420℃退火后,Brass织构的取向密度为0,形变织构转变为以Goss织构和Cube织构为主的再结晶织构;430℃退火后,rGoss织构取代Goss织构成为合金中强度最高的织构。这说明Goss织构是一种中间状态的再结晶织构,会随着再结晶程度增大转变为rGoss织构。此外,定向生长是再结晶织构的形成及演变的主要机

制之一,该机制表明,再结晶织构的组分取决于不同取向晶核的生长速率。由表3可知,退火温度较低时,Goss织构是合金中主要的再结晶织构,但是当退火温度达到430℃时,rGoss织构取代Goss织构成为合金中最主要的形变织构。这说明rGoss取向晶核在较高温度退火处理过程中比Goss取向晶核的生长速率更大。此外,420℃/4h退火处理的T4态合金板材具有更高强度的Goss和P织构,而Goss和P织构可以诱导疲劳裂纹发生大角度的偏转,因此420℃/4h退火处理的T4态合金板材在Paris区展现出较低的疲劳裂纹扩展速率,这与图1试验结果一致。

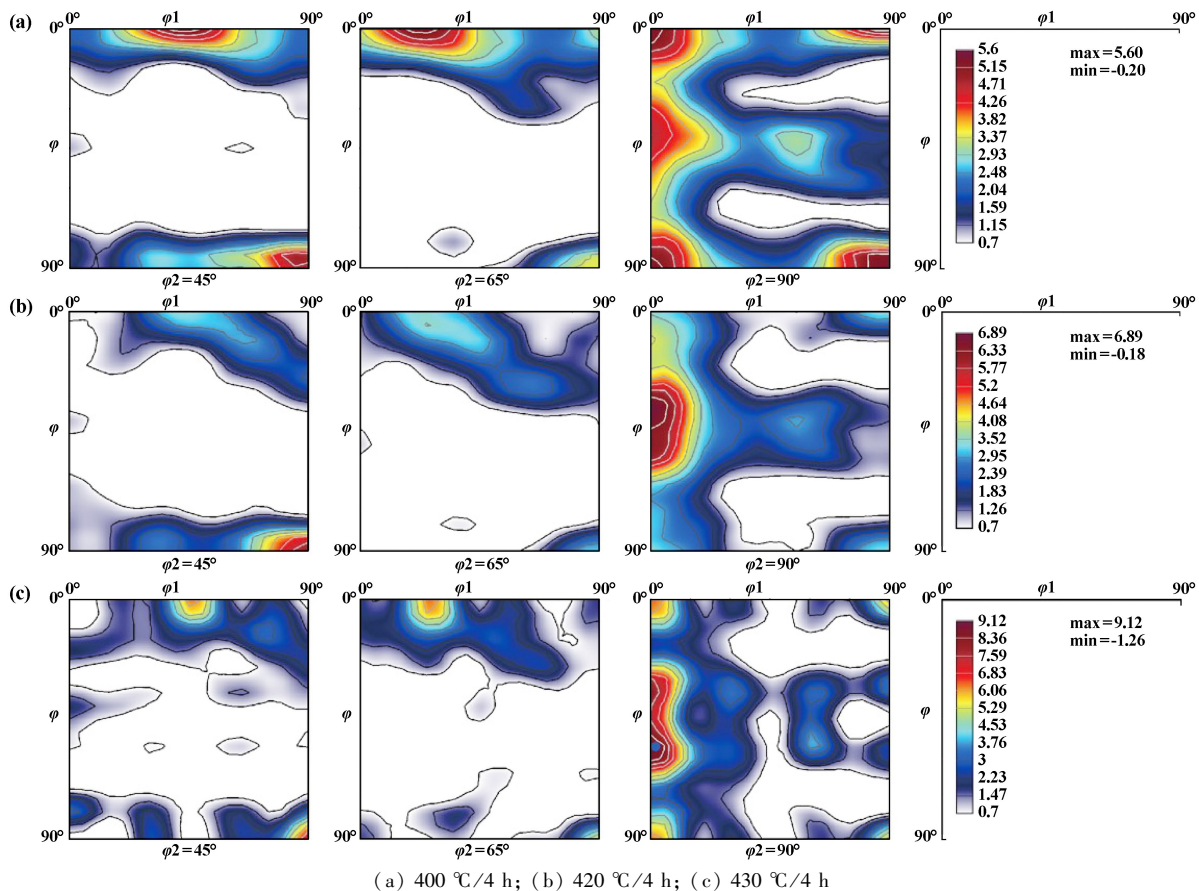


图3 不同退火温度下T4态合金的织构ODF图

Fig.3 ODF of textures in T4 alloy annealed at different temperatures

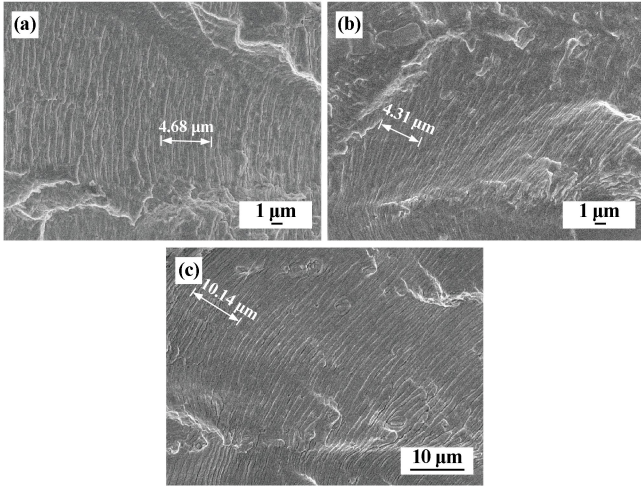
2.4 疲劳稳态扩展区形貌

通常借助疲劳裂纹扩展速率曲线来描绘疲劳裂纹的扩展过程,整个过程分为疲劳微裂纹萌生阶段、稳态扩展阶段和快速扩展阶段^[12]。高温热轧后经过不同温度退火4h的T4态合金Paris区的断口SEM形貌如图4所示,此时 $\Delta K \approx 20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 。从图4可以观察到裂纹周期性向前扩展而形成的辉纹,辉纹的宽度表示裂纹在一个循环应力周期中向前扩展的距离,辉纹的间距越大,说明疲劳裂纹的扩展速度越快,抗疲劳

性能越差^[13-14]。400、420、430℃下退火4h的T4态合金疲劳辉纹间距分别为4.68、4.31和10.14 μm 。可以发现,420℃/4h退火处理的T4态合金的辉纹间距最小,说明它的疲劳裂纹扩展速率最小,这与图1结果一致,因此,在实验温度范围内,420℃是最有利于提高合金抗疲劳性能的退火温度。

2.5 EBSD表征

晶粒越细小,意味着Goss织构晶粒的密度越大,更有利于诱导疲劳裂纹发生大角度的偏转^[4]。在一

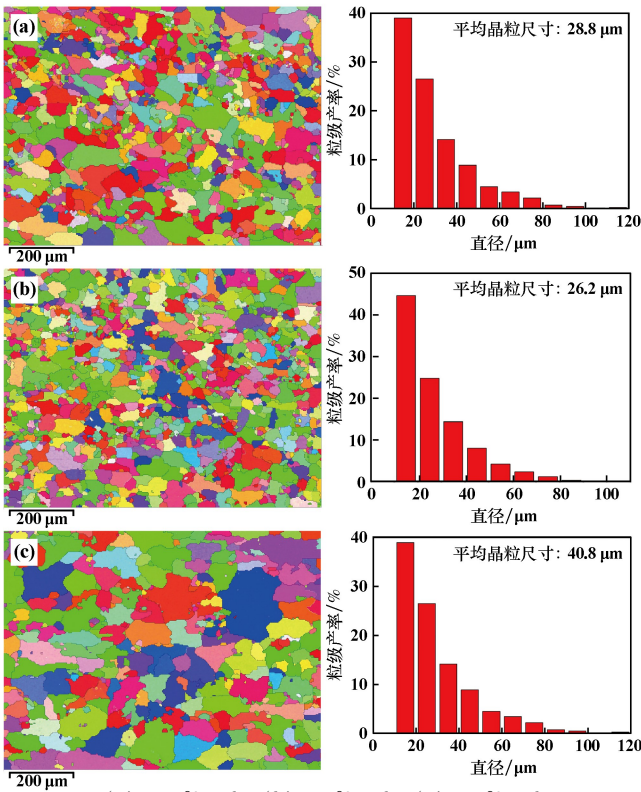


(a) 400 °C/4 h; (b)420 °C/4 h; (c)430 °C/4 h

图 4 不同退火温度下 T4 态合金疲劳稳态扩展区断口 SEM 图像

Fig.4 SEM images of fracture in steady-state FCP zone

定温度下对热轧后的合金进行退火处理,形变晶粒会发生再结晶以及晶粒长大。图 5 为不同退火温度下 T4 态合金 EBSD 图及晶粒尺寸分布图。由图 5 可知,3 种合金中的晶粒主要为等轴晶,这说明不同退火温度下 T4 态合金均发生了完全再结晶^[15]。400、420、430 °C 下退火 4 h 的 T4 态合金平均晶粒尺寸分别为 28.8、26.2 和 40.8 μm。可以发现,400 和 420 °C 下退火



(a) 400 °C/4 h; (b)420 °C/4 h; (c)430 °C/4 h

图 5 不同退火温度下 T4 态合金 EBSD 图及晶粒尺寸分布图

Fig.5 EBSD map of T4 alloy annealed at different temperatures

4 h 的合金板材中心位置组织的平均晶粒尺寸差别很小;但 430 °C 下退火 4 h 的合金板材再结晶晶粒发生长大,平均晶粒尺寸明显增大,这不利于提高合金的抗疲劳性能。综上,不同温度下退火过程中发生的织构转变和再结晶及晶粒长大程度不一是导致合金疲劳裂纹扩展速率产生差异的根本原因。

3 结论

1) 退火温度从 400 °C 提高到 420 °C 和 430 °C 时, Al-Cu-Mg-Ag 合金屈服强度和抗拉强度先减小后增大,延伸率先增大后减小,但是差异均在 5% 以内。实验范围内退火温度对合金的力学性能影响不大。

2) 在退火处理过程中,合金中的织构由以 Brass 织构为主的热轧织构转变为以 Goss 织构和 Cube 织构为主的再结晶织构。退火温度越高,这种转变越完全。然而当温度较高时,rGoss 织构将取代 Goss 织构成为合金中取向密度最大的织构,合金抗疲劳裂纹扩展性能明显下降。

3) 420 °C 下退火 4 h 的 T4 态合金具有高强度的细小 Goss 和 P 织构,因而疲劳裂纹在 Paris 区的扩展速率低,在实验温度范围内,420 °C 为最有利于提高合金抗疲劳性能的退火温度。

参考文献 (References):

[1] HUTCHINSON C R, FAN X, PENNYCOOK S J, et al. On the origin of the high coarsening resistance of Ω plates in Al-Cu-Mg-Ag alloys [J]. Acta materialia, 2001,49(14):2827-2841.

[2] 管仁国, 娄花芬, 黄晖, 等. 铝合金材料发展现状、趋势及展望 [J]. 中国工程科学, 2020,22(5):68-75.

GUAN Renguo, LOU Huaifen, HUANG Hui, et al. Development of aluminum alloy materials: Current status, trend, and prospects [J]. Strategic Study of CAE, 2020,22(5):68-75.

[3] GAZIZOV M, KAIBYSHEV R. Precipitation structure and strengthening mechanisms in an Al-Cu-Mg-Ag alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2017,702:29-40.

[4] LIU F, LIU Z, HE G. Making Al-Cu-Mg alloy tough by Goss-oriented grain refinement [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022,904:164095-164110.

[5] 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.

[6] LIU F, LIU Z, LIU M, et al. Texture evolution and its effect on fatigue crack propagation in two 2000 series alloys [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019,28:1324-1336.

(下转第 200 页)

4 结语

低空经济与矿冶工程的深度融合,正重塑现代产业格局。无人机与 eVTOL 赋能矿山勘探、安监、物流全链条,提升了勘探效率与应急响应速度;高强钛合金机身、钕铁硼永磁电机、芯片材料为飞行器铸就“钢筋铁骨”,筑牢低空产业根基。通过技术链共研与人才链互通,推动资源开发与空中经济的协同发展;通过材料创新与场景深化,持续打破学科壁垒,释放万亿级市场潜能,才能使“矿冶低空”成为新质生产力的战略高地。

参考文献(References):

- [1] 常理. 低空经济乘风起[N]. 经济日报, 2025-03-23(1).
CHANG Li. Low-altitude economy takes off[N]. Economic Daily, 2025-03-23(1).
- [2] MÜLLER E, TSHIBANDA J P, LI W. Drone-based surveying in Congolese copper mines: Efficiency gains and safety impacts[J]. Mining Technology, 2023, 132(6):401-415.
- [3] TIAN X W, YAO X, TAO T, et al. Monitoring and numerical analysis of slope deformation in a coal mine in the southwest mountainous regions of China[J]. Natural Hazards, 2025, 121(6):6955-6979.
- [4] 毛国斌, 余何, 吴荣华, 等. 无人机技术在露天非金属矿山绿色勘探项目中的应用[J]. 资源信息与工程, 2025, 40(4):70-73.
MAO Guobin, YU He, WU Ronghua, et al. Application of UAV technology in the green drilling project of open-pit non-metallic mines[J]. Resource Information and Engineering, 2025, 40(4):70-73.
- [5] 刘莉, 曹潇, 张晓辉, 等. 轻小型太阳能/氢能无人机发展综述[J]. 航空学报, 2020, 41(3):6-33.
LIU Li, CAO Xiao, ZHANG Xiaohui, et al. Review of development of light and small scale solar/hydrogen powered unmanned aerial vehicles[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(3):6-33.

- [6] 王玉磊, 汤雷, 钱思蓉. 基于无人机和红外热成像技术的小型水库坝体早期非稳定渗漏检测系统[J]. 无损检测, 2020, 42(12):61-65.
WANG Yulei, TANG Lei, QIAN Sirong. Early unsteady leakage detection system of small reservoir dam based on UAV and infrared thermal image[J]. Nondestructive Testing, 2020, 42(12):61-65.
- [7] 张铜, 王浩军, 刘旷, 等. 基于无人机红外热成像技术的土石坝渗漏检测方法研究[J]. 浙江水利科技, 2024, 52(2):60-66.
ZHANG Jian, WANG Haojun, LIU Kuang, et al. Leakage detection for rockfill dam by UAV and infrared thermal imaging technology[J]. Zhejiang Hydraulics, 2024, 52(2):60-66.
- [8] 刘明昊. 无人机技术在矿山复垦中的应用[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2018.
LIU Minghao. Application of UAV photogrammetry in mine reclamation[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2018.
- [9] 张海艳, 兰玉彬, 文晟, 等. 植保无人机水稻田间农药喷施的作业效果[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(1):116-124.
ZHANG Haiyan, LAN Yubin, WEN Sheng, et al. Operational effects of unmanned helicopters for pesticide spraying in rice field[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(1):116-124.
- [10] 蒋仲安, 曾发斌, 王亚朋. 我国金属矿山采运过程典型作业场所粉尘污染控制研究现状与展望[J]. 金属矿山, 2021(1):135-153.
JIANG Zhongan, ZENG Fabin, WANG Yapeng. Research status and prospect of dust pollution control in typical working places during mining and transportation of metal mines in China[J]. Metal Mine, 2021(1):135-153.

- 引用本文: 徐鹏, 贺跃光. 低空经济与矿冶工程双向赋能: 技术链和人才链耦合机制研究[J]. 矿冶工程, 2025, 45(4):196-200.
XU Peng, HE Yueguang. Two-way empowerment of low-altitude economy and mining and metallurgical engineering: Coupling mechanism of technology chain and talent chain[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(4):196-200.

(上接第195页)

- [7] BOWEN A W. Texture development in high strength aluminium alloys[J]. Materials Science and Technology, 1990, 6(11):1058-1071.
- [8] BATE P S, HUANG Y, HUMPHREYS F J. Development of the “brass” texture component during the hot deformation of Al-6Cu-0.4Zr[J]. Acta materialia, 2004, 52(14):4281-4289.
- [9] SHEN F, ZHOU Z, LI W, et al. Micro-mechanism of texture evolution during isochronal annealing of as-annealed hot rolled Al-Cu-Mg sheet[J]. Materials & Design, 2019, 165:107575-107594.
- [10] XIA P, LIU Z, BAI S. Coupling effect of grain structures and residual secondary phases on fatigue crack propagation behavior in an Al-Cu-Mg alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30:2669-2679.
- [11] ZHAO Q, LIU Z, HUANG T, et al. Enhanced fracture toughness in an annealed Al-Cu-Mg alloy by increasing Goss/Brass texture ratio[J]. Materials Characterization, 2016, 119:47-54.
- [12] SURIESH S. Fatigue of materials[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [13] 张静江. 典型断口微观特征: 四、疲劳断口[J]. 理化检验(物理分册), 1986, 22(5):64.

- ZHANG Jingjiang. Microfeatures of typical fracture: Four, Fatigue fracture[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 1986, 22(5):64.
- [14] 潘家发, 唐建国, 叶凌英, 等. 轧制温度对铝铜锂合金疲劳性能的影响[J]. 矿冶工程, 2022, 42(6):153-156.
PAN Jiafa, TANG Jianguo, YE Lingying, et al. Effect of rolling temperature on fatigue properties of Al-Cu-Li alloy[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(6):153-156.
- [15] KUMAR N, RAO P N, JAYAGANTHAN R, et al. Effect of cryorolling and annealing on recovery, recrystallisation, grain growth and their influence on mechanical and corrosion behaviour of 6082 Al alloy[J]. Materials Chemistry and Physics, 2015, 165:177-187.

- 引用本文: 赖志伟, 刘志义, 柏松, 等. 退火温度对 Al-Cu-Mg-Ag 合金疲劳性能的影响[J]. 矿冶工程, 2025, 45(4):192-195.
LAI Zhiwei, LIU Zhiyi, BAI Song, et al. Effect of annealing temperatures on fatigue properties of Al-Cu-Mg-Ag alloys[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(4):192-195.