

2024-T3 铝合金高温低周疲劳失效机理研究

金序伦¹, 姜玉涵¹, 程锦华^{1,2,3*}

(1. 内蒙古大学交通学院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2. 内蒙古大学土木工程废弃物绿色资源化利用研究自治区高等学校重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010020; 3. 中国地质大学(北京)深部探测与成像全国重点实验室, 北京 100083)

摘要:为明确轻量化铝合金钻杆材料在深部钻探高温交变载荷下的疲劳失效行为,以2024-T3铝合金为研究对象,开展了120、160、200℃温度下,应力幅分别为200、250、300 MPa条件下的轴向拉-压应力控制疲劳试验,并结合应力-应变滞回响应、扫描电镜断口形貌及背散射电子成像对其失效机制进行了分析。结果表明,疲劳寿命随应力幅升高显著降低,应力幅是控制寿命衰减的主要因素;温度对寿命的影响具有明显的应力幅相关性;在200、250 MPa中低应力幅下,200℃试样寿命较160℃有所回升,而在300 MPa高应力幅下寿命随温度升高持续降低。滞回环分析表明,160℃条件下材料循环塑性变形增强,宏观非弹性能量耗散增加;200℃条件下滞回环面积并未随温度升高持续增大,表明宏观耗散能与局部疲劳损伤之间并非完全对应,疲劳失效逐渐由均匀塑性耗散主导向局部应变集中及颗粒-基体界面损伤主导转变。断口观察表明,低温低应力幅下裂纹以较稳定的疲劳辉纹扩展为主;随着温度和应力幅升高,断口粗糙化加剧,二次裂纹、韧窝、撕裂棱及颗粒拔出特征增多。BSE结果显示,Cu富集粗大第二相颗粒及其局部聚集区是裂纹萌生和扩展的重要微观损伤源。综合分析认为,2024-T3铝合金高温疲劳失效受基体热软化、循环塑性变形和颗粒-基体界面损伤共同控制,高温高应力幅下界面脱黏与微孔聚合加速了裂纹扩展并导致疲劳寿命降低,研究成果可为特深井轻量化铝合金钻杆的服役可靠性评价提供试验支撑与理论依据。

关键词:2024-T3铝合金;铝合金钻杆;高温疲劳;低周疲劳;疲劳寿命;疲劳失效;滞回响应;断口形貌;深部钻探
中图分类号:P634.4;TE921⁺.2;TG146.21 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)05-0083-09

Investigation of the elevated-temperature low-cycle fatigue failure mechanism of 2024-T3 aluminum alloy

JIN Xulun¹, JIANG Yuhuan¹, CHENG Jinhua^{1,2,3*}

(1. Transportation Institute of Inner Mongolia University, Hohhot Inner Mongolia 010020, China; 2. Key Laboratory of Green Resource Utilization of Civil Engineering Waste at Universities of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot Inner Mongolia 010020, China; 3. State Key Laboratory of Deep Earth Exploration and Imaging, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: To elucidate the elevated-temperature fatigue failure behavior of lightweight aluminum alloy drill pipe materials in deep drilling, axial tension-compression stress-controlled fatigue tests were conducted on 2024-T3 aluminum alloy at 120, 160, and 200 °C with stress amplitudes of 200, 250, and 300 MPa. The failure mechanisms were analyzed via stress-strain hysteretic response, scanning electron microscopy fracture morphology, and backscattered electron imaging. The results show that fatigue life decreases markedly with increasing stress amplitude, which is the primary factor controlling life attenuation. The influence of temperature exhibits significant stress

收稿日期:2026-06-25; 修回日期:2026-08-08 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.05.009

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:42302349);深部探测与成像全国重点实验室开放课题(编号:DEEI20252231);地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(编号:2024ZD1000800、2024ZD1000808);内蒙古自然科学基金项目(编号:2023QN05027)

第一作者:金序伦,男,满族,1999年生,硕士研究生,交通运输专业,研究方向为超深井钻探钻柱动力学,内蒙古呼和浩特市昭君路街道24号,15931821255@163.com。

通信作者:程锦华,男,汉族,1994年生,副教授,硕士生导师,地质工程专业,博士,研究方向为低密高强取心绳缆设计与力学分析、超深科学钻探钻柱动力学与螺纹力学等,内蒙古呼和浩特市昭君路街道24号,chengjinhua@imu.edu.cn。

引用格式:金序伦,姜玉涵,程锦华.2024-T3铝合金高温低周疲劳失效机理研究[J].钻探工程,2026,53(5):83-91.

JIN Xulun, JIANG Yuhuan, CHENG Jinhua. Investigation of the elevated-temperature low-cycle fatigue failure mechanism of 2024-T3 aluminum alloy[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(5):83-91.

amplitude dependence; at intermediate and low stress amplitudes of 200 and 250 MPa, the fatigue life at 200 °C shows a recovery compared with that at 160 °C, whereas at a high stress amplitude of 300 MPa, it declines continuously with rising temperature. Analysis of the hysteretic response reveals that cyclic plastic deformation is enhanced at 160 °C, resulting in increased macroscopic inelastic energy dissipation. However, at 200 °C, the hysteresis loop area does not expand continuously, indicating a discrepancy between macroscopic dissipated energy and local fatigue damage, with the dominant failure mechanism shifting from uniform plastic dissipation to localized strain concentration and particle-matrix interface damage. Observations of fracture morphology indicate that crack propagation is dominated by stable fatigue striations at low temperatures and low stress amplitudes. Elevated temperatures and high stress amplitudes lead to rougher fracture surfaces with increased secondary cracks, dimples, tear ridges, and particle pull-out features. Backscattered electron imaging confirms that Cu-enriched coarse second-phase particles serve as critical microscopic damage sources for crack initiation and propagation. It is concluded that the fatigue failure is jointly governed by matrix thermal softening, cyclic plastic deformation, and particle-matrix interface damage. Under high-temperature and high-stress-amplitude conditions, interface decohesion and microvoid coalescence accelerate crack propagation and reduce fatigue life. The findings provide experimental support and a theoretical basis for service reliability evaluation of lightweight aluminum alloy drill pipe in ultra-deep wells.

Key words: 2024-T3 aluminum alloy; aluminum alloy drill pipe; elevated-temperature fatigue; low-cycle fatigue; fatigue life; fatigue failure; hysteretic response; fracture morphology; deep drilling

0 引言

深井、超深井乃至特深井钻探,是获取深部地质信息、开发深层油气资源和保障国家能源安全的重要工程手段。随着钻探深度持续增加,钻柱所承受的轴向载荷、回转扭矩、井壁接触和振动冲击显著增强,其力学可靠性直接影响钻井深度、钻进效率和井下安全。我国深井、超深井和水平井钻完井技术的发展表明,井下高温高压、复杂地层环境与长井段循环摩阻,已经成为深地钻探装备性能迭代升级的主要制约因素^[1]。因此,降低钻柱自重、提高钻杆在极端环境下的服役可靠性,是万米级深部钻探装备发展的关键方向之一。

铝合金钻杆凭借低密度、高比强度、优良的耐蚀性能及可控的加工制造成本,在深井、超深井钻探作业当中具有突出的轻量化优势^[2]。对于8000 m的深井,外径139 mm、壁厚10.54 mm的常规钢钻柱质量约为300 t,而相同规格铝合金钻柱质量仅为其三分之一左右^[3]。钻柱质量的大幅降低能够有效减小井口悬重和轴向拉伸载荷,降低深井段钻柱拉断风险,并有助于改善复杂井段钻进过程中的摩阻和扭矩状态。近年来,轻质铝合金钻杆在材料优化、结构设计、连接制造和表面防护等方面不断发展,其工程应用前景受到持续关注^[4-5]。熊洪威等^[6]采用玄武岩短纤维增强7075铝合金,发现纤维在基体中具有较好的分散和界面结合,并可提高复合材料的显微硬度;黄世寅等^[7]采用SiC颗粒和短碳纤维

强化2A12铝合金,使其在180、220 °C下的抗拉强度得到提高。这些研究表明,通过组织调控和增强相引入可以改善铝合金钻杆材料的静态力学及高温性能,但其评价指标主要集中于硬度、抗拉强度和材料制备效果,对循环载荷下的疲劳损伤行为关注相对不足。

然而,铝合金钻杆的服役可靠性并不只取决于静载荷强度。特深井钻柱长期承受拉伸、压缩、弯曲、扭转和冲击等复杂载荷,钻头跳钻、黏滑振动及井眼轨迹变化均可能引起显著的交变应力和瞬态载荷波动^[8-9]。钻杆在自转、公转过程中与井壁或套管反复接触,产生的磨损划痕和局部材料缺损可能成为裂纹萌生位置^[10];同时,接头、螺纹根部、过渡圆角及表面缺陷等部位易形成应力集中,是疲劳损伤的敏感区域^[11-14]。除机械载荷外,井下温度和腐蚀介质也会削弱钻杆服役性能。梁健等^[15]研究表明,铝合金钻杆腐蚀速率随温度和应力升高而加快,靠近钢接头区域的界面电流密度较高,局部阳极溶解和材料损失更为显著。王济生等^[16]发现,腐蚀环境会造成铝合金钻杆力学性能衰减,其中碱性环境的影响较为明显。因此,复杂交变载荷、局部应力集中、表面损伤及环境作用共同增加了裂纹萌生与扩展的风险,而高温引起的基体软化、循环变形及第二相颗粒相关损伤,是影响2024-T3铝合金疲劳失效的重要因素。围绕铝合金疲劳行为与微观损伤演化,已有研究为认识2024铝合金的循环变

形和断裂机制提供了基础。Djebli 等^[17]针对 Al-2024 铝合金疲劳损伤的非线性累积特征建立了能量模型,指出循环耗散能与疲劳损伤演化密切相关。郝红^[18]研究了铝合金平均应力松弛行为,表明非对称循环载荷下的应力演化会影响疲劳寿命。Singh 等^[19]研究了预拉伸历史和应变比对铝合金低周疲劳行为的影响,发现循环载荷路径和初始变形状态会改变材料的循环变形响应。Lipski 等^[20]研究了 2024-T3 铝合金在升温条件下的拉伸性能,表明温度升高会引起强度和弹性模量下降。微观组织方面,2024 铝合金的力学响应与 GPB 区、S'/S 相组织特征密切相关^[21],而粗大第二相颗粒及其局部聚集则可能进一步影响疲劳裂纹的萌生与扩展;循环滑移、裂纹尖端塑性变形、疲劳辉纹、韧窝和局部撕裂形貌则可用于表征疲劳裂纹扩展及局部损伤演化^[22-23]。此外,高温服役条件下铝合金可能出现蠕变-疲劳相互作用和局部损伤加速现象,这会进一步改变裂纹扩展方式和最终断裂模式^[24-25]。

现有研究从铝合金钻杆应用、钻柱动力学、疲劳损伤和微观组织演化等方面提供了重要依据,但面向特深井高温纵向循环载荷条件,2024-T3 铝合金疲劳寿命、滞回响应和断口微观特征之间的对应关系仍需进一步明确。特别是在 160~200 ℃高温区间及较高应力幅共同作用下,材料可能同时发生热软化、循环塑性变形增强、第二相颗粒损伤及颗粒或基体界面脱黏等过程。此时,宏观滞回耗散与局部损伤程度并不一定呈简单正相关,较小的滞回环面积也可能对应更强的局部应变集中和更早的界面开裂。因此,有必要将疲劳寿命、应力-应变滞回响应和断口显微形貌结合起来,揭示高温和应力幅共同作用下的疲劳失效机制。

基于此,本文以 2024-T3 铝合金为研究对象,开展不同温度和应力幅条件下的高温低周疲劳试验,分析其疲劳寿命、应力-应变滞回响应及循环损伤演化规律。通过扫描电镜断口形貌观察和背散射电子成分衬度对照,识别平坦疲劳扩展区、撕裂棱、韧窝、空洞、二次裂纹及 Cu 富集颗粒相关损伤之间的对应关系,阐明温度和应力幅对疲劳裂纹扩展方式及最终断裂机制的影响。本文旨在建立 2024-T3 铝合金高温低周疲劳宏观响应与微观失效特征之间的关联,为特深井轻量化铝合金钻杆的材料可靠性评价提供试验依据。

1 试样制备与试验条件

1.1 试验材料与试样制备

本研究所采用的试验材料是在航空航天及深层油气钻探工程中广泛应用的高强度 2024-T3 铝合金,交货状态为 T3,其标称化学成分见表 1。

表 1 2024-T3 铝合金化学成分
Table 1 Chemical composition of 2024 aluminum alloy

Cu/ %	Mg/ %	Mn/ %	Fe/ %	Al
3.8~4.9	1.2~1.8	0.3~0.9	≤0.5	余量

由于该合金中 Cu 和 Mg 元素含量较高,其力学性能对微观组织的各向异性及第二相分布较为敏感。对于工业级变形铝合金材料,微米级第二相颗粒及其局部聚集可能对疲劳裂纹萌生和扩展产生重要影响。为了消除材料初始加工织构引起的力学性能离散性,并最大程度降低机加工残余应力对早期疲劳裂纹萌生的干扰,所有试件均严格沿母材的纵向截取。试件加工符合《金属材料疲劳试验轴向力控制方法》(GB/T 3075—2021),试件标距段直径为 6 mm,圆弧过渡区域经过严格的形位公差控制以降低应力集中。为避免表面车削微观刀痕诱发非本征的裂纹源,所有试件的工作段表面均沿试样轴向采用 400~2000 目砂纸逐级打磨;随后,使用粒径为 1.0 μm 的金刚石研磨膏进行抛光处理,直至试样表面粗糙度 $R_a \leq 0.2 \mu\text{m}$ 。此外,为科学制定后续的高温疲劳载荷谱并划分高低周疲劳界限,试验前首先对同批次材料进行了单调拉伸试验(表 2),以精确获取该状态下金属材料的抗拉强度及断后伸长率等基准静态力学参量。试验结果表明,该材料的力学性能处于 2024-T3 铝合金典型性能区间。

表 2 2024-T3 铝合金拉伸断裂数据
Table 2 Tensile fracture data of 2024-T3 aluminum alloy

抗拉强度/MPa	断裂伸长率/ %	弹性模量/MPa
472.3	18.2	71925.2

1.2 高温疲劳试验条件

本研究所采用的设备为美国 MTS 型高温疲劳试验机(100 kN),如图 1 所示,其载荷测量系统依据 ASTM E4 标准进行校准,力值误差为 ±0.5%。完成试样安装并施加微小预紧力后,按照设定升温速率加热至目标温度,在施加交变载荷正式试验前恒温保温 30 min。试验采用轴向拉-压加载模式,加载

波形为正弦曲线,应力比 $R=-1$ 。加载频率选定为 $f=2\text{ Hz}$ 。本试验共设置了120、160、200℃三组环境温度与200、250、300 MPa三组应力幅,旨在深入探究温度和应力幅对2024铝合金高温疲劳失效机理的影响及耦合作用。



图1 MTS型试验机

Fig.1 MTS fatigue testing machine

2 不同温度和应力幅下的2024-T3铝合金高温疲劳试验

2024-T3铝合金在高温低周疲劳条件下的寿命同时受温度和应力幅控制,且温度效应并非简单单调变化,如图2所示。在相同温度下,疲劳寿命随应力幅升高显著降低。温度为120、160、200℃时,寿命由200 MPa下的31369、15969、19081周分别降至300 MPa下的2855、838、623周。由此可见,应力幅升高是导致疲劳寿命快速衰减的主导因素,其本质在于较高应力幅显著提高裂纹尖端循环塑性应变幅和局部损伤驱动力,使微裂纹萌生、扩展和最终失稳连接过程明显加快。

温度对疲劳寿命的影响表现出明显的应力幅相关性。在200、250 MPa条件下,120℃试样寿命最高,160℃试样寿命最低,而200℃试样寿命较160℃有所回升。其中,200 MPa下200℃寿命较160℃时提高约19.5%,250 MPa下提高约6.9%。该结果说明,在中低应力幅范围内,温度升高并不必然导致寿命持续降低。160℃下材料强度下降和循环塑性损伤增强,使寿命相较120℃明显缩短;而当温度进一步升高至200℃时,基体局部塑性协调能力提高,裂纹尖端钝化、裂纹路径偏折及裂纹闭合作用可能增强,从而在一定程度上降低了平均裂

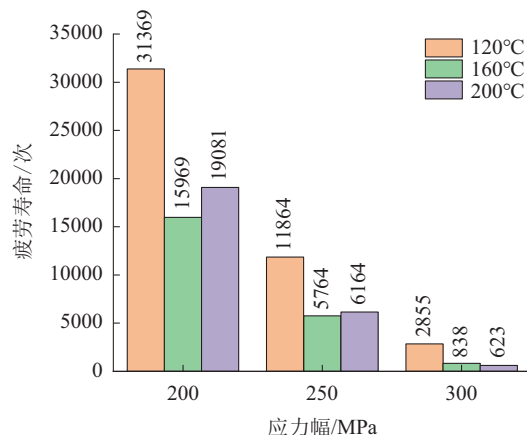


图2 不同温度和应力幅下2024-T3铝合金疲劳寿命

Fig.2 Fatigue life of 2024-T3 aluminum alloy at different temperatures and stress amplitudes

纹扩展速率,使疲劳寿命相对160℃出现回升。然而,200℃下寿命仍低于120℃时,说明该温度下热软化和基体界面损伤仍对疲劳性能具有不利影响。

当应力幅增至300 MPa时,温度引起的寿命回升现象消失,寿命按120、160、200℃顺序依次降低,分别为2855、838、623周。这表明在高应力幅下,外加载荷已成为控制疲劳失效的主要因素。高应力幅使材料进入显著循环塑性变形状态,局部应力集中可促进粗大第二相颗粒开裂、颗粒-基体界面脱黏及微孔快速聚合。此时,200℃下基体软化所带来的局部塑性协调作用已不足以抵消高应力幅诱发的颗粒相关损伤和界面失效,因此疲劳寿命进一步低于160℃时。

为定量比较不同温度和应力幅条件下材料循环变形响应的差异,对各工况的应力-应变滞回环进行面积计算。考虑到120℃及部分较低应力幅条件下滞回环较窄,所得面积较小且工况间差异有限,本文选取160、200℃下250、300 MPa工况,分别比较第100、600次循环及寿命中期的滞回环面积,结果见表3、图3。

图3进一步揭示了上述寿命变化的力学原因。滞回环面积可表示为单周循环中材料耗散的非弹性能量密度,即 $(W_d = \oint \sigma d\epsilon)$,其大小反映了循环塑性变形和疲劳损伤累积程度。在相同温度条件下,滞回环随应力幅升高而逐渐变宽。该规律在120℃条件下的图3(a)~(c)、160℃条件下的图3(d)~(f)及200℃条件下的图3(g)~(i)中均较为明显。200、250 MPa对应的滞回环较窄,说明试样整体变

表 3 不同工况下显著滞回环面积对比
Table 3 Comparison of significant hysteresis loop areas under different working conditions

温度/℃	应力幅/MPa	循环次数	滞回环面积/ 10^4Pa
160	250	100	6.2
		600	15.6
		寿命中期	21.3
	300	100	148.1
		600	224.1
		寿命中期	208.7
200	250	100	2.0
		600	2.7
		寿命中期	3.3
	300	100	120.5
		600	208.2
		寿命中期	156.4

形仍以弹性应变和较小非弹性应变为主;当应力幅升高至 300 MPa 时,滞回环沿应变轴明显扩张,面积显著增大,表明材料发生了更强的循环塑性变形,单周耗散能增加。这与图 2 中 300 MPa 条件下疲劳寿命大幅降低相对应。

从循环演化过程看,图 3(a)、(d)、(g)分别为 120、160、200 ℃ 下第 100 次的滞回响应,图 3(b)、(e)、(h)对应第 600 次,图 3(c)、(f)、(i)对应寿命中期。在应力控制条件下,应力幅保持恒定,若滞回环随循环次数增加逐渐变宽,则说明材料在循环过程中发生塑性应变增长,表现出循环软化特征。以 300 MPa 曲线为例,比较图 3(a)~(c)、图 3(d)~(f)及图 3(g)~(i)可以发现,高应力幅滞回环在整个循环过程中均保持较大的应变跨度,部分条件下面积随循环次数增加而进一步扩大,表明材料抵抗循环塑性变形的能力下降,疲劳损伤持续累积。相比之

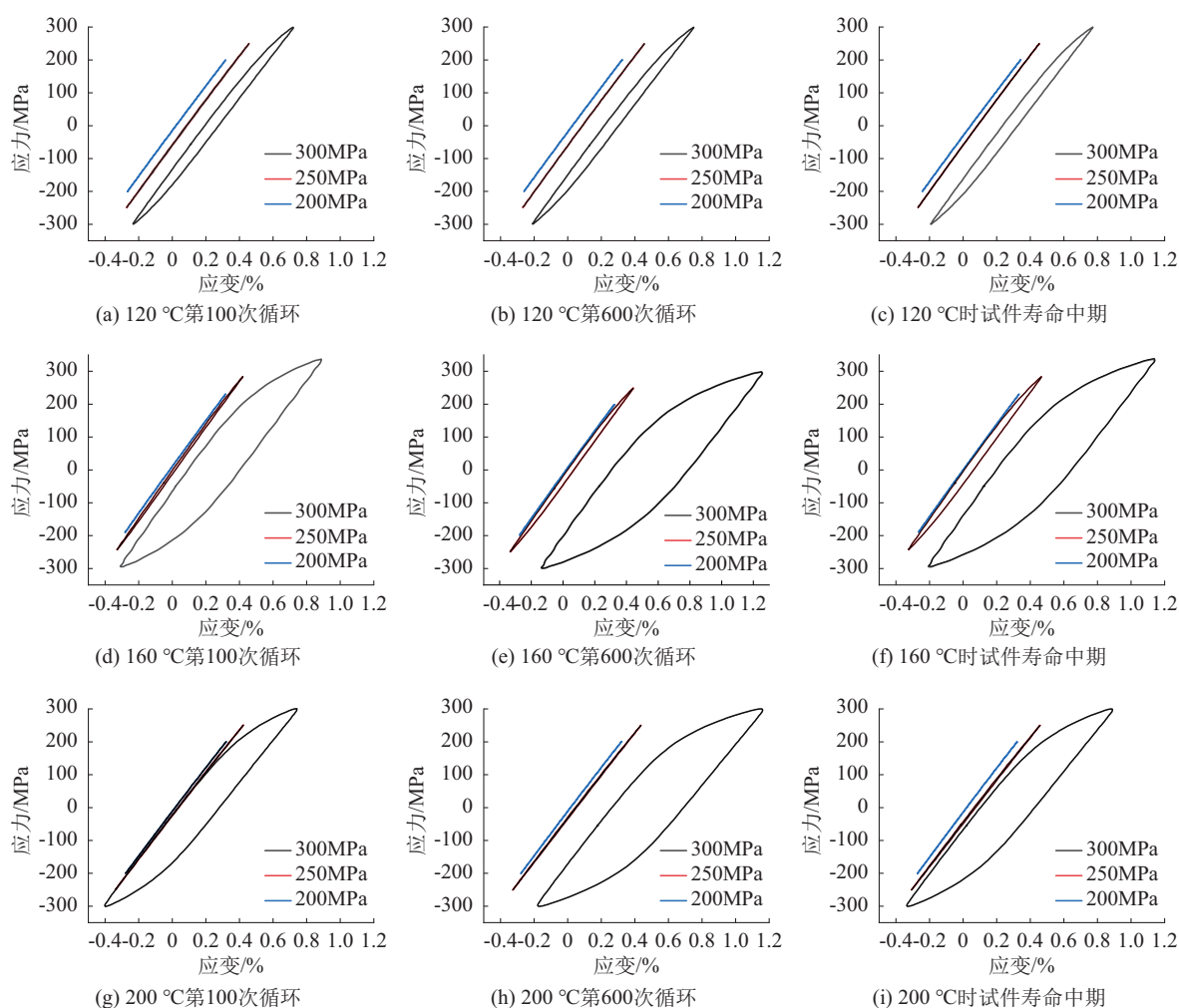


图 3 不同温度不同应力幅不同循环次数下应力-应变滞回曲线

Fig.3 Stress-strain hysteresis loops under different temperatures, stress amplitudes, and numbers of cycles

下,200、250 MPa时曲线整体较窄,说明其循环塑性变形程度明显低于300 MPa时,因此循环软化和损伤累积速率也相对较低。

温度对滞回响应的影响可通过相同循环阶段下的子图对比进一步说明。第100次时,比较图3(a)、(d)、(g)可见,温度升高改变了同一应力幅下的应变响应;第600次时,图3(b)、(e)、(h)显示高温条件下的非弹性变形更加明显;寿命中期的图3(c)、(f)、(i)进一步表明,不同温度下材料滞回响应存在明显偏差。由120℃升高至160℃时,相同应力幅下滞回环面积总体增大,说明温度升高削弱了2024-T3铝合金的抗塑性变形能力,使同等应力水平下产生更大的非弹性应变。与160℃相比,200℃下250、300 MPa的滞回环面积并未继续增大,部分循环阶段甚至有所减小。对比图3(d)~(f)与图3(g)~(i)可以看出,200℃下宏观循环耗散并不随温度升高而持续增加,这说明200℃下疲劳损伤可能不再主要由大范围均匀塑性耗散控制,而更可能与局部微区塑性变形、第二相颗粒损伤及颗粒-基体界面脱黏有关。

因此,较小的滞回环面积并不必然意味着较低的局部疲劳损伤。当塑性变形高度局域化时,材料可能在较低的宏观非弹性耗散水平下发生早期裂纹萌生和快速扩展。该认识有助于解释图2中不同温度和应力幅下的寿命差异:在120℃条件下,材料仍保持较高的强度和循环稳定性,裂纹扩展速率较低,因而寿命最高;在160℃条件下,热软化增强循环塑性变形,滞回环面积增大,疲劳损伤累积加快,寿命显著降低;在200℃条件下,中低应力幅时局部塑性协调、裂纹尖端钝化和裂纹路径偏折可能延缓裂纹扩展,使寿命相对160℃有所回升,而在300 MPa高应力幅下,颗粒相关损伤和界面脱黏效应增强,局部化失效加速,寿命再次降低。综上,2024-T3铝合金的高温低周疲劳寿命并非由温度或单周耗散能单独决定,而是由宏观循环塑性耗散、局部应变分配、裂纹尖端钝化及第二相颗粒诱导损伤共同控制。

3 2024-T3 铝合金高温低周疲劳微观失效机理分析

图4展示了2024-T3铝合金试件在不同温度和应力幅条件下同一断口中平坦刻面区与崎岖形貌区的典型形貌。可以看出,断口并非由单一扩展机

制控制,而是同时存在相对平整的疲劳扩展刻面和高度起伏的局部撕裂区,说明疲劳裂纹在扩展过程中受到局部组织不均匀性、裂纹前沿塑性变形及第二相颗粒-基体界面损伤的共同影响。

在120℃、200 MPa条件下,图4(a)中可观察到

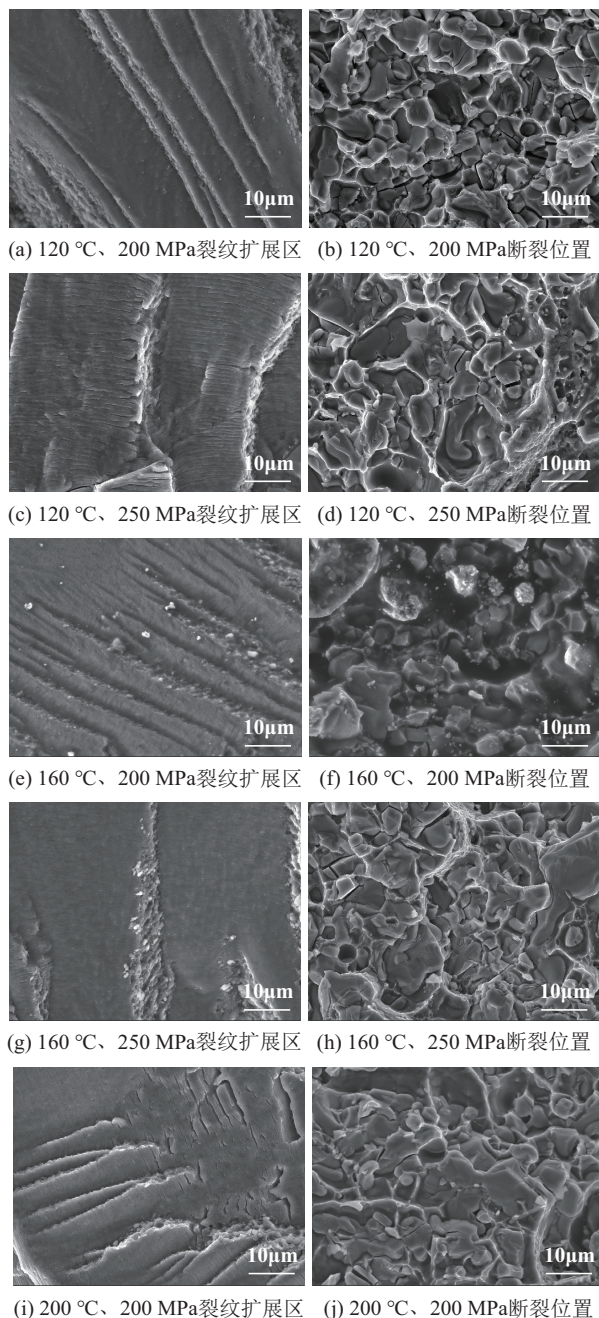


图4 2024-T3 铝合金试件在不同应力幅和温度条件下断口形貌

Fig.4 Typical fracture surface morphologies of 2024-T3 aluminum alloy at different temperatures and stress amplitudes

较为连续和平直的条带状痕迹,表明裂纹主要以相对稳定的平面化疲劳扩展方式推进;对应的崎岖区域图4(b)中虽存在颗粒状断裂单元和局部凹坑,但二次裂纹和撕裂连接特征尚不充分,说明该条件下裂纹扩展速率较低,局部塑性损伤程度有限。当应力幅增加至250 MPa时,图4(c)中平行疲劳辉纹更加明显,而图4(d)中出现二次裂纹和更复杂的崎岖断裂形貌,说明较高应力幅增大了裂纹尖端循环塑性区和局部应力集中程度,使裂纹在稳定推进的同时更容易发生分叉、偏折和局部连接。

温度升高至160℃后,断口形貌开始表现出更强的塑性变形和局部损伤特征。图4(e)中平坦刻面上的条带痕迹呈现一定波状起伏,说明裂纹扩展过程中塑性变形增强;图4(f)中颗粒状断裂单元、凹坑和撕裂特征更加明显,表明裂纹在扩展过程中更频繁地与第二相颗粒、界面或局部弱化区域发生相互作用。在160℃、250 MPa条件下,图4(g)仍可见较平直的疲劳扩展条带,但其间夹杂明显的撕裂带和粗糙台阶;图4(h)则呈现出更发育的孔洞、撕裂棱和二次裂纹,说明温度升高与应力幅增加共同促进了裂纹尖端塑性变形、微孔聚合和裂纹路径偏折。

进一步升温至200℃时,即使应力幅为200 MPa,图4(i)中的平坦扩展区也表现出更不规则的条带和局部撕裂痕迹,图4(j)中则可见明显的空洞、撕裂棱和高度起伏的断裂表面。该现象表明,高温削弱了材料抵抗循环塑性变形和界面损伤的能力,使裂纹扩展由相对规则的平面化疲劳推进逐渐转向以局部塑性变形、孔洞聚合和撕裂连接为特征的损伤控制过程。总体而言,随着应力幅和温度升高,断口由较规则的疲劳辉纹主导逐渐向二次裂纹增多、断面粗糙化和微孔聚合增强转变,反映出疲劳裂纹扩展机制由稳定循环推进向局部塑性损伤加速演化。

图5给出了2024-T3铝合金在较高应力幅和不同温度条件下的断口形貌及其对应背散射电子图像。与图4中低应力幅条件下可见的平坦疲劳扩展刻面和较规则条带状痕迹相比,图5中的断口整体更加粗糙,平坦刻面的比例明显降低,裂纹扩展过程逐渐表现出颗粒相关孔洞、韧窝聚合、撕裂棱和局部基体撕裂共同参与的特征。这说明随着应力幅升高,裂纹尖端循环塑性区扩大,局部应力集中增强,裂纹不再以相对规则的平面化稳定扩展为主,而是更容易与第二相颗粒及其周围基体发生相

互作用,诱发孔洞形核、长大和聚合。

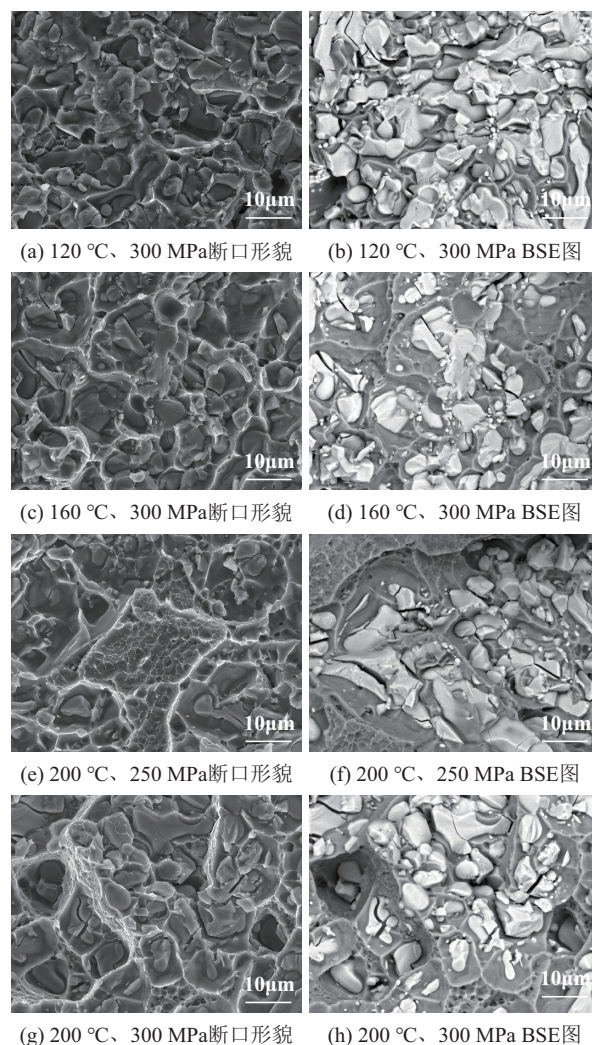


图5 高应力幅和高温条件下2024-T3铝合金断口形貌及BSE图

Fig.5 Fracture surface morphologies and corresponding BSE images of 2024-T3 aluminum alloy under high stress amplitudes and elevated temperatures

在120℃、300 MPa条件下,图5(a)中断口表面已呈现出明显的起伏和颗粒状断裂单元,图5(b)背散射图像中可见大量亮白色Cu富集颗粒分布于铝基体中,部分颗粒位于凹坑或撕裂区域附近。与图4(a)、(b)和图4(c)、(d)中温度120℃应力幅200、250 MPa条件下仍能观察到的平坦疲劳扩展区域相比,300 MPa应力幅下断口粗糙化明显,表明应力幅升高显著促进了裂纹尖端局部塑性变形。此时裂纹扩展机制已由较稳定的疲劳辉纹式推进,逐渐转向疲劳扩展与微孔聚合撕裂并存。

在160℃、300 MPa条件下,图5(c)断口表面可见发育的撕裂棱、韧窝状凹坑和明显起伏,说明铝基体在裂纹扩展过程中发生了较充分的局部塑性变形。对应的图5(d)背散射图像显示,Cu富集颗粒并非完全从基体中剥离,部分颗粒周围仍存在连续的灰色铝基体撕裂区域,表明裂纹扩展过程中基体参与程度较高。与图4(g)、(h)中160℃、250 MPa条件下仍可观察到平行疲劳辉纹和二次裂纹的混合特征相比,160℃、300 MPa条件下裂纹扩展进一步向韧性撕裂和孔洞聚合方向发展。该形貌说明在该温度下,材料仍保持一定基体塑性协调能力,裂纹扩展需要通过较大范围的基体撕裂和孔洞连通来完成,因此断裂过程具有较高的局部耗能特征。

当温度升高至200℃且应力幅为250 MPa时,图5(e)中可见局部集中的蜂窝状韧窝网络,而图5(f)中相应区域附近存在大量Cu富集颗粒、颗粒拔出坑及局部界面分离痕迹。该形貌表明,200℃下裂纹扩展并非简单表现为均匀塑性撕裂,而是更倾向于在第二相颗粒富集区或颗粒-基体界面附近发生损伤局域化。结合图4(i)、(j)中200℃、200 MPa条件下已出现的粗糙断面和孔洞特征可知,温度升高使颗粒相关损伤更容易参与裂纹扩展过程。若滞回环面积在该温度下相对减小,则可说明宏观均匀塑性耗散能力降低,而局部区域仍可能发生较强的塑性变形和孔洞聚合。

在200℃、300 MPa条件下,图5(g)中断口表面出现更显著的空洞、撕裂棱和粗糙起伏,图5(h)背散射图像中大量Cu富集颗粒暴露于断面,部分颗粒周围可见暗色间隙、孔洞或颗粒拔出坑。这说明在高温和高应力幅共同作用下,颗粒-基体界面成为裂纹扩展过程中的重要损伤源,裂纹可通过界面脱黏、颗粒拔出和相邻孔洞快速连通而扩展。与160℃、300 MPa条件相比,200℃、300 MPa下基体连续撕裂特征相对减弱,而颗粒暴露、孔洞连通和界面相关损伤更加突出,表明裂纹扩展机制由基体广泛参与的高耗能韧性撕裂,逐渐转向以局部界面脱黏和孔洞聚合为主的损伤局域化扩展。

综合图4、图5可以认为,2024-T3铝合金高温低周疲劳失效机制受温度和应力幅共同控制。应力幅升高主要通过增大裂纹尖端循环塑性变形和局部应力集中,促进第二相颗粒破裂、颗粒-基体界面脱黏及微孔聚合;温度升高则削弱基体强度和界

面协调变形能力,使损伤更容易在Cu富集颗粒周围局域化。当温度和应力幅同时较高时,疲劳裂纹不再主要依赖规则的疲劳辉纹式稳定推进,而是通过颗粒相关孔洞形核、界面脱黏、微孔聚合和撕裂棱连接快速扩展,从而导致疲劳寿命降低。

4 结论

(1)2024-T3铝合金在高温轴向循环载荷下的疲劳寿命受应力幅显著控制。在相同温度下,疲劳寿命随应力幅由200 MPa增至300 MPa而明显降低,表明应力幅升高会增大裂纹尖端循环塑性变形和局部损伤驱动力,加速疲劳裂纹萌生、扩展和失稳断裂。

(2)温度对疲劳寿命的影响具有明显的应力幅相关性。在200、250 MPa条件下,200℃试样寿命较160℃有所回升,但仍低于120℃;在300 MPa条件下,疲劳寿命随温度升高持续降低。说明中低应力幅下高温引起的局部塑性协调可能对裂纹尖端钝化和裂纹路径偏折具有一定作用,而高应力幅下热软化、颗粒损伤和界面脱黏对寿命衰减起主导作用。

(3)应力-应变滞回响应表明,应力幅升高使滞回环明显展宽,循环塑性变形和单周非弹性能量耗散增加。160℃条件下滞回环面积总体增大,反映出材料抗循环塑性变形能力下降;200℃条件下滞回环面积未继续增大,说明宏观耗散能与局部疲劳损伤之间存在不完全对应关系,疲劳失效更易受局部应变集中和颗粒-基体界面损伤控制。

(4)断口形貌和BSE观察表明,低温低应力幅下裂纹扩展以较规则的疲劳辉纹和相对稳定的平面化推进为主;随着温度和应力幅升高,二次裂纹、韧窝、撕裂棱、颗粒拔出坑和孔洞聚合特征增多。微米级Cu富集第二相颗粒及其局部聚集区是疲劳裂纹萌生和扩展的重要微观损伤位置。2024-T3铝合金高温低周疲劳失效由基体热软化、循环塑性变形、第二相颗粒损伤及颗粒-基体界面脱黏共同控制。

参考文献(References):

- [1] 汪海阁,黄洪春,纪国栋,等.中国石油深井、超深井和水平井钻完井技术进展与挑战[J].中国石油勘探,2023,28(3):1-11.
WANG Haige, HUANG Hongchun, JI Guodong, et al. Progress and challenges of drilling and completion technologies for deep, ultra-deep and horizontal wells of CNPC[J]. China Petroleum Exploration, 2023,28(3):1-11.
- [2] 孙建华,梁健,王立臣,等.深部钻探铝合金钻杆开发应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(4):34-39.

- SUN Jianhua, LIANG Jian, WANG Lichen, et al. Development and application of aluminum alloy drill rod in deep drilling[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016, 43(4):34-39.
- [3] 满国祥,程林,王克虎,等.石油钻杆的发展趋势分析[J].地质装备,2024,25(2):23-26.
- MAN Guoxiang, CHENG Lin, WANG Kehu, et al. Analysis on the development trend of petroleum drilling pipes[J]. *Equipment for Geotechnical Engineering*, 2024, 25(2):23-26.
- [4] 刘政涛,宋刚,王瑜,等.新型轻质铝合金钻杆研究现状与展望[J].钻探工程,2026,53(3):24-33.
- LIU Zhengtao, SONG Gang, WANG Yu, et al. Research status and prospects of novel lightweight aluminum alloy drill pipe[J]. *Drilling Engineering*, 2026, 53(3):24-33.
- [5] 尹浩,梁健.铝合金钻杆技术[J].钻探工程,2025,52(6):152-153.
- YIN Hao, LIANG Jian. Aluminum alloy drill pipe technology[J]. *Drilling Engineering*, 2025, 52(6):152-153.
- [6] 熊洪威,马银龙,张帅,等.玄武岩纤维增强铝基复合钻杆材料的制备研究[J].钻探工程,2021,48(3):140-145.
- XIONG Hongwei, MA Yinlong, ZHANG Shuai, et al. Preparation of basalt fiber reinforced aluminum based composite material for drill pipes[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(3):140-145.
- [7] 黄世寅,刘宝昌,孟庆南,等.SiC与碳纤维强化2A12铝合金钻杆材料的拉伸性能研究[J].钻探工程,2025,52(5):76-85.
- HUANG Shiyin, LIU Baochang, MENG Qingnan, et al. Study on tensile properties of 2A12 aluminum alloy drill pipe reinforced with SiC and carbon fiber[J]. *Drilling Engineering*, 2025, 52(5):76-85.
- [8] 杨怡帆.超深井钻柱动力学特性分析:以TB油田为例[D].成都:西南石油大学,2023.
- YANG Yifan. Analysis of dynamic characteristics of drill string in ultra-deep wells: a case study of TB Oilfield[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2023.
- [9] 滕学清,狄勤丰,李宁,等.超深井钻柱粘滑振动特征的测量与分析[J].石油钻探技术,2017,45(2):32-39.
- TENG Xueqing, DI Qinfeng, LI Ning, et al. Measurement and analysis of stick-slip characteristics of drill string in ultra-deep wells[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(2):32-39.
- [10] 袁牧.钻杆用碳纤维增强7075铝合金材料摩擦磨损性能研究[D].长春:吉林大学,2024.
- YUAN Mu. Study on the friction and wear properties of carbon fiber reinforced 7075 Al alloy material for drill pipes[D]. Changchun: Jilin University, 2024.
- [11] 张文波.石油钻柱的失效原因分析与预防[D].大庆:东北石油大学,2016.
- ZHANG Wenbo. Failure analysis and prevention of the oil drilling tools[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2016.
- [12] 秦长毅,蒋家华,蒋存民,等.钻杆失效分析与质量控制探讨[J].石油管材与仪器,2017,3(2):1-4.
- QIN Changyi, JIANG Jiahua, JIANG Cunmin, et al. Discussion on drill pipe failure analysis and quality control[J]. *Petroleum Tubular Goods & Instruments*, 2017, 3(2):1-4.
- [13] 彭先波,窦亮彬,李玮,等.钻杆疲劳寿命及失效机制研究进展与展望[J].石油机械,2025,53(12):32-42.
- PENG Xianbo, DOU Liangbin, LI Wei, et al. Research progress and prospect on fatigue life and failure mechanism of drill pipe[J]. *China Petroleum Machinery*, 2025, 53(12):32-42.
- [14] 郭王恒,吴百川.极限工况下钻杆接头疲劳分析[J].机械制造,2020,58(3):41-45.
- GUO Wangheng, WU Baichuan. Fatigue analysis of drill pipe joint under extreme conditions[J]. *Machinery*, 2020, 58(3):41-45.
- [15] 梁健,赵杰,王成彪,等.基于COMSOL的铝合金钻杆腐蚀分析[J].钻探工程,2021,48(4):1-10.
- LIANG Jian, ZHAO Jie, WANG Chengbiao, et al. Analysis of aluminum alloy drill pipe corrosion based on COMSOL[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(4):1-10.
- [16] 王济生,陈卫东,孔永平.铝合金钻杆在腐蚀环境下的力学性能[J].矿冶,2022,31(6):70-75.
- WANG Jisheng, CHEN Weidong, KONG Yongping. Mechanical properties of aluminum alloy drill pipe in corrosive environment[J]. *Mining and Metallurgy*, 2022, 31(6):70-75.
- [17] Djebli A, Aid A, Bendouba M, et al. A non-linear energy model of fatigue damage accumulation and its verification for Al-2024 aluminum alloy[J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2013, 51:145-151.
- [18] 郝红.2124-T851铝合金平均应力松弛行为与随机疲劳寿命估算研究[D].杭州:浙江大学,2018.
- HAO Hong. A study on the mean stress relaxation and fatigue life estimation under random load of 2124-T851 aluminum alloy[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [19] Singh J, Wheatley G, Branco R, et al. On the low-cycle fatigue behavior of aluminum alloys under influence of tensile pre-strain histories and strain ratio[J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 158:106747.
- [20] Lipski A, Mroziński S. The effects of temperature on the strength properties of aluminium alloy 2024-T3[J]. *Acta Mechanica et Automatica*, 2012, 6(3):62-66.
- [21] Mousavi Anjidan S H, Sadeghi-Nezhad D, Lee H, et al. TEM study of S' hardening precipitates in the cold rolled and aged AA2024 aluminum alloy: influence on the microstructural evolution, tensile properties & electrical conductivity[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 13:798-807.
- [22] 谢昌吉.铝合金低周疲劳损伤晶体塑性模型及其在裂尖疲劳过载行为研究中的应用[D].南宁:广西大学,2025.
- XIE Changji. A crystal plasticity model with the low cycle fatigue damage effect and its application in the study of fatigue overload behavior at crack tips for aluminum alloy[D]. Nanning: Guangxi University, 2025.
- [23] Maruschak P, Maruschak O. Methods for evaluating fracture patterns of polycrystalline materials based on the parameter analysis of fatigue striations: A review[J]. *MethodsX*, 2024, 13:102989.
- [24] 张庆.铝合金蠕变-疲劳耦合特性研究及其在柴油机活塞寿命预测中的应用[D].北京:北京理工大学,2015.
- ZHANG Qing. Study on the coupled creep-fatigue characteristic of aluminum alloy and the application in life prediction of diesel engine piston[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [25] Yan J, Cao Z C, Zhang W Z, et al. Research on the microscopic characteristics of low-cycle-fatigue and creep coupling in cast aluminum alloys for cylinder heads[J]. *International Journal of Fatigue*, 2025, 197:108952.

(编辑 王跃伟)