

关于 Al-Cu-Mg 合金疲劳性能的几个关键影响因素的讨论

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.5011

吴 琴 吴汉东 刘 玮
王 翔 陈亦然 陈国翔
范才河 张英哲

湖南工业大学
材料科学与工程学院
湖南 株洲 412007

摘 要: Al-Cu-Mg 系铝合金因其优异的力学性能、良好的抗疲劳性能及可加工性, 广泛应用于各类工程结构中。本文聚焦 Al-Cu-Mg 合金疲劳性能优化, 系统综述了元素成分控制、微观组织调控、析出相行为调控、织构演变及位错控制等关键因素的作用规律。研究表明, 对 Cu/Mg 原子比进行优化可调控析出相分布, 增强裂纹萌生抗力; 细晶粒结构通过强化晶界阻力和提高位错滑移难度, 显著延缓裂纹扩展; 织构类型与高角度晶界分布通过路径偏折抑制裂纹直线扩展; 而析出相-位错协同效应是提升疲劳寿命的关键。未来, 需要结合高通量设计、纳米析出调控及智能监测技术, 推动该合金工程化应用。

关键词: Al-Cu-Mg 合金; 疲劳性能; 析出相; 织构演变; 位错强化

中图分类号: TB31

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2025)05-0091-12

引文格式: 吴 琴, 吴汉东, 刘 玮, 等. 关于 Al-Cu-Mg 合金疲劳性能的几个关键影响因素的讨论 [J]. 包装学报, 2025, 17(5): 91-102.

1 研究背景

随着航空航天工业对轻量化的需求不断增加, 具有高强度、良好耐热性和加工性能的 Al-Cu-Mg 合金材料被广泛应用于飞机机身和机翼、发动机支架和高温部件、火箭燃料箱和导弹结构件等航空航天、交通运输和军事装备等领域^[1-3]。在实际应用中, Al-Cu-Mg 合金最主要的失效形式是疲劳。疲劳失效可能导致严重的后果, 甚至引发灾难性事故, 譬如飞机机身或机翼结构的疲劳失效, 可能会引发飞机空中解体等灾难性事故; 发动机部件的疲劳失效可能导致发动机

停机, 威胁飞行安全; 频繁的疲劳失效会进一步增加飞机的维护和检修成本, 影响航空公司的运营效率; 而车身或底盘部件的疲劳失效可能导致车辆失控, 引发交通事故^[4-7]。

在包装材料领域, 轻量化与耐用性的平衡始终是技术革新的核心挑战。传统铝合金包装材料 (如 1xxx、3xxx 系) 虽具备优异的成型性和耐蚀性, 但其低强度 (<200 MPa) 和有限的抗疲劳性能难以满足重型运输、高温灭菌等特殊场景的需求。以 Al-Cu-Mg 合金为代表的高强铝合金 (如 2024-T3, 屈服强度不低于 450 MPa), 因其独特的析出

收稿日期: 2025-03-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52271177); 湖南省自然科学基金资助项目 (2025JJ70063)

作者简介: 吴 琴, 女, 讲师, 博士, 主要从事轻量化材料制备及应用研究, E-mail: 420362747@qq.com

通信作者: 范才河, 男, 教授, 博士, 主要从事喷射成形快速凝固技术研究, E-mail: Fancaihe@hut.edu.cn

强化效应 ($S-Al_2CuMg$ 和 $\theta-Al_2Cu$ 相) 和抗循环载荷能力, 为严苛环境下包装材料的使用提供了新思路。在精密仪器运输中, $Al-Cu-Mg$ 合金箱体通过 S 相钉扎位错, 将疲劳寿命提升至普通铝箱的 2~3 倍, 可承受 100 000 次 2 m 跌落冲击而不损坏; 在医疗高温灭菌包装领域, Cu 质量分数为 4.5% 的 $Al-Cu-Mg$ 薄板 (T8 时效态) 在 121 $^{\circ}C$ 的蒸汽循环下仍能保持 0.02 mm/周次的稳定裂纹扩展速率, 显著优于 304 不锈钢 (0.08 mm/周次)。此类案例表明, 通过调控析出相形态与界面特性, $Al-Cu-Mg$ 合金可突破传统包装材料的性能边界, 实现“轻质-高强-耐疲劳”的一体化设计^[8-10]。

2 关键金属元素的优化

$Al-Cu-Mg$ 合金的析出强化行为与 Cu/Mg 原子比存在显著关联, 其强化相种类及形态可通过成分设计精准调控。当 Cu/Mg 原子比在 1.5~4 时, Al_2CuMg 相 (S 相) 为主导强化相, 其高界面共格性和热稳定性 (在 200 $^{\circ}C$ 高温下无明显粗化) 可有效阻碍位错运动; 当 Cu/Mg 原子比在 4~8 时, Al_2Cu (θ 相) 与 Al_2CuMg 相共存, 此时盘状/针状 θ 相通过与位错交互产生 Orowan 强化, 而 S 相则通过钉扎晶界提升抗疲劳裂纹扩展能力; 当 Cu/Mg 原子比高于 8 时, θ 相成为主强化相, 但粗化倾向加剧, 导致疲劳寿命下降^[11-12]。

2.1 Cu 含量及其化合物的合理调控

Cu 是 $Al-Cu-Mg$ 合金中必不可少的核心元素。通过时效处理, $Al-Cu-Mg$ 合金中过量的 Cu 会以 Al_2Cu 析出相的形式存在。细小的析出相可以有效阻碍位错的移动, 从而延缓疲劳裂纹源的诞生, 延长

$Al-Cu-Mg$ 高强度合金的疲劳寿命。例如, C. Lorella 等^[13]发现, Cu 的加入抑制了脆性共晶相的形成, 促进了高热稳定性强化相的析出, 对疲劳裂纹的延缓起到了积极作用。因此, Cu 元素能够通过促进高界面共格性析出物的形成, 增强裂纹扩展路径的复杂性, 从而延缓疲劳裂纹的传播速度。

2.2 Mg 含量及其化合物的合理调控

Mg 不仅可以改变 $Al-Cu-Mg$ 合金中的时效析出过程和时效析出相的种类及数量, 同时也是 Al_2CuMg 相 (即 S 相) 及其亚稳相的组成元素。 Mg 含量的增加会促进 S 相的析出, 能够延缓疲劳裂纹萌生并增强扩展阻力。

Hu P. 等^[14]研究表明, Mg 元素通过调控析出相形态与分布, 显著影响 $Al-Cu-Mg$ 合金的疲劳性能。 Mg 的添加可显著提升 $Al-Cu$ 合金在高温低周疲劳条件下的稳定性。适量添加 Mg 可促进 θ 相细化与致密化, 提升高温下的热稳定性, 抑制循环软化, 增强低周疲劳寿命。如图 1^[14]所示, 当 Mg 含量增加时, 析出相从 θ'' 相逐步演变为 θ' 相, 并使其分布更加均匀细密。Wang J. 等^[15]进一步指出, Mg 含量会影响裂纹扩展路径。低 Mg 含量 (0.7%) 下形成的细小析出相会导致裂纹偏折与分支增多, 进一步增强了扩展阻力; 而高 Mg 含量 (1.15%) 会导致粗大 Al_2Cu 颗粒增多并成为裂纹源, 加速裂纹扩展。这说明 Mg 的含量应控制在优化析出相与微观均匀性的平衡区间内, 以此实现疲劳性能的最优提升。

Cu/Mg 原子比对 $Al-Cu-Mg$ 合金的疲劳性能具有决定性影响。通过合理控制 Cu/Mg 原子比, 不仅可以调控析出相的类型和分布, 还可在材料强化与裂纹

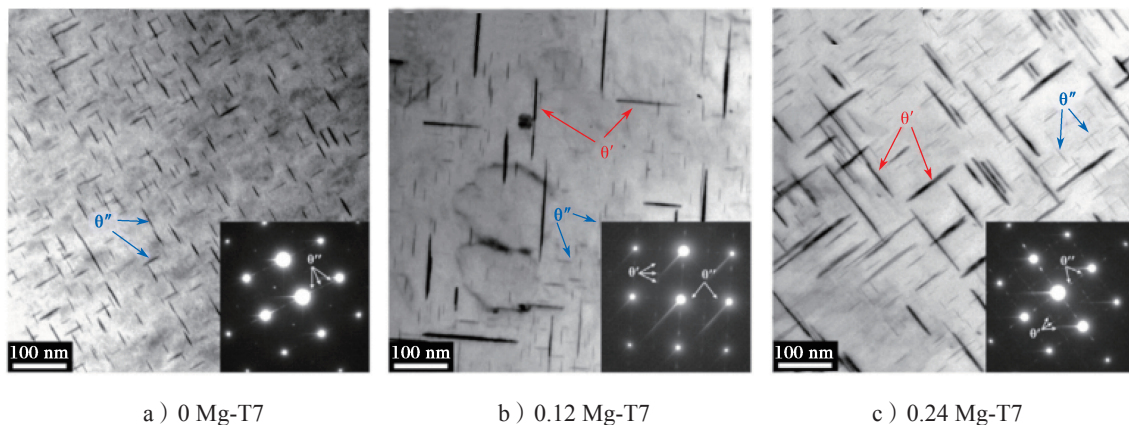


图 1 不同 Mg 含量 T7 时效工艺下的透射电镜显微结构图

Fig. 1 TEM micrographs of microstructures with different Mg contents under T7 aging treatments

扩展控制之间取得优化平衡。近年来的研究进一步表明,多元合金体系中不同元素的协同效应是未来提高疲劳性能的关键方向^[16-20]。

3 疲劳性能优化导向的微观组织结构设计

3.1 晶粒尺寸与晶粒形状的合理设计

3.1.1 细化晶粒

晶粒尺寸通过优化微观结构显著影响合金的疲劳性能,细晶粒结构通过提高位错滑移阻力来提升疲劳性能。晶界作为位错运动的阻碍,能够提高合金的强度和硬度,使材料在疲劳载荷下的变形更加均匀,有效延缓裂纹的产生和扩展。

Liu R. 等^[21]发现, Cu-Al 合金晶粒从 50 μm 细化至 1 μm 时,合金的疲劳强度提高 155%。根据图 2a^[21] 中疲劳强度系数 (σ_f') 和疲劳强度指数 (b) 之间的关系,细晶/超细晶材料具有介于纳米晶材料和粗晶材料之间的 σ_f' 值,但其 b 值与粗晶材料的 b 值接近,这表明随着所施加应力幅度的减小,疲劳寿命呈增加趋势。同时,从疲劳比趋势中也可以得出类似的结论,细晶/超细晶材料的疲劳比远高于粗晶或纳米晶材料,打破了强化会降低疲劳比的常规规律,验证了细化晶粒的抗疲劳优势(见图 2b^[21])。

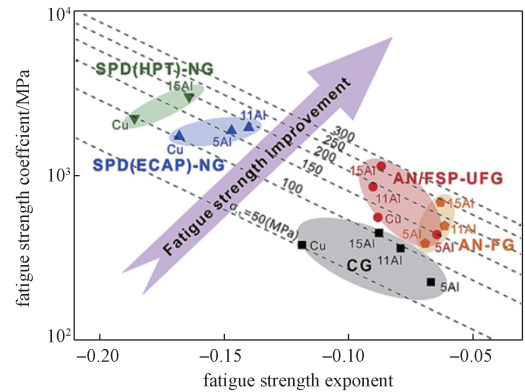
Jin J. W. 等^[22]在 7075 铝合金中进一步证实,晶粒尺寸与疲劳强度呈定量负相关关系,当晶粒尺寸从 53.3 μm 细化至 10.4 μm 时,疲劳强度提高了 5.8 MPa。值得注意的是,疲劳强度系数与晶粒尺寸平方根的倒数呈定量线性关系(见式(1))。

$$\sigma_f' = a \times d^{-0.5} + b, \quad (1)$$

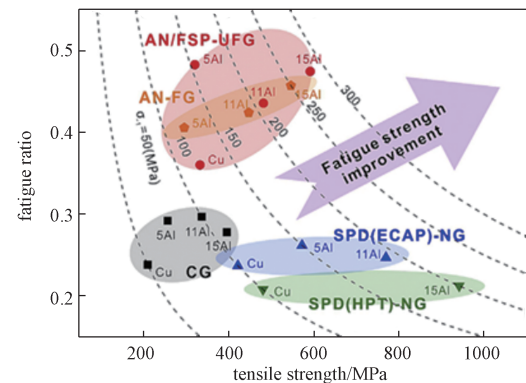
式中: d 是平均晶粒尺寸; a 和 b 都是相关系数,其

相关数值见表 1^[22]。

Shou W. B. 等^[23]指出,晶粒尺寸对 2524-T3 铝合金的疲劳裂纹行为具有显著影响。由图 3^[23]可知,晶粒尺寸在 50~100 μm 范围内,裂纹路径出现明显偏折与闭合现象,增强了扩展阻力。相比之下,细晶材料(尺寸低于 50 μm)的裂纹路径平直,偏折与闭合效应弱,扩展更易发生。



a) 疲劳强度系数与疲劳强度指数的关系图



b) 疲劳比与抗拉强度的关系图

图 2 疲劳参数之间的关系

Fig. 2 Relationships among parameters of fatigue

表 1 关于晶粒尺寸的平方根倒数与疲劳强度的线性关系的统计数据

Table 1 Statistical data on the linear relationship between the reciprocal of the square root of grain size and fatigue strength

material	Cu	Ti	Al	5024Al	Cu-15Al	Cu-5Al	Cu-11Al
coefficient a	946	281	162/241	2095	546	867	475
coefficient b	-328	407	47/36	-865	288	83	230

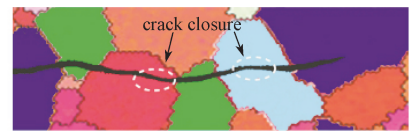
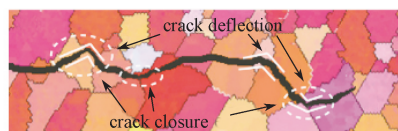


图 3 具有不同晶粒尺寸的三个典型 2524-T3 样品的疲劳裂纹扩展路径

Fig. 3 Illustrations of the fatigue crack propagation paths of three typical 2524-T3 samples with different grain sizes

3.1.2 晶粒分布的合理设计

晶粒尺寸对材料疲劳性能呈双刃剑效应：细晶粒通过 Hall-Petch 强化机制提升抗裂纹萌生能力，但其扩展阻力不足；粗晶粒凭借裂纹闭合效应增强扩展阻力，但也弱化了萌生抗力。双峰晶粒结构则通过“细晶抑制萌生-粗晶阻滞扩展”协同机制实现最优综合性能，相关研究也证明该观点成立。譬如，K. Elvira 等^[24]发现，双峰结构合金的疲劳极限较 T6 态提高了 45%，这是因为疲劳区的动态时效促进了局部强化相的再沉淀；N. Steven 等^[25]在 Al 5083 材料中观察到，裂纹在粗晶区域萌生，并向细晶基体扩展，且模拟结果显示，粗晶粒/超细晶粒界面成为主要扩展路径。这种由结构梯度诱导的裂纹偏折和应力分散，正是延长其疲劳寿命的微观根源。

合理设计晶粒尺寸的细化与分布是提升疲劳性能的有效途径。通过细化晶粒来提高位错滑移阻力，并通过调控双峰结构协调裂纹萌生与扩展过程，是当前优化 Al-Cu-Mg 合金疲劳性能的重要策略。同时，多尺度晶粒分布策略与异质结构调控策略的有效结合，代表了该领域的未来发展方向^[26-28]。

3.2 析出相种类和分布的合理设计

在 Al-Cu-Mg 合金中，析出相的分布、类型和尺寸是决定其疲劳性能的关键因素之一。通过控制合金的析出相，可以显著提高其疲劳寿命和裂纹扩展阻力。析出相分布的优化主要通过不同的热处理方法实现，使材料获得特定的微观组织结构，增强材料的抗疲劳裂纹扩展能力。

3.2.1 析出相的种类

Al-Cu-Mg 合金中的主要析出相有 θ' 相 (Al_2Cu)、 S' 相 (Al_2CuMg) 和 GP 区 (Guinier-Preston zones)，这些析出物在疲劳性能中扮演了重要角色。 θ' 相可阻碍位错运动，增强初期疲劳强度，但在长周期载荷下可能转化为裂纹传播路径。 S' 相通过弥散分布和切割位错机制强化基体，但若集中于晶界，则可能诱发晶界滑移。GP 区虽能提高初期屈服强度，但在高应力下易向稳定相转变，削弱其疲劳贡献。

Liu M. 等^[29]进一步揭示了 Cu-Mg 共团簇在裂纹尖端的动态演化行为。如图 4^[29]所示，2 原子共团簇在移动位错切割后被消除；还能将位错移动到较小团簇的两个部分，以此来切割小团簇和大团簇。这些细小团簇通过降低的界面能与应力场分散效应，提高了裂纹尖端的微观结构稳定性与扩展阻力。

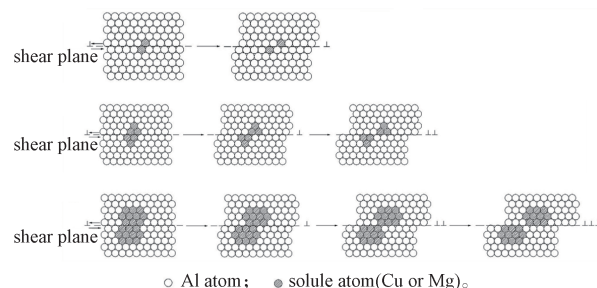


图 4 具有各种 Cu-Mg 共团簇的 FCC 晶格中的 111 平面被运动位错切割的示意图

Fig. 4 The sketch map of a 111 plane in an FCC lattice with various Cu-Mg co-clusters cut by the moving dislocation

3.2.2 析出相的分布

析出相的均匀分布在合金的强化机制中尤为重要。均匀分布的细小 S 相颗粒不仅能够有效提高合金的抗拉强度，还能够在疲劳裂纹扩展过程中提供额外的障碍，延缓裂纹的传播。研究发现，通过优化热处理使析出物在基体中均匀分布，可以显著延长 Al-Cu-Mg 合金的疲劳寿命^[30]。G. Marat 等^[31]发现，在 T6 态中， Ω 相与 θ' 相沿位错线方向呈链状排列，难以有效分散应力，导致裂纹路径直线化、扩展速率加快；而在 T840 态， Ω 相分布更均匀、密度更高，显著诱发裂纹偏折并形成锯齿状路径，有效降低裂纹扩展速率，体现了 Ω 相在应力分散与位错钉扎中的强化作用。

外场调控被证实可进一步优化析出相行为。譬如，Zhou M. Z. 等^[32]引入电场辅助时效处理，促使 S' 相细化与均匀分布，增强了位错钉扎作用，显著降低裂纹扩展速率（见图 5^[32]）。Wen K. 等^[33]也通过调控 Zn/Mg 原子比或施加外场细化析出物并增强分布致密性，提升裂纹扩展阻力。

此外，析出相与基体的界面特性同样重要。高共格性界面可显著提升界面结合强度，抑制裂纹沿相界面扩展。Tan P. 等^[19]指出，优化 Zn/Mg 原子比有助于稳定共格性强化相的生成，是提高合金抗疲劳能力的关键。在疲劳载荷下，析出相可能发生粗化、分解或再析出。Hu P. 等^[14]发现，在含 Mg 改性的 Al-Si-Cu 合金中，析出相在高温低周疲劳下保持良好稳定性，是延长疲劳寿命的核心机制。Guo G. Y. 等^[34]则通过非等温时效精准控制析出演化路径，在低循环疲劳中表现出优异的强化效果。

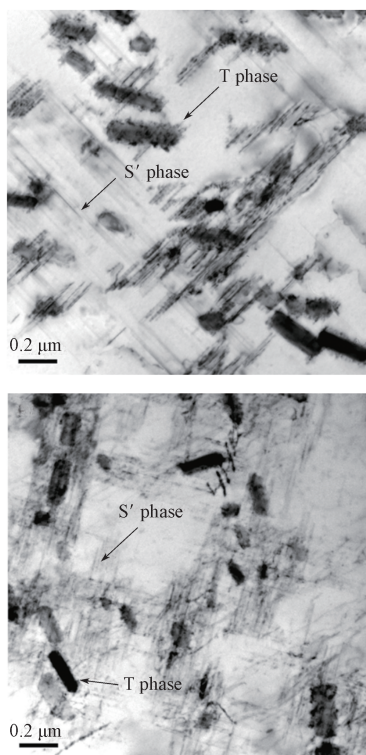


图 5 2524 合金的透射电子显微镜照片

Fig. 5 Transmission electron microscopy micrograph of 2524 alloy

析出相的类型、尺寸与分布对 Al-Cu-Mg 合金疲劳性能具有决定性影响。当前研究表明, 优选 S 相并控制其细化与均匀性, 是实现高疲劳抗力的核心策略。未来, 需探究析出相界面行为与疲劳演化机制的动态耦合规律, 通过协同调控实现抗疲劳合金的精准设计。

3.3 组织种类及分布的合理控制

在 Al-Cu-Mg 合金的疲劳性能研究中, 组织被认为是影响材料疲劳裂纹扩展速率的重要因素之一。Al-Cu-Mg 合金常见的组织类型包括轧制组织、再结晶组织、剪切组织、变形组织以及晶界组织。特定组织的形成可以改变晶粒的取向, 优化材料的抗疲劳裂纹扩展能力。通过控制组织, 材料可以获得更高的疲劳裂纹扩展阻力, 从而延长疲劳寿命。

3.3.1 组织对疲劳裂纹扩展的影响

在 Al-Cu-Mg 合金中, 组织通过调控晶粒取向、滑移系统活跃性及晶界特性, 显著影响疲劳裂纹扩展路径的方向性与复杂性。Copper 和 Brass 组织滑移活跃, 裂纹路径趋于直线化, 扩展阻力较低; P 组织性能介于二者之间; Cube 组织各向同性强, 配合再结晶形成的高角度晶界 (HAGBs) 能有效诱导裂纹偏折,

提高裂纹扩展阻力。强轧制组织则因各向异性显著, 在局部区域易形成裂纹扩展弱点。

Xia P. 等^[35]通过量化 Brass、Goss、Cube 组织的体积分数与晶界特性, 构建了基于晶体学的裂纹偏转模型。该模型引入扭转角 (α) 与倾斜角 (β) 作为晶界裂纹扩展阻力的关键参数, 其中 α 越大, 裂纹越难穿透晶界。该模型指出, 裂纹穿透晶界需破坏边界上形成的楔形区域 (图 6^[35] 中的 A、B 和 C 区域), 其面积与 α 成正比, α 越大表示裂纹扩展阻力越强。实验表明, Goss 和 Cube 组织通过偏折裂纹路径和激活滑移带, 表现出最优的疲劳性能; 而 Brass 组织则因滑移系少, 裂纹平直且闭合弱, 导致最差的疲劳性能。

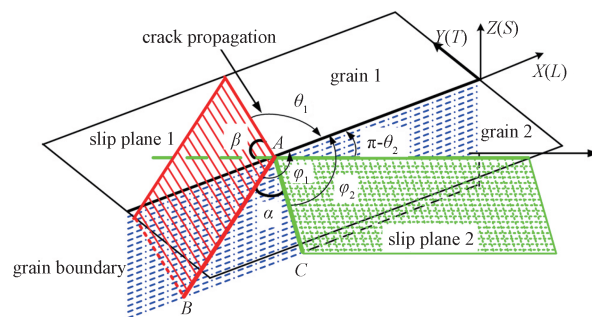
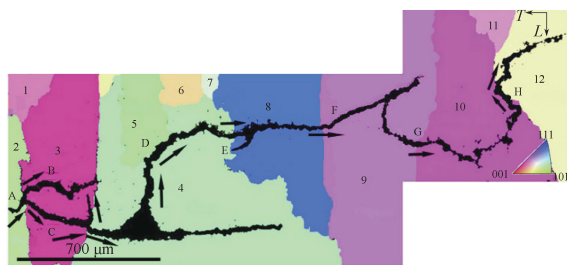


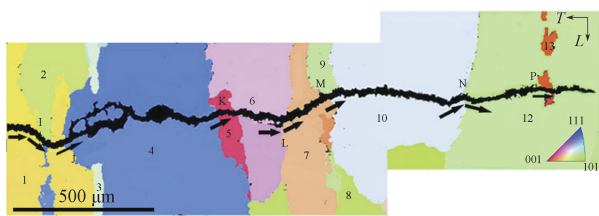
图 6 从晶粒 1 到晶粒 2 的短裂纹扩展的晶体学机制示意图

Fig. 6 Schematic diagram showing the crystallographic mechanism of short crack growth from grain 1 to grain 2

Wu W. T. 等^[36]通过研究发现, 高强度 Goss 组织样品疲劳裂纹扩展阻力最低, 且在电子背散射衍射 (electron backscatter diffraction, EBSD) 图中表现出更显著的裂纹偏折角度, 特别是在 Goss 晶粒边界处形成粗糙断面和裂纹闭合效应, 从而显著提升疲劳抗力。如图 7^[36] 所示, 试样 A 的裂纹在多个 Goss 相关晶粒发生明显偏折, 而试样 B 中 Brass 与 Cube 晶粒区域则无明显偏折, 表明 Goss 组织是裂纹扩展受阻的主要结构来源。



a) 试样 A



b) 试样 B

图 7 疲劳过程中的短裂纹的 EBSD 表征

Fig. 7 The EBSD characterization of short cracks in fatigue process

Shen F. H. 等^[37]发现 Cube 织构因高对称性使裂纹扩展路径平滑, 而 Goss 织构凭借适中的 Schmid 因子 (0.32~0.45) 有效协调晶界变形; Brass 织构则因较低的 Schmid 因子 (0.26~0.35) 和高 Taylor 因子 (3.2~3.6) 诱发锯齿状裂纹扩展及二次裂纹萌生。当 Cube/Brass 强度比 (FCGB) 指数较低时, 裂纹间距增大且二次裂纹增多; 提高 FCGB 指数可使疲劳裂纹间距缩小, 表明表面能消耗增强, 抗疲劳性能提升。

在 Al-Cu-Mg 合金中, 不同织构通过调控晶粒取向、滑移系统活跃性和晶界障碍作用, 影响裂纹扩展

路径的复杂性和方向性。轧制织构和剪切织构使裂纹路径具有明显的方向性, 而再结晶织构和高角度晶界增加了路径的分散性和复杂性。

3.3.2 晶界与织构的协同作用

在 Al-Cu-Mg 合金中, 织构与晶界特性的协同作用对疲劳裂纹扩展行为具有决定性影响。HAGBs 作为有效的扩展障碍, 可诱导裂纹路径偏转、提升裂纹扩展阻力; 而低角度晶界 (LAGBs) 因位错滑移通畅, 裂纹更容易沿界面传播, 其阻碍作用有限。织构类型通过调控 HAGBs 与 LAGBs 的分布比例进一步影响疲劳性能。Shen F. H. 等^[38]通过 FCGB 指数对热轧 Al-Cu-Mg 板材织构演化机制进行量化, 当压下率低于 85% 时, β 纤维织构 (Brass/S/Cu) 主导显微组织, 其连续取向带促进裂纹定向扩展, 降低疲劳抗力; 当压下率提升至 90% 并处于高温 (490 °C) 时, 储能积累触发 β 纤维转变为再结晶织构 (如 Cube、R-Cube), 显著提高 FCGB 指数, 从而增强 Al-Cu-Mg 板材的疲劳性能。如图 8^[38]所示, 样品 A (在 490 °C 下热轧) 在裂纹生长的稳定阶段显示出较高的 FCGB 指数和较低的疲劳裂纹扩展速率。

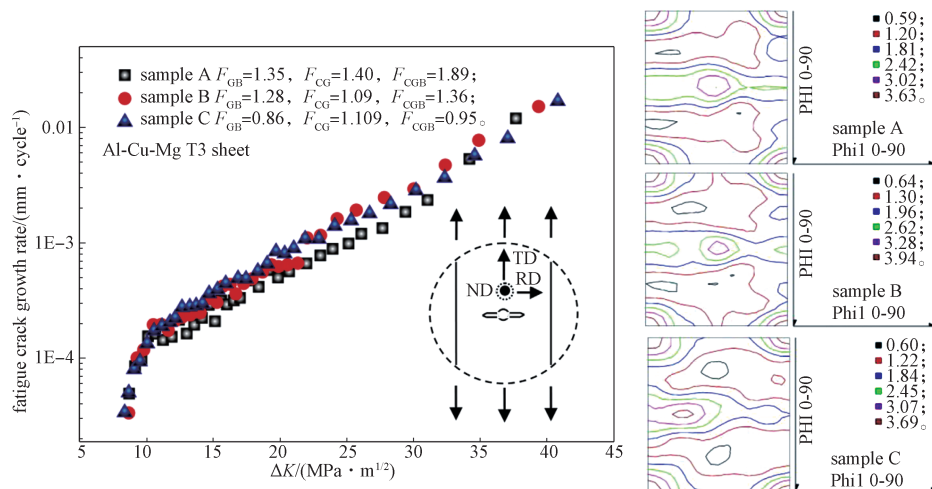


图 8 Al-Cu-Mg T3 薄板试样中应力强度因子与疲劳裂纹扩展速率的函数关系

Fig. 8 Stress intensity factor as a function of FCGB rate in Al-Cu-Mg T3 sheet samples

Yang Y. B. 等^[39]揭示了 Al-Cu-Mg 合金中织构与晶粒尺寸之间存在应变幅依赖竞争机制。在高应变幅 (0.6%~0.9%) 下, 粗晶区通过 Goss/Cube 织构主导延缓裂纹扩展; 而在低应变幅 (0.4%~0.5%) 时, 细晶表层 (弱织构强度) 通过晶界强化机制抑制裂纹萌生, 形成“织构主导-晶界调控”双阶段抗疲劳响应。

综上, 织构与晶界属性共同决定裂纹扩展路径的方向性与复杂性, FCGB 指数与 HAGBs 比例是关键

参数。未来优化疲劳性能的有效策略应包括增加再结晶织构含量、提升 HAGBs 比例、以及抑制定向滑移织构发展, 并通过工艺调控实现织构-晶界结构的精准设计。

3.4 位错的合理控制

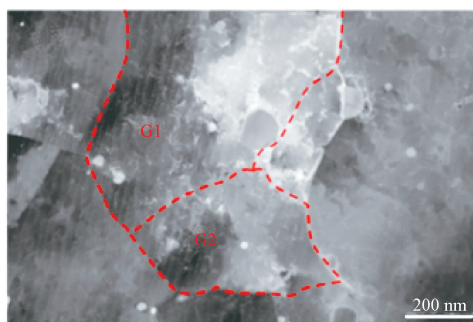
位错行为是调控 Al-Cu-Mg 合金疲劳性能的关键因素。在裂纹萌生阶段, 位错运动引发的局部应力集中成为裂纹形核点, 高应力幅下位错在晶界和第二相

处形成的滑移带与微孔洞显著加速裂纹萌生。在裂纹扩展阶段中, 循环载荷导致的位错重组与密度演变通过影响材料应变硬化效应调控裂纹扩展阻力。合金的疲劳寿命最终由位错密度梯度分布、界面钉扎效应和析出相 / 晶界协同强化机制共同决定。

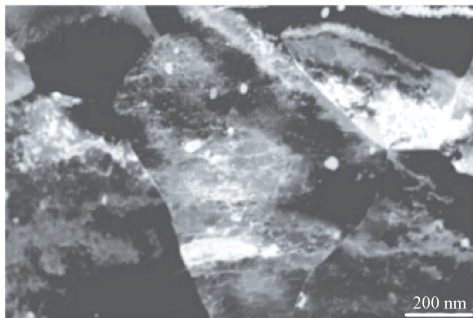
3.4.1 位错对疲劳性能的影响

在疲劳循环过程中, 位错的累积是影响裂纹扩展行为的主要因素之一。位错在晶粒内部与晶界处的堆积和滑移作用会导致不均匀的塑性变形, 这种不均匀性引发了裂纹扩展所需的局部应力集中。在高位错密度区域, 累积的位错会形成塞积区, 阻碍其它位错的进一步运动, 同时也抑制了裂纹的快速扩展, 从而在一定程度上延长合金的疲劳寿命^[40]。

Tian N. 等^[41]通过 7005 铝合金的预应变处理发现, 12% 预应变下样品的位错密度升高且分布更均匀, 疲劳寿命被有效延长至 106 周, 比未变形样品增长 169% (见图 9^[41])。当预应变达到 16% 时, 位错分布转向不均, 形成局部高密度位错胞, 导致裂纹快速萌生与扩展, 疲劳寿命反而下降。此外, Liu R. 等^[42]通过实验揭示了低初始位错密度、细晶组织 (晶粒细化结合高孪晶界密度) 与低堆垛层错能 (Al 合金化诱导平面滑移) 的协同作用, 通过增强循环硬化能力、变形可逆性及微观结构稳定性, 显著降低疲劳损伤累积, 形成基于局部损伤抑制的抗疲劳机制。



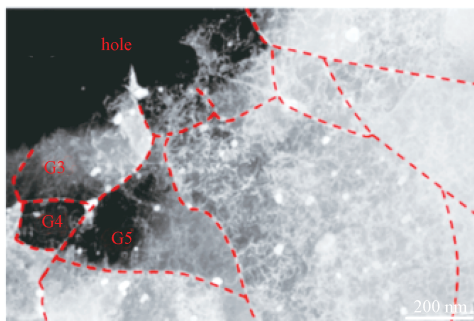
a) 5% 预应变



b) 8% 预应变



c) 12% 预应变



d) 16% 预应变

图 9 合金板在不同预应变变形量下的位错组态

Fig. 9 Dislocation configuration of alloy plate under different pre-strain deformation

位错密度的增加显著提升了 Al-Cu-Mg 合金在低循环疲劳条件下的寿命。高密度位错在疲劳循环中形成了林位错结构, 能够有效分散应力集中, 减少裂纹快速萌生的几率, 进而延长了合金的疲劳寿命。研究表明, 林位错不仅在循环应力下提高了合金的稳定性, 还通过位错缠结结构对裂纹路径形成障碍, 有效提升了疲劳性能^[43]。

3.4.2 析出相与位错的协同强化机制

析出相与位错的协同强化通过“钉扎-硬化-阻裂”多级机制提升材料的疲劳性能。析出相通过 Orowan 机制触发位错强化, 其周围累积位错形成梯度硬化区, 分散应力集中并延缓裂纹萌生。在裂纹扩展阶段, 析出相与位错交互重构局部应力场, 抑制位错滑移并降低裂纹驱动力。优化析出相尺寸分布与协同调控位错密度梯度, 可实现应力场均匀化和损伤容限提升的双重效应。S. Fintová 等^[44]发现析出相通过钉扎位错抑制滑移带形成, 降低应力集中并延缓裂纹萌生, 高频载荷下的低活性位错可提升疲劳极限。

Gong B. S. 等^[45]揭示不同时效状态会显著影响铝合金的疲劳性能。如图 10a^[45]所示, 对于拉伸性能, 与过时效 (OA) 状态相比, 欠时效 (UA) 状态下合

金中的平面滑移位错不太可能被交叉滑移湮灭,有助于提升加工硬化能力,导致更好的强度和塑性。然而,对于疲劳性能(见图 10b^[45]),UA 状态的平面滑移位错容易形成并聚集在晶界处,导致晶界处的严重封装和应力集中,从而促进晶界开裂;而 OA 状态的波滑移位错经常湮灭且聚集在第二相上,并结合宽析出物自由区(PFZ)有效缓解位错堆积损伤,因此形成并聚集在晶界处的位错数量相对较少,从而减少晶界的损坏。

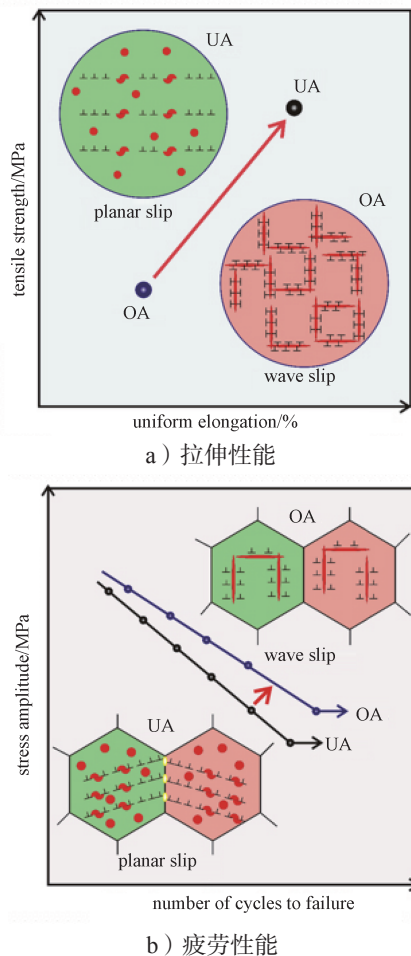


图 10 位错滑移模式对不同性能影响的损伤机制图

Fig. 10 Summary diagram of damage mechanisms influenced by dislocation slip modes on various material properties

在 Al-Cu-Mg 合金中,高位错密度通过双时效处理诱导析出相细化与梯度强化效应,S 相与位错的强交互作用形成协同钉扎网络,显著提升抗裂纹扩展能力^[46],验证了“位错滑移模式-析出相分布-PFZ 协同”的疲劳强度调控机制。此外,在图 11^[47]中展示了高速轧制(HSR)下孪生诱导动态再结晶(TDRX)

机制。HSR 初期生成大量高密度位错孪晶,并形成大量析出相。随着形变进行,位错析出相被限制,形成亚结构。这些亚结构(如位错胞)逐渐演化为 LAGBs,其取向差进一步增大,转变为 HAGBs。最终,在析出物的钉扎作用下,形成稳定的超细晶粒结构。TDRX 则是在 HSR 过程中释放储存的应变能和细化晶粒的关键过程^[47]。

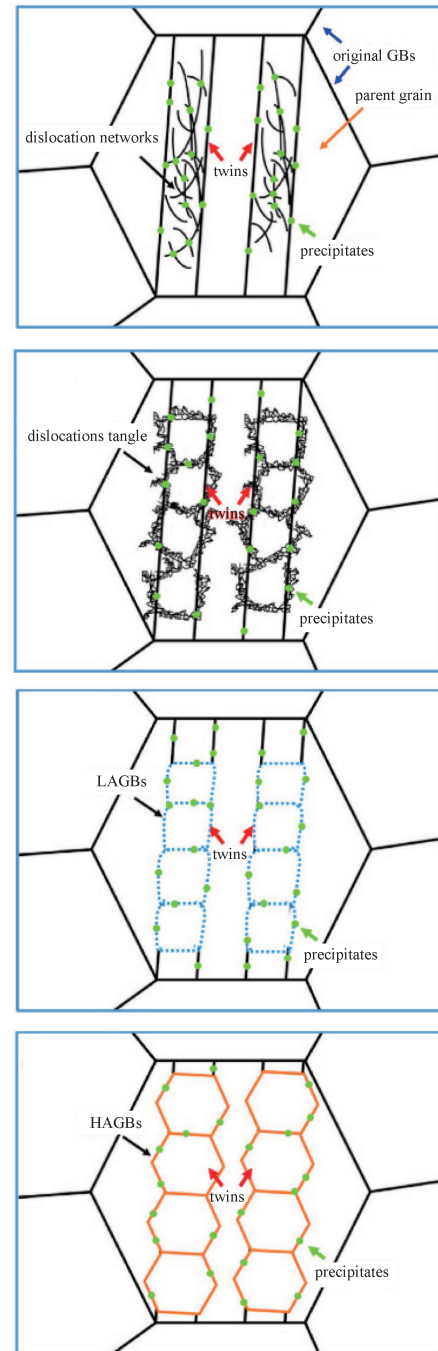


图 11 TDRX 机制示意图

Fig. 11 Diagram of TDRX mechanism

疲劳载荷下位错行为与强化机制的耦合对 Al-Cu-Mg 合金裂纹扩展行为具有决定性作用。合理调控析出相与位错的空间关系、提升位错密度与晶粒尺寸匹配性,并结合多尺度微观组织设计,是构建高疲劳强度铝合金体系的重要方向^[48]。

4 结语

4.1 总结

影响 Al-Cu-Mg 合金疲劳性能的关键因素主要有合金元素、晶粒尺寸与分布、析出相种类与分布、织构与晶界、位错与析出相的综合作用等。通过合理控制上述关键因素,可以有效延长 Al-Cu-Mg 合金的使用寿命。

1) 元素添加及成分优化。Cu 元素通过促进高热稳定性析出相(如 θ' 相)生成,显著提高了高温条件下合金的疲劳强度。Mg 元素则促进了 S 相的形成,增加了合金的硬度和初期疲劳性能,并通过细化晶内析出强化基体、优化晶界相分布增强阻力。优化 Cu/Mg 原子比及微量元素的配比,是提升 Al-Cu-Mg 合金疲劳性能的关键。

2) 微观组织调控。晶粒尺寸和析出相分布在疲劳性能中扮演了重要角色。细晶粒结构通过强化晶界阻力和提高位错滑移难度,有效延缓了疲劳裂纹的萌生与扩展;而双峰晶粒结构结合了细晶与粗晶的优势,展现出更优的综合性能。此外,合金疲劳性能的显著提升,得益于析出相均匀分布和动态演变行为对裂纹路径及应力场的调控与分散作用。

3) 特定织构的存在显著改变了裂纹扩展路径及扩展速率。再结晶织构和高角度晶界提高了裂纹偏折效应及裂纹扩展阻力,而 Brass 织构则因有效滑移系的减少而为裂纹提供了优先扩展通道。

4) 位错在疲劳裂纹的萌生与扩展中起着双重作用:一方面,位错的积聚引发局部应力集中,促进裂纹的形成;另一方面,高密度位错可构建塞积区并通过滑移干扰机制延缓裂纹扩展。此外,析出相通过 Orowan 机制钉扎位错,进一步提升局部硬化能力,构建“析出-位错”多重阻力网络。

4.2 未来研究展望

尽管 Al-Cu-Mg 合金疲劳性能研究取得了系列成就,但仍有新方法新技术值得我们进行更深入的探索。因此,未来研究应聚焦于通过多尺度协同设计与智能化调控,系统化地提升 Al-Cu-Mg 合金的疲劳性

能,从成分优化、微观结构调控和智能化监控方面探索新路径。

1) 成分设计与智能化调控。利用机器学习和高通量计算优化 Cu/Mg 原子配比及微量添加元素(如 Ag、Zn、Sc),精准调控析出相(S 相、 θ 相),并通过增材制造实现梯度成分设计,抑制裂纹萌生。

2) 纳米尺度析出相调控与缺陷工程。构建“纳米 S 相和亚微米 θ 相”双模态析出结构,结合碳纳米管或石墨烯增强界面强度,通过剧烈塑性变形优化晶界结构,抑制疲劳裂纹萌生。

3) 先进制造与智能化监控。采用增材制造-时效一体化工艺消除缺陷,嵌入微型传感器实时监测疲劳损伤,结合仿生结构(如贝壳珍珠层)和自修复涂层,提升疲劳性能并实现动态预警。

参考文献:

- [1] 胡泽艺, 范才河, 刘文良, 等. 快速冷冲及再结晶退火对 Al-Cu-Mg 合金微观组织和力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(10): 2306-2315.
- [2] FAN C, OU L, HU Z, et al. Effect of Rapid Cold Stamping on Fracture Behavior of Long Strip S' Phase in Al-Cu-Mg Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(10): 2590-2598.
- [3] SHEN T, FAN C H, HU Z Y, et al. Effect of Strain Rate on Microstructure and Mechanical Properties of Spray-Formed Al-Cu-Mg Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(4): 1096-1104.
- [4] 刘 梦, 秦梦黎, 柏 松, 等. 原子团簇尺寸对 Al-Cu-Mg 合金疲劳过程中滑移带形成及裂纹扩展行为的影响 [J]. 有色金属科学与工程, 2023, 14(4): 501-510.
- [5] 梁 浩, 刘鹏涛, 白雪飘, 等. 超声滚压对 2024-T3 铝合金表面完整性及疲劳性能的影响 [J]. 表面技术, 2025, 54(13): 184-192.
- [6] 陈圆圆. 2xxx 航空铝合金的疲劳与断裂行为研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [7] 殷海标, 姚卫星, 付定昆. 两种 SLM 制造铝合金超高周疲劳性能研究 [J/OL]. 航空工程进展, 2024: 1-7 [2024-07-02]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1479.V.20240701.1017.002.html>.
- [8] 范海洋, 汪翀昊. 钛/钢多材料增材制造研究进展 [J]. 包装学报, 2025, 17(1): 1-11.
- [9] 吴 琴, 吕华钦, 范才河, 等. 高 Zn 含量 Al-Zn-

- Mg-Cu 系合金的热处理技术研究综述 [J]. 包装学报, 2024, 16(5): 72–82.
- [10] 阳建君, 王家虎, 范才河, 等. 铝合金弹壳的发展历史和研究现状 [J]. 包装学报, 2023, 15(2): 69–77.
- [11] 刘海平. Ag、Cu、Mg 对 Al-Cu-Mg-Ag 合金组织与时效硬化行为的影响 [D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2015.
- [12] 沈 彤. 大塑性变形喷射成形 Al-Cu-Mg 合金组织演变和力学性能研究 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2021.
- [13] CESCHINI L, MESSIERI S, MORRI A, et al. Effect of Cu Addition on Overaging Behaviour, Room and High Temperature Tensile and Fatigue Properties of A357 Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(11): 2861–2878.
- [14] HU P, LIU K, PAN L, et al. Effect of Mg on Elevated-Temperature Low Cycle Fatigue and Thermo-Mechanical Fatigue Behaviors of Al-Cu Cast Alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 885: 145588.
- [15] WANG J, LIU Z Y, BAI S, et al. Microstructure and Three-Point Bending Fatigue Behavior of Al-Cu-Mg-Ag Alloys with Various Mg Contents[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(11): 6614–6625.
- [16] WEN K, XIONG B Q, ZHOU H, et al. Enlarged Zn, Mg Contents with a Same Zn/Mg Ratio Improve Fatigue Crack Propagation Resistance of Al-Zn-Mg-Cu Alloys with T7651 State[J]. Materials Science Forum, 2020, 1003: 3–10.
- [17] ZHOU W, HUO Q H, WANG C Y, et al. Effects of Texture Component, Dislocation Evolution and Precipitation on the Creep Resistance of T5-Treated Al-Mg-Si Alloy with Different Cu Contents[J]. Materials Characterization, 2022, 189: 111981.
- [18] YANG H B, LIU Y T, LI Y, et al. Influence of Cu/Mg Ratio and Content on Heat-Resistance of Al-Cu-Mg Alloys[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 29: 1040–1051.
- [19] TAN P, QIN J, QUAN X, et al. Co-Strengthening of the Multi-Phase Precipitation in High-Strength and Toughness Cast Al-Cu-Zn-Mg Alloy via Changing Zn/Mg Ratios[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 873: 145024.
- [20] PAN D C, PAN Q L, YU Q B, et al. Microstructure and Fatigue Behavior of MIG-Welded Joints of 6005A Aluminum Alloy with Trace Amounts of Scandium[J]. Materials Characterization, 2022, 194: 112482.
- [21] LIU R, TIAN Y Z, ZHANG Z J, et al. Exploring the Fatigue Strength Improvement of Cu-Al Alloys[J]. Acta Materialia, 2018, 144: 613–626.
- [22] JIN J W, ZHANG Z J, HOU J P, et al. Influence of Microstructure Characteristics on the Fatigue Properties of 7075 Aluminum Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 912: 146976.
- [23] SHOU W B, YI D Q, LIU H Q, et al. Effect of Grain Size on the Fatigue Crack Growth Behavior of 2524-T3 Aluminum Alloy[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2016, 16(3): 304–312.
- [24] KHAFIZOVA E, ISLAMGALIEV R, SITDIKOV V. Strength and Fatigue of an Ultrafine-Grained Al-Cu-Mg Alloy[J]. MATEC Web of Conferences, 2017, 129: 02039.
- [25] NELSON S, LADANI L, TOPPING T, et al. Fatigue and Monotonic Loading Crack Nucleation and Propagation in Bimodal Grain Size Aluminum Alloy[J]. Acta Materialia, 2011, 59(9): 3550–3570.
- [26] LI Y Y, ZHAO G Q, SUN L, et al. Texture Evolution Induced by Extrusion Parameters and Its Effect on Strengthening-Toughening Mechanisms of Al-Mg-Si-Cu-Mn Alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 916: 147377.
- [27] WU M D, XIAO D H, YUAN S, et al. Revealing the Role of Heterogeneous Microstructure on Fatigue Crack Propagation Behaviors in T74 Al-Zn-Mg-Cu Alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2025, 926: 147971.
- [28] YANG B C, CHEN S F, SONG H W, et al. Effects of Microstructure Coarsening and Casting Pores on the Tensile and Fatigue Properties of Cast A356-T6 Aluminum Alloy: A Comparative Investigation[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 857: 144106.
- [29] LIU M, LIU Z Y, BAI S, et al. Analysis on the Dissolution Behavior of Various Size Cu-Mg Co-Clusters Near a Fatigue Crack Tip of Underaged Al-Cu-Mg Alloy During Cyclic Loading[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 699: 119–125.
- [30] WANG J, LIU Z Y, BAI S, et al. Microstructure and Three-Point Bending Fatigue Behavior of Al-Cu-Mg-Ag Alloys with Various Mg Contents[J]. Journal of Materials

- Engineering and Performance, 2019, 28(11): 6614–6625.
- [31] GAZIZOV M, KAIBYSHEV R. High Cyclic Fatigue Performance of Al-Cu-Mg-Ag Alloy Under T6 and T840 Conditions[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(6): 1215–1223.
- [32] ZHOU M Z, YI D Q, LIU H Q, et al. Enhanced Fatigue Crack Propagation Resistance of an Al-Cu-Mg Alloy by Artificial Aging Under Influence of Electrical Field[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(16/17): 4070–4075.
- [33] WEN K, XIONG B Q, ZHANG Y A, et al. Measurement and Theoretical Calculation Confirm the Improvement of T7651 Aging State Influenced Precipitation Characteristics on Fatigue Crack Propagation Resistance in an Al-Zn-Mg-Cu Alloy[J]. Metals and Materials International, 2021, 27(5): 779–795.
- [34] GUO G Y, XU G F, TANG Y, et al. On the Low Cycle Fatigue Behaviour of an Al-Zn-Mg-Cu Alloy Processed via Non-Isothermal Ageing[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 168: 227–238.
- [35] XIA P, LIU Z Y, WU W T, et al. Texture Effect on Fatigue Crack Propagation Behavior in Annealed Sheets of an Al-Cu-Mg Alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(9): 4693–4702.
- [36] WU W T, LIU Z Y, HU Y C, et al. Goss Texture Intensity Effect on Fatigue Crack Propagation Resistance in an Al-Cu-Mg Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 730: 318–326.
- [37] SHEN F H, YI D Q, JIANG Y, et al. Semi-Quantitative Evaluation of Texture Components and Fatigue Properties in 2524 T3 Aluminum Alloy Sheets[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 657: 15–25.
- [38] SHEN F H, SUN Z Z, LI W F, et al. Texture Evolution in Hot-Rolled Al-Cu-Mg Sheets Using Orientation Streamline Approach and Texture Index[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 816: 152415.
- [39] YANG Y B, CHEN J, GAO L X, et al. Low-Cycle Fatigue Behaviour of Extruded 7075 Aluminium Alloy Bar: Competition of Grain Sizes and Textures[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 897: 146258.
- [40] ZHANG M X, LI J, SONG H W, et al. Comparative Study on the Fatigue Properties and Dislocation Evolution of Three Kinds of Aluminum Alloys[J]. International Journal of Fatigue, 2024, 178: 108001.
- [41] TIAN N, ZHANG Y Z, ZHANG Z S, et al. Dislocation Configuration on the Fatigue Fracture Behavior of a Solution-Treated 7005 Aluminum Alloy Plate[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 901: 146571.
- [42] LIU R, TIAN Y Z, ZHANG Z J, et al. Exploring the Fatigue Strength Improvement of Cu-Al Alloys[J]. Acta Materialia, 2018, 144: 613–626.
- [43] HEMCHUZHNIKOVA D, MIRONOV S, KAIBYSHEV R. Fatigue Performance of Friction-Stir-Welded Al-Mg-Sc Alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2017, 48(1): 150–158.
- [44] FINTOVÁ S, KUBĚNA I, TRŠKO L, et al. Fatigue Behavior of AW7075 Aluminum Alloy in Ultra-High Cycle Fatigue Region[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 774: 138922.
- [45] GONG B S, ZHANG Z J, QU Z, et al. Effect of Aging State on Fatigue Property of Wrought Aluminum Alloys[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 156: 106682.
- [46] SONG Y F, DING X F, XIAO L R, et al. Effects of Two-Stage Aging on the Dimensional Stability of Al-Cu-Mg Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 701: 508–514.
- [47] PEI D, YAN T L, WANG L, et al. Dynamic Precipitation and Twinning-Induced Dynamic Recrystallization in Mg-6Al-3Sn-1Zn Alloy During Multi-Pass High-Speed Rolling[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30: 2200–2210.
- [48] CHEN Z G, REN J K, YUAN Z G, et al. Enhanced Strength-Plasticity Combination in an Al-Cu-Mg Alloy: Atomic Scale Microstructure Regulation and Strengthening Mechanisms[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 787: 139447.

(责任编辑: 李 涛)

Discussion on Key Influencing Factors of Fatigue Properties of Al-Cu-Mg Alloys

WU Qin, WU Handong, LIU Wei, WANG Xiang, CHEN Yiran, CHEN Guoxiang,
FAN Caihe, ZHANG Yingzhe

(School of Materials Science and Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Al-Cu-Mg aluminum alloys have been widely used in structural components due to their excellent mechanical properties, fatigue resistance, and processability. This review focuses on the optimization of fatigue performance in Al-Cu-Mg alloys and systematically summarizes the effects of key factors including elemental composition control, microstructural control, precipitate behavior, texture evolution, and dislocation regulation. Studies reveal that optimizing the Cu/Mg atomic ratio can tailor precipitate distributions and improve crack initiation resistance. Fine-grained microstructures enhance grain boundary strengthening and impede dislocation slip, thereby significantly retarding crack propagation. The combination of favorable texture types and high-angle grain boundaries can deflect crack paths and suppress straight-line crack growth. Moreover, the synergistic interaction between precipitates and dislocations is identified as a critical mechanism for enhancing fatigue life. Future developments should integrate high-throughput alloy design, nano-precipitate engineering, and intelligent monitoring technologies to promote the widespread engineering application of these alloys.

Keywords: Al-Cu-Mg alloy; fatigue performance; precipitate phase; texture evolution; dislocation strengthening

.....
(上接第 81 页)

Study on Compressive Creep Behavior of Corrugated Cartons Based on Fractional Viscoelastic Constitutive Model

LI Bowen, YIN Haomin, LIAO Guangkai, YUAN Zhengkun,
LI Bin, LI Yuankang, WEN Yuhang, LIU Yuejun

(School of Packaging Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: The compressive creep behavior of corrugated cartons was studied by indoor experiment combined with theoretical analysis. The compressive stacking creep experiment of corrugated cartons was conducted using a carton compression experiment machine. The compressive strength of the corrugated cartons, the crushing time under a specified pressure, and the compressive strength after creep for 30 minutes were measured. The experimental data were fitted and analyzed using the generalized fractional Kelvin (GFK) model, and based on the fitting results, the delay spectrum($L(\tau)$) of corrugated cartons was further investigated. The results show that under the same holding time, the greater the pressure maintained on the corrugated cartons, the greater the deformation, and the shorter the time they will be crushed. In addition, by comparing the creep experimental data with the theoretical calculation data, it was found that the 5-unit Kelvin body GFK model can accurately describe the creep behavior of corrugated cartons, theoretically revealing the changes in structural properties during the creep process.

Keywords: corrugated carton; compressive creep; generalized fractional kelvin model