

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.002

基于晶体塑性与内聚力准则耦合的含孔铝合金断裂行为研究

陶玉杰^{a,b}, 董淑宏^{a,b}

(江南大学 a. 机械工程学院; b. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘 要: 由于制造与加工工艺的局限, 金属材料中不可避免存在孔洞缺陷, 其将对材料力学行为产生显著影响。基于晶体塑性及内聚力准则, 通过实验研究孔洞对含单边裂纹铝合金板断裂性能的影响。通过铝合金标准试件单轴拉伸实验, 确定晶体塑性模拟与内聚力准则所需主要参数; 根据断面微观形貌建立含孔洞铝合金板的晶体塑性有限元模型; 探讨孔洞分布范围及尺寸对预制裂纹扩展路径的作用, 揭示微孔洞对铝合金拉伸断裂行为影响的机制。研究工作有助于理解裂纹和孔洞耦合作用下的金属板损伤行为。

关键词: 晶体塑性有限元; 内聚力模型; 断裂行为; 微孔洞; 裂纹

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)04-0011-04

Research on Fracture Behavior of Porous Aluminum Alloy Based on
Coupled Crystal Plasticity and Cohesive Zone ModelTao Yujie^{a,b}, Dong Shuhong^{a,b}(a. School of Mechanical Engineering; b. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing
Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Due to limitations in manufacturing and processing techniques, defects such as microvoids are inevitably present in metal materials and can significantly affect their mechanical behavior. In this paper, based on crystal plasticity theory and the cohesive zone model, the influence of microvoids on the fracture performance of aluminum alloy plates with single-edge cracks is investigated experimentally. Uniaxial tensile tests on standard aluminum alloy specimens are conducted to determine the key parameters required for the crystal plasticity simulation and the cohesive zone model. A crystal plasticity finite element model of the aluminum alloy plate containing holes is established based on the microscopic morphology of the fracture surface. Finally, The effects of the distribution range and size of holes on the propagation path of the prefabricated crack are explored, revealing the mechanism by which micro-holes influence the tensile fracture behavior of the aluminum alloy. This study contributes to the understanding of the damage behavior of metal plates under the coupled action of cracks and holes.

Keywords: crystal plasticity finite element; cohesive zone model; fracture behavior; microvoids; crack

0 引言

孔洞成核、生长和凝聚是铝合金主要韧性失效模式之一, 这对铝合金的力学性能有显著影响。实验中观察到孔洞可以分布在晶间或晶内^[1], 其中以晶界附近的孔洞为主^[2]。孔洞的存在为铝合金断裂行为带来了极大的不确定性。

目前, 基于晶体塑性的介尺度模型因具有准确描述晶粒变形行为的能力, 常被应用于预测金属材料的宏观微观断裂行为^[3-4]。孙昂等^[5]采用晶体塑性有限元方法模拟微形管件的拉伸试验, 这为后续微形管件液压成型工艺的数值模拟提供材料参数, 具有重要的工程意义。畅一鹏等^[6]基

于晶体塑性滑移理论建立了 IC10 合金的本构模型, 有效预测了 IC10 合金在不同载荷作用下的高温力学行为。此外, 内聚力模型也常被用于研究金属在宏观微观尺度上的断裂行为^[7-8]。黄红梅等^[9]基于双线性内聚力模型研究了含初始裂纹的轮盘中裂纹的扩展过程, 并预测了轮盘的破裂转速。Sun 等^[10]提出了基于晶体塑性和内聚力模型的组合计算框架, 将晶体塑性获取的累计塑性切应变引入内聚力模型中作为裂纹萌生演化判断准则, 以此模拟超高周疲劳载荷作用下裂纹萌生和扩展过程。

本研究基于晶体塑性结合内聚力模型进一步探究孔洞缺陷对含裂纹铝合金板拉伸断裂行为的

基金项目: 航空航天结构力学及控制国家重点实验室开放课题 (MCMS-E-0123Y03)

第一作者简介: 陶玉杰 (1998—), 男, 江苏无锡人, 硕士研究生, 研究方向为现代机械设计与制造, 550081535@qq.com。

影响。首先,通过对试件拉伸实验结果与晶体塑性有限元模拟结果进行多次参数拟合,得到了铝合金的主要晶体塑性参数及内聚力模型参数。其次,通过构建含不同孔洞的多晶模型,研究孔洞尺寸及分布对铝合金预制裂纹扩展路径及断裂行为的影响。

1 材料及实验

为了准确利用晶体塑性有限元方法预测材料断裂行为,需要对所建立有限元模型进行实验验证。实验所选用的材料为 1060 铝合金。按照国标 GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》将厚度为 2 mm 铝合金板切割成标准拉伸试件。准静态单轴拉伸实验在 MTS Landmark 370.10 试验机上进行,如图 1 所示。加载速度为 2 mm/min,利用常温引伸计测量拉伸时试样应变。

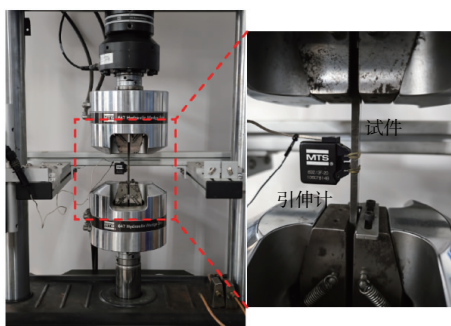


图 1 铝合金板单轴拉伸实验

2 建模及参数确定

本研究利用 Voronoi 多边形首先建立了不含孔洞的二维有限元多晶模型。模型长 l 和宽 w 分别为 0.2 mm 和 0.15 mm,含有 80 个晶粒,如图 2(a) 所示。模型晶粒间插入零厚度内聚力单元,用于对晶界施加牵引-分离(T-S)定律,如图 2(b) 所示。同时,采用双线性内聚力模型描述晶界的损伤演化。模型中的晶粒被随机赋予了晶粒取向。晶粒单元和内聚力单元的网格类型分别为 CPE3 和 COH2D4。

将基于图 2(a)、图 2(b) 模型的模拟结果与单轴拉伸试验所获得的应力应变曲线进行拟合,结果如图 3 所示。经过多次重复拟合,确定了晶体塑性与内聚力模型所需的弹性、塑性与界面等主要参数,具体参数如表 1 所示。

此外,利用扫描电子显微镜获得了试样断口的微观形貌,如图 2(c) 所示。可以明显看到试样断

口截面存在孔洞缺陷。基于实验观测,在图 2(a) 基础上进一步建立含孔洞的多晶铝合金模型,如图 2(d) 所示,以用于进一步研究裂纹与孔洞相互作用对铝合金断裂行为的影响。

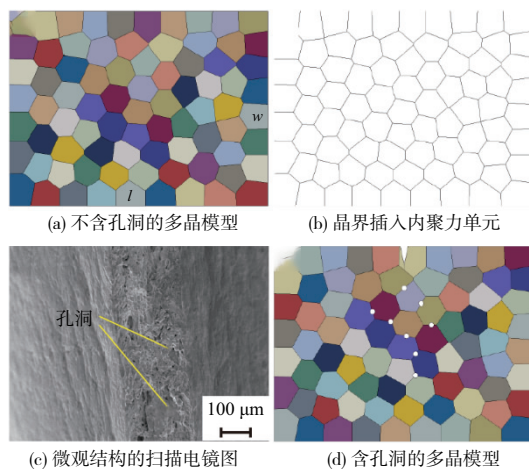


图 2 多晶模型示意图

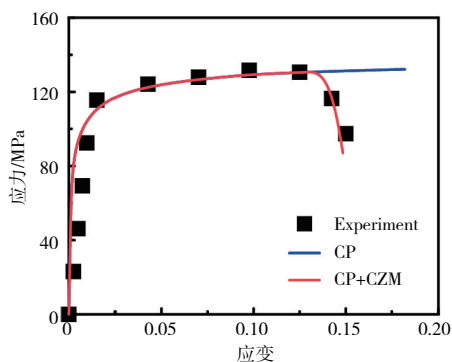


图 3 实验与模拟获取的铝合金板应力-应变曲线

表 1 实验拟合确定的晶体塑性与内聚力的主要参数

参数	数值
C_{11}/GPa	106.75
C_{12}/GPa	60.41
C_{44}/GPa	28.34
h_0/MPa	60.00
τ_s/MPa	24.15
τ_0/MPa	20.00
E/MPa	42 000
T/MPa	220
δ_t/mm	0.000 12

3 结果与讨论

3.1 孔洞位置影响

为了探究初始孔洞位置对铝合金拉伸断裂行

为的影响,选择了5处不同位置布设孔洞,分别处于水平、垂直、三晶交界处,此时,孔洞直径 d 取 $1\mu\text{m}$ 。由于在本文研究中预置初始裂纹倾向于向右侧扩展,因此考虑在裂纹左侧设置孔洞。同时建立无孔洞模型,对6种模型赋予相同的晶粒取向,且施加相同的边界条件。其模拟应力云图如图4所示,图4(a)无孔洞,图4(b)—图4(f)中虚线为孔洞分布范围。应力应变曲线如图5所示。

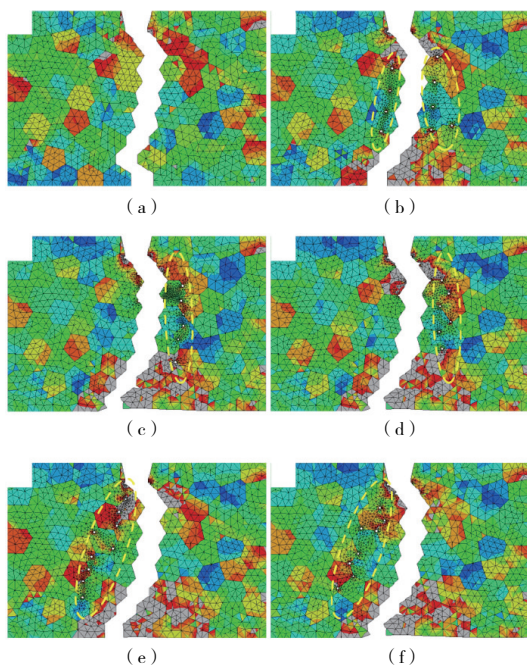


图4 含不同位置孔洞缺陷的晶体塑性模型

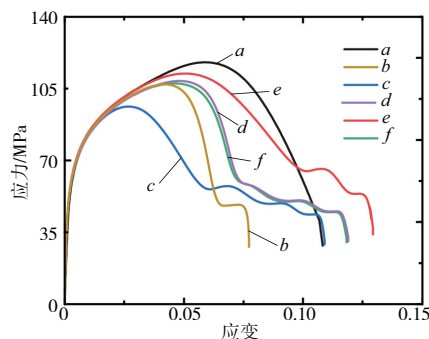


图5 不同孔洞位置的应力应变曲线

结合应力云图与曲线图发现,孔洞都将降低铝合金板抗拉强度。然而,当孔洞位置如图4(d)—图4(f)时,铝合金抗拉强度降低,但塑性变形增加,延展性能得到了改善。尤其当孔洞位置如图4(e)时,铝合金抗拉强度只有小幅度下降,但延展性却得到了一定程度改善,如图5中曲线e所示。此时孔洞缺陷与裂纹扩展方向相反,铝合金延展性能得到了明显改善。同时,相较于不含孔洞的情

况,铝合金极限强度没有大幅度衰减。原因是孔洞使得裂纹尖端应力向水平晶界处或区别于裂纹扩展方向的另一方向的晶界处分散,使铝合金所受应力更加平均,增加了铝合金整体塑性变形,改善了延展性。

3.2 孔洞尺寸影响

为了探究不同初始孔洞尺寸对晶间裂纹的影响,同时针对3.1节中孔洞缺陷分布位置与裂纹扩展方向相反时,铝合金能够获得较好延展性能情况,对此将进一步进行详细研究。

将孔洞直径 d 分别设置为 $1\mu\text{m}$ 、 $2\mu\text{m}$ 和 $3\mu\text{m}$,其模拟结果如图6所示。从图中可以发现,相较于无孔洞情况,当孔洞直径 d 为 $1\mu\text{m}$ 时,铝合金裂纹扩展路径并没有发生较大改变,但断裂后铝合金整体应力较大,应力集中现象显著;但当孔洞直径 d 增大到 $2\mu\text{m}$ 后,铝合金裂纹扩展路径发生明显改变,且应力集中更加显著;当孔洞直径 d 进一步增大到 $3\mu\text{m}$ 后,铝合金整体应力水平却下降了。

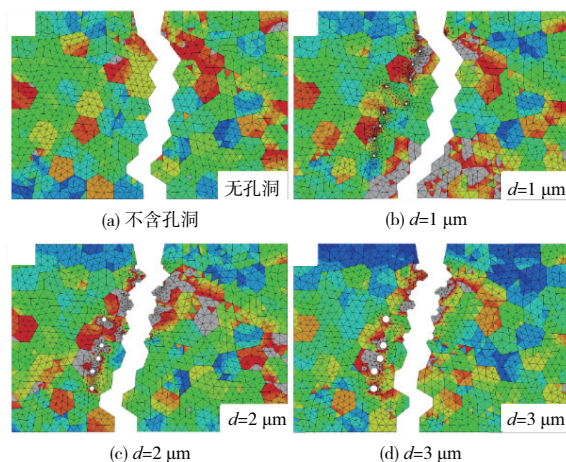


图6 不同孔洞直径 d 的晶体塑性模型

提取模拟得到的平均应力应变曲线,如图7所示。当孔洞直径 d 为 $2\mu\text{m}$ 时,铝合金拉伸强度大幅提升,延展性同步改善,而当 d 进一步增大时,铝合金抗拉强度和延展性均有所降低。当孔洞直径 d 为 $1\mu\text{m}$ 时,孔洞缺陷导致裂纹尖端钝化,减缓了裂纹扩展速度。随着孔洞尺寸进一步加大,预置裂纹左右两侧均出现裂纹扩展趋势,两条裂纹存在竞争关系。因此,单一界面所受到应力减小,使铝合金抗拉强度进一步提升。当孔洞直径 d 增加至 $3\mu\text{m}$ 时,初始裂纹左侧界面强度被孔洞极大削弱,导致铝合金抗拉强度下降,延展性能大幅度劣化。

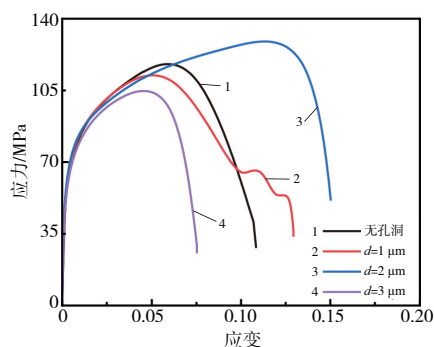
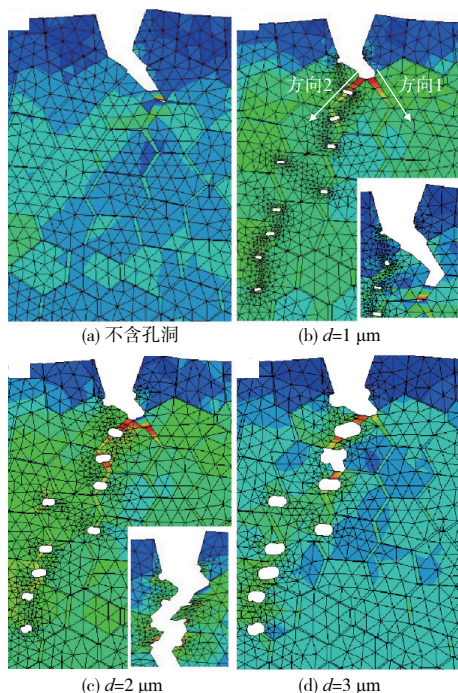


图7 不同孔洞直径时应力应变曲线

提取图6中模型裂纹扩展阶段的应力云图,如图8所示。从图中可以看出,当不含孔洞时,裂纹只向方向1扩展;当 d 为 $1\mu\text{m}$ 时,裂纹尖端有两个方向扩展的趋势,但方向1应力率先达到晶界所能承受范围,裂纹沿方向1扩展;当 d 为 $2\mu\text{m}$ 时,裂纹尖端向两个方向扩展,且两个方向应力大小相似,形成竞争关系,单一方向上裂纹扩展速率放缓。最终裂纹沿方向2扩展,裂纹路径发生偏折,能够在一定程度上增强铝合金抗拉强度并改善了延展性能;当 d 为 $3\mu\text{m}$ 时,方向2的界面强度远小于方向1的界面强度,裂纹沿方向2扩展。

图8 不同孔洞直径 d 时裂纹扩展应力云图

4 结语

本文通过晶体塑性有限元模拟描述铝合金材料弹塑性变形,采用双线性内聚力模型分析晶界

的损伤演化,得到以下结论:

1)利用基于晶体塑性结合内聚力模型方法,探讨了孔洞位置与尺寸对铝合金晶界断裂行为影响。结果表明:孔洞缺陷使裂纹尖端应力向水平晶界处或另一方向的晶界处分散,使铝合金整体受力更加平均,增加了铝合金整体塑性变形,延展性能得到改善。

2)裂纹尖端存在孔洞缺陷会成为裂纹新扩展方向,两个裂纹扩展方向存在竞争机制,减慢了裂纹扩展速率,在一定程度上提升了铝合金的抗拉强度并改善了其延展性能。

参考文献:

- [1] S  nac C, Hure J, Tanguy B. Void growth yield criteria for intergranular ductile fracture [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2023, 172: 105167.
- [2] Yal  inkaya T, Tando  an i T,   zdemir i. Void growth based inter-granular ductile fracture in strain gradient polycrystalline plasticity [J]. International Journal of Plasticity, 2021, 147: 103123.
- [3] 章海明,徐帅,李倩,等. 晶体塑性理论及模拟研究进展[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(5): 12-32.
- [4] Zhang Z F, Wang W H, Jiang R, et al. Tensile behavior of single-crystal superalloy with different structured cooling holes [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 229: 107514.
- [5] 孙昂,谢政龙,陈斌,等. 微型管拉伸过程的晶体塑性有限元模拟及材料参数拟合[J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(2): 123-125.
- [6] 畅一鹏,张宏建,卢孔汉,等. 镍基高温合金 IC10 的本构模型研究[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(4): 105-108.
- [7] Zhao Q, Abdel Wahab M, Ling Y, et al. Fatigue crack propagation within Al-Cu-Mg single crystals based on crystal plasticity and XFEM combined with cohesive zone model [J]. Materials & Design, 2021, 210: 110015.
- [8] Zhao Q, Abdel Wahab M, Ling Y, et al. Fatigue crack propagation across grain boundary of Al-Cu-Mg bicrystal based on crystal plasticity XFEM and cohesive zone model [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 126: 275-287.
- [9] 黄红梅,赵凯,贾文斌,等. 基于内聚力模型的轮盘破裂转速预测方法研究[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(1): 147-151.
- [10] Sun J Y, Qian G A, Li J H, et al. A framework to simulate the crack initiation and propagation in very-high-cycle fatigue of an additively manufactured AlSi₁₀Mg alloy [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2023, 175: 105293.

收稿日期:2024-04-01