

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.014

考虑缺陷影响的 YL113 铝合金疲劳寿命研究

吕浩

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要:通过开展 YL113 铝合金的应力疲劳试验,研究材料内部微观孔洞对材料疲劳寿命的影响。结果表明:微观孔洞在材料的疲劳寿命上具有显著影响。由于存在孔洞缺陷,材料的疲劳寿命呈现出较大的分散性。除了缺陷尺寸的限制之外,缺陷的位置也对材料的疲劳性能产生影响,甚至位置的影响优于缺陷尺寸。通过对试件断口的分析,确定了缺陷尺寸并建立应力-缺陷-寿命的关系模型,其可用于评估含有微孔缺陷的 YL113 铝合金材料的疲劳寿命。

关键词:微观孔洞;YL113 铝合金;疲劳寿命

中图分类号:TB302.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)02-0074-05

Study on Fatigue Life of YL113 Aluminum Alloy Considering Influence of Defects

LYU Hao

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: This study, based on the stress fatigue tests on YL113 aluminum alloy, investigates the impact of internal microscopic pores on the material's fatigue life. The results indicate that the microscopic pores have a significant impact on the material's fatigue life. Due to the existence of void defects, the dispersion of the material's fatigue life is evident. The fatigue life is not only constrained by the size of the defects but also influenced by their location, and the location has more pronounced effect than the defect size. By analyzing the fracture surfaces of the specimens, the defect sizes were determined, and a stress-defect-life relationship model was established, which can be used to assess the fatigue life of YL113 aluminum alloy materials containing microscopic pore defects.

Keywords: microscopic pores; YL113 aluminum alloy; fatigue life

0 引言

铸造成型是一种传统的加工工艺,直到现在对于某些复杂形状的零件来说,铸造成型仍然是性价比最高的一种加工方式。囿于工艺的限制,铸造成型过程中容易形成微孔,这个问题目前还未能得到有效地解决。微观孔洞是铸件中常见的缺陷,尺寸在几微米到几百微米间,孔洞的存在破坏了材料在微尺度上的连续性,对材料的力学性能有着极大影响。构件在服役过程中更多情况下承受循环载荷,由此进一步引发结构的疲劳破坏。据相关统计,服役过程中疲劳损伤造成的破坏约占 80%^[1]。材料内部微孔的存在会造成一定程度上的应力集中,这些薄弱部位往往也成為了疲劳破坏的裂纹源,容易导致疲劳破坏提前发生^[2]。

常用的铸铝合金可以分为以下几类:Al-Si 系、Al-Cu 系、Al-Mg 系和 Al-Zn 系。YL113-铝合金属于 Al-Si 系铝合金,其铸造性能良好且综合力学性能优异,多用于制造发动机、汽车底盘等

结构,是目前工业生产中应用最广的一类铝合金。在铝合金压铸成型的过程中,微孔还不能完全避免,因此考虑微孔缺陷对于 YL113 铝合金的疲劳性能的影响,建立相应寿命预测模型,对于后续寿命评估或者改进加工工艺以延长服役寿命都有很大的意义。

孔洞的形成与金属成型过程中液态金属的流动与冷却相关,VERRAN 等^[3]发现在压铸过程中,压射的速度越慢,孔洞的数量就会减少;压射的速度与浇注的温度对 AM50 镁合金微观孔洞形成会产生影响,速度和温度越低成型效果越好。熊守美等^[4]通过研究进一步指出,增压压力,压铸件的孔隙率明显下降。得益于三维无损检测技术的发展,高分辨率的 X 射线断层扫描技术(X-CT)是进行材料内部缺陷无损检测的最先进手段,利用它可以很方便地开展对材料内部缺陷的三维形貌、分布、尺寸大小等参数的研究,建立缺陷与材料力学性能的关系。LUDWIG 等^[5]利用原位三维 X 射线断层扫描技术观察了铸造铝合金的内部晶粒并

作者简介:吕浩(1998—),男,四川广安人,硕士研究生,研究方向为结构疲劳与断裂,lvhao@nuaa.edu.cn。

进一步形成了可视化图像。伴随高性能计算机的开发,研究人员着手利用基于 X-CT 的三维重构技术,以有限元模拟来研究微观孔洞对材料力学行为的影响,对 X-CT 获得的含缺陷材料的三维模型进行重构并导入有限元分析软件进行网格剖分与计算,定量分析缺陷的影响^[6-7]。

综上,目前关于微观孔洞影响的研究多集中在微观孔洞的成因上,但是关于考虑微孔影响的寿命预测方面还少有关关注。故本文以 YL113 型铝合金为研究对象,通过开展应力疲劳试验和对疲劳试验断口分析来揭示微孔缺陷对疲劳性能的影响机理。从考虑缺陷影响的角度出发,建立疲劳寿命预测模型,以此衡量孔洞缺陷对寿命的实际影响。

1 试验材料及方法

试验材料为压铸成型的 YL113 铝合金,材料质量分数如表 1 所示,满足相关标准要求的该合金成分含量。

表 1 YL113 铝合金质量分数 单位: %

成分	Si	Cu	Fe	Zn	Mn	Mg	Al
质量分数	10.82	1.85	0.77	0.77	0.20	0.17	余量

为了量化材料内部的微观孔洞缺陷,试验开始前利用 X-CT 进行缺陷检测。在利用 X-CT 检测试件内部孔隙时,由于材料内部微观组织对于 X 射线的吸收情况不同,将其转化为灰度图像后将会有所差异。通过 AVIZO 等系列的三维可视化软件对灰度图像进行处理和三维重构,以得到材料内部孔隙的具体信息,包括孔洞的形貌、尺寸、位置等,X-CT 成像示意图如图 1^[8]所示。

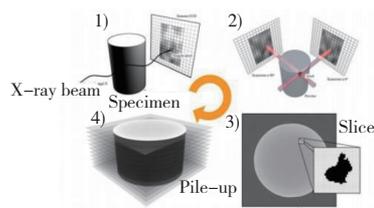


图 1 三维 X 射线断层扫描成像技术示意

疲劳试验在 MTS370 液压伺服材料试验机上进行。为探究孔洞缺陷对 YL113 铝合金疲劳性能的影响,设计并开展了材料的应力疲劳试验,参考相应试验标准进行试验件设计,试验件尺寸如图 2 所示。共设置了 4 个载荷等级 (190 MPa、

160 MPa、145 MPa、130 MPa),在应力比为 0.1、试验机频率 30 Hz 下进行疲劳试验,试验波形为正弦波,当试验件断裂或循环次数达到 10^7 次时停止试验,记录下循环次数。试验完成后,利用 SEM 扫描电镜对断裂的试验件进行断口检测,确定裂纹萌生位置及其疲劳失效方式,对 SEM 图像利用 ImageJ Pro 软件分析裂纹萌生处缺陷的尺寸参数,为厘清微孔缺陷对 YL113 疲劳性能的影响和建立考虑缺陷影响的疲劳寿命预测模型奠定基础。

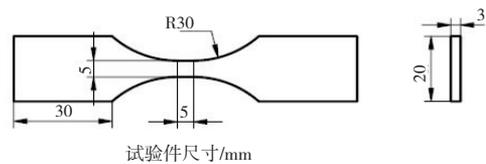


图 2 疲劳试验件

2 试验结果及分析

2.1 疲劳试验结果

根据疲劳试验结果对试验数据进行拟合,所得 S-N 曲线如图 3 所示,其方程为

$$\lg \sigma_{\max} = 2.6375 - 0.0849 N_f \quad (1)$$

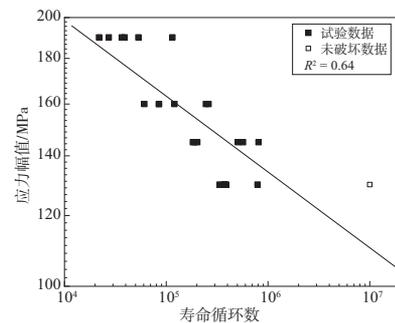


图 3 YL113 铝合金 S-N 曲线

根据式 (1) 所得 S-N 曲线分散带如图 4 所示。

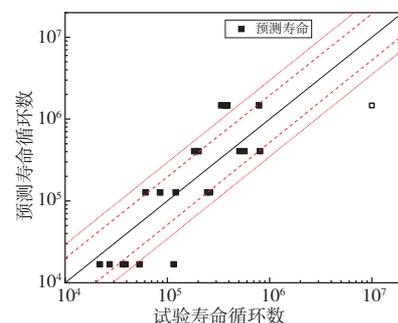


图 4 YL113 铝合金 S-N 曲线预测分散带

对结果进行初步分析可以发现, YL113 铝合金疲劳寿命分散性较大, 拟合获得的 $S-N$ 曲线的相关系数仅为 0.64, 且从寿命分散带可以明显发现大部分的数据均位于 2 倍分散带之外。从试验结果可以明显看出微孔缺陷对 YL113 的疲劳性能影响显著。

2.2 疲劳试样断口分析

试验结果表明, 绝大部分断裂试样的疲劳裂纹均萌生于孔洞缺陷处, 这也证实了材料内部孔洞缺陷的存在的确会降低材料的承载能力, 削弱其疲劳力学性能。典型试样的 SEM 图像如图 5 所示。在低倍数下的断口图像中可以明显看到从孔洞处开始萌生裂纹, 有的断面呈现多个孔洞, 裂纹源位于最大的孔洞缺陷处, 裂纹源处呈现放射状河流条纹, 河流条纹聚集于孔洞缺陷处; 从图中也可以发现, 除了孔洞的尺寸外, 孔洞缺陷的位置对疲劳性能的影响也很大, 位于表面的小尺寸缺陷比位于内部的大尺寸缺陷对疲劳性能的削弱作用更明显。图 6 为 SEM 断口的高倍图像, 从图中可以发现在裂纹萌生及扩展过程中, 孔洞的存在还会改变裂纹扩展方向, 同时使得断面变得粗糙不平。

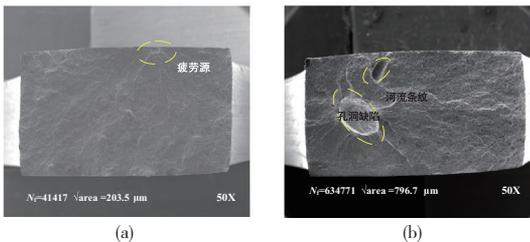


图 5 SEM 断口低倍镜图像

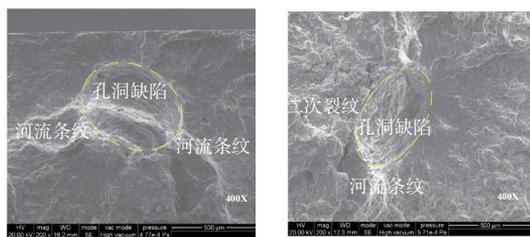


图 6 SEM 断口高倍镜图像

2.3 试样孔隙率分析

在疲劳试验开始前对试件进行了 X-CT 检测, 获得了试验件的初始孔隙率, 孔隙率-寿命关系曲线如图 7 所示。

从图 7 可以看出, 高载荷级下疲劳寿命与孔隙率的关系呈现正相关关系, 即孔隙率越大疲劳寿命越低。然而在低载荷 (130 MPa) 时, 孔隙率

与寿命之间并没有保持之前的相关关系, 疲劳寿命的跳动性较大, 表明孔隙率在低载荷时可能不是影响疲劳寿命的主要因素。结合目前的研究来看, 微孔缺陷的尺寸、位置、形状、分布等特征参数对疲劳性能都有着较大的影响, 这些因素都会造成疲劳寿命的分散性较大, 仅依靠孔隙率还不足以衡量微孔缺陷对 YL113 疲劳寿命的影响。

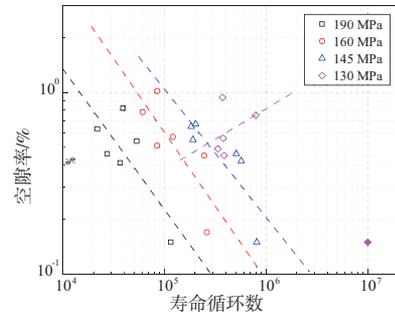


图 7 孔隙率-寿命关系

3 考虑缺陷的疲劳寿命预测

根据上述研究可知, 疲劳实验中寿命与孔隙率并非完全线性相关。为进一步研究微孔缺陷对 YL113 铝合金疲劳寿命的影响, 统计了断口裂纹萌生位置的缺陷尺寸参数 $\sqrt{S_{area}}$ (以裂纹萌生处缺陷面积计算), 统计结果如图 8 所示。同时将缺陷尺寸与寿命进行关联, 结果如图 9 所示。

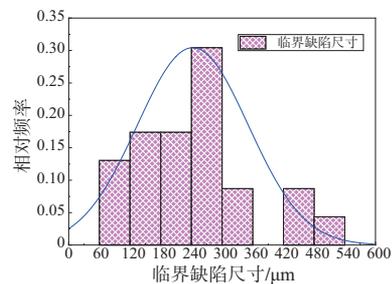


图 8 缺陷尺寸分布

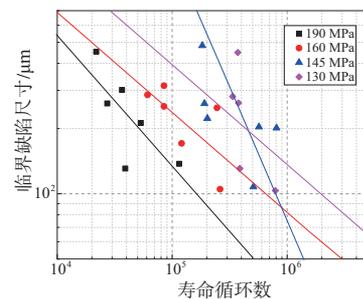


图 9 缺陷尺寸-寿命关系

如图 8 所示, 裂纹萌生处的缺陷尺寸集中在

200~300 μm 之间。图 9 为疲劳寿命与疲劳裂纹起源处孔洞缺陷尺寸与疲劳寿命之间的关系,可知无论是在高应力还是低应力条件下,其孔洞面积越大,则疲劳寿命越短。与图 7 相比,引起疲劳断裂的缺陷尺寸与疲劳寿命关系更为密切。因此,在后续疲劳寿命预测的研究即建立应力-缺陷-寿命模型时,也采用断面裂纹萌生处的缺陷尺寸作为参数。若不考虑裂纹萌生时间,疲劳寿命主要与初始裂纹的尺寸和位置以及裂纹扩展速度相关。同一部位孔洞尺寸越大,初始裂纹越大,则裂纹扩展至断裂时所需的时间更短,疲劳寿命也会缩短。

20 世纪末,日本科学家 MURAKAMI^[9] 开展了一系列针对微缺陷对材料疲劳力学性能影响的研究。基于缺陷容限设计思想提出了量化小尺寸缺陷 (<1 000 μm) 对材料疲劳性能影响的著名的 Murakami 模型,将损伤容限设计中应力强度因子的概念引入缺陷容限设计当中^[10]。在缺陷容限设计中,小尺寸缺陷 (<1 000 μm) 对应的应力强度因子 ΔK 可以表示为

$$\Delta K = Y \cdot \Delta\sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot (S_{\text{area}})^{1/2}} \quad (2)$$

式中: $\Delta\sigma$ 为应力范围; Y 表示缺陷位置的几何修正因子,表面缺陷 $Y=0.65$,近表面或内部缺陷 $Y=0.5$ 。将裂纹萌生处缺陷尺寸代入应力强度因子计算表达式(2)中,以应力强度因子作为损伤参量拟合得到 $\Delta K-N$ 曲线,曲线及相应的寿命预测分散带如图 10 所示。

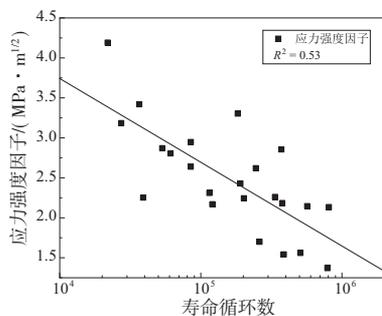


图 10 ΔK -寿命关系

从图 10 结果可以看出,单独以应力强度因子作为损伤参量来预测考虑孔洞缺陷影响的 YL113 铝合金的疲劳寿命结果并不好,其相关系数较差,拟合曲线的相关系数仅为 0.53。究其原因可能是材料本身内部的确含有一定数量的孔洞缺陷;然而从裂纹萌生处缺陷的尺寸上看并没有直接达到传统意义上的裂纹扩展阶段,采用应力强度因子直接计算并没有考虑到裂纹萌生阶段的寿命,最

终导致了寿命预测的结果偏差较大。

FATEMI 等^[11] 在 1988 年提出了一种基于多轴临界面的疲劳损伤参量 (fatigue indicator parameter, FIP),用于描述小裂纹的形成和扩展。

$$F_{\text{FIP}} = \Delta\gamma_{\text{max}} \left(1 + k \frac{\sigma_{\text{n}}^{\text{max}}}{\sigma_{\text{y}}} \right) \quad (3)$$

式中: $\Delta\gamma_{\text{max}}$ 为最大剪切应变幅值; $\sigma_{\text{n}}^{\text{max}}$ 为临界平面上最大正应力; σ_{y} 为屈服应力; k 为材料常数,取值在 0.5~1 之间,通常取 1。

为了考虑微孔缺陷影响,STEUER 等^[12] 对式(3)进行了重新改写,将应力强度因子引入 FIP 损伤参量计算式当中,修正后的损伤参量记为 F_{SIF} 。

$$F_{\text{SIF}} = \frac{\mu\Delta\sigma}{E} \left(1 + k \frac{\Delta K}{\Delta K_{\text{threshold}}} \right) \quad (4)$$

式中: μ 为 Schmid 因子,取值为 0.43; E 为材料弹性模量,取值为 70 GPa; $\Delta\sigma$ 为应力幅值; $\Delta K_{\text{threshold}}$ 为裂纹扩展阈值,参考相关文献^[13] 铝合金裂纹扩展阈值取值为 2.13 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。代入相关参数,最终计算结果如式(5)所示。可以发现 SIF 与寿命拟合关系良好且最终呈现在寿命预测分散带中,大部分预测寿命均位于 2 倍分散带以内,极个别数据位于 3 倍分散带内,证实了该方法的有效性,建立的寿命预测模型可用于评估考虑微孔缺陷影响的 YL113 铝合金的疲劳寿命,如图 11 和图 12 所示。

$$F_{\text{SIF}} = 0.022 \ 4N_{\text{f}}^{-0.218 \ 2} \quad (5)$$

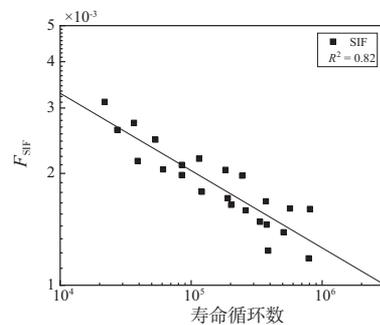


图 11 SIF-寿命关系

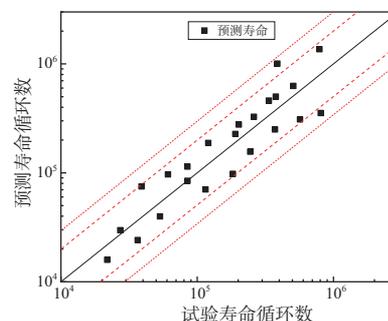


图 12 SIF-寿命预测分散带

4 结语

本文针对压铸成型的 YL113 铝合金开展了疲劳试验,研究了材料的微观孔洞缺陷对疲劳性能的影响,建立了相应的疲劳寿命的预测方法。

1) 疲劳试验的结果表明:材料内部微观孔洞的存在的确使得疲劳寿命的分散性增大,通过对典型断口的微观分析也发现了裂纹从孔洞萌生的现象,同时孔洞的存在也会影响裂纹扩展,最终使得断口形貌凹凸不平;孔洞的尺寸与位置对疲劳寿命都会有影响,位于内部的大孔洞缺陷的危险程度并不一定高于次表面的小孔洞缺陷。

2) 通过关联疲劳断口的缺陷尺寸与疲劳寿命建立了应力-缺陷-寿命关系。以应力强度因子作为中间参量,修正了 FIP 参量,建立了新的损伤参量 SIF 与寿命的关系式,最终预测的精度较高,可用于评估孔洞缺陷对疲劳寿命的影响。

参考文献:

- [1] 张雨,董好志,任海林. 单轴向与多轴向随机载荷下星载单机的疲劳损伤研究[J]. 机械制造与自动化, 2023,52(2):68-71.
- [2] ABOULKHAIR N T, MASKERY I, TUCK C, et al. Improving the fatigue behaviour of a selectively laser melted aluminium alloy: influence of heat treatment and surface quality [J]. Materials & Design, 2016, 104: 174-182.
- [3] VERRAN G O, MENDES R P K, ROSSI M A. Influence of injection parameters on defects formation in die casting Al12Si1, 3Cu alloy: experimental results and numeric simulation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 179(1/2/3):190-195.
- [4] 闫焉服,熊守美,柳百成,等. 铸造压力对 ADC12Z 压铸件孔洞和力学性能的影响[J]. 铸造, 2007, 56(11):1171-1174.
- [5] LUDWIG W, BUFFIÈRE J Y, SAVELLI S, et al. Study of

the interaction of a short fatigue crack with grain boundaries in a cast Al alloy using X-ray microtomography [J]. Acta Materialia, 2003, 51(3): 585-598.

- [6] SINGARAVELU A S S, WILLIAMS J J, GOYAL H D, et al. 3D time-resolved observations of fatigue crack initiation and growth from corrosion pits in Al7XXX alloys using in situ synchrotron X-ray tomography [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2020, 51(1):28-41.
- [7] SERRANO-MUNOZ I, BUFFIERE J Y, VERDU C. Casting defects in structural components: are they all dangerous? A 3D study [J]. International Journal of Fatigue, 2018, 117:471-484.
- [8] NICOLETTO G, ANZELOTTI G, KONEČNÁ R. X-ray computed tomography vs. metallography for pore sizing and fatigue of cast Al-alloys[J]. Procedia Engineering, 2010, 2(1):547-554.
- [9] MURAKAMI Y. Metal fatigue: effects of small defects and nonmetallic inclusions[M]. Oxford: Elsevier, 2019.
- [10] 吴圣川,胡雅楠,杨冰,等. 增材制造材料缺陷表征及结构完整性评定方法研究综述[J]. 机械工程学报, 2021, 57(22):3-34.
- [11] FATEMI A, SOCIE D F. A critical plane approach to multiaxial fatigue damage including out-of-phase loading [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1988, 11(3):149-165.
- [12] STEUER S, VILLECHAISE P, POLLOCK T M, et al. Benefits of high gradient solidification for creep and low cycle fatigue of AM1 single crystal superalloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 645: 109-115.
- [13] 张晓敏. 断裂力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2012: 47-96.

收稿日期:2023-07-25

(上接第 36 页)

- [6] 刘启坤,吴胜利,李智,等. 圆柱直齿轮齿根裂纹扩展路径仿真及其影响因素分析[J]. 机械传动, 2021, 45(10):29-35.
- [7] 张眸青,方实年,蒲春雷,等. 基于疲劳试验与数值分析方法的齿根裂纹扩展规律及寿命预测研究[J]. 机械传动, 2022, 46(2):1-6.
- [8] 屈阳,刘明勇,邓恩喜,等. 准静态工况下斜齿轮裂纹扩展特性与寿命研究[J]. 湖北工业大学学报, 2022, 37(5):52-56.

[9] 张国海,何勇,成小龙,等. 少齿数齿轮轴齿根应力强度因子研究[J]. 陕西理工学院学报(自然科学版), 2017, 33(1):16-20.

- [10] 任博. 摩擦系数对直齿轮副振动特性的影响[J]. 装备制造技术, 2021(4):51-54.
- [11] 机械工程材料性能数据手册编委会. 机械工程材料性能数据手册[M]. 北京:机械工业出版社, 1995.

收稿日期:2023-07-28