

缺陷特征对铝合金疲劳性能的研究

王何俊

上海工程技术大学, 上海

收稿日期: 2023年1月16日; 录用日期: 2023年2月17日; 发布日期: 2023年2月23日

摘要

针对铝合金材料, 确定不同缺陷特征参数对铝合金疲劳寿命的影响, 通过Pearson系数选取与疲劳损伤影响较大的特征参数进行研究, 基于Abaqus分析软件建立了缺陷特征的疲劳损伤模型, 在特征权重公式的基础上, 获得了不同缺陷特征对疲劳性能影响的相对权重, 最后达到量化不同缺陷特征对疲劳性能的影响。

关键词

汽车轻量化, 缺陷特征, 疲劳损伤, 损伤模型

Study on Fatigue Performance of Aluminum Alloy with Defect Characteristics

Hejun Wang

Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

Received: Jan. 16th, 2023; accepted: Feb. 17th, 2023; published: Feb. 23rd, 2023

Abstract

For aluminum alloy, the influence of different defect characteristic parameters on the fatigue life of aluminum alloy was determined. Pearson coefficient was selected and the characteristic parameters with great influence on fatigue damage were studied. The damage model of defect characteristics was established based on Abaqus analysis software. The relative weights of the effects of different defect characteristics on the fatigue properties were obtained. Finally, the mesoscopic damage factors were obtained through the multiple linear regression equation, which can effectively characterize the damage degree of aluminum alloy materials.

Keywords

Automotive Lightweight, Defect Characteristics, Fatigue Damage, Damage Model

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着汽车轻量化研究的发展, 铝合金材料广泛应用于汽车行业, 且铝合金有着密度小、加工性能好同时强度高优点, 可以给汽车提供更轻的车身质量[1]。铝合金材料在汽车领域广泛工程应用的主要障碍之一是其较差的抗疲劳性, 特别是与铸造、焊接和锻造的等效部件相比。铝合金零部件的缺陷群体特征、微观结构各向异性、复杂残余应力和表面粗糙度都可能导致其高周疲劳性能的下降。在实践中, 通过适当的预热、后热处理、喷丸、振动磨削和/或微加工的组合, 可以减轻残余应力并获得可接受的表面光洁度, 但研究发现, 这些工艺处理未能完全消除铝合金的疲劳损伤影响极大的表面缺陷[2], 而部分缺陷在热处理工艺后还会重新长大。因此, 缺陷特征与疲劳强度和寿命的影响也是具有重要意义的。

针对缺陷特征对疲劳损伤和寿命的影响, 很多学者都进行了广泛研究。缺陷产生一个应力强度因子, 它取决于缺陷的大小, 对于表面的缺陷, 应力强度因子更大。Williams 等[3]认为, 试样强度的变化在很大程度上受最有害缺陷的几何参数(位置、大小和形状)控制, 这些参数的确定对疲劳强度的评估具有重要作用。在此基础上, 许多研究人员研究了缺陷与疲劳寿命的关系。许多研究都集中在缺陷尺寸对疲劳寿命的影响上。Julius 等[4]确定了引起疲劳损伤的缺陷大小, 并通过北川类型图建立了疲劳极限与缺陷大小的关系。Hu 等人[5]使用同步辐射 x 射线计算机断层扫描从密度、形状和大小等方面研究缺陷特征对疲劳损伤的影响。但上述研究忽略了量化缺陷特征对疲劳损伤的影响。

2. 疲劳拉伸实验

2.1. 试件的制备

本次疲劳拉伸实验采用的是基于 ASTM E8 标准制备的 6061 铝合金试件。6061 铝合金是一种以硅和镁为主要合金元素的铝合金与其他材料相比, 具有易加工和焊接, 易电镀, 韧性较好, 不易变形, 容易抛光和表面处理, 极强的耐腐蚀性的优点, 是 6 系列铝合金中非常主要的一种合金产品。6061 铝合金试件材料相比于其他系的铝合金, 具有更好的加工性能以及抗腐蚀性等优良特点, 常用于装饰、包装、建筑、运输、电子、航空、航天、兵器等各行各业。铝合金材料的主要成分如表 1 所示, 铝合金材料的具体形状及尺寸如图 1 所示。

Table 1. Composition of 6061-T6 aluminum alloy

表 1. 6061-T6 铝合金的成分

Al	Mg	Fe	Si	Cr	Cu	Zn	Mn	Ti	其他
95.8	0.8~1.2	0.7	0.6	0.3	0.2~0.4	0.25	0.15	0.15	0.15

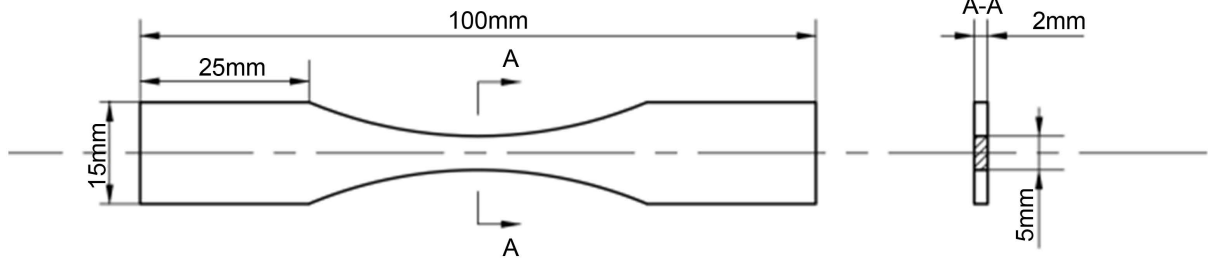


Figure 1. Dimensional of experimental specimen
图 1. 实验试件的尺寸图

通常情况下，铝合金材料的表面粗糙度越高的地方，很容易产生较大的应力集中，在受到较大的疲劳载荷时，会严重损害铝合金材料的疲劳性能。于是，为了避免铝合金材料表面粗糙度的不利影响而导致的实验误差，需要对试件进行抛光打磨后的工艺处理，然后采用粗糙度测量仪(图 2)对铝合金试件的表面粗糙度测量，处理过后的试件表面粗糙度结果如表 2 所示。



Figure 2. SJ-210 Roughness measuring instrument
图 2. 表面粗糙度测量仪

Table 2. Surface roughness of selected 15 test pieces
表 2. 试件的表面粗糙度

试件组别	试件编号	粗糙度 Ra/ μm
第一组	1	0.395
	2	0.421
	3	0.412
第二组	4	0.390
	5	0.402
	6	0.386
第三组	7	0.395
	8	0.423
	9	0.411

Continued

	10	0.421
第四组	11	0.396
	12	0.405
	13	0.429
第五组	14	0.412
	15	0.410

2.2. 静力学实验

基于相关的实验标准需要对试件进行静力学拉伸，得到了铝合金材料的基本力学参数，本次静力学拉伸实验所使用的设备是 MTS Landmark (如图 3 所示)，该设备是具备动拉伸和静拉伸多种应用功能，能够在恶劣(腐蚀、极寒、炎热)的环境下工作，应用场景主要是测试各种金属、非金属、复合材料及其结构件的动静态力学性能。可以进行腐蚀、高低温环境下的力学性能测试。



Figure 3. MTS Landmark Electro-hydraulic servo dynamic test system
图 3. MTS Landmark 电液伺服动态测试系统

试件的拉伸采用恒定拉伸速度的方式进行，拉伸的速度设为 0.2 mm/s。为避免实验的偶然性，每组数据取三个试件拉伸参数的平均值作为该试件最终的力学参数，如表 3 所示。并以此得出铝合金材料拉伸的应力 - 应变关系图，如图 4 所示。

2.3. 疲劳拉伸实验

为获取不同损伤阶段的试件，使用 MTS Landmark 电液伺服动态测试系统对铝合金材料试件进行阶段性的疲劳拉伸实验。基于已获得的力学参数对试件进行多次疲劳预实验，最终获得试件疲劳寿命约为 10 万次的加载载荷值为 3600 N，因此，实验采用 3600 N 作为拉伸载荷对试件进行阶段性疲劳，实验相关的控制参数如表 4 所示。

Table 3. Mechanical properties of 6061 aluminum alloy
表 3. 6061-T6 铝合金的力学性能

拉伸强度 R_m (MPa)	屈服强度 $R_{0.2}$ (MPa)	弹性模量 E (MPa)	伸长率 A (%)
339.8	326.6	58368	3.96

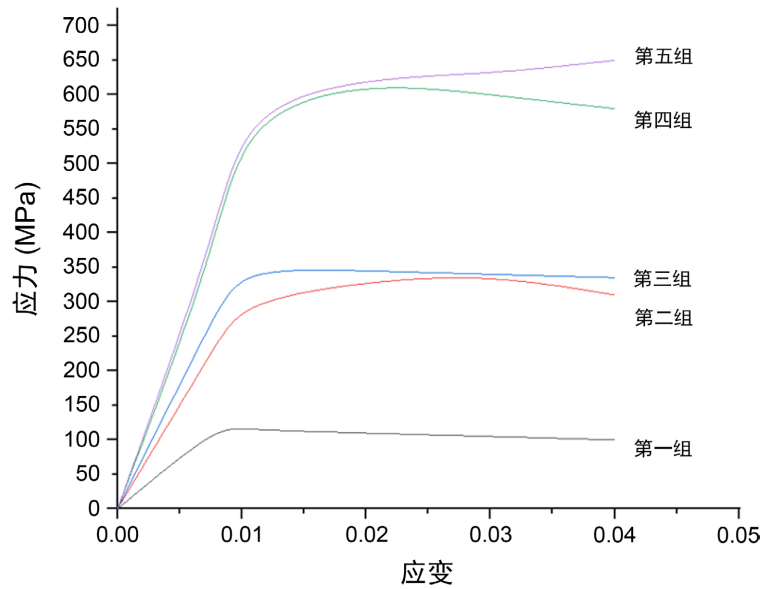


Figure 4. Stress-strain relationship curve of 6061-T6 aluminum alloy specimen
图 4. 6061-T6 铝合金试件的应力 - 应变关系曲线

Table 4. Test parameters of fatigue test
表 4. 疲劳实验的实验参数

参数名称	温度	加载方式	应力比	频率	载荷
参数	24℃	正弦波形	0.1	52 Hz	3600 N

因此，按照表 4 中的加载条件，将实验的疲劳阶段分为 5 组，分别对应疲劳循环次数的 2 万次、4 万次、6 万次、8 万次和 10 万次，每个疲劳阶段 3 个试件，共 15 个试件，各试件如图 5。

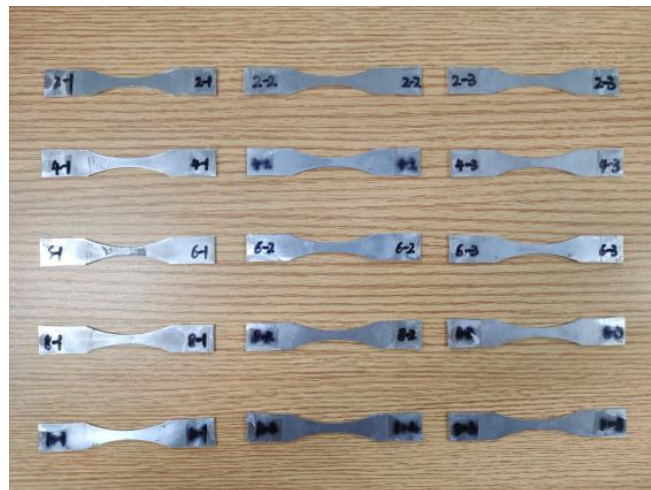


Figure 5. 5 groups of test specimens for fatigue tension
图 5. 疲劳拉伸的 5 组试件

3. 缺陷特征参数的选取

本文采用皮尔逊相关系数(Pearson)分析与疲劳损伤相关性较大的特征，皮尔逊相关系数的定义为：

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_x\sigma_y} = \frac{E[(X-EX)(Y-EY)]}{\sigma_x\sigma_y} = \frac{E(XY)-E(X)E(Y)}{\sqrt{E(X^2)-E^2(X)}\sqrt{E(Y^2)-E^2(Y)}} \quad (1)$$

其中 cov 为协方差，σ 为标准差。皮尔逊相关系数有一重要特点，不受不同参数单位的影响，使计算的值分布在-1 到 1 中间。根据疲劳拉伸实验获取得到的特征参数如表 5 所示，引入中间变量疲劳循环周次来表征材料的疲劳损伤程度，与缺陷特征(数目、位置、形状和孔隙率)进行相关性分析，将表 5 中缺陷特征参量代入到各疲劳阶段的缺陷特征损伤量代入到皮尔逊相关系数求解公式中，从而得到各个特征与疲劳损伤过程之间的相关系数，如图 6 所示。

Table 5. Defect characteristics and characteristic quantities of each test piece

表 5. 各试件的部分缺陷特征和特征量

循环次数(万次)		2	4	6	8	10
孔洞数量/个	第一组	35,106	215,398	125,703	35,684	20,982
	第二组	36,061	233,821	104,895	30,569	16,456
	第三组	34,854	190,636	76,695	24,534	18,672
孔隙率/%	第一组	0.035	0.166	0.268	0.338	0.343
	第二组	0.076	0.141	0.219	0.288	0.376
	第三组	0.06	0.176	0.242	0.343	0.439
最大孔洞体积/μm ³	第一组	996	1965	2145	3360	4806
	第二组	1117	2048	2238	3045	4463
	第三组	1064	1896	2405	3251	4907
最大损伤表面积/μm ²	第一组	0.0124	0.0231	0.0614	0.0895	0.1541
	第二组	0.0097	0.0291	0.0541	0.0932	0.1932
	第三组	0.0113	0.0340	0.0481	0.0747	0.2056

	数量	孔隙率	形状	位置	循环次数
数量	1	-0.364	-0.0466	-0.1198	-0.4217
孔隙率	-0.364	1	0.9363	0.9527	0.9961
形状	-0.0466	0.9363	1	0.9749	0.9039
位置	-0.1198	0.9527	0.9749	1	0.9353
循环次数	-0.4217	0.9961	0.9039	0.9353	1

Figure 6. Correlation coefficient between characteristic parameters and the number of cycles

图 6. 特征参数与循环次数之间的相关系数

从图 6 的相关系数表中可以看出, 循环次数与缺陷数量特征的 Pearson 相关系数小于 0.5, 呈现弱相关性趋势, 而缺陷的孔隙率, 形状和位置呈现强相关性。因此, 本文选取缺陷的孔隙率、位置和形状三个特征量三个特征量与疲劳损伤的相关系数值都在 0.9 以上, 呈现强相关性。因此, 本文将量化缺陷的孔隙率、形状和位置参数对铝合金材料疲劳损伤的影响。

4. 建立疲劳损伤模型

4.1. 缺陷特征的权重公式

随着加载循环周次的提高, 内部缺陷的特征参量的数值也在不断变化。相关研究表明[6], 缺陷特征可以与铝合金材料的疲劳损伤直接联系起来, 并用于预测材料的疲劳寿命。之前很多学者对缺陷的单一特征进行分析, 并没有综合考虑缺陷的多个特征, 本文通过量化每个缺陷对疲劳影响的权重, 以这种方式结合不同缺陷特征参数计算铝合金材料的疲劳损伤程度。

假设材料的细观损伤程度为评价目标 G , 三个缺陷特征参数(孔隙率、形状和位置)为评价指标 $\{S_1, S_2, S_3\}$ 。设 x_g 为评价目标 G 的取值变量, x_i 为指标 S_i 的取值变量 ($i=1, 2, 3$)。同时, 细观损伤参量根据缺陷特征量的变化而变化。基于 ABAQUS 有限元分析软件建立疲劳损伤模型, 使其中一个缺陷特征参量 x_i 增加 10%, 细观损伤参量 x_g 会对应增加 $k_i\%$ 。则 k_i 为缺陷特征指标 S_i 对细观损伤评价目标 G 的弹性系数。计算方法如公式 2 所示:

$$\omega_i = \frac{k_i}{\sum_{n=1}^3 k_n} \quad (2)$$

其中, ω_i 是为该缺陷特征对疲劳损伤影响的权重。

根据上述权重公式, 求出孔隙率、形状和位置分别对疲劳损伤的影响程度。

4.2. 疲劳损伤模型的建立

在疲劳拉伸过程中, 试件不可避免地会出现大小和位置随机的缺陷。利用仿真软件模拟这些缺陷的变化是研究缺陷对试件疲劳损伤影响的有效方法。在研究中, 利用 ABAQUS 仿真软件对试件的缺陷进行了仿真。试件模型参照 CT 扫描中试件中心面积, 设定为长、宽、高分别为 5 mm、2 mm、6 mm 的矩形六面体, 分别对应坐标轴的 Y、X、Z 轴, 如图 7 所示。通过 ABAQUS 子例程导入缺陷的特征信息, 生成所需的损伤模型进行仿真。

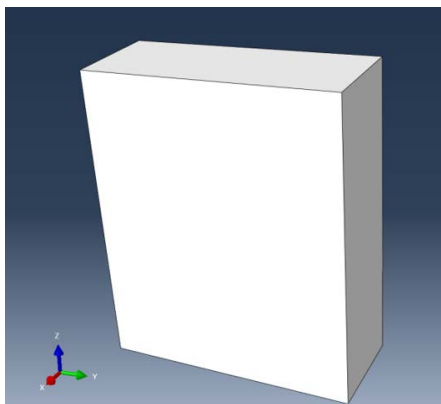


Figure 7. The equivalent damage model of the CT scan area of the specimen
图 7. 试件 CT 扫描区等效损伤模型

根据缺陷特征将仿真实验分为 3 组，每组通过改变特征参量进行 5 次仿真实验。在仿真中，采用位移控制方法对损伤模型进行有限元拉伸分析。固定模型的一端，在另一端施加应力 P ，如图 8(a)所示。从最后的拉伸模拟结果，可得到最大应力点的 P_{\max} 值，如图 8(b)所示。为了表征缺陷模型的疲劳性能，引入应力集中因子 K 作为中间变量，应力集中系数的计算公式如公式 3 所示：

$$K = \frac{P_{\max}}{P} \quad (3)$$

其中， P_{\max} 最大应力， P 施加应力。

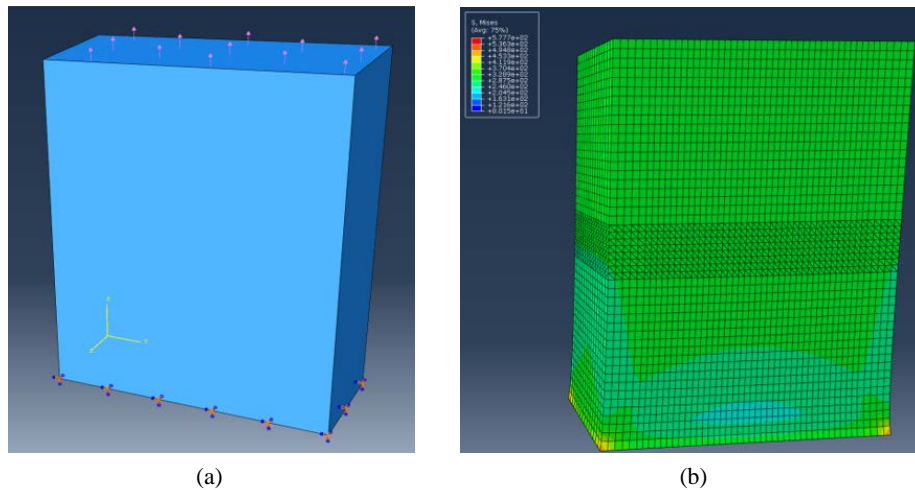


Figure 8. (a) Tension model, (b) Simulation results
图 8. (a) 张力模型, (b) 仿真结果

在仿真实验中，缺陷的分布如下图所示，在 Z 轴方向有三层缺陷，分别在 Z 轴的 2.8 mm，3 mm，3.2 mm 处，每层均有 160 个缺陷，在 XY 平面上的排布方式如图 9 所示。



Figure 9. The distribution of defect defects in the model on the xy plane
图 9. 模型中缺陷在 xy 平面上的分布

根据权重计算方法，缺陷的特征量每增加 10%。为了避免缺陷间距的相互影响，当缺陷的孔隙率增大时，在保持原有缺陷位置不变的情况下，按比例增加缺陷。同时保证了相同的参数设置和相同的网格划分方法。最后得到缺陷孔隙度特征、形状(纵横比)、位置变化的 5 个最大应力集中系数，如图 10 所示。

如图 10(a)所示随着铝合金试件加载循环次数的增加,缺陷的总体积随着加载次数的增加而增加。由于缺陷的总体积(孔隙率)增大,材料应力集中系数急剧增大,大幅度降低材料的疲劳损伤;如图 10(b)所示,缺陷在加载循环的初期,大部分缺陷的初始形状接近为圆形,缺陷的纵横比为 1,但是由于加载循环持续的不断增长,导致缺陷在不断被拉长,拉长的过程中与其他缺陷连接一起,同时缺陷在拉长过程中尖端产生恶劣的应力集中,减少铝合金材料的疲劳性能;SERRANO [7]的研究表明,即使表面缺陷的尺寸是内部缺陷的十分之一,产生的应力集中效应比内部缺陷更大,如图 10(c)的趋势所示,缺陷距离表面越近,材料的应力集中系数越高,因此缺陷的孔隙率、形状、位置对铝合金材料的疲劳性能有着显著的影响。

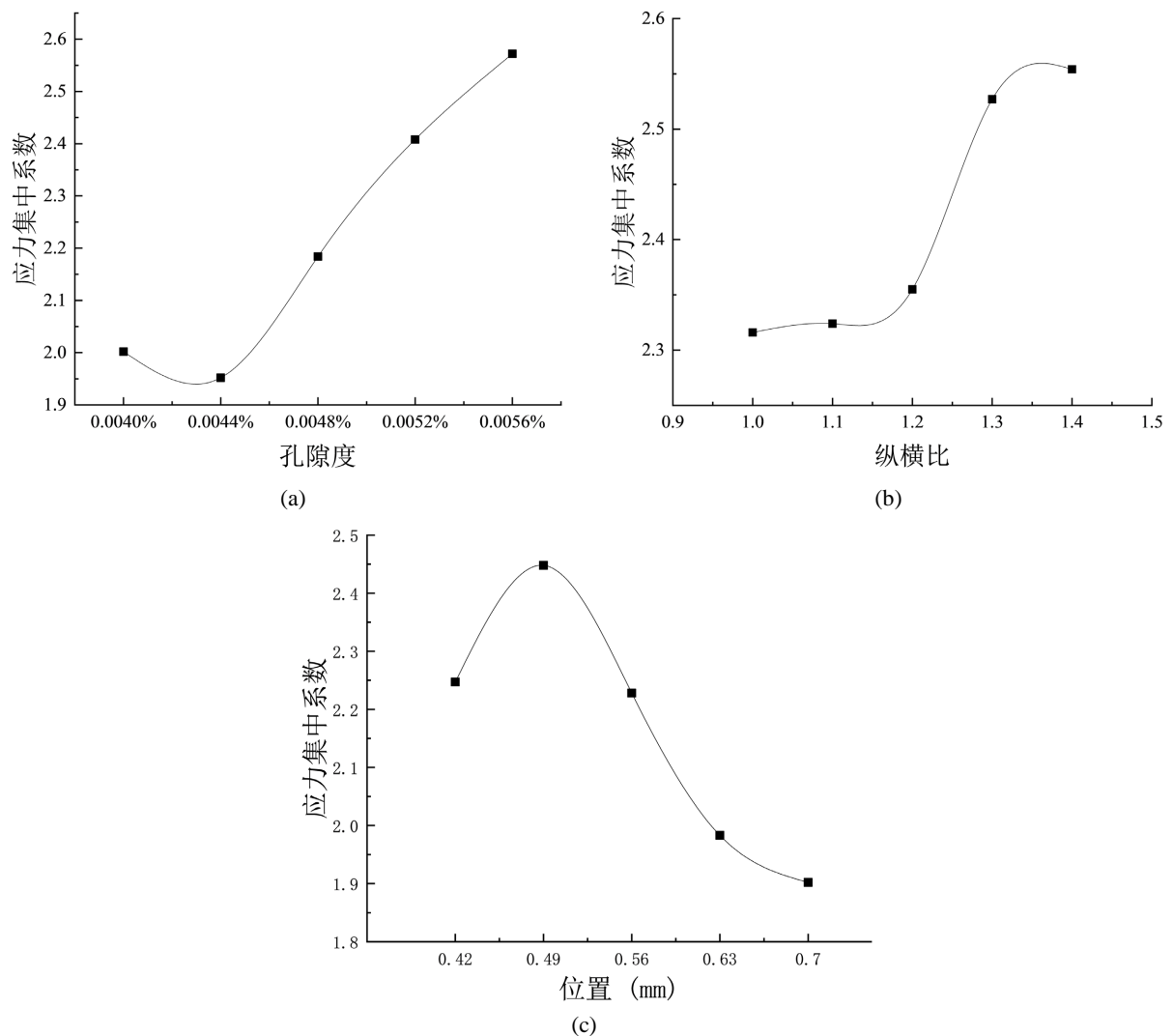


Figure 10. Change of stress concentration factor with different defect characteristics, (a) Position, (b) Porosity, (c) Shape
图 10. 不同缺陷特征对应的应力集中系数的变化, (a) 孔隙率, (b) 形状, (c) 位置

5. 权重的获取

由上述的仿真分析输出了不同缺陷参数的应力集中系数,采用最小二乘法将曲线拟合成一条直线,拟合后的曲线如图 10 所示。三个曲线的线性函数如公式 4 所示。

$$\begin{cases} y_1 = 39900x_1 + 0.3080 \\ y_2 = 0.6793x_2 + 1.5998 \\ y_3 = -1.649x_3 + 3.0851 \end{cases} \quad (4)$$

其中, x_1 、 x_2 、 x_3 分别是缺陷的孔隙率、形状、位置的特征参量, 同理, y_1 、 y_2 、 y_3 是三个特征参量对应的应力集中系数。通过公式 4 可得到孔隙度、形状和位置缺陷特征对细观损伤的弹性系数 k_1 、 k_2 和 k_3 分别为 8.38、2.98 和 5.98。基于弹性系数可以得到孔隙度、形状和位置对疲劳损伤的权重分别为 0.483、0.172 和 0.345。

6. 结束语

本文通过 Pearson 系数选取相关性最大的缺陷特征参数, 得到缺陷的孔隙率、位置以及形状和疲劳性能的相关性较高。基于改变缺陷的特征参量建立仿真损伤模型, 利用应力集中系数表征损伤的程度, 最后达到量化不同缺陷特征对疲劳性能的影响。

参考文献

- [1] 蔡其刚. 铝合金在汽车车体上的应用现状及发展趋势探讨[J]. 广西轻工业, 2009, 25(1): 28-29.
- [2] Tammas-Williams, S., Withers, P.J., Todd, I. and Prangnell, P.B. (2016) Porosity Regrowth during Heat Treatment of Hot Isostatically Pressed Additively Manufactured Titanium Components. *Scripta Materialia*, **122**, 72-76. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.05.002>
- [3] Tammas-Williams, S., Withers, P.J., Todd, I. and Prangnell, P.B. (2017) The Influence of Porosity on Fatigue Crack Initiation in Additively Manufactured Titanium Components. *Scientific Reports*, **7**, Article No. 7308. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06504-5>
- [4] Julius, N., Ngnokou, D., et al. (2017) Influence of Defect Size on the Fatigue Resistance of AlSi10Mg Alloy Elaborated by Selective Laser Melting (SLM). *Procedia Structural Integrity*, **7**, 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.11.063>
- [5] Hu, Y.N., Wu, S.C., et al. (2020) A New Approach to Correlate the Defect Population with the Fatigue Life of Selective Laser Melted Ti-6Al-4V Alloy. *International Journal of Fatigue*, **136**, 105584. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105584>
- [6] 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, 2022, 57(22): 3-34.
- [7] Serrano-Munoz, I., Buffiere, J.Y., Mokso, R., et al. (2017) Location, Location & Size Defects Close to Surfaces Dominate Fatigue Crack Initiation. *Scientific Reports*, **2017**, Article No. 45239. <https://doi.org/10.1038/srep45239>