



## 微观孔洞对铝合金压铸件疲劳性能的影响

万 谦, 赵海东, 葛继龙

(华南理工大学 国家金属材料近净成形工程技术研究中心, 广州 510640)

**摘 要:** 基于高分辨率三维 X 射线断层扫描技术, 对实际 ADC12 铝合金压铸件疲劳试样内部微观孔洞进行了检测和重构, 对 7 组不同孔隙率的试样进行了 5 级应力水平的高周疲劳实验。三参数 Weibull 分析表明: 随着应力水平升高, 疲劳寿命分散性逐渐降低。采用 SEM 观察疲劳断口, 确定诱发疲劳裂纹起源的孔洞, 并对其进行了分析; 基于断口表面的孔洞特征以及 X 射线断层扫描重构数据, 建立了孔洞-疲劳寿命预测方程, 并与实验结果进行了对比分析。将三维 X 射线断层扫描重构数据与有限元分析相结合, 计算和分析了实际微观孔洞引起的应力情况, 为研究材料内部实际微观孔洞特征对性能的影响提供新的途径。

**关键词:** 铝合金; 高压压铸; 微观孔洞; 疲劳; 三维 X 射线断层扫描; 有限元分析

中图分类号: TG292

文献标志码: A

## Effect of micro-porosities on fatigue behavior of aluminum die castings

WAN Qian, ZHAO Hai-dong, GE Ji-long

(National Engineering Research Center of Near-net-shape Forming for Metallic Materials,  
South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The micro-porosities in fatigue specimens obtained from practical ADC12 high pressure die castings were detected and reconstructed with high resolution X-ray computed tomography technology. The high cycle fatigue tests were carried out at five stress amplitudes on seven groups of the specimens with different porosity contents. The Weibull analysis suggested less scatter of the fatigue life at larger stress condition. With the SEM observation on the fatigue fractured surfaces, the porosities initializing the fatigue cracks were identified and measured. A pore-fatigue life prediction equation was deduced with the pore characteristics from the fracture surface and 3D X-ray tomography inspection. With 3D reconstruction of tomography data and FEA method, the simulation of the stress distribution around the actual 3D pores were carried out and analyzed further. A new approach was provided to assess the effect of pores with actual 3D characteristics on casting properties.

**Key words:** aluminum alloy; high pressure die casting; micro-porosity; fatigue; three dimensional computed tomography; finite element analysis

压铸是当前铝、镁合金精确铸造成形的主要方法。压铸过程中金属液高速充填型腔, 通常会引起气体卷入并产生孔洞缺陷, 降低了铸件的力学性能, 且常诱发疲劳裂纹<sup>[1-4]</sup>。WEILER 等<sup>[5]</sup>和 HU 等<sup>[6]</sup>研究了压铸

镁合金内部孔洞和断裂强度之间的关系。本文作者的前期工作中研究了孔洞尺寸和体积分数对 ADC12 压铸件的影响<sup>[7]</sup>, 提出了合格压铸件的孔洞临界尺寸和体积分数; WANG 等<sup>[8]</sup>用二参数 Weibull 分布来分析

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2013AA031201); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-08-0209); 中央高校基本科研业务费项目(2012ZP0006)

收稿日期: 2014-06-09; 修订日期: 2014-11-12

通信作者: 赵海东, 教授, 博士; 电话: 020-87112948-302; E-mail: hdzhao@scut.edu.cn

A356 合金在有孔洞缺陷条件下的疲劳寿命; LU 等<sup>[9]</sup>用实验和模拟方法研究了孔洞对 AM60 合金压铸件疲劳裂纹起源的影响, 结果表明, 复杂形状孔洞周围的应力集中要比简单圆形孔洞的更加明显。在这些研究中, 孔洞的分析与测量是基于二维金相或是基于二维假想孔洞模型, 而不是基于三维的实际孔洞。近年来, 高分辨率 X 射线断层扫描技术的发展使得研究铸件孔洞的三维形貌成为可能<sup>[10]</sup>, FELBERBAUM 等<sup>[11]</sup>采用高分辨率 X 射线断层扫描技术观察未变质与变质 Al-Cu 合金内部的微观孔洞, 并估算出孔洞的曲率, 指出二维金相中某些邻近的孔洞实际在三维空间中是连通的整体孔洞。这意味着基于断面的二维分析高估了孔洞的数量, 而低估了孔洞的尺寸和形状复杂性。因此, 有必要研究孔洞的三维特征和疲劳性能之间的关系。

本文作者对 ADC12 压铸件试样中进行了不同应力水平的高周疲劳测试, 基于试样三维 X 射线断层扫描, 分析了试样内部微观孔洞对疲劳性能的影响, 建立了 ADC12 压铸件的疲劳寿命预测模型。基于断层扫描得到的实际孔洞三维模型, 采用有限元分析方法模拟和讨论了孔洞引起的应力集中。

## 1 实验

用于 X 射线断层扫描分析和疲劳测试的试样取自于实际的 ADC12 压铸件, 铸件质量 5842 g, 外形尺寸约为 480 mm × 360 mm × 70 mm, 铸件采用 UBE1650T 冷室压铸机生产, 压铸过程中, 浇注温度为 680 °C, 充型的低速和高速压射速度分别为 0.1~0.8 m/s 和 4.0 m/s, 增压压力为 65 MPa。通过 LEEMANLABS Pulsar 进行化学分析, 铸件的实际成分(质量分数, %)为 Si 10.77、Cu 1.87、Fe 0.78、Zn 0.78、Mn 0.20、Mg 0.17、其余为 Al, 符合 JIS 的 ADC12 铝合金成分要求。依据 ASTM 标准取 40 个疲劳试样, 其取样部位平均壁厚约 4 mm, 试样尺寸如图 1 所示。

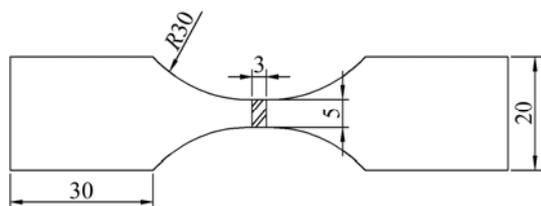


图 1 疲劳试样的形状和尺寸

Fig. 1 Shape and dimension of fatigue sample (Unit: mm)

在疲劳测试前, 所有试样均使用高分辨率 X 射线断层扫描技术对标距部分的孔洞进行无损检测。采用的设备为德国 YXLON 的微焦点 X 射线 CT, 其最高电压为 225 kV, 最高理论分辨率达到 5 μm。使用 VGStudio Max<sup>®</sup> 2.0 软件对 CT 获取的扫描切片图像进行孔洞的三维形貌重构, 得到试样中孔洞的体积、表面积和位置等信息<sup>[12]</sup>。

根据孔隙率(孔洞总体积与试样体积之比)将所有试样分为 7 组, 各组的平均孔隙率分别为 0.91%、0.71%、0.56%、0.48%、0.43%、0.31% 和 0.15%, 每组至少 5 个试样, 每组均用 INSTRON 8874 液压伺服疲劳试验机进行 110、130、145、160 和 190 MPa 共 5 级应力水平的高周疲劳实验。疲劳测试在 20 °C 恒温下进行, 为单轴拉拉疲劳实验, 频率为 30 Hz, 应力比为  $R=0.1$ 。采用 FEI Quanta 200 环境扫描电子显微镜(SEM)观察分析所有试样的断口, 确定诱发疲劳裂纹的孔洞并测定其尺寸。

## 2 结果与讨论

### 2.1 疲劳裂纹的起源分析

为了研究试样中引起疲劳裂纹萌生的缺陷, 采用 SEM 对所有试样的断口进行了观察和分析。结果发现, 超过 80% 的疲劳试样(27 根)失效是由孔洞缺陷引起的, 且疲劳裂纹起源处的孔洞尺寸均超过 100 μm。其中孔隙率为 0.27% 的试样在 145 MPa 应力水平下的断口形貌如图 2(a)所示, 相应的重构孔洞的三维特征如图 2(b)所示。

图 3 所示为试样断层扫描的内部所有孔洞和 SEM 分析的疲劳起源处孔洞的等效直径累积概率图, 其中圆点状代表引起疲劳断裂的孔洞尺寸, 其等效直径均大于 100 μm, 表明在压铸件中 100 μm 以上的孔洞会成为疲劳断裂的起源。从图 3 还可看出, 大于 200 μm 的孔洞(约占孔洞总数的 10%) 较易引起疲劳裂纹萌生和断裂失效。

近年来, TIRYAKIOĞLU<sup>[13]</sup>进行了关于疲劳断口缺陷尺寸统计分布规律的大量研究, 指出使用准确的统计分布函数能够提高断裂力学疲劳寿命模型的准确度, 可以更精确地预测铝镁合金的疲劳寿命。THUMSER 等<sup>[14]</sup>研究了金相孔洞尺寸与疲劳断面孔洞尺寸的分布, 指出在疲劳设计过程中, 应采用断面分析而不是金相分析来估计缺陷的尺寸并作为设计准则。本研究中采用了三参数对数分布对疲劳裂纹起源处的孔洞等效直径尺寸进行了分析, 其结果如图 4 所

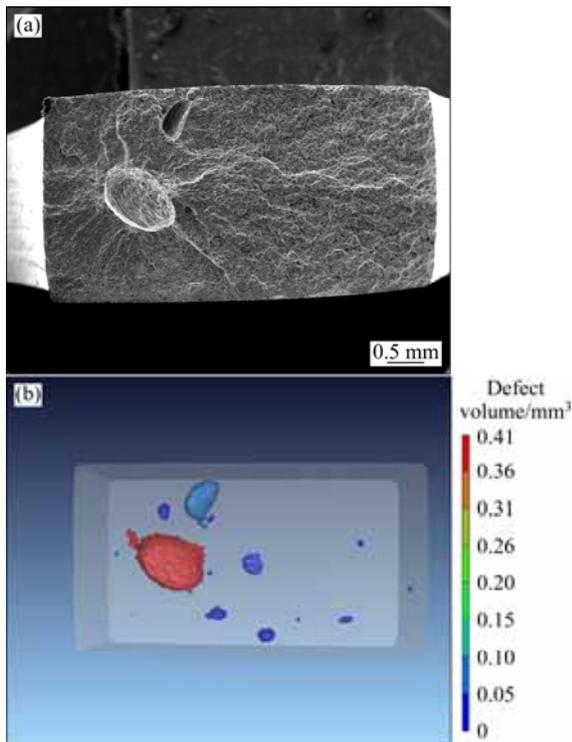


图 2 疲劳裂纹萌生于孔洞试样断口的 SEM 像及相应的三维重构孔洞

Fig. 2 SEM image of pores on fractured surface initiating fatigue cracks (a) and 3D reconstruction pores (b)

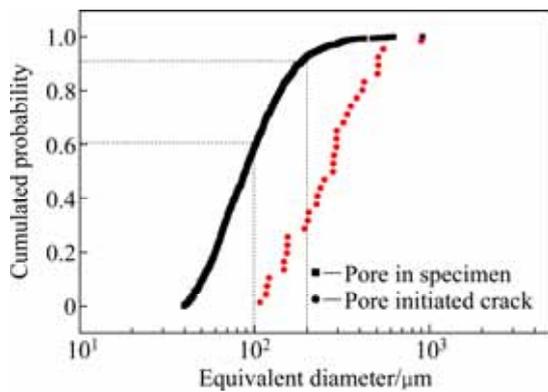


图 3 试样内部孔洞和断面孔洞等效直径的累积概率图

Fig. 3 Cumulative probability of equivalent diameter of pores initiated cracks

示, 参数估计结果见表 1, 表明裂纹起源的孔洞直径符合三参数 Lognormal 分布, 与文献[14-16]中的结果相吻合。

### 2.2 孔洞对疲劳性能的影响

采用单对数坐标对疲劳应力与寿命数据作图, 可得到如下的  $S-N$  图(见图 5)。对 7 组不同孔隙率试样

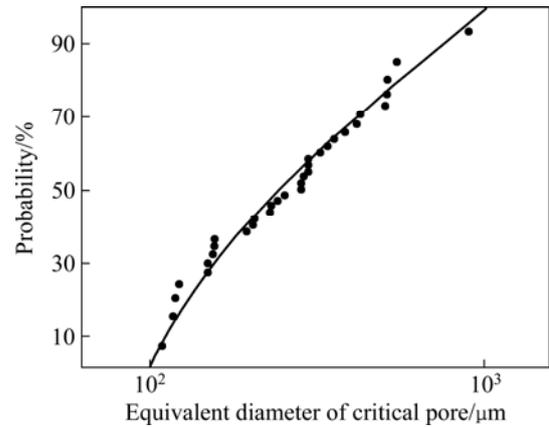


图 4 疲劳裂纹起源处孔洞尺寸的对数分布拟合

Fig. 4 Fitting of equivalent diameter critical pores initiating fatigue cracks

表 1 三参数 Lognormal 分布拟合的参数估计

Table 1 Estimated parameters of 3-parameter Lognormal distribution fitting of pores size

Location parameter	Scale parameter	Threshold value	Number	AD
5.186	0.7265	65.71	33	0.364

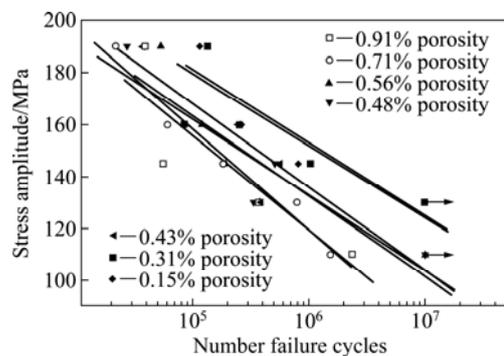


图 5 不同孔隙率试样的疲劳  $S-N$  线图

Fig. 5  $S-N$  curves of specimens with different porosities

的疲劳寿命做线性拟合, 可见  $S-N$  线随着孔隙率的增大呈现向左偏移的趋势, 如图 5 所示, 表明试样的孔隙率越大, 其疲劳寿命越短。图 5 表明, 对于 ADC12 压铸件, 孔隙率不超过 1%, 则疲劳寿命的分散性低于一个数量级。

研究者通常使用 Weibull 分布来研究疲劳寿命的分散性, 从而了解在不同状态下试样的疲劳性能<sup>[8,17]</sup>。三参数 Weibull 分布一般用下式表示<sup>[18]</sup>：

$$F_w(N) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{N - N_0}{N_c}\right)^m\right] \quad (1)$$

式中:  $F_w(N)$  是试样在指定疲劳周次  $N$  或  $N$  以下断裂的试样占全部试样的分数;  $N$  是断裂试样的疲劳周次;  $N_c$  是特征疲劳寿命, 表示大约有 63.2% 的试样疲劳断裂的疲劳周次;  $N_0$  是疲劳寿命阈值;  $m$  是 3 参数 Weibull 分布的形状系数, 表征数据的分散性。当  $N_0=0$  时, 式(1)就成为常见的二参数 Weibull 分布函数。

采用三参数 Weibull 分布拟合了 130~190MPa 应力级别的疲劳寿命数据, 如图 6 所示。由于 110 MPa 下只有两根试样断裂, 故未做分析。表 1 列出了 Weibull 分布的参数估计结果, 由表 2 可见, 190 和 160 MPa 应力下疲劳寿命的 Weibull 分布  $m$  值要大于 145 和 130 MPa 应力下的  $m$  值, 说明随着应力增加, ADC12 铸件的疲劳寿命分散性降低。

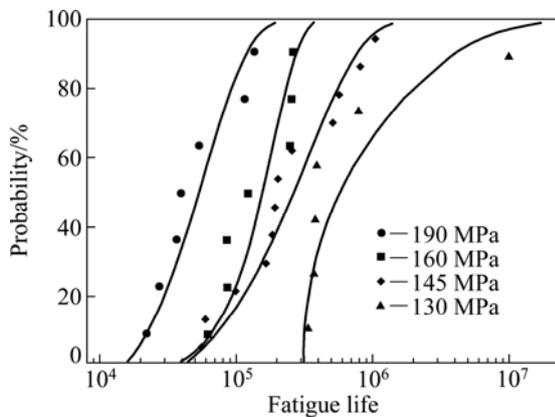


图 6 各级应力下疲劳寿命的三参数 Weibull 分布拟合结果  
Fig. 6 3-parameter Weibull fitting results of fatigue lives at different stress levels

### 2.3 疲劳寿命预测

疲劳寿命  $N_f$  包括裂纹萌生时期( $N_i$ )和扩展时期( $N_p$ )。由于孔洞普遍存在所有的试样中, 疲劳裂纹能够直接从孔洞萌生, 所以疲劳裂纹萌生阶段可以忽略, 因而疲劳寿命主要由裂纹扩展阶段决定。裂纹的扩展可以用 Paris 定律来描述<sup>[19]</sup>

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{\text{eff}})^m \quad (2)$$

表 2 不同应力下疲劳寿命的三参数 Weibull 分布拟合的参数估计

Table 2 Estimated parameters of 3-parameter Weibull distribution fitting of fatigue lives under different stresses

Stress amplitude/MPa	Scale parameter, $m$	Location parameter, $N_c$	Threshold value	Number	$A^2$
190	1.247	53729	11352	7	0.394
160	2.126	185805	-4860	7	0.684
145	1.030	321512	27259	12	0.317
130	0.4415	533935	311841	6	0.709

式中:  $a$  是裂纹尺寸;  $N$  是周期;  $m$  和  $C$  是对应于不同合金的固定系数;  $\Delta K_{\text{eff}}$  是应力强度因子范围。

$$\Delta K_{\text{eff}} = K_{\text{max}} - K_{\text{opening}} = U_R(a)\Delta K \quad (3)$$

$$\Delta K = Y(a)\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (4)$$

式(3)~(4)中:  $\Delta K$  为应力强度因子范围;  $K_{\text{max}}$  为疲劳周期内应力强度因子  $k$  的最大值;  $K_{\text{opening}}$  为裂纹张开处的应力强度因子;  $U_R(a)$  与循环载荷的应力比  $R$  有关;  $Y(a)$  为裂纹(此处为孔洞)的形状因子;  $\Delta\sigma$  为交变应力范围。

裂纹尺寸可以用  $\sqrt{s}$  ( $s$  为孔洞在垂直应力方向上的投影面积)大概描述<sup>[20]</sup>, 内部孔洞的  $Y(a)$  为 0.5, 表面孔洞的  $Y(a)$  为 0.65<sup>[21]</sup>。由式(2)~(4)推导出的孔洞-疲劳寿命模型如下

$$\int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{Y(a)^m U_R(a)^m \cdot (\pi a)^{m/2}} = C \cdot (\Delta\sigma)^m \int_{N_i}^{N_f} dN \quad (5)$$

将  $N_p$  作为裂纹扩展至断裂的疲劳周次, 式(5)可以变换为

$$a_f^{(2-m)/2} - a_i^{(2-m)/2} = \frac{2-m}{2} CY(a_i)^m U_R(a_i)^m \pi^{m/2} (\Delta\sigma)^m (N_f - N_i) \quad (6)$$

式中:  $a_i$  和  $a_f$  分别是初始裂纹尺寸(在本研究中即为孔洞尺寸)和断裂后最终裂纹尺寸。因为  $a_f$  要远大于  $a_i$  且  $m > 4$ <sup>[22]</sup>, 故  $a_f^{(2-m)/2}$  在式(6)中可以忽略不计, 式(6)可以变换为

$$a_i^{(2-m)/2} N_p^{-1} = \frac{m-2}{2} CY(a_i)^m U_R(a_i)^m \pi^{m/2} (\Delta\sigma)^m \quad (7)$$

由于有  $a_i$  和  $N_p$  两个变量需要求解, 故将式(7)简化为

$$a_i N_p = B \cdot (\Delta\sigma)^{-m} \quad (8)$$

其中  $B$  为

$$B = \left[ \frac{m-2}{2} CY(a_i)^m U_R(a_i)^m \pi^{m/2} \right]^{-1} \quad (9)$$

考虑到裂纹终止因素,  $R = 0.1$  时,  $U_R(a_i) = 1$ ;  $R = -1$  时,  $U_R(a_i) = 0.5^{[8]}$ 。

对式(7)两边取对数整理得

$$\lg(a_i N_p) = \lg B - m \lg(\Delta\sigma) \quad (10)$$

根据疲劳实验的应力、疲劳寿命以及临界孔洞尺寸, 对所研究铸件的孔洞-疲劳寿命模型中的参数  $B$  和  $m$  进行线性回归拟合, 所得结果为  $B = 6.01e^{21}$ ,  $m = 6.63$ 。从而孔洞-疲劳寿命预测公式为

$$a_i N_p = 6.01e^{21} (\Delta\sigma)^{-6.63} \quad (11)$$

根据式(11)预测的疲劳寿命与 ADC12 压铸件的实际疲劳寿命对比如图 7 所示, 可见两者吻合较好。

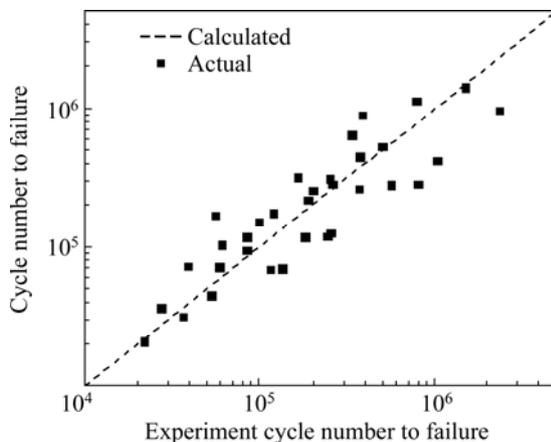


图 7 预测疲劳寿命和实际疲劳寿命对比

Fig. 7 Comparison of calculated fatigue lives and actual fatigue lives

#### 2.4 孔洞周围应力的三维有限元分析

对铸件内部孔洞引起的应力集中进行有限元分析能够了解不同的孔洞特征(大小、形状和位置等)对铸件失效的影响。本研究中基于三维 X 射线断层扫描重构获取的孔洞实际几何模型, 对孔洞导致的应力集中进行了有限元分析。

为进行有限元分析, 首先应对包含孔洞的三维模型进行网格划分。在二维图像中连续标记铝合金基体和孔洞的界面, 然后用 Mimics<sup>®</sup> 软件对包含孔洞的三维重构模型进行三角形面网格划分, 再导入到有限元软件 ABAQUS<sup>®</sup> 中。将网格类型由三角形面网格转换为四面体体网格。图 8 所示为试样中包含孔洞的部分有限元网格, 用透明显示模式来展示内部孔洞。根据 SEM 观察结果, 该部分内部的孔洞与试样疲劳断裂裂纹萌发有关。值得注意的是, 孔洞附近的网格应仔细划分以保证其质量, 这会影响到接下来的应力分析

计算。

在有限元分析软件中, 按照 ADC12 铝合金的材料属性赋予至实体模型, 合金密度设置为  $2700 \text{ kg/m}^3$ , 弹性模量取  $70 \text{ GPa}$ , 泊松比为  $0.3$ 。在体网格模型上定义静力加载和约束条件, 对一个面施加拉应力, 而另外一个面做固定约束。

图 9(a)所示为使用 ABAQUS 进行有限元分析计

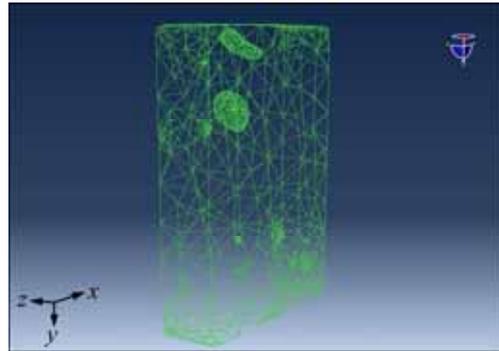


图 8 包含孔洞的有限元网格划分

Fig. 8 Finite element meshes of 3D model containing pores

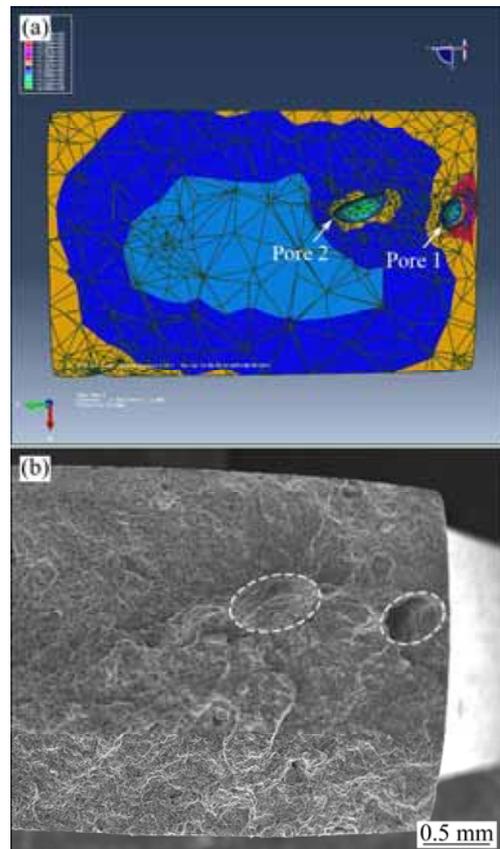


图 9 孔洞周围应力分布和相应的断面特征

Fig. 9 Stress distribution around pores (a) and corresponding fracture surface morphology (b)

算得出的试样断裂表面孔洞周围 Von Mises 应力分布情况。很明显孔洞导致了严重的应力集中, 尽管图 9(a) 中孔洞 1 的体积小于孔洞 2 的, 然而在孔洞 1 周围的应力集中最大, 达到了 307.9 MPa。图 9(b)所示为相应的试样疲劳断口表面形貌, 由图 9(b)可见, 靠近边界的孔洞是疲劳裂纹源。因此, 有限元分析的结果与实验结果非常吻合, 且铸件表面附近的孔洞能够引起更严重的应力集中, 对铸件性能和使用不利。由于试样内部孔洞的三维重构、有限元网格划分以及应力有限元分析都需要大量进行计算, 非常耗时, 因此, 本研究中只对几个试样完成了上述有限元分析, 但是该方法为研究材料内部实际微观孔洞特征对性能的影响提供了新途径。

### 3 结论

1) 由铝合金压铸件试样疲劳实验可发现, 孔隙率越大, 疲劳寿命越低; 对于 ADC12 压铸件, 孔隙率不超过 1%时, 则疲劳寿命相差不超过两个数量级。

2) Weibull 分析表明, 高应力水平下, ADC12 压铸件疲劳寿命分散性低。

3) 根据 Paris 定律、三维 X 射线断层扫描重构和断口表面孔洞特征, 推导了孔洞-疲劳寿命预测方程, 预测结果与实验结果吻合较好。

4) 基于铸件内部实际微观孔洞的几何模型, 完成了孔洞周围应力的有限元分析, 计算的应力集中与疲劳实验结果相吻合, 且靠近铸件表面的孔洞将导致更严重的应力集中。

致谢: 感谢中国科学院金属研究所材料疲劳与断裂研究部对本文疲劳实验提供的支持与帮助。

### REFERENCES

[1] HARDIN R A, BECKERMANN C. Integrated design of castings: Effect of porosity on mechanical performance[C]. LUDWIG A, WU M H, KHARICH A A. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Schladming Austria: IOP Publishing, 2012: 1-8.

[2] ZHAO H D, BAI Y F, OUYANG X X, DONG P Y. Simulation of mold filling and prediction of gas entrapment on practical high pressure die castings[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(11): 2064-2070.

[3] GAO Y X, YI J Z, LEE P D, LINDLEY T C. The effect of porosity on the fatigue life of cast aluminium-silicon[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures, 2004, 27(7): 559-570.

[4] PROULX T. Optical measurements, modeling and metrology[C]//Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. New York: Proulx, Springer Science Business Media, 2011: 55.

[5] WEILER J P, WOOD J T, KLASSEN R J, MAIRE E, BERKMORTEL R, WANG G. Relationship between internal porosity and fracture strength of die-cast magnesium AM60B alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 395: 315-322.

[6] HU H, ZHOU M, SUN Z, LI N. Tensile behaviour and fracture characteristics of die cast magnesium alloy AM50[J]. J Mater Process Technology, 2008, 201: 364-368.

[7] ZHAO H D, WANG F, LI Y Y, XIA W. Experimental and numerical analysis of gas entrapment defects in plate ADC12 die castings[J]. J Mater Process Technology, 2009, 209: 4537-4542.

[8] WANG Q G, APELIAN D, LADOS D A. Fatigue behavior of A356/357 aluminum cast alloys. Part I. Effect of casting defects[J]. J Light Met, 2001(1): 73-84.

[9] LU Y, TAHERI F, GHARGHOURI M A, HAN H P. Experimental and numerical study of the effects of porosity on fatigue crack initiation of HPDC magnesium AM60B alloy[J]. J Alloys Compd, 2009, 470(1/2): 202-213.

[10] NICOLETTO G, KONEČNÁ R, FINTOVA S. Characterization of microshrinkage casting defects of Al-Si alloys by X-ray computed tomography and metallography[J]. Int J Fatigue, 2012, 41: 39-46.

[11] FELBERBAUM M, RAPPAZ M. Curvature of micropores in Al-Cu alloys: An X-ray tomography study[J]. Acta Mater, 2011(59): 6849-6860.

[12] 万 谦, 赵海东, 邹 纯. 铝合金压铸件微观孔洞三维特征及分布的研究[J]. 金属学报, 2013, 49(3): 284-290.

WAN Qian, ZHAO Hai-dong, ZOU Chun. Three-dimensional characterization and distribution of micropore in aluminum alloy high pressure die castings[J]. Acta Metall Sin, 2013, 49(3): 284-290.

[13] TIRYAKIOĞLU M. On the size distribution of fracture-initiating defects in Al- and Mg-alloy castings[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 476(1/2): 174-177.

[14] THUMSER R, KLEEMANN S, BERGMANN J W, KLEEMANN A. Investigation on defect distribution and its statistical evaluation for case hardened material states[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 41: 52-56.

[15] ZHENG X, JR C C, SU X, CUI H, WEN W. Modeling of fatigue damage under superimposed high-cycle and low-cycle fatigue

- loading for a cast aluminum alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2013, 560: 792–801.
- [16] CETIN A, NAESS A, HÄRKEGÅRD G. A physically based extreme value characterization of material fatigue[J]. *International Journal of Fatigue*, 2013, 47: 216–221.
- [17] YI J Z, GAO Y X, LEE P D, FLOWER H M AND LINDLEY T C. Scatter in fatigue life due to effects of porosity in cast A356-T6 aluminum-silicon alloys[J]. *Metall Mater Trans A*, 2003, 34(9): 1879–1890.
- [18] CAMPBELL J. *Complete casting handbook: Metal casting processes, metallurgy, techniques and design*[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011: 499.
- [19] WOLF E. Fatigue crack closure under cyclic tension[J]. *Eng Fract Mech*, 1970, 2(1): 37–44.
- [20] MURAKAMI Y, BERETTA S. Small defects and inhomogeneities in fatigue strength: Experiments, models and statistical implications[J]. *Extremes*, 1990, 2(2): 123–147.
- [21] MURAKAMI Y. Material defects as the basis of fatigue design[J]. *Int J Fatigue*, 2012, 41: 2–10.
- [22] COUPER M J, NEESON A E AND GRIFFITHS J R. Casting defects and the fatigue behaviour of an aluminium casting alloy[J]. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 1990, 13(3): 213–227.

(编辑 李艳红)