# A356铸造铝合金中孔洞缺陷对应力应变集中程度的影响

陈远路[1] 李钟尧[1] 苗以升[2,3] 郎玉玲[4] 孔德才[4] 王俊升[1,2,3]

(1.北京理工大学机械与车辆学院,北京 100081; 2.北京理工大学材料学院,北京 100081; 3.北京理工大学前沿交叉科学研究院,北京 100081; 4.中信戴卡股份有限公司,秦皇岛 066010)

**摘要:**针对铸造过程中出现缩孔、气孔等缺陷,导致大载荷条件下应力集中,产生局部高应力应变区引起局部屈服,从而降低零件服役寿命的问题,采用有限元简化建模和试验分析验证相结合的办法,系统地研究了A356铸造铝合金中孔洞与自由表面距离、孔间距、孔形貌,以及孔角度对应力应变集中程度的影响,建立了孔洞各缺陷特征对应力应变集中影响的关系,并通过试样内实际孔洞对所建立的关系进行了验证。

**关键词:**A356铸造铝合金 孔洞缺陷 有限元计算 网格无关性 应力集中

**中图分类号:**TH142.2 **文献标志码:**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20240223

# Effect of Porosity Defects on Stress Concentration in A356 Aluminum Casting

Chen Yuanlu[1], Li Zhongyao[1], Miao Yisheng[2,3], Lang Yuling[4], Kong Decai[4], Wang Junsheng[1,2,3]

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081; 2. School of Materials Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081; 3. Advanced Research Institute of Multidisciplinary Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081; 4. CITIC Dicastal Co., Ltd., Qinhuangdao 066010)

**Abstract:** In response to the occurrence of defects such as shrinkage and porosity during the casting process, which lead to stress concentration under high load conditions, produce local high stress-strain zones and local yielding, resulting in reducing the service life of the parts. By using a combination of finite element simplified modeling and experimental analysis verification, the effects of the distance between micropores and the free surface, the distance between the pores, the porosity morphology and the distribution angles on the stress concentration in A356 cast aluminum alloys are systematically studied. The relationship between the influence of each defect feature on the stress-strain concentration is established, and the established relationship is verified by actual pores in the sample.

**Key words: A356 cast aluminum alloy, Porosity defects, FEM, Mesh independence, Stress concentration**

## 1 前言

随着汽车制造业的发展,汽车制造过程中轻量化材料应用越来越受到认可[1-2],铝合金由于其高比强度、易加工性和耐腐蚀的优点广泛用于汽车行业,其中A356铝合金由于其优异的力学性能、可有效减轻簧下质量而广泛用于汽车轮毂制造[3-5]。

**作者简介:**陈远路(1997—),男,硕士学位,主要研究方向为材料缺陷对力学性能与疲劳寿命的影响。

通信作者:王俊升(1979—),男,教授,主要研究方向为集成计算材料工程 ,铝合金、镁合金设计、表征与应用基础研究。

**参考文献引用格式:**

陈远路, 李钟尧, 苗以升, 等. A356铸造铝合金中孔洞缺陷对应力应变集中程度的影响[J]. 汽车工艺与材料, 2024(11): 1-10.

CHEN Y L, LI Z Y, MIAO Y S, et al. Effect of Porosity Defects on Stress Concentration in A356 Aluminum Casting[J]. Automobile Technology & Material, 2024(11): 1-10.

铸造过程中，由于不同位置金属液的冷却速度不同及金属液冷却过程中存在气体析出等原因，材料内部不可避免地出现缩孔、气孔等孔洞缺陷，影响材料的力学性能[6-8]。因此，研究孔洞缺陷对材料力学性能的影响对提升产品的可靠性有一定的作用。

为了解决孔洞尺寸远小于大锻件轮廓尺寸、现有数值模拟方法建模困难的问题，康冬[9]提出一种跨尺度的数值模拟模型，结合有限元二次开发建立了基于体胞法的孔洞演化分析方法并以此讨论了镦粗中孔洞缺陷的演化规律。李清等[10]研究了冲击载荷下含孔洞缺陷材料的断裂行为，发现试件边裂纹处的应力集中程度较内部孔洞更为显著。Nicoletto 等[11] 研究了气孔与缩孔对应力集中的影响，发现形状复杂的缩孔平均应力集中系数高于形状较为规则的气孔。Okayasu 等[12]通过试验的方法分别研究了材料抗拉极限与缺陷在断裂面所占面积分数（The Defect Rate, DR）和缺陷排列角度之间的关系，发现材料抗拉极限与 DR 之间成线性相关，但断裂应变与 DR 成非线性关系。Paul 等[13]在 Okayasu 的基础上，提出扩展 EI-Haddad 模型，构建了拉伸延展性与材料缺陷尺寸之间的关系，并建立了有限元模型，预测了含缺陷材料的应力-应变曲线、抗拉强度等拉伸性能。

以上研究探究了孔洞演化规律以及孔隙率对材料力学性能的影响，但对于孔洞形貌、孔洞位置、孔洞间距离对材料载荷的扰动还鲜有研究。针对 A356 铝合金试样进行计算机断层扫描（X-CT）获取试样内部的孔洞缺陷信息，对试样进行单轴拉伸试验获取材料的力学性能。先通过理想简化孔洞模型建立孔洞缺陷各特征对应力集中的影响模型，然后通过在试样中提取的实际孔洞形貌验证模型。

## 2 试验与仿真

### 2.1 试验

依据 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分：室温试验方法》对两端有 M6 螺纹的圆柱形试样进行拉伸试验，试样尺寸如图 1 所示。以 1 mm/min 的拉伸速率在室温下对试样进行试验。试验材料为 A356 铝合金，除主要元素铝外，各成分质量分数如下：Si 为 7%，Mg 为 0.32%，其他<0.1%。

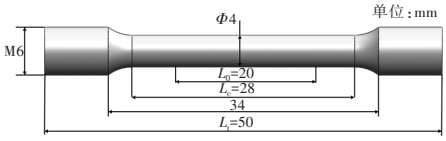



图 1 拉伸试样尺寸

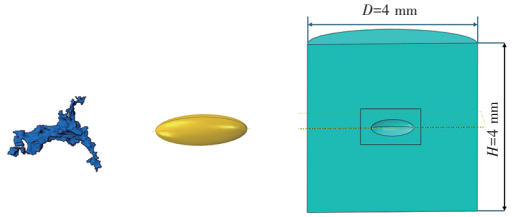
拉伸试验前、后对试样进行 X-CT 扫描。采用的设备为蔡司 Xradia 520 Versa，在加速电压为 70 kV、功率为 6 W、分辨率为 4 μm 的条件下扫描 1 001 张切片数据。采用 AVIZO 软件对数据进行处理：先采用中值滤波过滤噪点，提高结果可靠性，再通过不同结构的灰度值差异利用阈值分割提取孔洞切片数据，然后通过三维重构获得孔洞的三维具体特征，最后分析孔洞具体信息，如孔洞体积、长度、表面积和圆度等。根据 EI Haddad 的研究，较小的孔洞缺陷对疲劳性能影响较小，孔洞尺寸越大，对疲劳性能的影响也越大[14]，故忽略小于 100 μm 的孔洞，仅分析尺寸最大的孔洞对应力应变集中程度的影响。

### 2.2 仿真

仿真分为 2 部分，分别为简化理想孔洞建立各特征与应力集中的关系，以及将包含实际孔洞信息的 X-CT 切片数据重构三维模型导入有限元软件进行仿真，以验证理想简化孔洞所建立的关系模型。

实际试样中，孔洞位置和形状复杂多样，试验研究较为困难。有限元软件能够很好地进行含孔洞试样的力学模拟，成本低且效率高。故采用有限元模拟的方法分别研究孔洞位置、形貌、间距和角度对应力应变集中程度的影响，通过 ABAQUS 软件进行建模和仿真。考虑到建模过程中，不规则孔洞划分的网格质量较差，为降低建模难度并提高计算精度，将孔洞形状简化成球形或椭球形。基于试样的对称性，采用半模型施加对称边界条件进行仿真以提高计算效率。为了与 X-CT 重构的含孔洞缺陷信息的三维模型相对应，简化理想孔洞模型基体采用和 X-CT 扫描段相同尺寸的圆柱体进行建模，如图 2 所示。所建

立的有限元模型设置的载荷和边界条件均为模型上端面施加100 MPa的拉应力,在轴切面和下端面施加对称边界条件。网格采用二阶四面体单元(C3D10)。




(a)实际孔洞　(b)简化孔洞　(c)孔洞模型

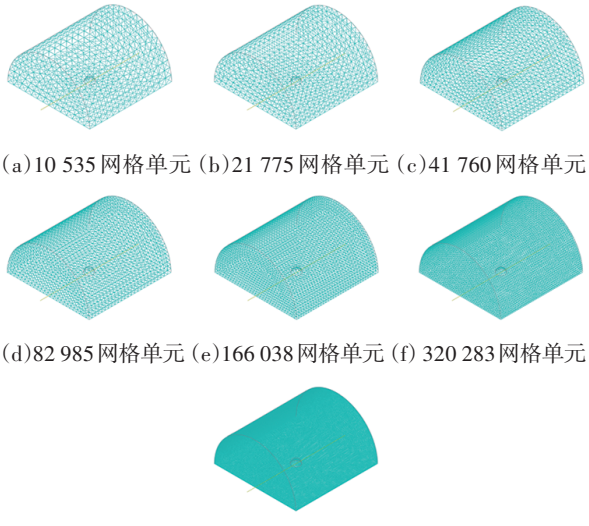
**图2　实际孔洞简化为椭球形孔洞**

## 3　结果与讨论

### 3.1　网格无关性验证

在有限元模型中,网格的划分与计算精度、计算效率密切相关[15-17]。在合理的划分方案下,网格划分越细致,其计算结果的准确性越高,但所需的时间成本将大幅增加。网格细致到一定程度后,随着网格数量的增加,计算结果将会趋近于某极限值,此时继续细化网格将大幅增加计算时间,对于计算精度却没有明显提高,故需要确定个最合适的网格尺寸。

为确定最优网格尺寸,设置7组不同的网格尺寸进行仿真,划分结果如图3所示。



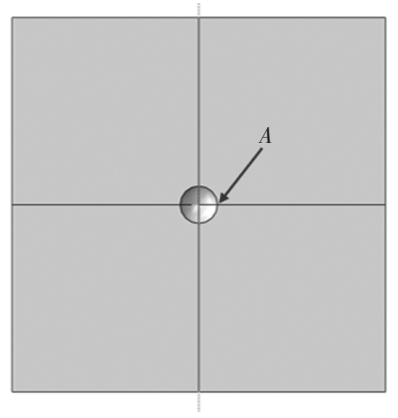
(a)10 535网格单元 (b)21 775网格单元 (c)41 760网格单元

(d)82 985网格单元 (e)166 038网格单元 (f) 320 283网格单元

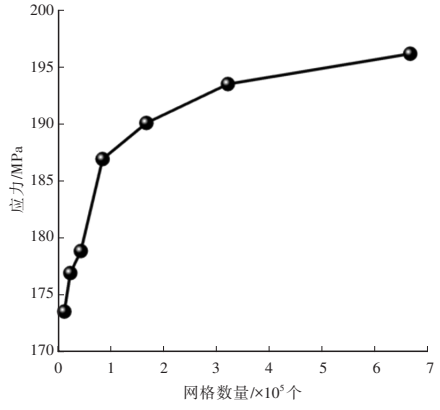
(g)665 545网格单元

**图3　网格尺寸对网格影响**

不同大小的网格对分析结果的影响不同,网格无关性验证应在相同位置提取不同网格模型分析结果的应力进行比较。本文取典型位置节点$A$的应力计算结果进行网格无关性验证,如图4所示。可见对于此模型,在网格达到$1\times10^5$个左右时,网格数量对计算精度的影响已经开始减缓。在网格数量为166 038个时,$A$点处应力为190.1 MPa,与最细网格665 545个网格单元的误差为3.16%,此误差已经可以接受,因此后续仿真采用$16\times10^4$个网格作为网格划分标准进行仿真计算。




(a)应力参考点$A$位置




(b)网格影响分析结果

**图4　应力参考点位置及分析结果**

### 3.2　孔洞与自由表面距离对应力应变的影响

对于孔洞型缺陷对应力应变的影响,Gao等[18]采用应力应变平均因子$K_g$作为同时考虑应力应变集中的无量纲数,用来描述应力应变的集中程度。此参数用来表述微小裂纹扩展中局部应力应变变化具有较高的准确性,故采用$K_g$作为量化表征参数进行描述孔洞对应力应变的影响:

$$K_g = \sqrt{k_\sigma k_\varepsilon} \tag{1}$$

式中:$k_\sigma = \sigma_{max}/\sigma^\infty$为应力集中系数;$k_\varepsilon = \varepsilon_{max}/\varepsilon^\infty$为应变集中系数;$\sigma_{max}$为孔洞局部最大应力;$\varepsilon_{max}$

为孔洞局部最大应变；$\sigma^{\infty}$ 和 $\varepsilon^{\infty}$ 为无穷远处的应力和应变，用于描述无孔洞缺陷时材料的受力状态。

现有文献表明，靠近表面的大孔洞将会诱导产生微小裂纹，从而大幅降低零件服役性能[19-20]。研究孔洞与自由表面间距的影响主要是为了研究孔洞对材料的力学性能产生影响时与表面的最小距离。由于孔洞的大小不一，为系统研究孔洞与自由表面之间距离的影响，本文将取孔洞与自由表面间的最小距离与孔洞直径的比值（$s/D$）作为自变量，以 $K_g$ 作为因变量。孔洞位置如图 5 所示。

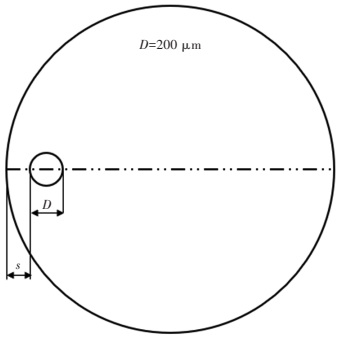
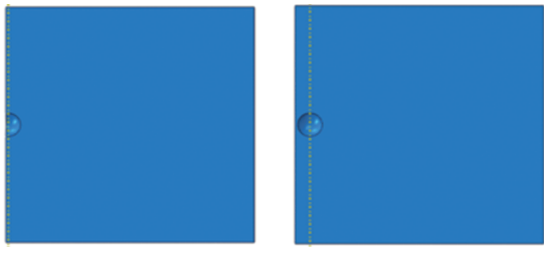



图 5 孔洞位置示意

$s/D$ 作为自变量分别取 15 组不同值，如表 1 所示。如图 6a 所示，$s/D$ 取负值代表孔洞与自由表面相交，即在基体表面出现空腔的情况，且 $s/D$ 值越小，孔洞在基体表面的凹坑深度越小；如图 6b 所示，取正值则代表孔洞位于自由表面之下，且 $s/D$ 越大，说明孔洞位置越深，孔洞与自由表面间厚度越大。计算结果如图 7 所示。

表 1 $s/D$ 取值

| 试验号 | $s/D$ | 试验号 | $s/D$ | 试验号 | $s/D$ | 试验号 | $s/D$ | 试验号 | $s/D$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | −0.7 | 4 | −0.4 | 7 | −0.1 | 10 | 0.3 | 13 | 0.6 |
| 2 | −0.6 | 5 | −0.3 | 8 | 0.1 | 11 | 0.4 | 14 | 0.7 |
| 3 | −0.5 | 6 | −0.2 | 9 | 0.2 | 12 | 0.5 | 15 | 1.0 |




（a）孔洞在基体自由表面 （b）孔洞深埋在自由表面之下

图 6 孔洞与自由表面相对位置

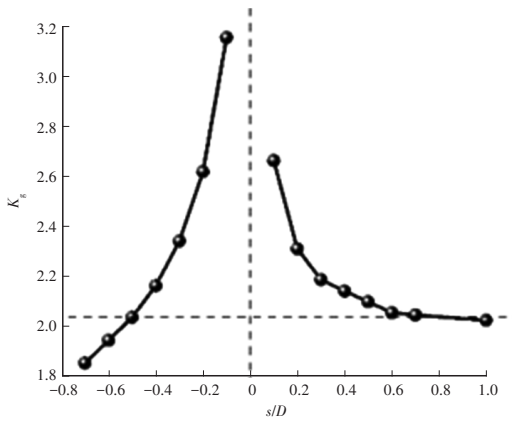



图 7 应力集中程度随孔洞与自由表面间距离变化的影响

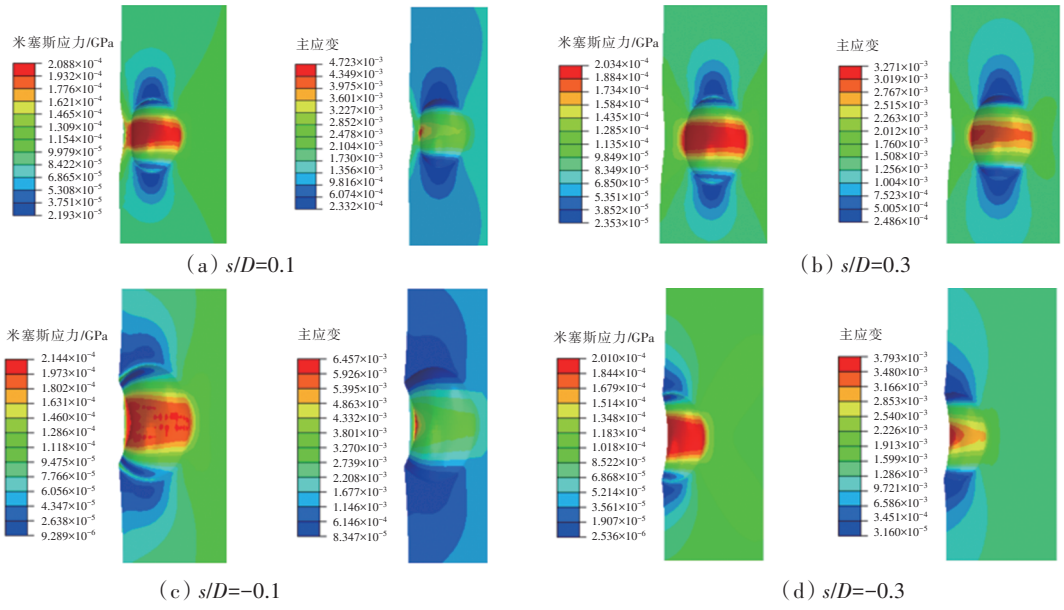
由图 7 可知，在孔洞埋在试样内部且与自由表面距离越小时，孔洞所带来的应力应变影响越显著，且随着孔洞与自由表面距离的增大，孔洞带来的应力应变影响先是迅速降低，而后趋于平缓。在孔洞远离表面一定距离（$s/D$>0.6）时，应力应变集中程度趋于平衡，即此时孔洞位置继续向内部移动不会对零件的载荷产生明显的扰动，从而不会对零件的服役性能产生明显的影响。由于孔洞与自由表面之间的距离很小时，孔洞与自由表面间的网格层数过小，此时会导致计算结果失真，故对 $s/D$ 取值±0.1 之内的情况不予考虑。对于 $s/D$ 取负值，即孔洞与自由表面相交时，孔洞对应力应变的影响与孔洞深埋在试样内部的情况相类似，随着 $s/D$ 值越来越小，应力应变集中程度先迅速下降，而后趋于平缓，直至孔洞完全脱离试样后，无应力应变集中，$K_g$ 最终取值为 1。对模型分析结果数据进行散点拟合，得到应力应变平均因子 $K_g$ 与孔洞与自由表面相对位置的关系：

$$K_g = \begin{cases} 1.8e^{\frac{x}{0.3}} + 1.69 \ (x \leqslant -0.1) \\ 0.7e^{-\frac{x}{0.7}} + 2.02 \ (x \geqslant 0.1) \end{cases} \quad (2)$$

如图 8 所示为节选的部分孔洞位置仿真结果应力应变分布情况。

### 3.3 孔洞间距对应力应变的影响

除了孔洞与自由表面间距会对材料的载荷产生影响，两孔洞间距大小也会对材料载荷情况产生影响[21]，故孔洞间距也是需关心的变量。本文将孔洞进行周向阵列，外圈的圆孔按照正六边形顶点的位置分布，如图 9 所示，以此确保所有孔洞之间距离相等。




（a）$s/D$=0.1　　（b）$s/D$=0.3

（c）$s/D$=−0.1　　（d）$s/D$=−0.3

**图8　孔洞位置仿真结果应力应变分布**

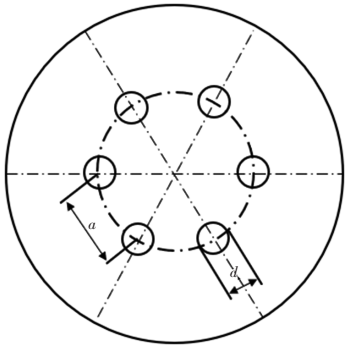



**图9　孔洞间距模型**

以2个孔洞的球心间距与孔洞直径的比值（$a/d$）作为自变量进行表征，设置了6组取值，如表2所示。计算结果如图10所示，应力应变分布情况如图11所示，根据计算结果进行拟合建立了$K_g$与两孔洞间距的关系函数：

$$y = 47\,677.7e^{-\frac{x}{0.1}} + 2.04 \quad (x \geqslant 1.2) \qquad (3)$$

**表2　$a/d$取值**

| 参数名称 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $a/d$ | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.5 | 1.75 | 2.0 |

可见在$a/d$取值越小时，$K_g$越大，并且随着$a/d$的增大，$K_g$减小的速度逐渐减小。在$a/d$>1.5时，孔洞间距带来的影响已经趋近于平衡，可见此时孔洞间距不是影响零件载荷变化的显著因素，在此孔洞间距下，多个孔洞之间产生的应力集中已经不再相互耦合，应力集中的大小只与单个孔洞的特征有关。

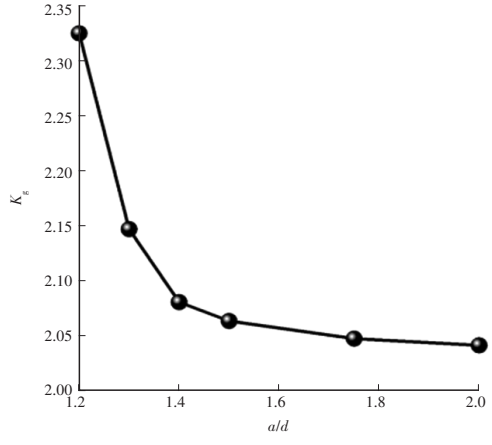


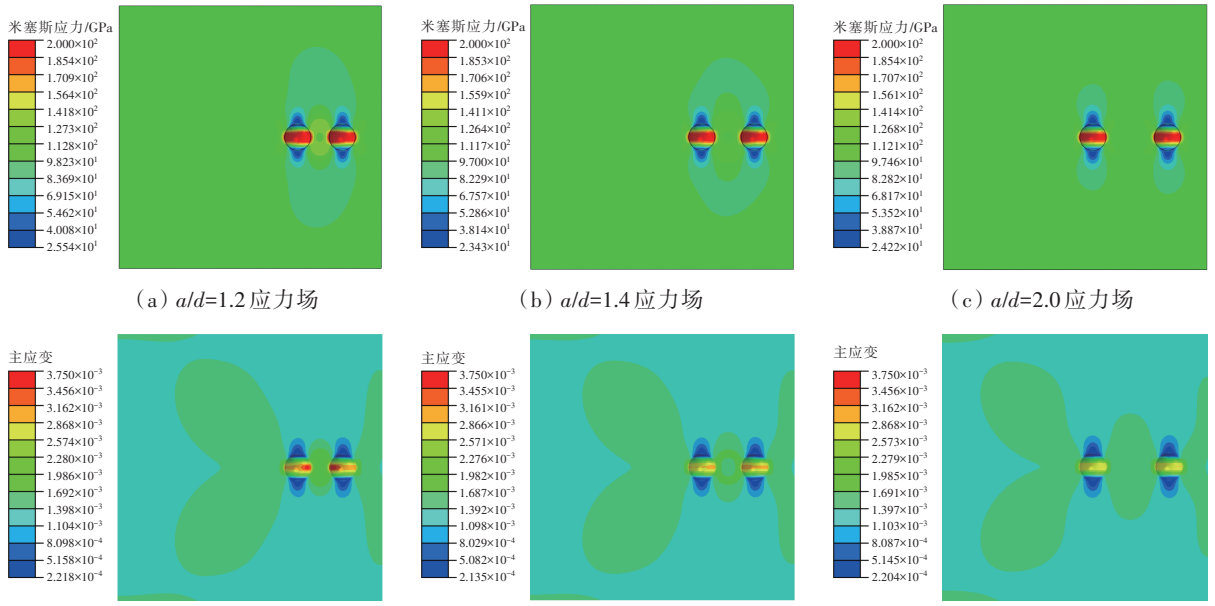

**图10　应力集中程度随孔洞间距变化的影响**

### 3.4　孔洞形貌对应力应变的影响

主要考虑3种不同形貌对应力应变集中程度的影响。3个形貌孔洞分别为球形、圆盘形、子弹形，如图12所示。

引入三轴尺寸来定义3种形貌，设短半轴、中长半轴、长半轴分别为$a$、$b$、$c$，其中球形孔代表$a$=$b$=$c$；圆盘形孔代表$a$<$b$=$c$；子弹形孔代表$a$=$b$<c。

球形孔直径分别取为0.05 mm、0.1 mm、0.15 mm、0.2 mm、0.25 mm、0.3 mm、0.35 mm、0.4 mm、0.45 mm、0.5 mm；圆盘形孔固定取值$b$=$c$=0.5 mm，$a$按0.05 mm的梯度由0.5 mm降至0.05 mm；子弹形孔固定取值$c$=0.5 mm，$a$与$b$同步按0.05 mm的梯度由0.5 mm降至0.05 mm，即所有长径比（$a/c$）设置按0.1间 隔，从1取到0.1。




（a）$a/d$=1.2 应力场　（b）$a/d$=1.4 应力场　（c）$a/d$=2.0 应力场

（d）$a/d$=1.2 应变场　（e）$a/d$=1.4 应变场　（f）$a/d$=2.0 应变场

**图 11　孔洞间距的影响**



（a）球形孔　（b）圆盘形孔　（c）子弹形孔

**图 12　3 种孔洞形貌**

计算结果如图 13 所示，发现当孔洞为球形时，随着孔径的增大，应力应变集中程度并没有明显的波动，同时，当孔洞为固定长轴 $c$，同步增大 $a$ 和 $b$ 的子弹形孔洞时，应力应变集中程度依然波动不明显。然而，当孔洞为固定中长轴 $b$ 和长轴 $c$ 的圆盘形孔洞时，应力应变集中随着 $a/c$ 比值减小迅速上升，即圆盘形孔越薄，孔洞所引起的应力应变集中越剧烈。

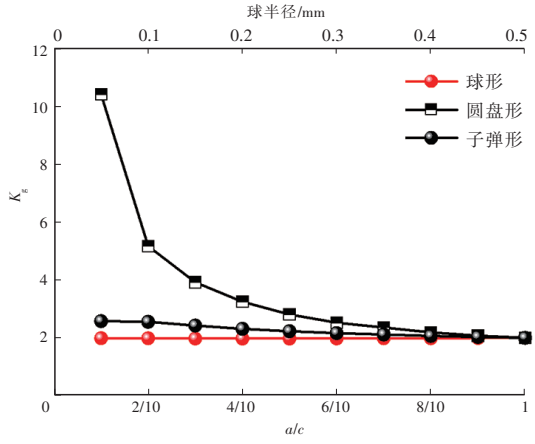


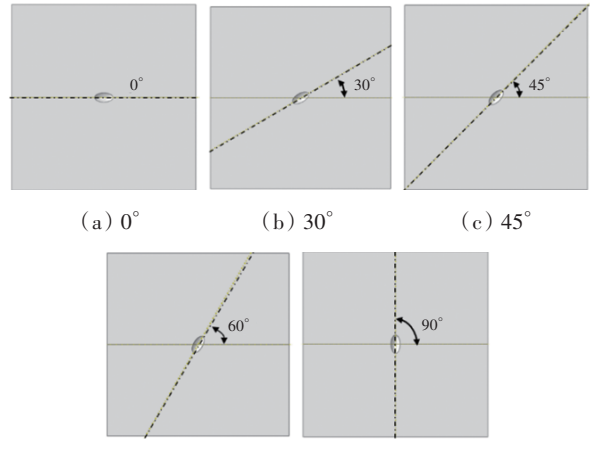

**图 13　应力集中程度随孔洞形貌变化的影响**

### 3.5　孔洞角度对应力应变的影响

简化为球形孔洞不能满足对试样实际载荷情况数值计算的需求，因此对于试样上不同的孔洞，需要根据实际情况将其简化为不同孔洞。除了球形孔洞没有角度差异外，圆盘形孔洞和子弹形孔洞都具有方向性。

以 $a/c$=$b/c$=1/2 的子弹形孔洞为例研究孔洞方向性变化对应力应变集中程度的影响，设置孔洞长轴与载荷方向垂直面夹角分别成 0°、30°、45°、60°、90°来分析角度变化带来的影响，角度朝向定义如图 14 所示。计算结果如图 15 所示，根据计算结果进行拟合建立应力应变集中因子和孔洞长轴与载荷方向垂直面夹角的关系函数：

$$y = 2.37 - 0.01x\,(0^\circ \leqslant x \leqslant 90^\circ) \qquad (4)$$




（a）0°　（b）30°　（c）45°

（d）60°　（e）90°

**图 14　孔洞角度示意**

由图 15 可知，应力应变集中程度随长轴与载

荷方向垂直面夹角的增大而减小,并且成线性关系。对此可以用与载荷垂直方向上裂纹的尖锐程度解释,当长轴与载荷方向垂直时,长轴两端点间距离与平行于载荷方向上两端点间距离的比值最大,即可认为此时孔洞在垂直于载荷方向上的孔隙尖锐程度最大,故此时会引起最大程度的应力集中,诱使了微小裂纹的产生。如图16所示为部分计算结果的应力应变场。

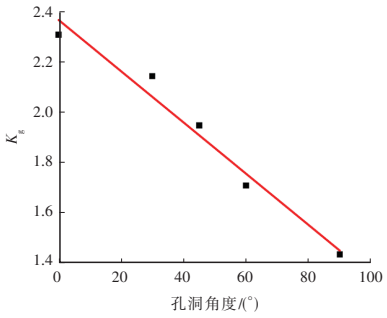
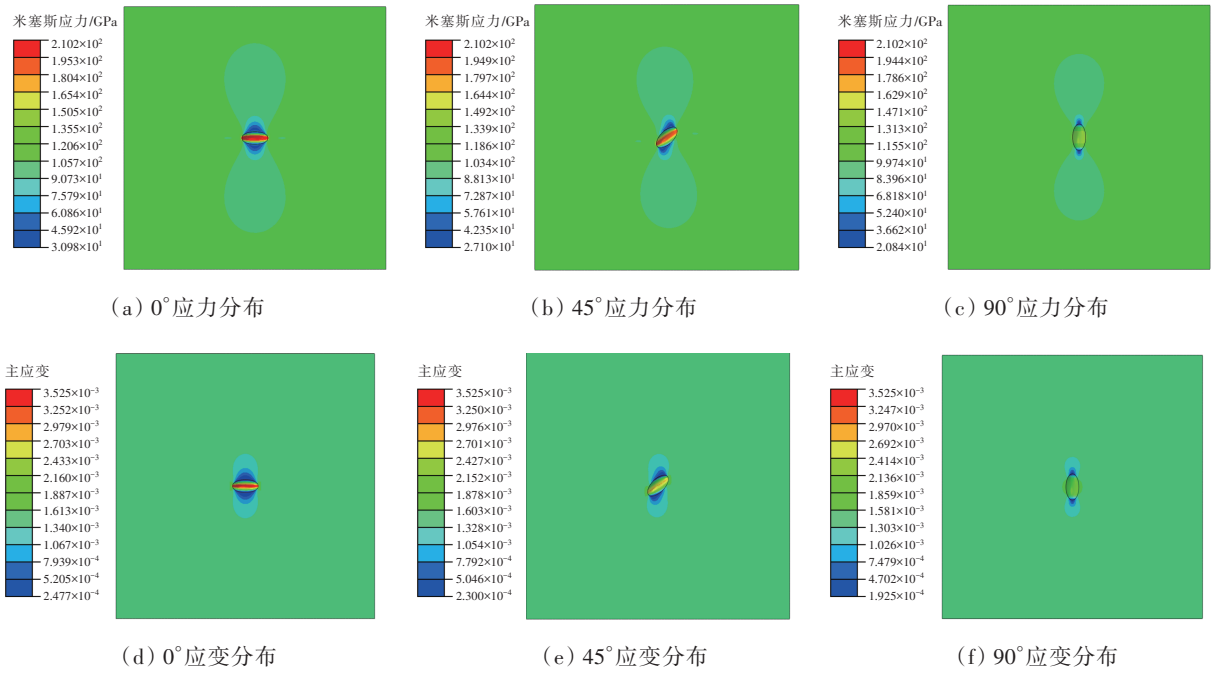



图15　子弹形孔洞应力应变集中程度随孔洞角度变化的影响




(a) 0°应力分布　(b) 45°应力分布　(c) 90°应力分布

(d) 0°应变分布　(e) 45°应变分布　(f) 90°应变分布

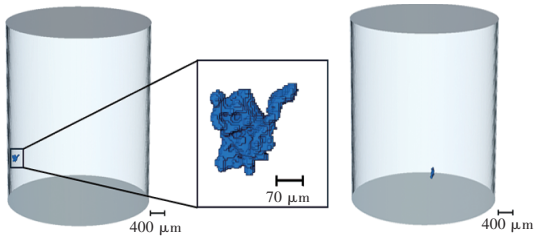
图16　孔洞不同取向的部分仿真结果

## 4　对比验证

在以上模型分析的基础上,本文对实际试样中的孔洞进行有限元分析,获取含孔洞试样的应力应变分布,对所建立模型进行验证。同时,为验证仿真结果的准确性,采用数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)方法对试样在实际拉伸过程中的应变进行表征,获取试样局部应变并与有限元结果中应变场进行对比,了解与分析仿真和试验结果之间的误差。本文所报道的DIC结果均为拉伸过程中载荷为100 MPa时刻的应变场分布,红色框为试样进行XCT扫描区域。

### 4.1　靠近自由表面大孔洞

选取边界大孔洞模型,孔洞形状和位置如图17所示。孔洞的当量直径为107.8 μm,体积为6.56 × $10^5$ μm$^3$,该孔洞最长方向的尺寸为250.8 μm,垂直该方向的最大尺寸为90.1 μm。孔洞与自由表面的最小距离为210 μm,即 $s/d$=210/107.8=1.95。将含有该孔洞缺陷三维实体模型导入有限元软件建模分析。在上端面施加100 MPa拉应力,在下端面施加对称边界条件。为了验证仿真结果,在试样中找到该孔洞的实际位置 $O$ 进行了DIC试验,见图18c。

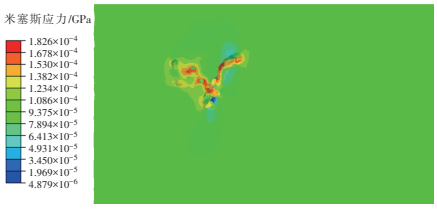



(a)孔洞正视图　(b)孔洞放大图　(c)孔洞侧视图

图17　表面大孔洞形貌及位置

有限元计算结果如图18a和图18b所示,根据应力应变结果,按式(1)计算,$K_g$=2.03。按简化后建立的理想孔洞模型进行计算,$K_g$的计算结果为

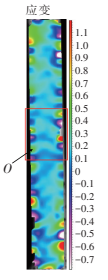
2.06，二者之间的误差小于 2%，证明了简化后的理想孔洞模型可以用于预测孔洞与自由表面之间距离的应力应变集中关系。DIC 试验结果如图 18c 所示，可见实际试样在 100 MPa 的载荷下，孔洞的局部应变为 0.4% 左右，与仿真结果接近，验证有限元结果的可靠性。




（a）应力场分布




（b）应变场分布

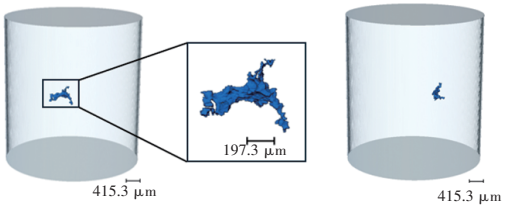



（c）DIC 试验应变分布

**图 18　表面大孔洞仿真结果和 DIC 试验结果**

### 4.2　水平方向大孔洞

选取了孔洞朝向为垂直载荷方向的大孔洞，孔洞形貌和位置如图 19 所示。孔洞的当量直径为 215.5 μm，体积为 $5.24\times10^6$ μm$^3$，该孔洞最长方向的尺寸为 690.6 μm，垂直该方向的最大尺寸为 314.2 μm。边界条件和载荷设置与 4.1 节部分一致。同 4.1 节，为验证仿真结果，在试样中找到该孔洞的实际位置 $P$ 进行了 DIC 试验，如图 20c 所示。




（a）孔洞正视图　（b）孔洞放大图　（c）孔洞侧视图

**图 19　水平方向孔洞形貌及位置**

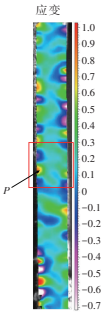
有限元计算结果如图 20 所示，孔洞附近局部应力最大值为 205.8 MPa，局部应变最大值为 0.569%。在均质区域（远离孔洞所在的部位），应力为 100 MPa，应变为 0.139%。由图 20c 可知，实际试样在孔洞位置（$P$ 点）的应变在 0.6%~0.7% 之间，与试验结果的 0.569% 存在一定的误差，但处于可接受的范围。根据式（1）进行计算，可以得到 $K_g$=2.90。这与理想孔洞简化模型式（4）的计算结果的误差值为 22%，产生误差的原因主要有：理想孔洞简化模型在建模时只考虑了单一长径比的情况，对于大小不同的孔洞计算结果可能存在偏差；实际孔洞形状各异，存在曲率过大的部位会加剧应力集中，但对于复杂形状，在建模过程中需要进行简化，故实际结果与模型计算结果之间存在误差。但对于此模型的计算精度已经接近 80%，故认为对于本算例建立的模型能够适用本文所研究情况。




（a）应力场分布




（b）应变场分布




（c）DIC 试验应变分布

**图 20　水平方向大孔洞模型仿真结果和 DIC 试验结果**

4.1 节与 4.2 节的计算结果进行比较可以佐证 3.6 节中所建立的孔洞角度对应力应变集中程度影响的模型。在孔洞长轴在载荷方向的垂直面上

时,孔洞产生的应力应变集中程度最大。孔洞长轴与载荷方向平行时,孔洞的应力应变集中取得最小值。由此验证了3.5节中所建立模型的正确性。

## 5　结束语

本文通过拉伸试验前对试样进行计算机断层扫描,由拉伸试验得到材料的基本物性参数,然后简化孔洞建立理想孔洞的应力集中模型,最后通过断层扫描的真实孔洞信息对所建立的理想孔洞模型进行验证,得到了以下结论:

**a**.孔洞在与自由表面相切时引起的应力集中最为显著,随着孔洞与自由表面间距离的增大先迅速下降,后缓慢变化,直到达到平衡值。当孔洞与自由表面间材料厚度大于孔洞当量直径一半时,孔洞对应力应变集中程度的影响达到稳定值,此时即可认为该孔洞位置远离降低产品服役性能的敏感区域。

**b**.应力集中程度与孔洞间距成负相关关系,当球形孔洞质心之间的距离逐渐增至超过1.5倍直径后,多孔洞之间对应力应变的耦合关系减小,直至解耦。

**c**.孔洞长轴在载荷垂直面上时,圆盘形孔洞应力集中程度最大,且圆盘形孔洞越扁($a/c$越小),应力集中越明显。

**d**.应力集中程度与孔洞长轴与载荷方向的角度有关,在长轴处于载荷垂直面时,孔洞产生应力集中程度最大,当长轴方向与载荷方向重合时,孔洞产生的应力应变集中程度最小。

## 致谢

感谢华北理工大学冶金与能源学院张明山老师对本文应力集中试验表征提供的支持与帮助。

**参考文献:**

[1] 陈志俊. 金属材料在汽车轻量化中的应用与发展[J]. 中国金属通报, 2021(3): 9-10.

[2] 李振江, 任洁. 浅谈轻质材料在新能源汽车轻量化中的应用与发展[J]. 汽车文摘, 2021(8): 15-18.

[3] 蒋建平, 蒋晶. 浅析汽车安全新技术与道路交通安全[J]. 绿色科技, 2013(11): 213-215.

[4] 张世琪, 吴国瑞, 黄金, 等. 浅析汽车轻量化铝合金轮毂的生产工艺[J]. 内燃机与配件, 2022(24): 76-78.

[5] KONG D C, SUN D Z, YANG B C, et al. Characterization and Modeling of Damage Behavior of a Casting Aluminum Wheel Considering Inhomogeneity of Microstructure and Microdefects[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 145.

[6] ZERBST U, MADIA M, KLINGER C, et al. Defects as a Root Cause of Fatigue Failure of Metallic Components. I: Basic Aspects[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 97: 777-792.

[7] ZERBST U, MADIA M, KLINGER C, et al. Defects as a Root Cause of Fatigue Failure of Metallic Components. II: Non-metallic Inclusions[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 98: 228-239.

[8] ZERBST U, MADIA M, KLINGER C, et al. Defects as a Root Cause of Fatigue Failure of Metallic Components. III: Cavities, Dents, Corrosion Pits, Scratches[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 97: 759-776.

[9] 康冬. 大锻件孔洞缺陷演化过程的跨尺度数值模拟方法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.

[10] 李清, 郭洋, 韩通, 等. 冲击载荷作用下含孔洞缺陷介质断裂行为研究[J]. 中国矿业, 2016, 25(8): 126-129.

[11] NICOLETTO G, KONEČNÁ R, FINTOVA S. Characterization of Microshrinkage Casting Defects of Al–Si Alloys by X-Ray Computed Tomography and Metallography[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 41: 39-46.

[12] OKAYASU M, SAKAI H. The Effects of Defects on Tensile Properties of Cast ADC12 Aluminum Alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46(11): 5418-5430.

[13] PAUL S K. A Physics-Based Defect Tolerant Design Approach to Predict the Tensile Performance of Aluminium Alloys with a Defect[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023, 127.

[14] EL HADDAD M H, SMITH K N, TOPPER T H. Fatigue Crack Propagation of Short Cracks[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1979, 101(1): 42-46.

[15] 黄山, 徐伟, 张喻捷, 等. 基于Ansys Workbench的往复吊厢吊杆网格无关性分析[J]. 起重运输机械, 2022, (1): 62-66.

[16] 杨林家, 方舒杨. 基于FLUENT的弯曲方管网格无关性验证[J]. 北部湾大学学报, 2023, 38(2): 63-69.

[17] 张波, 苏宗帅, 王宝新, 等. 无人潜航器电池舱结构设计与仿真分析[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(13): 76-79.

[18] LI P, LEE P D, MAIJER D M. Quantification of the Interaction within Defect Populations on Fatigue Behavior in an Aluminum Alloy[J]. Acta Materialia, 2009, 57(12): 3539-3548.

[19] GAO Y X, YI J Z, LEE P D, et al. The Effect of Porosity on the Fatigue Life of Cast Aluminium-Silicon Alloys[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2004, 27(7): 559-570.

[20] LE V-D, SAINTIER N, MOREL F, et al. Investigation of the Effect of Porosity on the High Cycle Fatigue Behaviour of Cast Al-Si Alloy by X-Ray Micro-Tomography [J]. International Journal of Fatigue, 2018, 106: 24-37.

[21] 吴海峰, 许莎, 严颖清, 等. 孔洞型缺陷对铸造铝合金应力分布影响的研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2023, 61(11): 146-173.

AT&M