

微观孔洞对压铸 AlSiMgMn 合金拉伸断裂的影响

刘 斐, 杨润生, 赵海东

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

摘要: 利用高精度X射线三维断层扫描技术对压铸AlSiMgMn合金内部孔洞进行了重构, 并利用有限元模拟分析了拉伸裂纹的扩展及孔洞导致的应力集中。结果表明, AlSiMgMn合金内部的孔洞对裂纹扩展路径有决定性的影响。孔洞的形状和位置也会影响微裂纹的产生和应力分布。同时发现圆整度低且距离最小截面近的孔洞易形成微裂纹。实验证明了合金中的脆性 α -Fe金属间化合物对裂纹扩展的影响。

关键词: 压铸AlSiMgMn合金; 孔洞; 三维X射线断层扫描; 有限元分析

汽车轻量化可以有效减少能耗、降低污染^[1]。目前铝合金凭借高比强度、成形性好等优势, 通过代替传统钢铁材料实现汽车零部件轻量化。AlSiMgMn合金由于良好的力学性能, 已经被广泛地应用于汽车零件^[2-4]。压铸是汽车零部件常用的成形方法, 但由于在压铸过程中, 金属液体高速充填型腔, 液态金属处于紊流状态, 易产生气体卷入而产生孔洞缺陷^[5-6]。此外在合金凝固收缩时也会形成缩孔^[7-8], 这些孔洞会降低铸件的力学性能^[9-14]。

传统研究中, 主要根据孔洞的二维形貌来分析其对合金性能的影响^[15]。但是, Irfan等^[16]指出利用孔洞二维形貌来研究合金力学性能的方法并不准确。随着高分辨率X射线断层扫描技术的发展, 研究者开始利用X射线三维断层扫描技术研究孔洞的体积、圆整度和曲率半径等。Felberbaum等^[17]利用高精度三维断层扫描技术研究重力铸造铝铜合金中微孔的三维形貌, 发现在金相上观察到相互独立的孔洞, 但是在试样内部却是相互连接的。Li等^[18]利用有限元模拟研究铸造铝合金内部孔洞周围的应力分布。通过ABAQUS软件, Taxer等^[19]使用孔洞随机分布模型分析了孔洞的体积分数对材料弹塑性力学影响。Sebastien等^[20]利用静态有限元模拟研究孔洞形貌对局部应力应变的影响。Zhao^[21]基于孔洞的X射线扫描与重构, 计算了压铸ADC12合金疲劳载荷下孔洞的应力集中。但是, 利用高精度X射线扫描重构及有限元分析技术, 研究压铸合金真实孔洞对断裂失效影响的研究非常有限。

本文利用高精度X射线对压铸AlSiMgMn合金内部微观孔洞进行了重构, 使用原位拉伸实验研究了合金拉伸性能。在考虑合金内部孔洞结构的情况下, 对拉伸过程裂纹形成与扩展进行了三维有限元模拟。完成了试验结果与模拟结果的对比, 分析了孔洞导致的应力集中与裂纹形成, 以及对裂纹扩展的影响。同时, 讨论了模拟结果误差的原因。

1 试验方法

原位拉伸试验材料为AlSiMgMn合金, 用线切割在某汽车压铸件上直接取样。铸件在压铸过程中的浇注温度和模具温度分别为650 °C和200 °C。利用直读光谱仪ARL4460测量了化学成分, 结果除了铝元素外, 主要包括10.10%Si、0.075%Fe、0.62%Mn、0.12%Mg、0.012%Sr。

原位拉伸试样如图1所示。为了准确观测裂纹萌生与扩展, 在试样中间一侧加工

作者简介:

刘 斐(1990-), 男, 博士生, 主要从事压铸铝合金组织性能的研究工作。
E-mail: 15735161276@163.com

中图分类号: TG146.2⁺¹

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)06-0657-07

基金项目:

广东省重点领域研发计划项目(2020B010186002); 佛山市核心技术攻关项目(1920001001040)。

收稿日期:

2021-05-18

了一个深度为0.3 mm、角度为60°的V形缺口。原位拉伸试验在岛津 (SEM-Servopluse) 扫描电子显微镜的拉伸设备上完成, 该设备可以在高真空的条件下观察拉伸过程中试样组织变形和裂纹扩展。试验中拉伸速率为1 $\mu\text{m/s}$, 裂纹每扩展0.3 mm记录一次。

本试验所采用的断层扫描设备为三英精密仪器有限公司生产的nanoVoxel-2000系列X射线三维显微CT, 最高分辨率达到0.5 μm , 试样在4 mm \times 2.5 mm \times 1.3 mm范围内进行扫描 (图1)。本次扫描中X射线管电压和电流分别为120 kV和80 μA , 其中试样以0.5 $^\circ/\text{min}$ 的角速度旋转, 获得了一系列1 024 \times 1 024像素的图片。为了最大获取整个检测区域的孔洞特点, 扫描精度设置为3.88 μm 。将断层扫描后的数据导入Volume Graphics (VG) Studio Max 2.2软件, 可以重构出试样孔洞缺陷的三维形貌和空间分布。拉伸试样缺口段的孔洞分布如图2所示, 其孔洞颜色越靠近红色, 表示孔洞体积越大。

2 数值模拟

2.1 有限元网格

通过VG软件将X射线断层扫描获得的孔洞数据进行三维重构, 进而得到试样内部孔洞的几何结构和位置数据。将试样长度方向 (Z轴) 的连续切片导入Mimics软件进行重构。根据研究发现^[22-24], 尺寸较大的孔洞和较为靠近试样表面的孔洞对合金的破坏性较大。因此重构时为了提高计算的效率, 只保留体积超过 10^{-4} mm^3 和靠近试样表面的孔洞。为了提高网格划分质量, 形状质量 (H/B) 设置为不超过0.4。面网格中, 三角形最大边长在3~100 μm 之间, 这样有利于提高有限元模拟的精度及效率^[20]。

为了模拟拉伸断裂并建立包含孔洞几何模型的拉伸试样有限元模型, 使用了Abaqus软件, 它可以有效地进行物体的弹塑性、断裂等模拟分析。为了简化分

析, 在文章中只选取一个具有代表性的试样做讨论。由于孔洞形貌复杂使用六面体网格划分网格比较困难, 因此利用Abaqus软件将三角形面网格转化为四面体网格。Abaqus边界条件设置时, 将实际拉伸条件设置在节点上, 上端面固定, 下端面设置位移条件 (图3a), 拉伸速率为1 $\mu\text{m/s}$ 。图3b展示了孔洞的有限元网格划分。

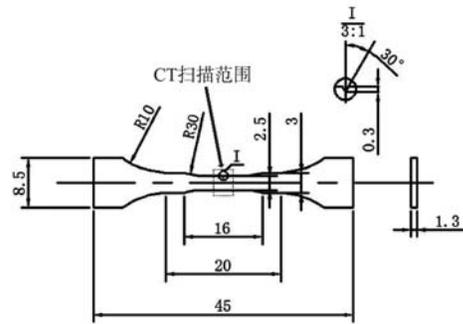


图1 原位拉伸试样形状与尺寸

Fig. 1 Shape and dimensions of in-situ tensile sample

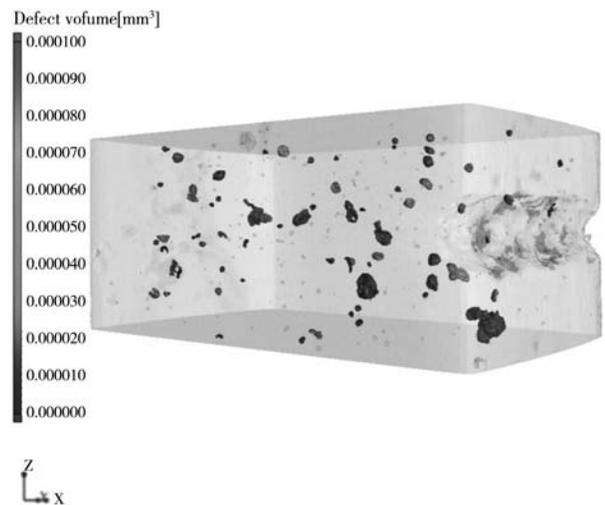
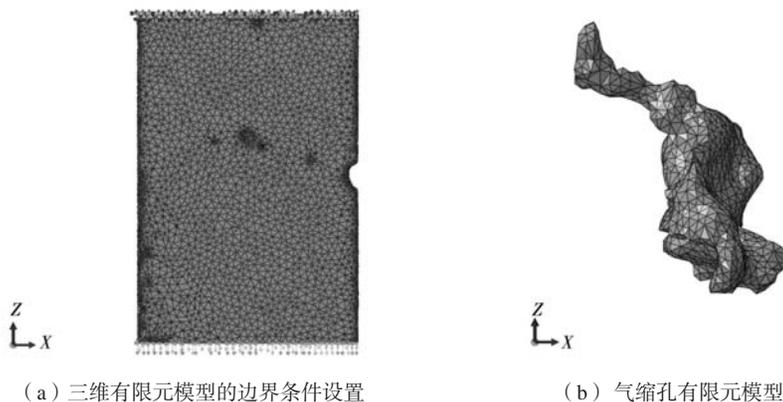


图2 三维重构压铸AlSiMgMn合金内部孔洞

Fig. 2 3D reconstruction of micropores in die-cast AlSiMgMn alloy



(a) 三维有限元模型的边界条件设置

(b) 气缩孔有限元模型

图3 三维有限元模型的边界条件设置及气缩孔有限元模型

Fig. 3 3D FE meshing and boundary conditions and FE meshing of a gas-shrinkage pore

2.2 数学模型

基于Von Mises弹塑性本构定律,材料属性设置为等向硬化。断裂应力设置为0.07,将合金拉伸曲线导入到软件中。合金密度设置为2.64 kg/dm³,杨氏模量设置为76 GPa,泊松比为0.33。由于该合金为塑性良好的压铸铝合金,选择塑性损伤模型作为实验模型^[25]。模型是关于应力三轴度和应变速率的函数,用于定义发生损伤时的等效塑性应变表达式如下^[25]:

$$\eta = \frac{-p}{q} \quad (1)$$

式中: p 为压应力, q 是指Mises等效应力。当如下表达式成立的情况时就满足了材料发生损伤的准则:

$$\omega_d = \int \frac{d\varepsilon^{-pl}}{\varepsilon_d^{-pl}(\eta, \varepsilon^{-pl})} = 1 \quad (2)$$

式中: ω_d 是状态变量,其大小随着塑性变形的增加而单调递增。计算过程中的增加量 $\Delta\omega_d$ 如下:

$$\Delta\omega_d = \int \frac{\Delta\varepsilon^{-pl}}{\varepsilon_d^{-pl}(\eta, \varepsilon^{-pl})} \geq 0 \quad (3)$$

损伤演化规律是描述材料在达到相应的判据时退化的退化率,对于韧性金属的损伤,ABAQUS在模拟中一个单元的应力张量可以用一个损伤变量来建模:

$$\sigma = (1-d)\bar{\sigma} \quad (4)$$

式中: d 是该单元整体的损伤变量, $\bar{\sigma}$ 是在当前增量中

计算出的有效(或未损坏区域的)应力张量;当 $d=1$ 时,该单位材料失去承载能力并被移除。

3 结果与分析

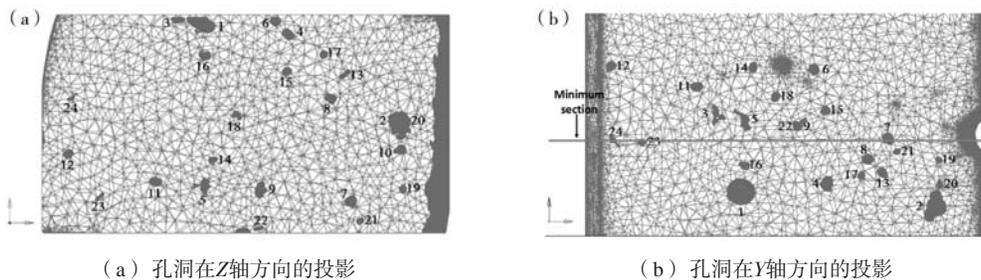
3.1 孔洞分布

图4为有限元网格划分后的孔洞分布。按照孔洞体积大小,对孔洞进行编号。图4a为拉伸模型内部孔洞在Z轴方向的投影,从图中可以看出大多数的孔洞位于截面区域右侧和中部。图4b为拉伸模型内部孔洞在Y轴上的投影,可以看出孔洞位于X射线检测区域中部。

表1中PZ代表孔洞在加载方向的投影面积,Z表示孔洞外接球球心距离预制缺口最小截面的距离。P1至P11孔有较大的体积,P1、P3、P4和P6接近表面。P19、P21和P22孔接近相反面的表层且具有相对小的体积。表1表明较大体积的孔洞通常有较大的投影面积。通过Z值可以看出P1、P2、P4、P6、P10、P11、P12、P14和P18远离最小截面,P7、P23和P24靠近最小截面。

3.2 断裂特征

图5a和5b为原位拉伸试验得到的试样表面完整裂纹扩展路径和模拟断裂后的模型图。图5b与图5a相比,裂纹扩展路径相似。有限元模拟的裂纹扩展路径



(a) 孔洞在Z轴方向的投影

(b) 孔洞在Y轴方向的投影

图4 有限元模型中的孔洞分布图

Fig. 4 Distribution of pores in FE model

表1 有限元模拟的孔洞特征数据
Table 1 Characteristic data of pores in FE model

孔洞	体积 (10 ⁻⁶ ×mm ³)	圆整度	投影面积 (10 ⁻⁴ ×mm ²)	Z/mm	孔洞	体积 (10 ⁻⁶ ×mm ³)	圆整度	投影面积 (10 ⁻⁴ ×mm ²)	Z/mm
P1	1 118	0.47	133	0.33	P13	61	0.45	20	0.18
P2	987	0.46	158	0.34	P14	61	0.54	16	0.44
P3	179	0.32	45	0.19	P15	57	0.47	23	0.17
P4	170	0.48	38	0.25	P16	56	0.46	28	0.16
P5	144	0.36	46	0.14	P17	53	0.65	18	0.21
P6	129	0.64	31	0.41	P18	50	0.42	22	0.24
P7	126	0.46	40	0	P19	41	0.6	17	0.11
P8	119	0.60	30	0.11	P20	33	0.42	13	0.25
P9	114	0.38	50	0.10	P21	32	0.58	16	0.06

注:*Z表示孔洞外接球球心距离预制缺口最小截面的距离。

和实验结果一致，证明模拟中考虑孔洞几何模型的应力计算是准确的。

图6a为试样原位拉伸断口，可以发现在断口上有8个孔洞，即P1、P4、P5、P7、P8、P9、P17和P21孔洞。模拟结果如图6b所示，P1、P4、P5、P7、P8、P9、P13、P17、P19和P21孔洞在试样断面被发现。实验结果同模拟结果相比较，除了P13和P19孔之外，其余孔洞都在拉伸断口上被发现。

从图7a上可以清楚的看到在试样的断口上的P13孔洞附近存在团聚的金属间化合物。通过EDS分析可知（图7c），金属间化合物为 $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ 。P19孔附近同样有团聚的 α -Fe金属间化合物（图7b）。因为金属间化合物塑性极差，易于萌生微裂纹^[26]，因此在

这两个区域内主要是团聚的 α -Fe金属间化合物来决定裂纹扩展方向。在模拟的过程中合金中的 α -Al相，共晶区和金属间化合物被作为均质，所以导致实验与模拟结果存在差异。在下一步的模拟过程中会考虑模拟非均质合金。

3.3 孔洞对微裂纹萌生的影响

许多研究者发现孔洞形貌对微裂纹萌生有较大的影响。在有限元模拟中发现在主裂纹扩展前，孔洞附近就会有微裂纹产生。从图8可以看出， PZ 值越大，在加载方向上的投影越大，裂纹出现的时间越早。除了P4和P9孔洞，其余孔洞微裂纹的出现时间都随着 PZ 的增加而减小。

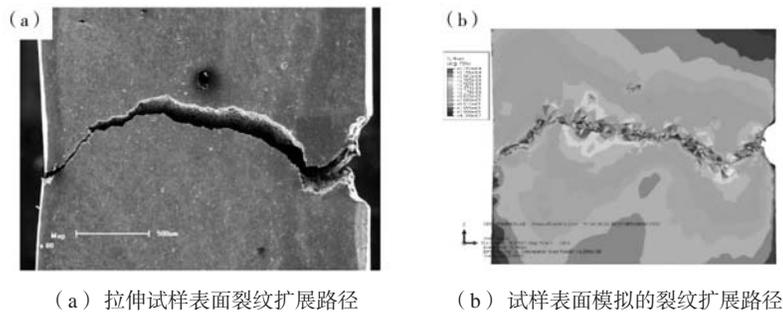


图5 拉伸试样表面裂纹扩展路径及试样表面模拟的裂纹扩展路径
Fig. 5 Experimental crack on tensile sample surface and simulated crack on sample surface

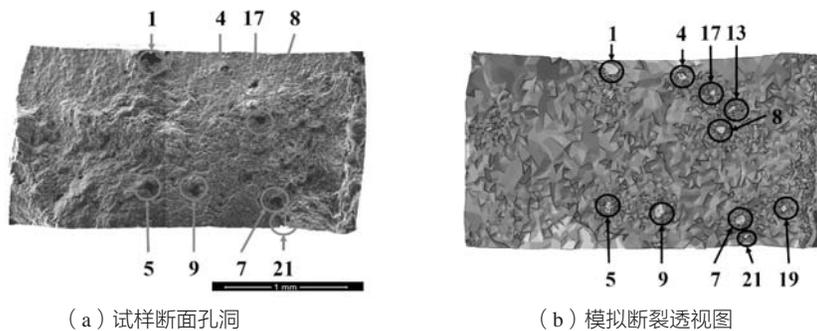


图6 试样断面孔洞和模拟断裂透视图

Fig. 6 Pores on sample fracture and pores on simulated fracture surface

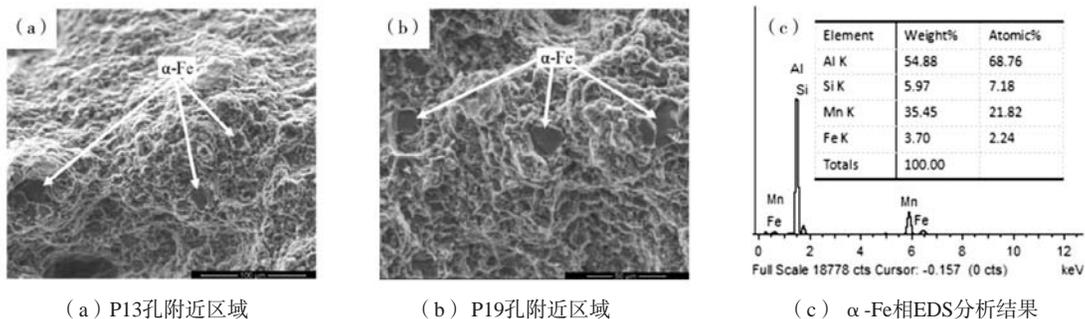


图7 金属间化合物造成的断裂
Fig. 7 Fracture caused by aggregated Fe-rich intermetallics

图9a和9b为P4孔洞在加载时间分别为71 s和110 s的应力分布图。根据表1中的数据，P4孔洞的圆整度为0.48（接近于气孔）。它距预制缺口最小截面的距离为0.25 mm。应力加载到71 s时，孔洞附近没有微裂纹出现。当应力加载到110 s时，孔洞上出现微裂纹。与之相反的是，P9孔洞的圆整度为0.38，距预制缺口最小截面的距离相对较近，只有0.1 mm。如图9c所示，孔洞附近出现较大的应力集中区域，所以应力加载到71 s时便出现微裂纹。当加载到110 s时（图9d），在孔洞上面形成了三条微裂纹。模拟结果表明当孔洞圆整度越小，距预制缺口最小截面越近，就会造成更大的应力集中，导致在应力集中附近区域形成微裂纹。

3.4 孔洞对主裂纹扩展的影响

图10a为应力加载初期试样表面的Mises应力云图。当试样存在预制缺口时，导致受力面积的减少，引起应力集中。缺口附近在垂直于加载方向的截面处应力集中程度最大，而在应力加载方向上则出现低应力区。这是由于缺口附近存在孔洞，从而使材料不均匀，应力加载方向上试样表面不能提供受力点，因此应力较低。随着应力继续增加，预制缺口处应力集中越来越大，最终导致该区域裂纹开始扩展。图10b为裂纹扩展初期试样表面应力分布图。如图所示，主裂纹向下扩展。从图4b可知，这是由于P2、P19和P20孔洞的存在导致裂纹扩展方向发生偏折。也可看出裂纹穿

过的区域应力下降，应力集中区域随着裂纹扩展不断向前移动。然而随着应力继续加载，裂纹开始向上扩展（图10c）。因为在裂纹前方存在大量位于最小截面区域的孔洞（图4b）。最后随着裂纹尖端扩展至左端的最后断裂区域时（图10d），由于P23和P24孔洞（图4b）的存在，产生应力集中，最终主裂纹向下偏转。低应力区转变为高应力集中区域，并最终断裂。

4 结论

利用高精度X射线三维断层扫描技术重构了压铸AlSiMgMn合金内部孔洞，基于塑性损失模型进行了拉伸断裂的有限元分析。得出如下结论：

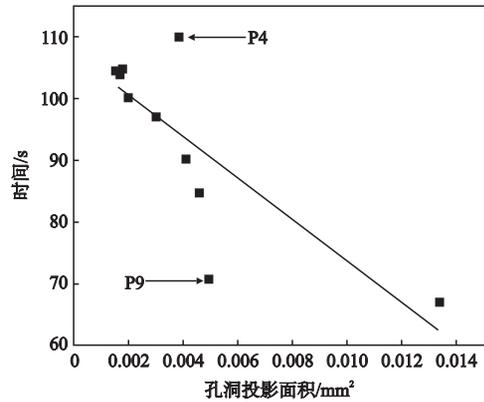


图8 孔洞投影面积与微裂纹萌生时间关系
Fig. 8 Variation of micro-crack initialization time with projection areas

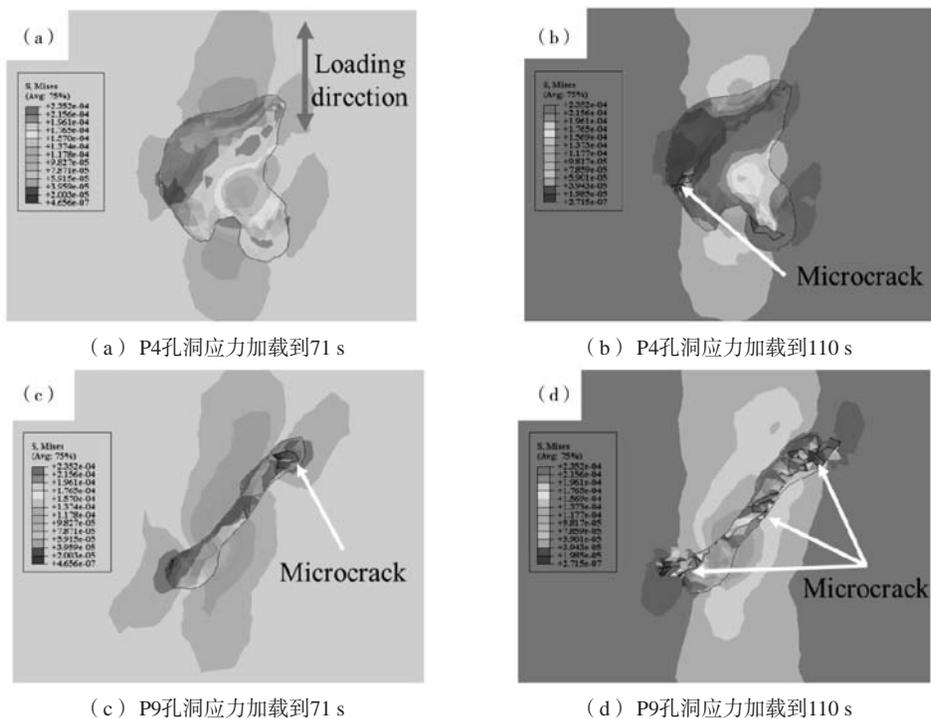


图9 孔洞周围的应力分布与裂纹萌生：Z轴方向投影视图
Fig. 9 Stress variation and micro-crack formation around pore with load time：Z direction projection views

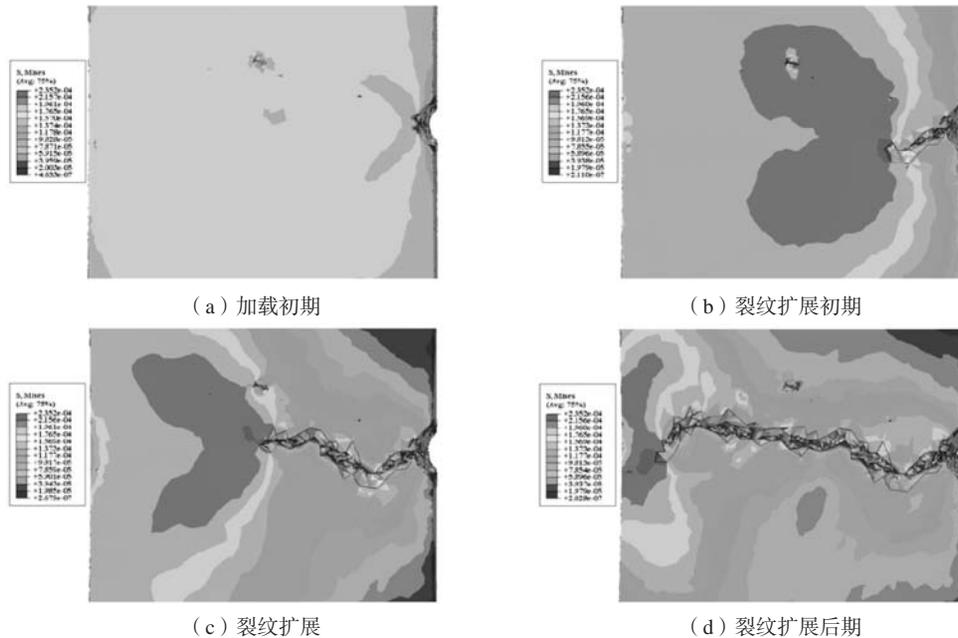


图10 试样加载过程中Mises应力分布云图

Fig. 10 Mises stress distribution during tensile

(1) 有限元分析与实验结果的裂纹扩展路径基本一致。在模拟断口的大部分孔洞出现在拉伸断口上, 表明有限元分析的有效性。模拟与实验结果存在的差异主要是由合金内部脆性 α -Fe金属间化合物导致。

(2) 试样内部的孔洞容易造成应力集中并且产生

微裂纹, 所以孔洞对试样主裂纹扩展与偏折具有决定性作用。

(3) 孔洞形状对应力分布与微裂纹萌生也有重要影响。圆整度越小、分布位置越靠最小截面处, 越容易造成应力集中, 从而导致微裂纹在孔洞附近形成。

参考文献:

- [1] 范子杰, 桂良进, 苏瑞意. 汽车轻量化技术的研究与进展 [J]. 汽车安全与节能学报, 2014, 5(1): 1-16.
- [2] OTARAWANNA S, GOURLAYC M, LAUKLIH I, et al. Microstructure formation in AlSi4MgMn and AlMg5Si2Mn high-pressure die castings [J]. Metall. Mater. Trans., 2009, A 40: 1645-1659.
- [3] MEDVEDJ, KORESS, VONČINAM. Development of innovative Al-Si-Mn-Mg alloys with high mechanical properties// TMS Meeting & Exhibition. Springer, Cham, 2018: 373-380.
- [4] TIMELLIG, LOHNE O, ARNBERG L, et al. Effect of solution heat treatments on the microstructure and mechanical properties of a die-cast AlSi7MgMn alloy [J]. Metall. Mater. Trans. A, 2008, 39: 1747-1758.
- [5] ZHAOH D, WANGF, LIY Y, et al. Experimental and numerical analysis of gas entrapment defects in plate ADC12 die castings [J]. J. Mater. Process Tech. 2009, 209: 4537-4542.
- [6] OKAYASUM, TAKEUCHIS, AIZAWAK. In situ observation of material failure in cast aluminum alloy during monotonic loading observed by a high-speed camera [J]. Exp. Mech. 2014, 54: 1479-1489.
- [7] LEES G, GOKHALEA M. Formation of gas induced shrinkage porosity in Mg-alloy high-pressure die-castings [J]. Scripta. Mater, 2006, 55: 387-390.
- [8] 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: 284-290.
- [9] IWATAY, DONGS. SUGIYAMAY, et al. Compression behavior of entrapped gas in high pressure diecasting [J]. Mater. Trans., 2012, 53: 483-488.
- [10] AZIZ, AHAMEDA K M. Influence of casting defects on tensile properties of ADC12 aluminum alloy die-castings [J]. Mater. Trans., 2008, 49: 1621-1628.
- [11] HARDINR A, BECKERMANNC. Integrated design of castings: effect of porosity on mechanical performance [C]//Materials Science and Engineering Conference Series, 2012, 8: 12069-12076.
- [12] TIRYAKIOĞLUM, CAMPBELLJr J T S J. The effect of structural integrity on the tensile deformation characteristics of A206-T71 alloy castings [J]. Mater. Sci. Eng. A, 2008, 487: 383-387.

- [13] AMMARH R, SAMUELA M, SAMUELF H. Porosity and the fatigue behavior of hypoeutectic and hypereutectic aluminum-silicon casting alloys [J]. *Int. J. Fatigue*, 2008, 30: 1024–1035.
- [14] LEITNERM, GARBC, REMESH, et al. Microporosity and statistical size effect on the fatigue strength of cast aluminum alloys EN AC-45500 and 46200 [J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 2017: 707.
- [15] FANJ, D. MCDOWELL, HORSTEMEYER F, et al. Cyclic plasticity at pores and inclusions in cast Al-Si alloys. *Eng. Fract. Mech*, 2003, 70: 1281–1302.
- [16] IRFANM A, SCHWAMD, KARVEA, et al. Porosity reduction and mechanical properties improvement in die cast engine blocks [J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 2012, 535: 108–114.
- [17] FELBERBAUMM, RAPPAZM. Curvature of micropores in Al-Cu alloys: An X-ray tomography study [J]. *Acta Mater*, 2011, 59: 6849–6860.
- [18] LIP, LEEP D, MAIJERDM, et al. Quantification of the interaction within defect populations on fatigue behavior in an aluminum alloy [J]. *Acta Mater*, 2009, 57: 3539–3548.
- [19] TAXERTK, SCHWARZC, SMARSLYW, et al. A finite element approach to study the influence of cast pores on the mechanical properties of the Ni-base alloy MAR-M247 [J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 2013, 575: 144–151.
- [20] DEZECOT S, MAURELV, BUFFIEREJY, et al. 3D characterization and modeling of low cycle fatigue damage mechanisms at high temperature in a cast aluminum alloy [J]. *Acta Mater*, 2017, 123: 24–34.
- [21] WAN Q, ZHAO H, ZOU C. Effect of micro-porosities on fatigue behavior in aluminum die castings by 3D x-ray tomography inspection [J]. *ISIJ International*, 2014, 54: 511–515.
- [22] UCHIKAWAH, TSUKIYAMAK. Studies on the influence of the shape of the pore and aggregate on the stress-strain distribution hardened cement paste by finite element method [J]. *J. Ceram. Soc. Jpn*, 1975, 83: 117–121.
- [23] KOBAYASHIM, DORCEY, TODAH, et al. Effect of local volume fraction of microporosity on tensile properties in Al-Si-Mg cast alloy [J]. *Met. Sci*, 2014, 26: 962–967.
- [24] WEILERJP, WOODJT, KLASSEN RJ, et al. Relationship between internal porosity and fracture strength of die-cast magnesium AM60B alloy [J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 2005, 395: 315–322.
- [25] Abaqus/CAE User's Manual [M]. 2017.
- [26] BÖSCHD, POGATSCHERS, HUMMELM, et al. Secondary Al-Si-Mg high-pressure die casting alloys with enhanced ductility [J]. *Metall. Mater. Trans. A*, 2015, 46: 1035–1045.

Effect of Micro-Pores on Tensile Fracture Damage of Die-Cast AlSiMgMn Alloy

LIU Fei, YANG Run-sheng, ZHAO Hai-dong

(National Engineering Research Center of Near-Net Shape Forming for Metallic Materials, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong, China)

Abstract:

In this study, the pores in a die-cast AlSiMgMn alloy were reconstructed by high resolution three-dimensional (3D) X-Ray micro computed tomography (μ -CT) inspection. The crack propagation and stress distribution were simulated through finite element (FE) simulation. The results showed that the pores played a decisive role in main crack path, and the pore morphologies and locations had significant influence on the stress distribution and microcrack. The pores of lower sphericity and larger project area in tensile axis direction were prone to cause multi-microcracks and promote crack deflection. The experiment results demonstrated that the aggregation of brittle α -Fe intermetallics in the alloy also affected the main crack propagation.

Key words:

die-cast AlSiMgMn alloy; pores; 3D μ -CT; finite element analysis