

铝合金薄壁压铸件中孔洞的三维表征及其对断裂位置的影响

夏利红

(重庆工商大学 机械工程学院, 重庆 400067)

摘要: 铝合金高压铸件中存在大量孔洞, 对其塑性和断裂行为有显著影响。为研究铸件中孔洞对断裂位置的影响, 采用电子计算机断层扫描(CT)技术分析了高压铸造Al-10Si-0.3Mg合金中孔洞的三维特征, 并采用断口扫描电子显微镜图像分析对CT结果进行了标定。将孔洞的三维特征和采用数字图像相关技术(DIC)获取的局部应变信息相结合, 分析了孔洞特征参量(局部孔隙率、最大孔洞尺寸和孔洞位置)与局部应变分布和断裂位置之间的关系。结果表明: 试样的局部孔隙率、最大孔洞和孔洞位置等特征参量均会影响局部应变分布和断裂位置。然而, 对19个样品的统计分析结果可知, 试样主要在局部孔隙率最大处或接近最大值处发生断裂, 表明局部孔隙率是决定断裂位置的主导因素。

关键词: 压铸; 孔洞; 断裂位置; CT扫描

高压铸造(简称压铸)技术由于具有生产效率高、铸件精度高、铸件性能好、工艺简单等优点^[1-6], 得到了广泛应用, 如汽车大型铝合金薄壁压铸件。然而, 由于压铸工艺充型速度快, 容易导致卷气, 形成气孔, 即使采用真空压铸技术, 也很难消除铸件中的气孔; 而对于大型薄壁压铸件, 因为其各个部位几乎同时凝固, 无法有效补缩, 容易形成缩孔。因此, 作为大型铸造薄壁件的一种主要缺陷, 孔洞(包括气孔和缩孔)不易消除。孔洞的存在会减少材料的有效承载面积, 使得材料在服役过程中产生应力集中, 进而发生断裂^[2-7]。对于在汽车结构件中应用日益增大的大型铝合金薄壁压铸件, 系统研究各种孔洞特征参数(如孔洞的尺寸、局部孔隙率以及孔洞位置)与铸件应变集中和断裂位置的关系, 有助于工程师分析其影响断裂位置的主导因素, 为预测断裂位置, 通过优化工艺提高铸件性能提供实验依据。关于材料孔洞的研究已有大量报道, 熊守美等^[8]认为在拉伸变形过程中, 大孔洞, 包括气孔和网状缩孔是裂纹萌生的主要来源, 裂纹通过材料有效承载面积最小处传播, 也就是孔洞尺寸最大处传播。WEILER等^[9]观察了AM60B镁合金压铸件在拉伸过程中, 材料内部孔洞的演变规律, 发现只有大孔洞发生了明显变形, 而小孔洞的形状几乎没有改变, 认为只有大孔洞才是变形过程中影响材料断裂的关键。WEILER等^[10-11]还用有限元模拟了孔洞尺寸和位置对材料变形的影响, 发现当孔洞位于试样表层所引起的应变集中比在心部更大, 可见孔洞位置会影响局部应变的分布, 进而影响断裂位置。Sun等^[12]基于孔洞的CT扫描构建了3D有限元模型, 预测了AM60镁合金薄壁试样的应力-应变曲线, 同样发现孔洞的尺寸和分布会对材料的断裂产生重要影响。Flacher和Caceres等^[13-14]则认为孔隙率是影响Al-Si-Mg铸造合金断裂的主要因素, 尤其是在薄壁铸件中。此外, 有研究表明, 在孔隙率很低的情况下, 孔隙率的大小与断裂没有明显关系, 而断面上孔洞的面积和长度则直接影响材料的断裂行为^[15-16]。综上所述, 孔洞特征参量, 如孔洞的尺寸、局部孔隙率以及孔洞位置, 会影响铸件的断裂位置。但是, 已有的基于CT技术研究孔洞特征参量与断裂位置的工作存在一些不足, 例如: 样品数量有限(最多5个样品), 结果缺乏统计性; 且分辨率较低(分

作者简介:

夏利红(1986-), 女, 讲师, 博士, 从事轻合金性能预测与改进研究及智能制造研究。E-mail: lhxia@ctbu.edu.cn

中图分类号: TG456.9

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)

06-0698-07

收稿日期:

2021-12-22 收到初稿,

2022-01-19 收到修订稿。

分辨率最高仅为80 μm ，无法探测到尺寸小于80 μm 的孔洞)，丢失了小孔洞的信息。

针对上述问题，作者以典型商业压铸铝合金（Al-10Si-0.3Mg合金）为研究对象，通过显微X射线断层扫描技术（X-ray tomography，也称Computed tomography，CT技术，分辨率为25 μm ）分析了19个样品内的孔洞特征，并与数字图像相关技术（Digital Image Correlation，DIC）相结合，系统分析了孔洞特征参量对局部应变的影响，及其与断裂位置的关系。

1 试验材料与方法

试验所用材料为Al-10Si-0.3Mg合金压铸薄板试样，其厚度为2.5 mm，其化学成分利用GREEN型电感耦合等离子光谱发生仪（ICP）进行分析，检测结果如表1所示。

对合金铸件进行固溶（450 $^{\circ}\text{C}$ ，4 h）+时效（225 $^{\circ}\text{C}$ ，2 h）处理，之后用线切割加工出如图1所示的拉伸试样（共19个试样），采用GE v|tome|x s 240&180型CT设备对每个试样的标距段进行CT扫描，扫描电压为160 kV，电流为0.13 mA，分辨率为25 μm ，所得的CT数据通过VG studio软件进行后处理。

将CT扫描后的试样长宽平面喷上白底漆和黑色斑点，得到的数字图像相关技术（Digital Image Correlation，DIC）试样如图2所示。使用INSTRONG型万能拉伸试验机对试样进行拉伸测试，拉伸测试的同时使用DIC对喷漆平面进行检测，使用的检测仪器为VIC-3D型非接触全场应变测量系统，拉伸速率

表1 Al-10Si-0.3Mg合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of the Al-10Si-0.3Mg alloy $w_B/\%$

Si	Mg	Mn	Fe	Cu	Ti	Sr	其他	Al
9.108	0.33	0.451	0.223	0.015	0.053	0.011	<0.01	余量

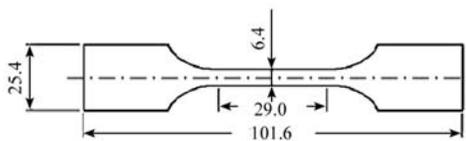


图1 拉伸试样的尺寸

Fig. 1 Dimensions of the test specimen

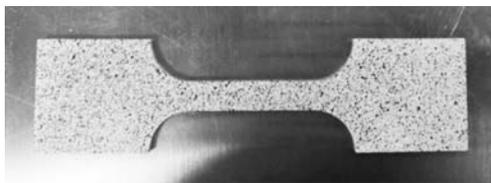


图2 DIC试样的形貌

Fig. 2 Schematic diagram of the DIC sample

为0.8 mm/min，DIC测试的拍照速率为1张/min。试样拉断后用TESCAN VEGA 3型钨灯丝扫描电子显微镜（SEM）二次电子成像的方式对断口进行扫描，获取断口形貌。

2 试验结果

2.1 CT结果的标定

CT扫描原理是基于不同密度材料对X射线吸收能力的不同，孔洞内部主要是空气，其密度远远低于铝合金基体，因此CT扫描能准确识别出材料内的孔洞。CT图像中的不同颜色代表孔洞的体积大小。如图3所示，在试样标距内有大量弥散分布的孔洞，主要为数量较多、尺寸较小的气孔和数量较少但体积较大的缩孔。

由于工业CT是使用X射线对样品进行扫描后，再通过VGstudio软件进行三维重构，因此软件的后处理对CT结果的准确性有着重要影响。后处理软件中的参数阈值对后处理的结果有着直接影响，选取不同的阈值，会得到不同的结果，如图4所示（所扫描区域中灰度值大于阈值的部分被认为是材料，而低于阈值的部分被认为是孔洞，即图4中的A区域）。同一个样品，当选取阈值为6 800和6 000时，样品所得的CT后处理结果差异明显，图4a中，样品含有大孔洞与小孔洞混合，而图4b中，样品没有大孔洞且分布均匀。可见，

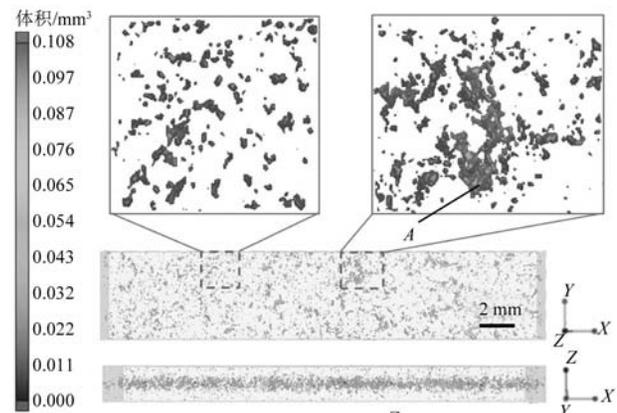


图3 15号试样中孔洞的CT形貌（A区域）

Fig. 3 CT morphologies of the pores in the sample 15



（a）阈值为6 800；（b）阈值为6 000

图4 不同阈值对标距段内孔洞CT形貌的影响（15号样品）

Fig. 4 CT morphologies of the sample 15 with different threshold values

阈值对CT后处理结果有显著影响。

CT结果的标定是保证其准确性的关键，为确保CT数据重构的孔洞数据准确，首先，根据拉伸试样断口的SEM形貌确认孔洞形貌和分布，在将SEM图片中的孔洞特征与CT结果中的断口处孔洞特征进行对比，然后，调整CT数据的后处理参数，使断口处孔洞的CT形貌和分布与SEM的形貌和分布一致，以获得较为可靠的CT结果，即孔洞的形貌和分布图。由于SEM断口为样品断裂时的一个崎岖不平的面，而CT选取部位为一个三维结构，因此CT图像上会观察到更多的孔洞。具体如图5所示，由图5d中的SEM形貌可看出，试样断口上的孔洞主要分为5个区域（标出部分为孔洞），根据各个区域的孔洞特征调节CT后处理参数，直至CT结果中各个区域的孔洞特征与SEM结果一致，如图5c。断口处缺陷的CT形貌和分布与SEM图像中的一致，则可认为CT结果准确有效。因此，采用这种方式对19个试样的CT结果进行了标定，以保证CT结果的可靠性。

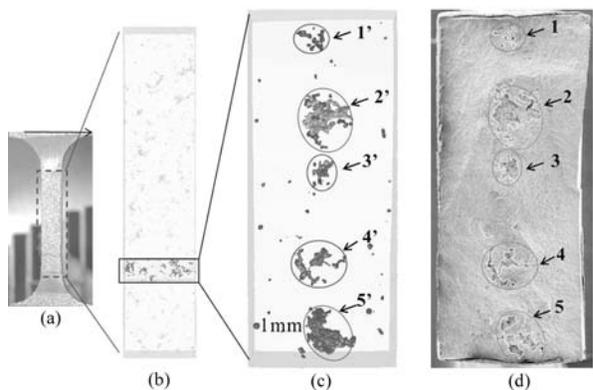


图5 CT结果标定示意图（8号样品）

Fig. 5 Schematic diagram of the calibration of CT result (Sample 8)

2.2 孔洞特征参数的获取

基于CT扫描结果可获取每个试样内部每个孔洞的体积、等效直径、沿不同方向（沿 x 、 y 、 z 方向）的投影面积及位置（中心坐标）等信息。每个试样中的孔洞尺寸和分布各不相同，为了定量地研究孔洞的分布特征，将试样标距区域沿轴向划分成厚度为1 mm的多个单元（试样标距段有29 mm，因此可以划分为29个单元），可计算每个单元内的局部孔隙率，如图6所示。将试样内部的孔洞沿拉伸方向进行投影，获取每个孔洞的投影面积，可以得到最大孔洞的投影面积来表征最大孔洞的尺寸，并计算每个单元内所有孔洞沿拉伸方向的投影面积之和，用单元内局部孔洞的投影面积之和来表示局部孔隙率。如图6所示，单元2中有3个孔洞，即 V_a 、 V_b 和 V_c ，它们沿拉伸方向的投影面积分别为 P_a 、 P_b 和 P_c ，则单元内最大孔洞投影面积为 P_c ，局部孔

隙率为 $P_{\text{sum}}=P_a+P_b+P_c$ 。在图7b和c中分别给出了15号试样标距区域内孔洞最大投影面积 P_{max} 和局部孔隙率 P_{sum} 沿轴向的分布曲线。

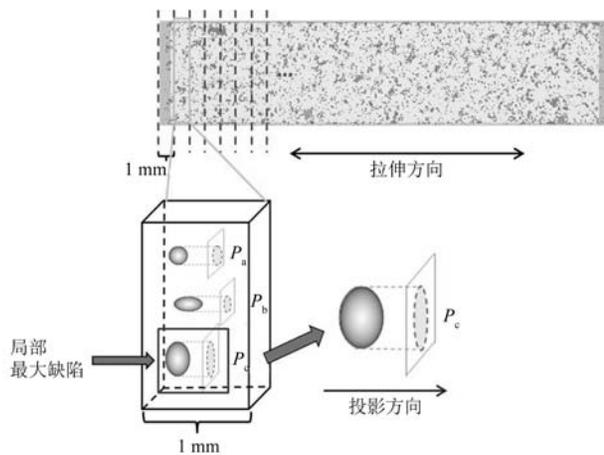


图6 孔洞的投影面积获取方法示意图

Fig. 6 Schematic diagram of obtaining method of projection area of the holes

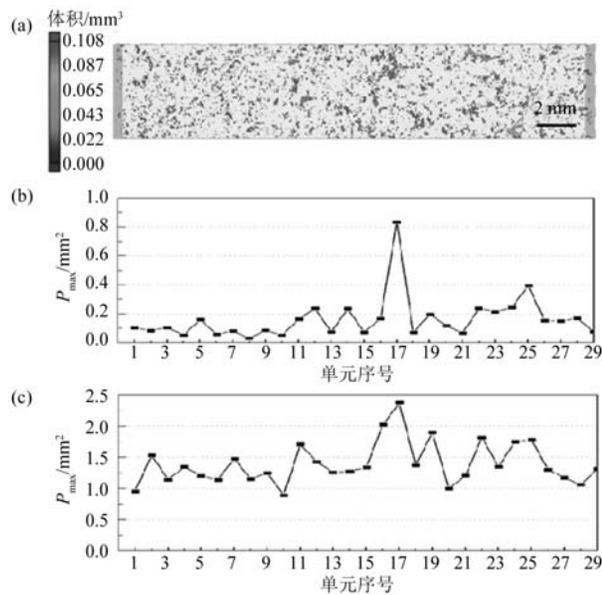


图7 15号试样中孔洞的形貌和分布

Fig. 7 The morphology and distribution of the porosity in the sample 15

2.3 孔洞特征参数与断裂位置

为了探明试样局部孔隙率和试样内部最大孔洞对试样断裂位置的影响，将试样最大的局部孔隙率和最大孔洞的投影面积与断口处的数据进行了对比分析。将每个试样断口处的局部孔隙率与试样标距内的局部最高孔隙率进行比较，可得到试样断口处局部孔隙率与标距内最高局部孔隙率的关系，19个试样的分析结果如图8a所示。将断口处的最大孔洞投影面积与整体最大孔洞的投影面积进行比较，可得到试样断口处最大孔洞与试样内部最大孔洞的关系，19个试样的比较

结果如图8b所示。

图8a中可看出, 19个样品中有13个样品的数据点落在 $X=Y$ 的直线上(即对角线上), 表明这13个样品的断口所在单元的局部孔隙率与标距内的最大局部孔隙率相同, 而其余6个数据点未落在 $X=Y$ 直线上的点则落在直线 $X=Y$ 附近, 表示这部分样品的断裂处的局部孔隙率稍低于标距内最高孔隙率, 但差异较小。可以观察到, 19个样品的标距内最高局部孔隙率与断口处局部孔隙率之间呈现明显的相关性。而图8b中可以看出,

当最大孔洞的投影面积 $>0.4 \text{ mm}^2$ (区域2)时, 点落在直线 $X=Y$ 上, 标距内最大孔洞的投影面积与断口处局部最大孔洞的投影面积呈明显相关性, 但是当样品内部没有大孔洞存在时, 即最大孔洞的投影面积 $<0.4 \text{ mm}^2$ 时(区域1, 共12个试样), 未观察到明显的相关性。而这12个没有大孔洞的样品(区域1)中, 标距内最高局部孔隙率与断口处局部孔隙率之间仍旧呈现明显的相关性, 如图8c所示。表明局部孔隙率是决定断裂位置的关键因素。

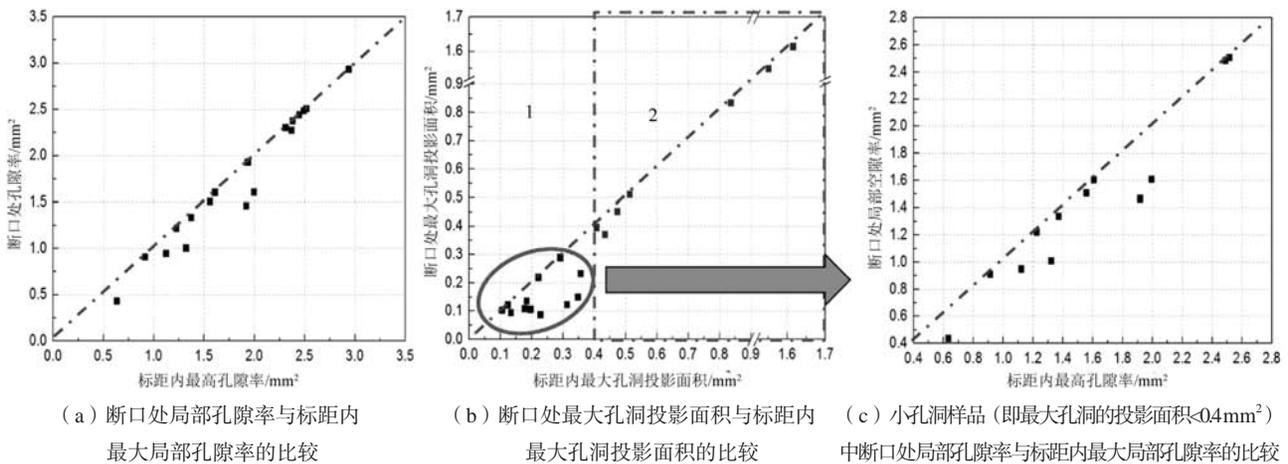


图8 孔洞特征参数分析(19个试样): 标距段最高值与断口值的对比

Fig. 8 Comparison between the maximum value of the pore characteristic parameter and the fracture value

3 分析与讨论

3.1 最大孔洞尺寸对断裂行为的影响

Wood等^[9]研究了含大孔洞的压铸镁合金样品拉伸过程中的孔洞演变, 发现只有大孔洞发生了明显的变形, 因此认为只有大孔洞才是影响材料断裂的关键, 而总体孔隙率对断裂位置没有显著影响。从图8b可以看出, 当样品中最大孔洞的投影面积 $>0.4 \text{ mm}^2$, 最大孔洞是决定材料断裂位置的关键, 然而当材料内部没有大孔洞时, 即最大孔洞的投影面积 $<0.4 \text{ mm}^2$ 时, 最大孔洞与材料的断裂位置无关。但是, 对于只有小尺寸孔洞的样品, 即在没有较大孔洞的情况下, 样品发生的断裂有区域内部的整体孔隙率决定。图9a展示了7号样品孔洞的CT形貌, A为样品中的最大尺寸孔洞, 其投影面积为 0.2 mm^2 。拉伸变形过程中, 未在A处发现应变集中, 应变集中发生在局部孔隙率最高的B处, 如图9b-d所示, 这与Wood的研究^[9]相符合。在15号样品中, 拉伸时, 在A处单元内产生应变集中, 如图10所示。可以认为, 含有最大尺寸孔洞A的单元是引起材料断裂的关键。然而, 在单元内部, 往往大孔洞比其他小孔洞大得多, 因此拥有大孔洞的区域内, 其整体投影面积的孔隙率也拥有较高水平, 如图10d所示, A处的局部孔隙率也为最大值, 所以可认为, 是最高局部孔

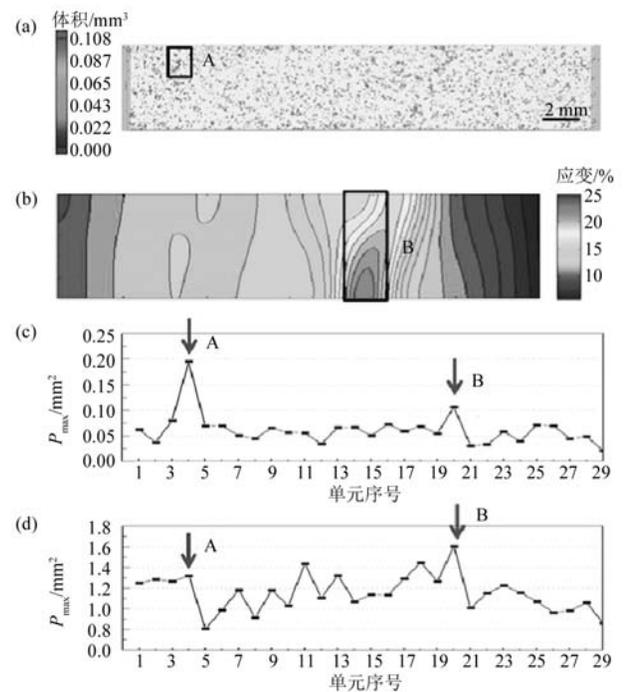
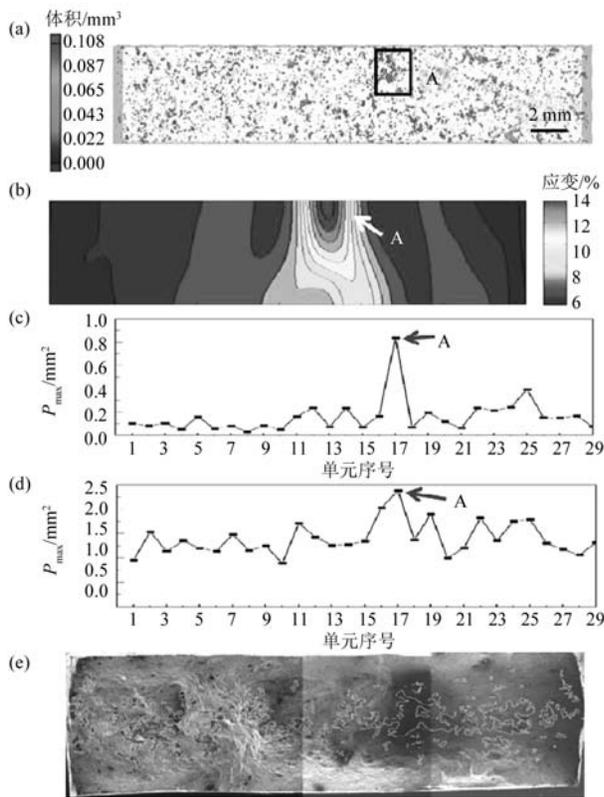


图9 7号试样(最大孔洞的投影面积 $<0.4 \text{ mm}^2$)中局部孔隙率和最大尺寸缺陷对应变的影响

Fig. 9 Influences of the local porosity and the largest pore on the local strain distribution in the sample 7 with pores $<0.4 \text{ mm}^2$



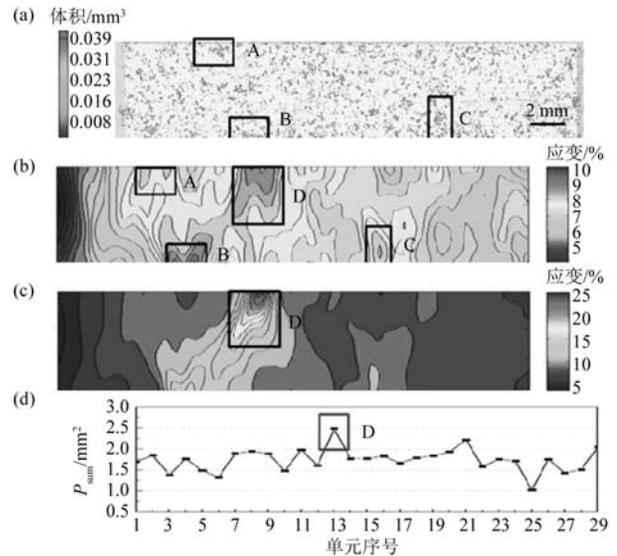
(a) 试样标距段内孔洞的CT形貌；(b) 断裂前的局部应变分布；(c) 局部最大孔洞的投影面积；(d) 局部孔隙率的分布曲线；(e) 断口SEM形貌（曲线所圈定区域为孔洞，椭圆内为图(a)中所指出的最大孔洞）

图10 含大孔洞试样（15号试样）孔隙率和最大缺陷对应变的影响
Fig. 10 Influences of the local porosity and the largest pore on the local strain distribution in the sample 15 with large pore

隙率引发了材料的断裂。因此，最大的孔洞会对材料的断裂产生一定影响，但是却不是最主要因素，只有当材料内部拥有大孔洞，即孔洞投影面积超过 0.4 mm^2 时，才会对样品的断裂产生显著影响，当材料内部没有大孔洞（投影面积超过 0.4 mm^2 ）时，最大的孔洞对材料断裂位置的影响较小。

3.2 孔洞位置对断裂位置的影响

图11显示了9号样品中孔洞的CT形貌以及其对局部应变的影响。样品边部有大孔洞，即A和C两处，B处有孔洞团簇，如图11a所示。拉伸过程中，A、B和C处都产生了较大的变形，即产生应变集中，如图11b所示。随着拉伸的继续，样品最终断裂发生在局部孔隙率最高处。表明样品大孔洞所在的位置对样品的变形也有影响，当孔洞的位置在样品的边缘时，则该区域更容易引起应变集中。与Weiler和Wood等人^[10-11]的工作一致，靠近样品边缘的孔洞更容易产生大的应变。由于孔洞形状的不规则性，非常容易在孔洞的尖角处产生应力集中，从而产生裂纹。当孔洞靠近样品边缘，



(a) 试样标距段内孔洞的CT形貌；(b) 局部应变分布（标距段应变=7.5%）；(c) 局部应变分布（标距段应变=9.5%）；(d) 局部孔隙率的分布曲线

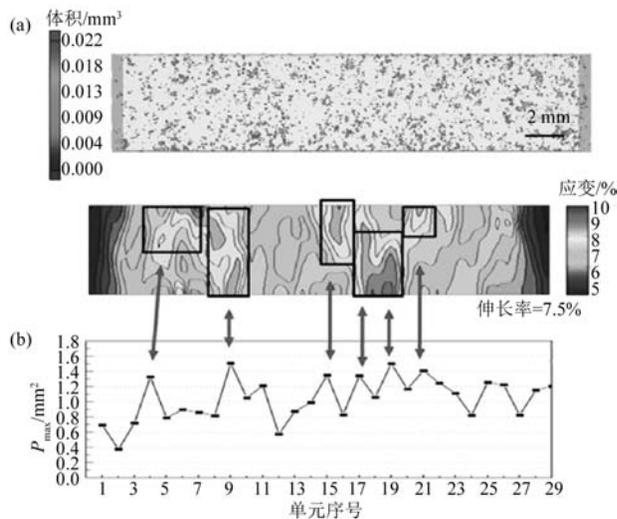
图11 边部有大孔洞样品（9号试样）孔隙率和最大缺陷对应变的影响

Fig. 11 Influences of the local porosity and the largest pore on the local strain distribution in the sample 9 with a large pore near the edge

则更加容易产生与边界相连通的裂纹，则相当于在样品的边界上形成了缺口，容易造成显著的应力集中，迅速发生断裂。因此，当样品的边缘处存在大孔洞或团簇时，边缘处的孔洞也会对样品的断裂有着一定的影响。

3.3 孔隙率对断裂位置的影响

图8a中，整体最高局部孔隙率与断口处局部孔隙率之间呈现出明显的相关性，这表明样品内部的孔洞沿着拉伸方向的投影面积所表示的局部孔隙率是影响材料断裂位置的最关键因素。图12显示了13号样品的孔洞形貌、拉伸变形过程中的应变分布和局部孔隙率分布。样品中，局部孔隙率较高的位置，在拉伸时局部应变水平较高，产生了应变集中。这表明局部孔隙率较高的部位更容易发生变形，最终导致断裂。局部孔隙率高的部位，材料在拉伸方向上的有效承载面积较小，容易引起应力集中产生裂纹，而裂纹的扩展倾向于连通各个相近的孔洞。样品中的裂纹扩展传播的过程中，各孔洞尖角应力集中处产生位错塞积，位错塞积会引起应力集中，进而导致裂纹的产生。变形过程中，相邻孔洞之间的间距越小，使得位错转移需要的能量越少，越容易引起应变集中，促使萌生和裂纹扩展^[17]。因此，在拉伸过程中，局部孔隙率高的部位更容易发生变形，产生应变集中，是引发材料断裂的最主要因素。



(a) 试样标距段内孔洞的CT形貌；(b) 应变分布图与局部孔隙率曲线

图12 含小孔洞试样(13号样品)中局部孔隙率对应变的影响
Fig. 12 Influence of local porosity on the local strain distribution in the sample 13

目前, 已有的高压铸造商业软件, 如MagmaSoft和Pro-cast, 可以预测大型压铸件内的局部孔隙率分布, 工程师可以直接根据局部孔隙率的水平预测使役条件下铸件的断裂位置, 并优化压铸工艺参数, 控制铸件内局部孔隙率的分布, 避免铸件在关键部位出现断

裂, 提高铸件的使役性能。

4 结论

(1) 压铸铝合金中的孔洞会减小有效承载面积, 引起应变集中。孔洞的各种特征参量, 包括局部孔隙率、最大孔洞的尺寸和孔洞位置, 均会影响局部应变的分布, 进而影响断裂位置。

(2) 大孔洞尺寸对断裂位置有显著影响。当样品内部大孔洞的投影面积 $>0.4 \text{ mm}^2$, 断裂会发生在最大孔洞处, 但是当样品内部全是小孔洞时(最大孔洞的投影面积 $<0.4 \text{ mm}^2$), 样品的断裂位置与最大的孔洞没有明显的相关性。

(3) 孔洞位置对应变集中和断裂位置有显著影响。靠近样品边缘处的大孔洞或孔洞团簇, 容易引起应变集中, 诱发断裂。虽然最大孔洞尺寸和孔洞位置对应变集中和断裂位置有影响, 但CT分析结果表明(19个试样), 断裂主要发生在局部孔隙率最大处或接近最大值处, 表明局部孔隙率是决定断裂位置的主导因素。

(4) 可以通过优化压铸工艺参数, 控制铸件内局部孔隙率的分布, 避免铸件在关键部位出现断裂, 提高铸件的使役性能。

参考文献:

- [1] 张洪信, 姜勇, 张铁柱, 等. 铝合金压力铸造技术的现状与展望 [J]. 铸造, 2007, 56 (12): 1247-1250.
- [2] 刘金城. 特斯拉的铝合金专利暗示超强电动汽车的生产成本更低 [J]. 铸造, 2021, 70 (10): 1246.
- [3] 樊振中, 袁文全, 王端志, 等. 压铸铝合金研究现状与未来发展趋势 [J]. 铸造, 2020, 69 (2): 159-166.
- [4] 周鹏飞, 陆从相, 杨书根. 新型高强度压铸Al-Si-Mg-Mn合金组织和性能的演变 [J]. 铸造, 2021, 70 (3): 316-322.
- [5] CáCERES C H, SELLING B I. Casting defects and the tensile properties of an Al Si Mg alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 1996, 220 (1): 109-116.
- [6] JI S, FAN Z. Solidification behavior of Sn-15 wt pct Pb alloy under a high shear rate and high intensity of turbulence during semisolid processing [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2002, 33 (11): 3511-3520.
- [7] TIMELLI G, FABRIZI A. The effects of microstructure heterogeneities and casting defects on the mechanical properties of high-pressure die-cast AlSi9Cu3 (Fe) Alloys [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2014, 45 (12): 5486-5498.
- [8] LI X, XIONG S M, GUO Z. Correlation between porosity and fracture mechanism in high pressure die casting of AM60B alloy [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2016, 32 (1): 54-61.
- [9] WEILER J P, WOOD J T, KLASSEN R J, et al. Porosity, damage evolution and fracture in die-cast magnesium alloy AM60B [J]. Advanced Materials Research, 2007, 15-17 (2): 455-460.
- [10] WEILER J P, WOOD J T. Modeling fracture properties in a die-cast AM60B magnesium alloy II—The effects of the size and location of porosity determined using finite element simulations [J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 527 (1-2): 32-37.
- [11] WEILER J P, WOOD J T. Modeling the tensile failure of cast magnesium alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 537 (26): 133-140.
- [12] SUN X, CHOI K S, LI D S. Predicting the influence of pore characteristics on ductility of thin-walled high pressure die casting magnesium [J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 572 (11): 45-55.

- [13] FLACHER O, BLANDIN J J, PLUCKNETT K P, et al. Effects of porosity on the superplastic properties of submicronic alumina-zirconia composites [J]. *Materials Science Forum*, 1996, 243-245 (4S) : 411-416.
- [14] WANG Q G , CÁ CERES C H. The fracture mode in Al-Si-Mg casting alloys [J]. *Materials Science and Engineering A (Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing)*, 1998, 241 (1-2) : 72-82.
- [15] MURAT TIRYAKIOĞLU. On fatigue life variability in cast Al-10%Si-Mg alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527 (6) : 1560-1564.
- [16] HARDIN D B. The effect of porosity distribution on the predicted mechanical response of die cast AM60B magnesium [D]. *Dissertations & Theses-Gradworks*, 2010.
- [17] 罗德春, 芮执元, 曹卉, 等. 单晶 γ -TiAl中孔洞位置对裂纹扩展影响的分子动力学模拟 [J]. *功能材料*, 2016, 47 (6) : 6136-6141.

Three-Dimensional Characteristics of Pores and Their Influences on Fracture Location in Aluminum Alloy Thin-Wall Die Castings

XIA Li-hong

(School of Mechanical Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract:

A number of pores in aluminum alloy high pressure die castings show a significant influence on the ductility and fracture location. To understand the effect of porosity on the fracture location of the high pressure die casting, the three-dimensional (3D) characteristics of the porosity in Al-10Si-0.3Mg high pressure die castings were obtained via X-ray tomography, named computed tomography (CT). The CT results were calibrated via fractographic analysis. The correlation between the characteristics of porosity (local porosity, the size of the largest pore and the location of pore) and local strain, as well as fracture location, were analyzed based on the 3D characteristics and local strain achieved using digital image correlation (DIC) technology. The results indicated that the characteristics of the porosity, specifically local porosity, the size of the largest pore and the location of pore, showed impacts on the local strain and fracture location. However, the statistical analysis about the characteristics of the porosity in 19 samples showed that the local porosity of the fracture regions was equal or close to the highest local porosity in the gauge. This suggests that local porosity was the dominant factor governing fracture location.

Key words:

die casting; voids; fracture location; CT scan