

# 具有内部孔洞的 3D 打印 PLA 试样力学性能研究

董俊杰, 刘宇杰

(西南交通大学力学与工程学院, 成都 610031)

**摘要:**结构内部的孔洞、夹杂等缺陷是引起构件破坏的重要原因,为研究材料内部孔洞对其力学性能的影响。本文利用 3D 打印设备,使用 PLA(聚乳酸)材料,制备得到含有不同尺寸的球形和椭球形孔洞的试样,在 MTS 疲劳试验机上开展拉伸试验,研究了 3D 打印材料内部孔洞对构件力学性能的影响。结果表明,小尺寸孔洞能增加 3D 打印试样的拉伸强度和刚度。球形孔洞对构件在单轴拉伸时的断裂形式有显著的影响,随着孔洞体积的增加,构件的拉伸强度和拉伸强度应变呈逐渐减小的趋势;在体积分数相同时,球形孔洞的对构件力学性能的影响大于椭球形孔洞。

**关键词:**3D 打印;内部孔洞;拉伸试验;力学性能

**中图分类号:**TB32

**文献标志码:**A

## 引言

构件内部的裂纹、孔洞等缺陷是引起材料损伤和破坏主要诱因之一,因而针对含缺陷构件的力学性能研究就显得非常重要。自 Kachanov 提出使用连续度<sup>[1]</sup>来描述材料损伤以来,连续介质力学损伤力学取得了非常显著的发展。传统的损伤表征方法虽然应用简便,但是不能很好地揭示损伤的物理机理。随着 XCT 等无损检测技术的发展,材料或构件内部的缺陷观测成为可能。近年来,研究者们针对构件微观结构演化对其力学性能的影响做了大量研究<sup>[2-7]</sup>。Williams 等<sup>[2]</sup>对 Ti-6Al-4V 构件的内部孔洞的形态和分布进行了详细的研究,结果表明,3D 重构后的几何模型可清楚地观测到材料内部的孔洞及其分布。Yang 等<sup>[3]</sup>对 AM60 铸造镁合金的内

部孔洞的尺寸分布、孔隙率、空间分布等特性进行了形态学分析。文献[4-7]对疲劳过程中的裂纹萌生和裂纹扩展进行了 3D 观测,得到了大量对解释疲劳机理有用的结论。但是,由于缺陷形貌的复杂性,对含缺陷材料的几何建模和有限元计算运算量非常大,因而对于计算机和前处理软件要求就非常高。

3D 打印(Three Dimensional Print)是一种将被制备构件的三维几何模型通过切片分层处理,进而利用熔融、激光照射等方式堆叠得到真实构件的先进制造技术<sup>[8-9]</sup>。目前,该技术已逐渐应用于医疗设备、汽车工业、航空航天等领域,同时,已有大量学者基于 3D 打印技术针对不同的材料、工艺以及打印参数等做了研究<sup>[10-14]</sup>。最近,研究者利用 3D 打印技术生成材料内部缺陷,来研究缺陷对材料力学性能的影响。田威等<sup>[15]</sup>通

收稿日期:2018-01-22

作者简介:董俊杰(1991-),男,甘肃武威人,硕士生,主要从事金属材料疲劳与损伤方面的研究,(E-mail)jtjessetung@163.com;

刘宇杰(1978-),男,四川内江人,副教授,博士,主要从事材料循环本构关系、疲劳与损伤力学以及轻质材料力学性能方面的研究,(E-mail)yjliu6@163.com

过 CT 扫描重建得到天然砂岩试样的几何模型,进而利用 3D 打印工艺,制备得到近似于天然砂岩结构的 3D 打印试样,并进行力学性能测试,结果表明:3D 打印试样能够高度还原天然砂岩试样的内部复杂结构,并且具有与天然砂岩更加近似的力学性能和较小的试验离散性。该方法结合了 CT 扫描技术和 3D 打印技术的优点,为研究构件内部结构和缺陷对其力学性能的影响提供了新的思路。

本文针对 PLA 材料,结合 3D 打印技术,通过设计构件的几何模型,尤其是其内部结构的几何分布,制备得到含有不同尺寸和不同形状孔洞的 3D 打印试样;利用 MTS 疲劳试验机,对试件开展拉伸试验,将得到的结果进行对比分析,进而揭示内部孔洞对构件力学性能的影响。

### 1 试验概述

试验选取 PLA 3D 打印耗材,利用极光尔沃-603S 型 3D 打印机,制备如图 1 所示的完好试件和含孔洞试件(尺寸参考 GB/T 1040.2-2006)。试件厚 2 mm,宽 6 mm,工作段长 25 mm。

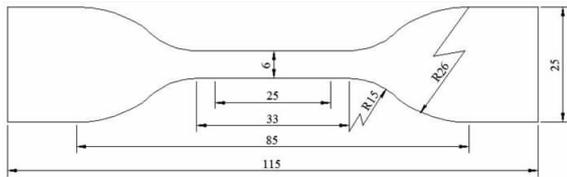


图 1 试件尺寸图/mm

孔洞尺寸见表 1,缺陷均为埋藏型内部孔洞,位于工作段中心位置处,其中椭圆形孔洞的短轴沿构件厚度方向。需说明的是,为了便于后续比较分析,在设定孔洞尺寸时,使椭圆型组中孔洞的体积近似等于球形组的孔洞体积。

表 1 孔洞的尺寸和类型

孔洞类型	孔洞尺寸/mm
球形	$r = 0.4; r = 0.6; r = 0.8;$
椭圆形	$a = 0.6, b = 0.2, c = 0.6;$
	$a = 0.9, b = 0.3, c = 0.9;$
	$a = 1.1, b = 0.4, c = 1.1;$

利用 Cura 软件对试样几何模型沿厚度方向进行切片,其中,切片间距为 0.1 mm,壳厚度为 1.2 mm,填充率为 100%,控制打印机速率为 30 mm/s,熔融温度为 200 °C。制备 14 个 3D 打印试样,分为三组,分别为无孔洞组

(2 个)、球形孔洞组(6 个)、椭圆形孔洞组(6 个)。

拉伸试验使用 MTS-858 电液伺服疲劳试验机进行,加载速度设定为 1 mm/min,试验过程中在试件工作段安装标距为 25 mm 的引伸计,通过 MTS 793 控制系统测量应变。

### 2 试验结果与讨论

#### 2.1 应力-应变曲线对比

完好试样拉伸的应力-应变曲线如图 2 所示。从拉伸曲线的演化趋势可以看出,打印得到的 PLA 构件在拉伸过程中达到极限应力之后,随着应变增加,应力迅速减小,直至断裂。观察其断面形貌(图 3)可以发现,断面具有脆性断裂的特征,同时,试件在拉断时,应变小于 5%,综合以上变形特征可以说明 PLA 3D 打印试件具备典型脆性材料的破坏特征。

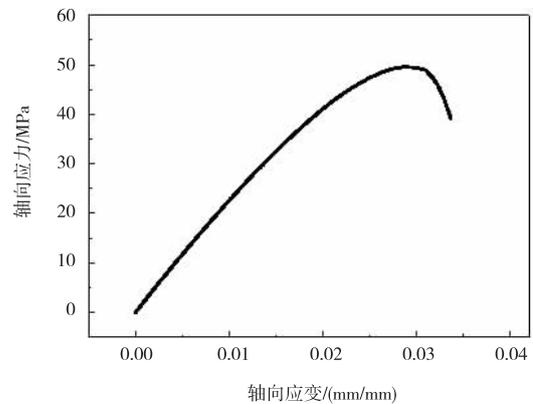


图 2 PLA 打印试样拉伸应力-应变曲线

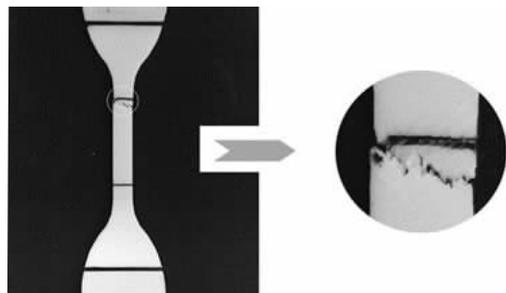


图 3 拉伸断面形貌

为了直观地说明含孔洞试件和无孔洞试件之间的力学性能差异,图 4 给出了无孔洞试样和含孔洞试样单轴拉伸的名义应力-应变曲线。由图 4 可知,整体的演化趋势上,除球形孔洞尺寸  $r = 0.8$  mm 的试件,其余含孔洞构件的屈服强度均大于完好试验的拉伸强度,说明

孔洞可以在一定程度上增加构件的拉伸强度;另外,对比不同试样在弹性阶段的斜率发现,含球形孔洞构件与无孔洞试件的斜率十分接近,但是,含椭球形孔洞试样其弹性阶段的斜率明显大于球形孔洞试样和无孔洞试样,说明椭球形孔洞对于构件工作段的刚度有所增强。

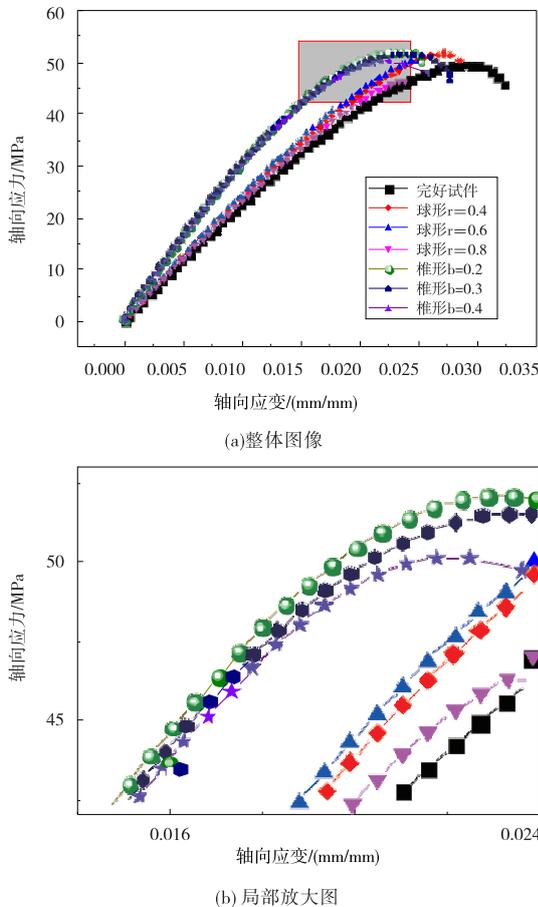


图4 不同试样的拉伸应力-应变曲线

## 2.2 孔洞对构件断裂形式的影响

图5给出了不同尺寸的球形深埋孔洞在拉伸时的断口位置和断口形貌(左边两组 $r=0.4\text{ mm}$ ;中间两组 $r=0.6\text{ mm}$ ;右边两组 $r=0.8\text{ mm}$ )。首先,由图5(a)可知,断裂位置均在工作段的中心位置,即孔洞所在位置处发生断裂(构件上的黑线是准备试验时标定的工作段位置,下同),说明孔洞部位在拉伸过程中处于应力集中比较明显的区域。

另一方面,观察发现,有孔洞试样的断口处的截面没有明显的收缩,呈现的是一种脆性断裂的形式,和无孔洞试样的拉伸断裂破坏形式相似。但是,在观察图5(b)中所给出的试验结束后试件断口局部形貌发现,不

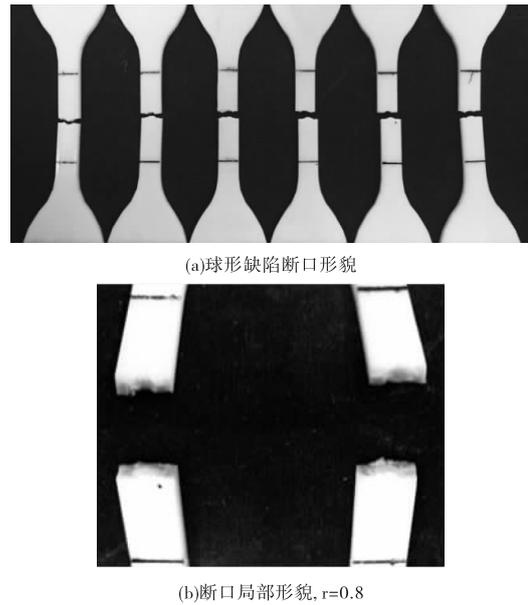
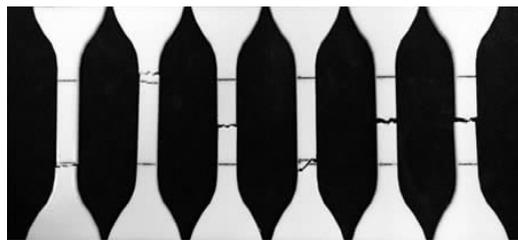


图5 不同尺寸的球形深埋孔洞断裂情况

管孔洞尺寸大小如何,构件断裂时并不是贯穿球形孔洞而破坏,而是在孔洞和周围过渡位置的连接处发生断裂而破坏。这种现象的产生原因可能是在构造内部孔洞时,3D打印机首先在孔洞周围沿着圆周路径打印出孔洞的轮廓,形成孔洞的壳,然后在无孔洞部位按照45度直线路径进行打印堆积。从而使得构件在孔洞位置和周围材料之间产生了一定的几何不连续的界面,使得加载过程中这一区域应力集中相对明显,最终导致了这种特殊的破坏形式。

图6给出了和球形孔洞体积相同的椭球型深埋孔洞在单轴拉伸时的断口位置和断口形貌(左边两组 $a=0.6\text{ mm}$ ,  $b=0.2\text{ mm}$ ,  $c=0.6\text{ mm}$ ;中间两组 $a=0.9\text{ mm}$ ,  $b=0.3\text{ mm}$ ,  $c=0.9\text{ mm}$ ;右边两组 $a=1.1\text{ mm}$ ,  $b=0.4\text{ mm}$ ,  $c=1.1\text{ mm}$ )。由图6(a)可知,当椭球型缺陷短半轴 $b=0.2\text{ mm}$ 时,构件在工作段和夹持段的连接位置处断裂;当 $b=0.3\text{ mm}$ 时,构件的断裂位置并不统一;当 $b=0.4\text{ mm}$ 时,构件在缺陷部位断裂,说明 $b=0.3\text{ mm}$ 是缺陷尺寸的临界值。结合图5,对比相同孔隙率下球形孔洞试件断裂位置可以发现,椭球形孔洞构件的断裂位置并不完全集中在孔洞区域,说明椭球形孔洞所引起的应力集中对拉伸断裂破坏的影响并没有球形孔洞下的明显。

同时,观察图6(b),当 $b=0.4\text{ mm}$ ,构件在椭球形孔洞部位断裂时的局部断口形貌可以发现,断口呈现贯



(a) 椭圆形缺陷断口形貌

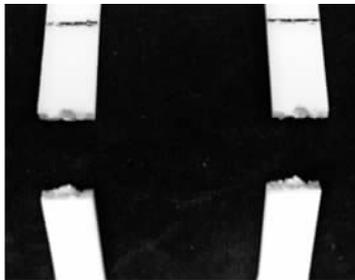
(b) 断口局部形貌,  $b=0.4$ 

图 6 椭圆形缺陷断裂情况

穿孔洞的破坏形式,这和球形孔洞试样的断口形貌有很明显的差别。尽管两种孔洞在打印时的路径比较相似,但是椭圆形孔洞的曲率相对球形较小,因而孔洞和周围材料之间的粘合性比较好,这应该是两种不同类型孔洞试件呈现不同断口形貌的主要原因。

### 2.3 孔洞对构件力学性能的影响

衡量脆性材料拉伸强度最重要的指标是材料的抗拉强度。图 7 给出了含不同孔洞的试样拉伸强度随孔洞体积的演化规律,同时作为参照,给出了无孔洞试样拉伸时的拉伸强度。由图 7 可见,相比于无孔洞试样的拉伸强度,当孔洞体积在  $0.2 \text{ mm}^3 \sim 1.0 \text{ mm}^3$  时,不论孔洞类型是球形还是椭圆形,其拉伸强度均大于完好试样的拉伸强度;当缺陷体积大于  $1 \text{ mm}^3$  以后,球形缺陷的拉伸强度下降比较明显,而椭圆形孔洞的拉伸强度尽管也呈下降趋势,但是下降速率比较小,而且在体积分数达到 4% 时,椭圆形孔洞试样拉伸强度依旧略高于完好试样的拉伸强度,说明一定尺寸的几何孔洞反而可以在某种程度上加强材料的抗拉强度。可能的原因是 3D 打印过程中,圆孔的孔边壳体和无孔部分堆积路径不同造成材料性能差异,而且连续曲线堆积的壳的强度高于 45 度往复堆积的无孔部分的强度。这也可以解释前面观察到的拉伸破坏并不发生在孔边处的现象。

对比两种不同形状孔洞试样的拉伸强度可以发现,当孔洞体积相同时,球形孔洞试样拉伸强度小于椭圆形

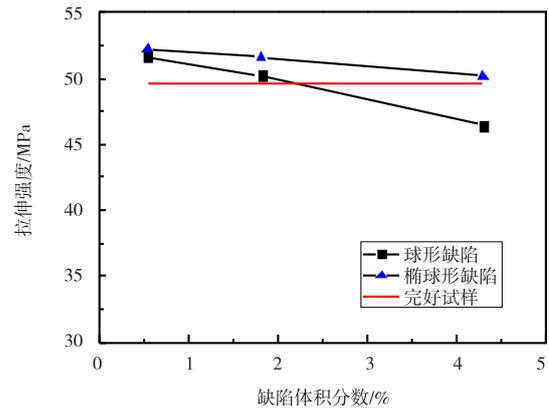


图 7 拉伸强度随孔洞体积分数变化之间的关系

孔洞试样的拉伸强度,说明椭圆形孔洞对构件力学性能的影响并不明显,反而对拉伸强度有一定的提高。同时,随着孔洞体积的增加,球形孔洞试样的拉伸强度下降速率大于椭圆形孔洞试样。

### 3 结论

基于 3D 打印制备了含有不同类型和尺寸缺陷的 PLA 试样,并进行单轴拉伸试验。由于 3D 打印特殊的成型工艺,带有内部圆孔的 3D 打印材料的力学性能与普通材料相比有明显区别:

(1) 由于孔边壳体强度较高,相对小尺寸的孔洞能够提高 3D 打印构件的拉伸强度和刚度;具有小尺寸孔洞的构件破坏并不发生在孔洞处,而是发生在孔边壳体和密实部分的连接处。

(2) 随着孔洞体积的增加,球形孔洞对拉伸强度的影响大于同体积下椭圆形孔洞。

### 参考文献:

- [1] Rabotnov Y N. Creep rupture [C]//Proceedings of the XII International Congress on Applied Mechanics, Stanford, August 26-31, 1968:342-349.
- [2] TAMMAS-WILLIAMS S, ZHAO H, LÉONARD F, et al. XCT analysis of the influence of melt strategies on defect population in Ti-6Al-4V components manufactured by selective electron beam Melting [J]. Materials Characterization, 2015, 102:47-61.
- [3] YANG Z F, MAUREY A, KANG J D, et al. 2D and 3D characterization of pore defects in die cast AM60 [J].

- Materials Characterization,2016,114:254-262.
- [4] MO D F,HE G Q,HU Z F,et al.Effect of microstructural features on fatigue behavior in A319-T6 aluminum alloy[J].Materials Science & Engineering:A,2010,527(15):3420-3426.
- [5] KING A,LUDWIG W,HERBIG M,et al.Three-dimensional in situ observations of short fatigue crack growth in magnesium [J].Acta Materialia,2011,59(17):6761-6771.
- [6] JANG Y,JIN S,JEONG Y,et al.Fatigue crack initiation mechanism for cast 319-T7 aluminum alloy [J].Metallurgical & Materials Transactions A,2009,40(7):1579-1587.
- [7] TODA H, MASUDA S, BATRES R, et al. Statistical assessment of fatigue crack initiation from sub-surface hydrogen micropores in high-quality die-cast aluminum [J].Acta Materialia,2011,59(12):4990-4998.
- [8] 郑增,王联凤,严彪.3D打印金属材料研究进展[J].上海有色金属,2016,37(1):57-60.
- [9] 张胜,徐艳松,孙姗姗,等.3D打印材料的研究及发展现状[J].中国塑料,2016,30(1):7-14.
- [10] 刘晓军,迟百宏,王成硕,等.热处理工艺对3D打印PLA试件力学性能的影响[J].塑料,2017,46(2):40-42,57.
- [11] 于国庆,毕超.3D打印参数对聚乳酸试样拉伸性能的影响[J].中国塑料,2017,31(11):125-129.
- [12] 胡婧,陶梅平,唐金颖.3D打印TC4钛合金的成形工艺与热处理行为研究[J].热加工工艺,2017,46(16):220-224.
- [13] 高士友,黎宇航,周野飞,等.熔融沉积(FDM)3D打印成形件的力学性能实验研究[J].塑性工程学报,2017,24(1):200-206.
- [14] 金泽枫,金杨福,周密,等.基于FDM聚乳酸3D打印材料的工艺性能研究[J].塑料工业,2016,44(2):67-70.
- [15] 田威,裴志茹,韩女.基于CT扫描与3D打印技术的岩体三维重构及力学特性初探[J].岩土力学,2017,38(8):2297-2305.

## Study on Mechanical Properties of 3D Printing PLA Specimens with Inner Hole

DONG Junjie, LIU Yujie

(School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The internal pores, inclusions and other defects are one of the causes for damage failure of components. In this paper, the 3D printing PLA (Polylactic Acid) specimen with different sizes of spherical and ellipsoidal holes was prepared. Then, tensile experiments were performed to study the influence of holes on mechanical properties of 3D printing specimens by MTS test machine. The results show that the specimens with small size hole have higher tensile strength and stiffness compared with specimens without hole. The spherical holes have significant influence on the fracture form for tensile specimens. With the increasing of hole volume, the tensile strength of specimens decrease gradually. For the same hole volume, the influence of spherical holes on mechanical properties is greater than that of ellipsoidal holes.

**Key words:** 3D printing; inner hole; tensile experiment; mechanical properties