

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2017.01.021

3D 打印工程塑料力学特性分析

林海英¹, 崔博然², 刘冰河¹

(1. 北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191; 2. 北京师范大学附属实验中学, 北京 100032)

摘要: 为了3D打印工程塑料被更合理地使用, 通过试验了解3D打印工程塑料的特殊力学性能, 并建立其力学模型。首先将3D打印工程塑料根据不同的方向与不同的纤维直径, 利用3D打印设备打印出狗骨状试件, 然后按照试验标准利用INSTRON 5966材料试验平台对其进行材料拉伸试验。发现其力学性能具有明显的各向异性, 在纤维方向具有弹塑性的特点; 垂直纤维方向有弹脆性的特点; 在垂直纤维方向纤维直径越大则失效应变越大; 在纤维方向时, 纤维直径等于0.25 mm时屈服强度和极限载荷有着明显的提高, 纤维直径等于0.3 mm时破坏位移/应变是最大的。并利用Mazars损伤模型描述了3D打印工程塑料的力学本构模型。最后分析了3D打印工程塑料的特殊力学特性对其使用的特殊要求与运用。

关键词: 汽车工程; 力学性能; 拉伸测试; 工程塑料; 3D打印

中图分类号: U465.4⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2017)01-0149-05

Analysis on Mechanical Property of 3D Printing Engineering Plastic

LIN Hai-ying¹, CUI Bo-ran², LIU Bing-he¹

(1. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191;

2. The Experimental High School Attached to Beijing Normal University, Beijing 100032)

Abstract: For more reasonable application of 3D printing plastic, its special mechanical property is obtained through experiment, and the mechanical model is built. First, the dog-bone specimens are printed using the engineering plastic by 3D printing service considering both anisotropic and fibre diameter. Then, the tensile test is conducted using INSTRON 5966 material testing platform according to the test standard. It is found that (1) the specimens have obvious anisotropy, elastic-plastic property in fibre direction and elasto-brittle property in vertical direction of fibre; (2) In the vertical direction of fibre, the failure strain of 3D printing material is larger with larger fibre diameter; (3) in the fibre direction, the yield strength and ultimate load are greatly improved when fibre diameter equals to 0.25 mm, and the maximum failure displacement/strain happens when fibre diameter equals to 0.3 mm. Afterwards, the mechanical constitutive model of the 3D printing plastic is built based on Mazars damage model. At last, the potential notice for using the 3D printing material due to the special mechanical behavior is discussed.

Key words: vehicle engineering; mechanical behavior; tension tests; engineering plastic; 3D printing

0 引言

3D打印技术是根据所设计的模型通过3D打印设备逐层增加材料来制造三维产品的技术^[1]。随着

3D打印技术的不断发展^[2], 其运用越来越广泛。对于汽车行业由于其能简化生产环节、缩短生产周期、加快汽车更新换代速度、满足消费者个性化消费的心理方面、汽车维修、应急处理突发事件等优势,

收稿日期: 2016-10-24

基金项目: 中央基本科研业务费(YWF-16-RSC-011)

作者简介: 林海英(1971-), 男, 吉林永吉人, 博士, 副教授。(haiying@buaa.edu.cn)

在汽车行业逐步开始使用^[3-4]，其中3D打印工程塑料已经在汽车行业取得了一定的使用。但是鲜见3D打印工程塑料的力学性能研究，从而限制了其进一步作为结构件材料在汽车上的应用。对于工程塑料而言，一般不具有明显的各向异性，并且可以用弹塑性模型去描述它们的力学行为^[5-8]。由于加工方式的不同，3D打印工程塑料的力学特性必然与普通的工程塑料有所不同。在之前的研究中，文献[9]研究了3D打印的PLA材料，认为PLA材料是脆性的并且在弹性阶段各向异性，文献[10]用3D打印材料时仍然将其当作各向同性材料的模型使用。本文通过3D打印设备按照不同的方向，以及不同的纤维直径打印。通过材料试验机测得其力学特性曲线，从而建立3D打印工程塑料的本构模型。本文将分析3D打印工程塑料的特殊力学特性，对3D打印材料的运用提出新的要求与可能性。研究将对3D打印材料在汽车行业的运用有着积极的作用。

1 试验方法

1.1 3D打印试件

工程塑料因为其强度高，热稳定性好，在汽车行业运用广泛。本文选取了ABS材料，并采用熔融沉积的方法进行3D打印。首先将ABS材料通过送料器供给，ABS在通过打印喷头时加热融化并挤出。挤出的材料在受冷时迅速固化，并且与已经固化的材料粘结，逐层堆积。在3D打印过程中，由于ABS是通过丝状物挤出，丝状物的排布方向可能会对材料的力学行为有着重要的影响。另外可以通过控制纤维的直径打印出不同纤维直径的样件。本文通过3D打印设备（见图1），利用ABS工程塑料，按照不同的打印方向、打印纤维直径，打印出如图2所示的狗骨状试件。

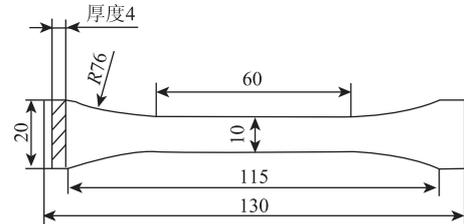


图1 3D打印设备

Fig.1 3D printing equipment

1.2 拉伸试验

根据国家标准（GB/T 1039—92），试件制成狗骨状试件，试件尺寸如图2（a）所示。本文试验平台为INSTRON 5966材料试验平台。用试件夹头将试件两端夹紧后，控制试验机以2 mm/min的速度加载，这一加载速度可以认为是准静态加载，如图2（b）所示。本试验采用位移传感器与力传感器分别测试件拉伸时的力和位移，其中，两传感器的放置位置均为上夹头。



(a) 狗骨状试件尺寸(单位:mm)



(b) 试验机拉伸测试图

图2 试验设计图片

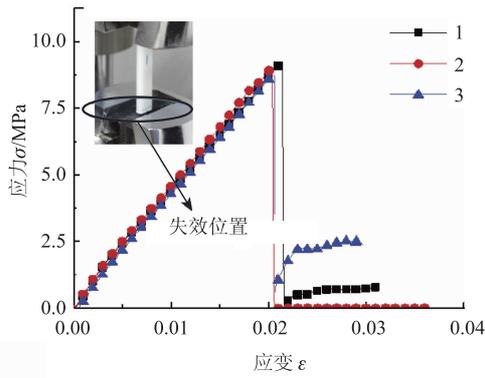
Fig.2 Figures of experiment design

上一节介绍了打印不同纤维大小和不同打印方向的试件。本文对这两种情况展开讨论，探究3D打印参数对材料特性的影响。为了保证试验的可靠性，同种试件重复3次试验。

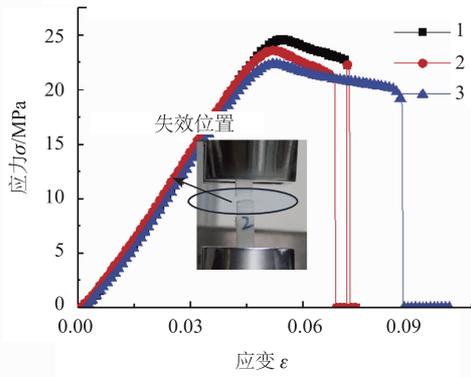
2 结果与讨论

2.1 3D打印工程塑料的各向异性

工程塑料按照两种不同的打印方向制成，具有明显的各向异性。如图3所示，试件为横向（垂直纤维方向）打印的应力-应变曲线结果（其中应力由力除以截面积，应变由拉伸位移除以标距得到）。结果显示试件载荷随着位移的增长而线性增加，在达到一定的位移后发生脆性断裂，材料表现出很强的脆性，可以认为3D打印工程塑料在横向表现出弹脆性材料的特性。并且所有试件断裂的位置在靠近夹具的位置，断口方向为 0° 方向，并且断口比较平整。



(a) 横向 (垂直纤维方向) 拉伸试验结果



(b) 竖向 (纤维方向) 拉伸试验结果

图 3 拉伸试验结果

Fig. 3 Result of tensile experiment

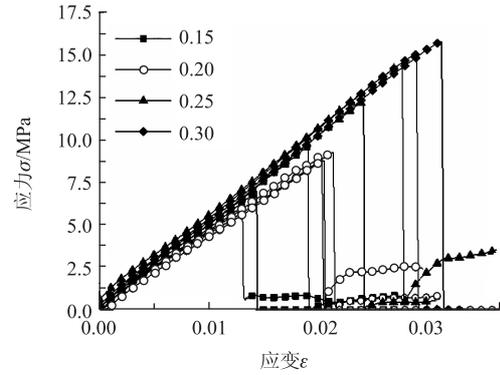
而对于竖向 (纤维方向) 打印的试件, 材料的性能呈现出完全不一样的结果。首先材料具有明显的弹塑性特点, 可承载能力明显高于横向打印的试件, 试件的破坏载荷为横向打印试件的 2.5 倍。同时由图 3 (b) 所示曲线将分为两段, 分别为线弹性阶段、塑性软化阶段。在线弹性阶段载荷随着位移的增加而线性增加, 而在软化阶段载荷随着加载位移的增加而降低。断裂发生在塑性阶段, 断口方向同样为 0° 方向, 断口处较为平整, 如图 3 (b) 所示。

2.2 纤维直径对力学性能的影响

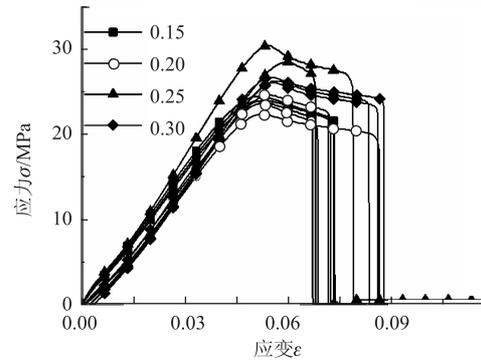
3D 打印设备可以控制纤维的粗细, 当纤维较粗时, 3D 打印的速度也会随之增快, 但是打印精度却会随之降低。本文讨论了纤维直径分别为 0.15, 0.2, 0.25, 0.3 mm 纤维直径的力学性能。

在横向方向上如图 4 所示, 4 种试件在线弹性阶段的斜率几乎一样, 但是失效应变却有着明显的差异, 由图 4 (a) 可以看出, 在纤维较小时试件会产生较小的失效应变, 而在纤维较大时, 失效应变增加。

在竖向方向上, 所有纤维直径都显示出弹塑性



(a) 纤维直径对横向性能的影响



(b) 纤维直径对竖向性能的影响

图 4 纤维直径对性能的影响

Fig. 4 Effect of fibre diameter on performance

的特性, 在纤维直径等于 0.25 时屈服强度和极限载荷有着明显的提高, 纤维直径等于 0.3 时破坏位移/应变是最大的。根据上述结果可以表明, 在打印精度要求不是很高的部件时, 可以尽量采用较粗的纤维, 这样既可以保证较大的打印速度也可以保证较好的力学性能。

2.3 3D 打印工程塑料本构关系

根据前面的研究, 纤维的直径对于 3D 打印工程塑料有着重要的影响, 在建立材料模型时必须要考虑纤维直径的影响, 本文针对纤维直径为 0.3 mm, 建立本构模型。图 5 为材料的应力 - 应变曲线, 可以看出横向和竖向的弹性模量几乎相等, 在弹性阶段可以认为这种材料是各向同性的, 杨氏模量 $E_{iso} = 512.26$ MPa。在横向方向, 应变达到 0.03 则失效, 而在竖向方向, 纤维在达到应变为 0.05 达到塑性阶段, 应变达到 0.08 时则会发生断裂。

在横向方向即垂直纤维方向, 可以用线弹性模型去描述 3D 打印材料的力学行为, 描述为:

$$\sigma_h = E_h \varepsilon_h, \quad (1)$$

式中, ε_h 为横向的应变; σ_h 为横向方向的应力; E_h 为在这个方向的杨氏模量。

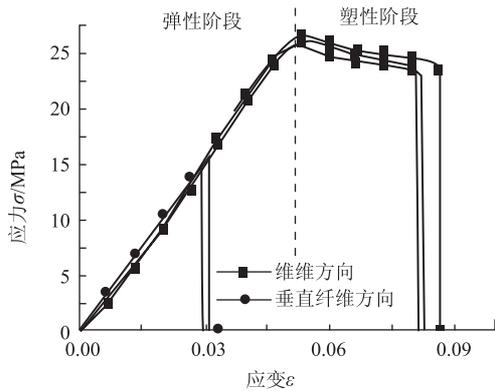


图5 不同方向拉伸试验的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves in different directions

而对于竖向,即竖向可以采用 Mazars 损伤模型^[11-12]来描述其应力-应变曲线,Marzar 损伤模型是含损伤变量的应力应变曲线与试验比较得出损伤变量的演化方程,可表示为:

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s (1 - D_T), \quad (2)$$

式中, σ_s 为竖向的应力; ε_s 为竖向的应变; E_s 为竖向的杨氏模量; D_T 为损伤演化方程,可以表示为:

$$D_T = \begin{cases} 0 & (0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_f) \\ 1 - \frac{\varepsilon_f(1 - A_T)}{\varepsilon} - \frac{A_T}{\exp[B_T(\varepsilon - \varepsilon_f)]} & (\varepsilon > \varepsilon_f) \end{cases}, \quad (3)$$

式中, A_T 和 B_T 为拉伸试验的材料参数; ε_f 可由拉伸试验的材料参数确定。可以通过拟合确定 $\varepsilon_f = 0.0502$, $A_T = 0.2135$, $B_T = 32.58$ 。经验证,此模型可以很好地预测竖向纤维方向的力学特性。

2.4 3D 打印工程塑料在汽车上的运用分析

3D 打印技术可以运用于汽车研发的全过程,例如:(1)在造型油泥模型的使用。(2)应用于零件概念的设计。(3)汽车内外饰件的制作。(4)整车开发中局部模型的验证等。在这些现有的使用中,3D 打印工程塑料要么作为模型验证材料,要么直接使用于汽车的零部件中。

根据前文的研究表明,3D 打印工程塑料相比于传统的塑料而言,有两个很特殊的力学特性:明显的各向异性、力学性能与纤维直径相关的性质。对于 3D 打印工程塑料的各向异性这一性质而言,它的使用范围与使用工况必须得到充分的考虑,例如在 3D 打印的零件使用时,要尽量将其纤维方向运用于承载方向。另外,在将 3D 打印的工程塑料运用于

零件开发测试时,也需要区分 3D 打印塑料与普通塑料力学性能的不同,才能更好地开发零件与设计汽车的结构。对于 3D 打印力学特性与纤维直径相关这一特性而言,它又赋予了 3D 打印材料新的可能:根据这一特性,3D 打印工程塑料可以实现更加个性化的运用,它可以通过调节纤维的直径而调节其力学性能,这对汽车轻量化的设计又提供了新的参考。

值得一提的是,3D 打印的工程塑料力学性能表征十分复杂,在有限元模拟中很难表征材料参数,有限元如何表征其力学性能也是今后研究的难点所在。但是在材料试验中可以看到,在小变形时 3D 打印工程塑料是各向同性的,所以小变形的部件可以采用各向同性的线弹性模型去模拟。而在大变形时,由于其塑性阶段各向异性非常明显,可以通过写用户自定义子程序的方法描述其力学本构。

3 结论

随着 3D 打印工程塑料在汽车上的应用,其材料力学表征愈发重要。本文针对 ABS 这种在汽车行业使用较多的工程塑料,将其利用 3D 打印的方式加工成狗骨状试件,并对其进行材料力学试验,利用 Mazars 损伤模型来描述其本构行为。本文的研究得到以下结论:

(1) 发现了通过 3D 打印的工程塑料将具有明显的各向异性特性。其在横向很脆,在未达到塑性阶段就已经断裂,但是在竖向(纤维方向)表现出明显的弹塑性特性,先经历线弹性阶段,然后经历塑性软化阶段。

(2) 3D 打印工程塑料的力学性能也和打印纤维直径相关。无论是竖向(纤维方向)还是横向(垂直纤维方向),其材料特性都与纤维直径有着明显的相关。

(3) 3D 打印工程塑料在汽车研发和汽车零件上得到了广泛的运用,其各向异性这一力学特性将对它的使用范围与使用工况提出新的要求。

(4) 3D 打印工程塑料与纤维直径相关这一特性可能使 3D 打印工程塑料实现更加个性化的运用。

(5) 有限元仿真中,小变形时可以通过线弹性模型表征 3D 打印工程塑料的力学参数,但是在在大变形时必须通过写用户自定义子程序的方式描述其力学本构。

随着 3D 打印技术的不断推广,3D 打印材料的使用将会越来越广泛,尤其是在交通领域,对于其

力学基本特性的研究也愈发重要。

参考文献:

References:

- [1] 杜宇雷, 孙菲菲, 原光, 等. 3D 打印材料的发展现状 [J]. 徐州工程学院学报: 自然科学版, 2014, 29 (1): 20-24.
DU Yu-lei, SUN Fei-fei, YUAN Guang, et al. Current Status of Materials for Three-dimensional Printing [J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology: Natural Sciences Edition, 2014, 29 (1): 20-24.
- [2] 赵三明. 索尔维工程塑料: 靠 3D 打印赢得客户 [N]. 中国工业报, 2015-01-02B03.
ZHAO San-ming. Solvay Engineering plastics: Win Customers by 3D Printing [N]. China Industry News, 2015-01-02B03.
- [3] 赵婧. 3D 打印技术在汽车设计中的应用研究与前景展望 [D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
ZHAO Jing. Research and Prospects on Application of 3D Printing Technology in Automotive Design [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014.
- [4] 辛公锋, 王兆星, 刘家海, 等. 箱梁预应力孔道压浆密实性检测技术研究 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (9): 114-117, 121.
XIN Gong-feng, WANG Zhao-xing, LIU Jia-hai, et al. Research on Grouting Density Inspection of Box Girder Prestressed Duct [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (9): 114-117, 121.
- [5] 陈庆, 曾军堂, 陈韦坤. 3D 打印塑料材料技术现状和发展趋势 [J]. 新材料产业, 2015, 6 (6): 27-32.
CHEN Qin, ZENG Jun-tang, CHEN Wei-kun. Present Situation and Development Trend of 3D Printing Plastic Material [J]. Advanced Materials Industry, 2015, 6 (6): 27-32.
- [6] 王芳. POM/HDPE/EVA 共混物及其纳米复合材料力学性能的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
WANG Fang. Research on Mechanical Properties of POM/HDPE/EVA Blends and Nano-composites [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [7] 张伍斌, 都佩华, 蒋冠森, 等. 拉伸速率对工程塑料力学性能的影响 [J]. 现代机械, 2008, 2 (2): 93-94.
ZHANG Wu-bin, DU Pei-hua, JIANG Guan-sen, et al. Effect of Loading Rate on the Tensile Properties of Engineering Plastics [J]. Modern Machinery, 2008, 2 (2): 93-34.
- [8] 杨庆国, 涂志忠, 张玉伟. 玻璃纤维增强塑料 (GFRP) 筋混凝土梁抗弯性能的研究 [J]. 公路交通科技, 2011, 35 (5): 88-92.
YANG Qing-guo, TU Zhi-zhong, ZHANG Yu-wei. Study on Flexural Performance of GFRP Reinforced Concrete Beams [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 35 (5): 88-92.
- [9] 付远, 程香平, 万珍珍, 等. XFEM 计算 3D 打印 PLA 材料拉伸试样的裂纹扩展 [J]. 塑性工程学报, 2016, 23 (2): 136-142.
FU Yuan, CHENG Xiang-ping, WAN Zhen-zhen, et al. Crack Propagation of PLA 3D Printing Stretching Specimen by Means of XFEM [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2016, 23 (2): 136-142.
- [10] 张博. 成年人腰椎三维动力学模型设计与性能分析的基础研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2014.
ZHANG Bo. Basic Research on Adult Lumbar Spine Three-dimensional Dynamic Model Design and Performance Analysis of [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2014.
- [11] MILED K, ROY R L, SAB K, et al. Compressive Behavior of an Idealized EPS Lightweight Concrete: Size Effects and Failure Mode [J]. Mechanics of Materials, 2004, 36: 1031-1046.
- [12] DESMORAT R. Anisotropic Damage Modeling of Concrete Materials [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2016, 25 (6): 818-852.