

梯度过渡层对异质树脂材料并联结构拉伸强度和延性的影响

杨权权,曹鹤,李芸,唐友成,朱帅

(淮阴工学院,江苏省先进制造技术重点实验室,淮安 223003)

摘要:选择弹性模量依次减小的7种树脂材料,利用多材料喷射打印技术制备由最大和最小弹性模量材料并联形成的具有4种界面结构的拉伸试样,界面结构分别为无过渡层、宽度3 mm均质过渡层(由弹性模量居中的1种材料组成)以及宽度分别为3,5 mm的梯度过渡层(由另外5种材料组成),分析了其界面成形质量及拉伸性能。结果表明:无过渡层试样的界面处存在纹道和较多孔洞,成形质量较差;添加均质过渡层后,界面缺陷减少,拉伸强度略微增大,但是断裂应变降低了14.8%;添加梯度过渡层后,界面成形质量进一步提高,拉伸强度略微增大,延性明显提高,含宽度3,5 mm梯度过渡层试样的断裂应变分别比无过渡层试样提高了10.6%,37.9%。

关键词:梯度过渡层;3D打印;材料界面;拉伸强度;延性

中图分类号: TB332; O341

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2021)12-0026-05

Effect of Graded Transition Layer on Tensile Strength and Ductility of Parallel Structures of Heterogeneous Resin Materials

YANG Quanquan, CAO He, LI Yun, TANG Youcheng, ZHU Shuai

(Jiangsu Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223003, China)

Abstract: Seven resin materials with decreasing elastic moduli were selected. Tensile specimens with four interface structures were prepared by multi-material jet printing of two materials with the smallest and the largest elastic moduli; the two materials were connected parallelly. The interface structures were listed as follows: without transition layer, with homogeneous transition layer (composed of one material with mediate elastic modulus), and with 3 mm and 5 mm thick graded transition layers (composed of other five materials). The interface forming quality and tensile properties were analyzed. The results show the specimen without transition layer had grooves and much holes at interfaces, indicating a poor forming quality. With a homogeneous transition layer, the defects at the interface decreased in amounts, the tensile strength increased slightly, but the fracture strain decreased by 14.8%. With graded transition layers, the interface forming quality further increased, the tensile strength increased slightly and the ductility increased obviously. Comparing with that without transition layers, the fracture strains of specimens with 3 mm and 5 mm thick graded transition layers increased by 10.6%, 37.9%, respectively.

Key words: graded transition layer; 3D printing; material interface; tensile strength; ductility

0 引言

功能梯度材料(Functionally Graded Material,

收稿日期:2020-10-21;修订日期:2021-12-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11502090);江苏省“六大人
才高峰”高层次人才项目(GDZB-014);江苏省高校自然科
学研究重大项目(19KJA150007)

作者简介:杨权权(1984—),男,江苏淮安人,副教授,博士

FGM)由于具有界面强度高、断裂韧性好、不易产生应力集中等优异力学特性,已在航空航天、机械工程、生物医学等领域得到越来越广泛的应用^[1]。FGM的主要特征是材料宏观性能在空间位置上连续变化,这一优点是在制备过程中通过逐渐改变材料组成而获得的。这种连续变化可以消除不同组成材料之间的界面突变,进而避免由界面应力集中引起的断裂。将FGM用作界面过渡层连接2种不相

容的异质材料,可以大大提高异质材料间的结合强度,进而延长材料结构的服役寿命^[2-3]。目前,FGM 在 2 种异质材料间的界面力学行为已受到国内外学者的关注。CHU 等^[4]分析了功能梯度梁在拉伸和弯曲载荷作用下的力学行为,讨论了梯度弹性层连接 2 种不同材料时的界面位移。RIZOV^[5-6]理论研究了功能梯度多层梁结构的界面断裂问题,分析了裂纹位置、材料梯度和材料非线性行为对层间开裂的影响。HER 等^[7]计算了多层复合材料梁结构在拉伸和剪切载荷共同作用下界面裂纹的应变能释放率,分析了复合材料梁层厚对界面断裂韧性的影响。HSUEH 等^[8]研究了任意多层弹性梁在四点弯曲条件下的界面断裂问题,讨论了各界面厚度比和弹性模量比对界面断裂的影响。PEI 等^[9]利用激光熔覆技术制备了 AlSi₄₀ 功能梯度材料并通过试验研究了梯度材料的界面结合性能,揭示了 AlSi₄₀ 功能梯度材料和基体的不同失效模式。SEO 等^[10]通过爆炸喷涂技术制备了 ZrO₂/NiCrAlY 功能梯度涂层结构,利用剪切试验测试了梯度涂层的界面结合强度。CHAI 等^[11]针对口腔修复体中烤瓷氧化锆常见的界面开裂问题,设计并制备了梯度结构氧化锆试样,通过试验研究了梯度结构对界面结合性能的影响。目前,有关 FGM 界面性能的研究大多为理论分析或数值模拟,试验研究较少;并且,已有的试验研究所用 FGM 试样大多通过气相沉积、粉末冶金或自蔓延高温合成等传统方法制备,这些方法通常无法精确控制材料组成相的位置。

多材料 3D 打印基于逐点、逐面的材料累加原理,可在不同部位定向堆积不同材料,从而高效精确地制备得到 FGM 零部件^[12-13]。喷射打印是一种应用较早的多材料 3D 打印技术,该技术将材料熔化并按照规划路线以液滴状喷射成形,并通过热固化或紫外光固化制备得到零部件,具有很高的几何打印精度^[14-15]。作者针对硬脆和韧弹两种性能差异显著的异质树脂材料,利用多材料喷射打印技术制备界面无过渡层、含均质过渡层及含两种宽度梯度过渡层等 4 种界面结构的拉伸试样,通过拉伸试验测试比较了 4 种界面结构试样的拉伸性能,分析了梯度过渡层对拉伸强度和延性的影响,为存在异质材料界面结构工件的力学性能改进提供试验依据和参考。

1 试样制备与试验方法

在 Stratasys Connex3 Objet260 型 3D 打印机提供的材料中,选择 7 种不同弹性模量的光敏树脂材料

进行试验。其中:材料 1 为刚性不透明材料 (Vero White Plus),材料 7 为类橡胶材料 (Tango Black Plus),材料 2~6 为打印机厂商将材料 1 和材料 7 按照不同比例混合制得。打印机厂商仅提供了材料 1 的弹性模量范围 (2 000~3 000 MPa),为了获得材料 1~7 具体的弹性模量,根据 ASTM D 638-97 中拉伸试样 (类型 I) 的几何尺寸 (见图 1),利用 Stratasys Connex3 Objet260 型 3D 打印机打印制备 7 种材料的拉伸试样,每种材料各制备 2 个拉伸试样,并在 SANS-CMT5105 型电子万能试验机上进行室温拉伸试验,采用应变控制方式,拉伸速度为 5 mm·min⁻¹,得到的应力-应变曲线见图 2。试验测得材料 1~7 的弹性模量依次为 2 154, 1 881, 1 576, 1 174, 880, 445, 145 MPa, 拉伸强度逐渐降低,断裂应变逐渐增加,变化趋势基本接近于线性。

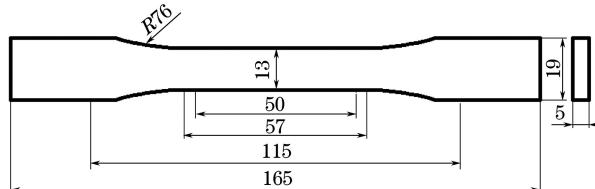


图 1 拉伸试样形状和尺寸

Fig. 1 Shape and size of tensile specimen

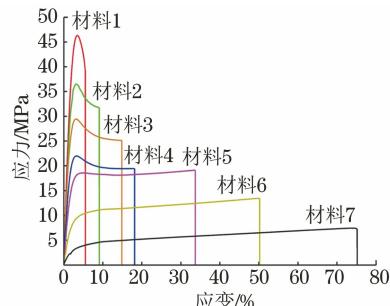


图 2 7 种打印材料的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves for seven printing materials

设计了 4 组不同界面结构的拉伸试样,试样形状和尺寸同图 1,界面结构位于试样宽度方向中心线处。设计的界面结构如图 3 所示,其中:试样 1 由材料 1 和材料 7 直接黏接而成,无界面过渡层,二者弹性模量相差很大;试样 2 在材料 1 和材料 7 的界面处增加了宽度为 3 mm 的材料 4 作为过渡层(均质过渡层),材料 4 的弹性模量介于材料 1 和材料 7 之间,在一定程度上能起到过渡缓冲作用;试样 3 和试样 4 在材料 1 和材料 7 界面处均增加了梯度过渡层,梯度过渡层的宽度分别为 3 mm 和 5 mm,均由材料 2~6 依次打印而成,每层的宽度均相等。

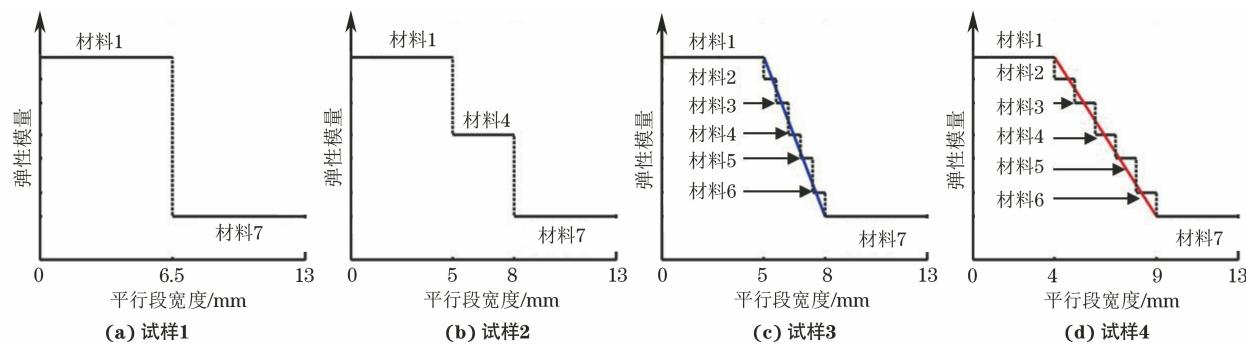


图 3 拉伸试样的界面结构示意

Fig. 3 Interface structure diagram of tensile specimen: (a) specimen 1; (b) specimen 2; (c) specimen 3 and (d) specimen 4

利用 Solidworks 软件对 4 种试样进行建模,在建模过程中不同材料部分需先单独建模,再装配成多材料结构模型,输出为 STL 格式文件并导入 Stratasys Connex3 Objet260 型 3D 打印机软件中,在软件中选择相应的材料,打印出上述 4 组不同界面结构拉伸试样。使用 DSX100 型超景深显微镜观察拉伸试样表面形貌,通过 Axio Imager 型光学显微镜观察试样界面微观形貌。使用 SANS-CMT5105 型

电子万能试验机进行室温拉伸试验,拉伸速度为 $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。拉伸断裂后,使用 DSX100 型超景深显微镜观察拉伸断口侧面形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 表面和界面形貌

由图 4 可以看出,4 种试样表面光滑,界面清晰,无明显的宏观裂纹缺陷。

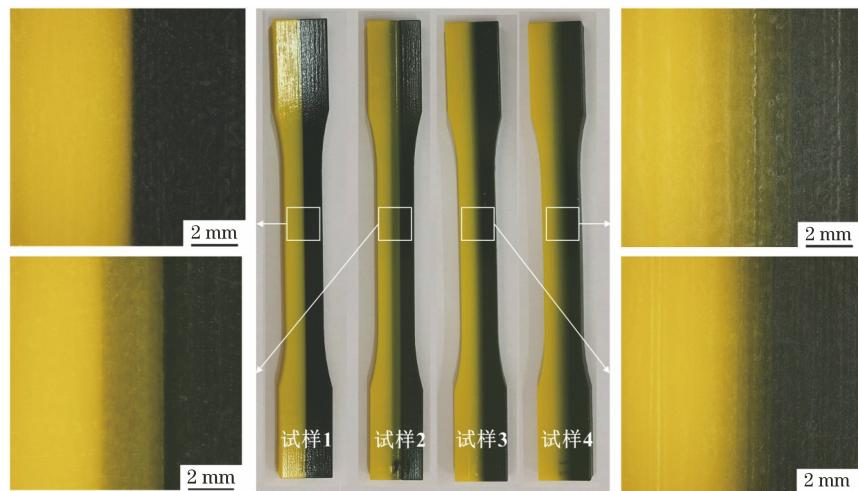


图 4 4 种试样的宏观照片及其中心处表面形貌

Fig. 4 Macroscopic photos of four specimens and their surface morphology at center

由图 5 可以看出:试样 1 中材料 1 和材料 7 由于成分、性能存在明显差异,二者直接黏接时界面处存在明显纹道和较多孔洞,2 种材料在界面处未能有效熔合,界面成形质量较差;试样 2 由于在材料 1 和材料 7 界面处添加了性能介于 2 种材料之间的材料 4 作为过渡层,界面处缺陷明显减少,界面熔合程度得到提高,成形质量较好;试样 3 和试样 4 在材料 1 和材料 7 之间添加了梯度过渡层,相邻材料的成分、性能差异更小,界面结合良好,基本无孔洞等缺陷,其中过渡层宽度较小的试样 3 的界面熔合程度最好,成形质量最高。

2.2 拉伸性能

由图 6 可见:4 种试样均在屈服阶段达到了最大应力(即拉伸强度),且均出现了应变软化效应,即应力随应变的增大而减小;在弹性阶段,4 种试样的应力-应变关系十分接近,进入塑性阶段以后,4 种试样的应力-应变关系出现明显区别。试验测得试样 1、试样 2、试样 3 和试样 4 的拉伸强度分别为 20.71, 21.11, 21.84, 21.38 MPa, 断裂应变分别为 11.99%, 10.21%, 13.26%, 16.54%。试样 2、试样 3 和试样 4 的拉伸强度与试样 1 相差不大,仅分别略微提高了 1.9%, 5.5%, 3.2%;试样 2 的断裂应变比试样 1 降低

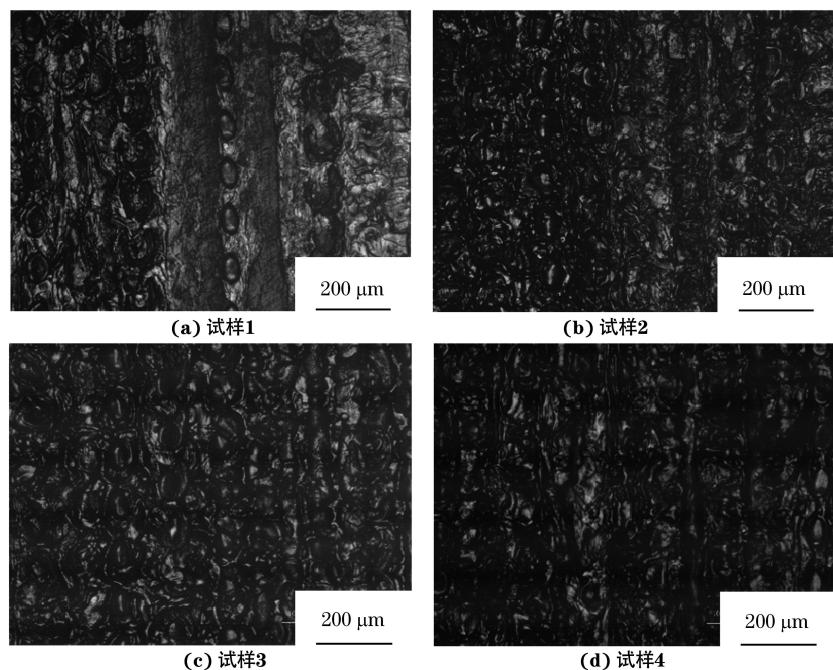


图 5 4 种试样的界面微观形貌

Fig.5 Interface micromorphology of four specimens: (a) specimen 1; (b) specimen 2; (c) specimen 3 and (d) specimen 4

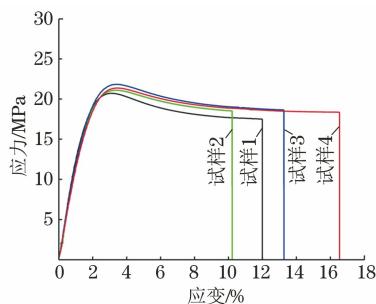


图 6 4 种试样的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves for four specimens

了 14.8%, 而试样 3 和试样 4 的断裂应变分别比试样 1 提高了 10.6%, 37.9%。

综上可见:在材料 1 和材料 7 之间添加性能介于二者之间的均质过渡层后,试样强度有所提高,但是延性变差;在材料 1 和材料 7 之间添加梯度过渡层则同时提高了试样的强度和延性,若进一步增加梯度层宽度,则可以使试样在强度微弱降低的情况下进一步提高延性。结合图 5 分析可知:在界面添加均质过渡层后,界面缺陷明显减少,成形质量得到提高,因此试样 2 的拉伸强度高于试样 1;试样 3 的界面熔合效果最好,成形质量最高,所以拉伸强度最大。

由图 7 可以看出,4 种试样中的材料 1 断口平齐,未观察到明显塑性变形,材料 7 断口处的厚度较

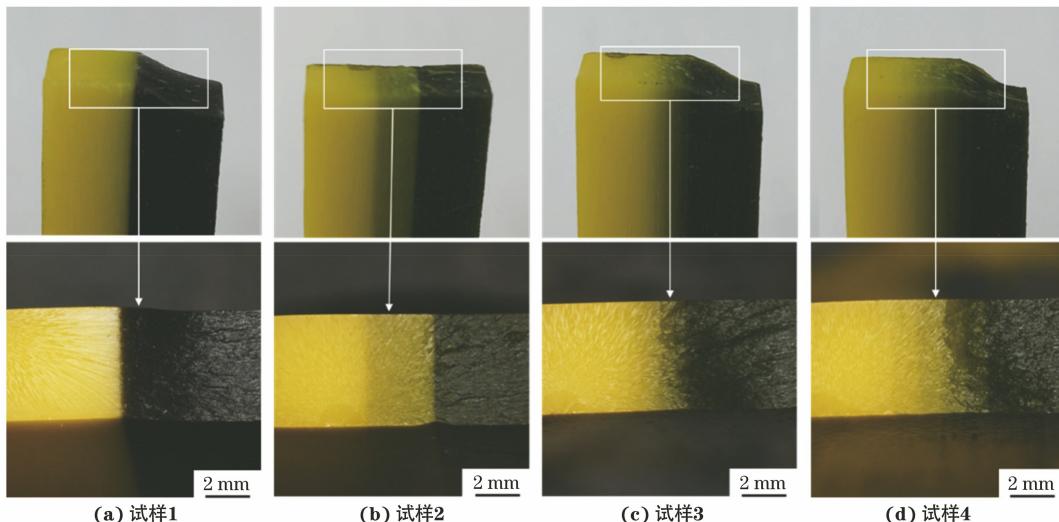


图 7 4 种拉伸试样断口侧面宏观形貌

Fig.7 Macromorphology of fracture sides of four specimens: (a) specimen 1; (b) specimen 2; (c) specimen 3 and (d) specimen 4

原始厚度略微减小,断口上可见纤维区。可知材料1和材料7均分别呈现出脆性断裂和韧性断裂特点。在应变控制加载方式下,4种试样在拉伸断裂前,其内部各材料层的应变相等。材料1的断裂应变最小,因此材料1一侧最先发生断裂,而后依次为材料2→材料7,在此过程中各材料层所承担的载荷在其断裂后全部转移至剩余材料层承担。材料1和材料7在试样中的含量同为最高,但材料1的拉伸强度最大,所以材料1是拉伸过程中的主承载体,试样的拉伸强度主要依赖于材料1的强度;材料1断裂后转移的载荷很大,试样很快将发生整体破坏,所以图6中应力-应变曲线较为平滑,没有出现跳跃突变。

2.3 拉伸强度理论计算

根据并联复合材料混合定律,计算理论拉伸强度。若只考虑试样内各材料的体积分数,忽略其他影响因素,则并联复合试样在水平拉伸载荷 F 作用下,各材料层平行承受载荷,如图8所示。每个材料层所受载荷若用 F_i 表示,则有

$$F = \sum F_i \quad (i = 1, 2, \dots, 7) \quad (1)$$

$$\sigma A = \sum \sigma_i A_i \quad (i = 1, 2, \dots, 7) \quad (2)$$

式中: σ, σ_i 分别为材料破坏前试样整体和试样内各材料层所受应力; A, A_i 分别为试样整体和各材料层的横截面积。

式(2)两边同时除以 A 可得

$$\sigma = \sum \sigma_i \varphi_i \quad (3)$$

式中: φ_i 为试样中各材料层的体积分数,即 A_i/A 。

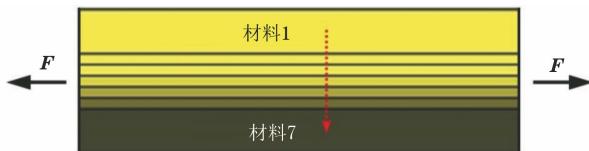


图8 并联复合试样受力示意

Fig. 8 Loading diagram of parallel composite specimen

由2.2节中的试验结果可知,复合试样在材料1失效后将发生整体破坏,所以有

$$\sigma_u = \sigma_{ul} V_1 + \sum \sigma'_i V_i \quad (4)$$

式中: σ_u, σ_{ul} 分别为试样和材料1的拉伸强度; σ'_i 为材料1达到拉伸强度时其余各材料对应的应力。

由图2可知,当材料1达到拉伸强度(46.33 MPa)时,对应的应变为3.47%,该应变下材料2~7对应的应力分别为36.39, 29.34, 21.95, 18.24, 9.58, 3.46 MPa。则由式(4)计算得到试样1、试样2、试样3和试样4的拉伸强度分别为24.90, 24.22, 24.48, 24.51 MPa。

4种试样的理论拉伸强度相差很小,与试验结果的相对误差分别在20.2%, 14.7%, 12.1%, 14.6%, 相对误差较大,并且理论值均高于试验值。这主要是因为利用混合定律进行理论计算时只考虑了各材料的体积分数,忽略了真实试样孔洞缺陷、空隙含量、界面结合质量等因素的影响。

3 结 论

(1) 将硬脆和韧弹树脂材料直接黏接,二者界面处存在明显纹道和较多孔洞缺陷,界面成形质量较差;在界面处添加弹性模量介于硬脆和韧弹材料之间的均质材料过渡层后,界面处缺陷明显减少,界面熔合程度得到提高,成形质量较好;在界面处添加由弹性模量介于二者之间的5种材料组成的梯度过渡层后,界面结合良好,基本无孔洞等缺陷,并且过渡层宽度较小的界面熔合程度最好,成形质量最高。

(2) 在硬脆和韧弹树脂材料界面添加均质材料过渡层后,试样的拉伸强度略微增大,但是延性明显降低,断裂应变降低了14.8%;界面添加梯度过渡层后,试样的拉伸强度略微增大,延性明显提高,断裂应变分别比无界面过渡层的提高了10.6%(过渡层宽度为3 mm)和37.9%(过渡层宽度为5 mm)。

(3) 根据并联复合材料定律计算得到的4种试样的拉伸强度相差不大,与试验结果的相对误差较大且高于试验结果,推测是由于计算时忽略了孔洞缺陷、空隙含量、界面结合质量等因素的影响。

参考文献:

- [1] MAHAMOOD R M, AKINLABI E T. Introduction to functionally graded materials [M]//Functionally Graded Materials. Cham: Springer International Publishing, 2017:1-8.
- [2] ERDOGAN F. Fracture mechanics of functionally graded materials[J]. Composites Engineering, 1995, 5(7):753-770.
- [3] 刘长生,方建成,陈庆财.梯度功能材料的制备与性能评价[J].机械工程材料,2006,30(10):1-4.
- [4] LIU C S, FANG J C, CHEN Q C. Fabrication and performance evaluation of functionally graded materials[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2006, 30(10):1-4.
- [5] CHU P, LI X F, WU J X, et al. Two-dimensional elasticity solution of elastic strips and beams made of functionally graded materials under tension and bending [J]. Acta Mechanica, 2015, 226(7):2235-2253.
- [6] RIZOV V. Delamination fracture analysis of an elastic-plastic functionally graded multilayered beam [J]. International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 2017, 12(1): 4.

(下转第41页)