

DOI: 10.3901/JME.2022.09.291

打印层厚度及路径宽度对熔丝成型结合颈的影响规律研究^{*}

姜世杰¹ 陈丕峰¹ 胡科¹ 战阳² 李常有¹

(1. 东北大学机械工程与自动化学院 沈阳 110819;

2. 辽宁轨道交通职业学院 沈阳 110023)

摘要: 熔丝成型(Fused-filament fabrication, FFF)是当今应用最广泛的3D打印技术之一,构成FFF产品的挤出材料丝之间的结合颈对其成型质量及机械性能有着至关重要的影响,然而相应的机理仍不明确。将理论与试验相结合,针对不同打印层厚度及路径宽度对FFF样件结合颈的影响规律进行研究,首先基于挤出材料丝的黏性烧结现象创建结合颈的理论模型;然后,完成FFF样件的制备以及试验准备工作,进而使用扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)对样件的结合颈进行分析及测量;最后,对比分析理论与试验结果,确定打印层厚度及路径宽度对FFF样件结合颈的影响规律,验证理论模型的正确性。结果表明增大打印层厚度会增大纵向结合颈,减小横向结合颈;而增大路径宽度可以增大横向结合颈,减小纵向结合颈。总体上,增大打印层厚度或路径宽度可以提高FFF样件的层间结合质量,并阐明相应的机理。研究成果将为FFF技术在改善成型质量方面提供理论参考和技术支持。

关键词: 熔丝成型; 打印层厚度; 路径宽度; 结合颈; 理论模型

中图分类号: TH113

Theoretical and Experimental Study on the Bonding Neck of Fused Filament Fabrication Parts

JIANG Shijie¹ CHEN Pifeng¹ HU Ke¹ ZHAN Yang² LI Changyou¹

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819;

2. Guidao jiaotong Polytechnic Institute, Shenyang 110023)

Abstract: Fused filament fabrication (Fused-filament fabrication, FFF) is one of the most widely used 3D printing technologies, and the bonding neck between the adjoining material filaments of FFF products has an important influence on its forming quality and mechanical properties, but the corresponding mechanism is not clear. Combining theoretical and experimental analysis, the effect of different layer thickness and extrusion width on the FFF parts' bonding neck is studied. Firstly, the theoretical model of the bonding neck is established based on the viscous sintering phenomenon of the extruded filament; The preparation of the samples is then completed, and the bonding neck of the samples is observed and measured by scanning electron microscope (SEM); Finally, the theoretical and experimental results are compared and analyzed, determining the influencing rule of the layer thickness and extrusion width on the built samples' bonding neck, and verifying the correctness of the theoretical model. The results show that increasing the layer thickness will increase the longitudinal bonding neck, but reduce the horizontal one; While for the extrusion width, the situation is in vise versa. In general, the FFF products' bonding quality is improved with the increasing layer thickness or extrusion width, and the mechanism is revealed. The research findings will provide theoretical reference and technical support for FFF technology in improving forming quality.

^{*} 国家自然科学基金(51705068)和中央高校基本科研业务费专项资金(N180703009, N170302001)资助项目。20210316收到初稿, 20211106收到修改稿

Key words: fused filament fabrication; layer thickness; extrusion width; bonding neck; theoretical model

0 前言

增材制造已从开始的原型制造逐渐发展为直接制造、批量制造,具有广泛而重要的应用前景^[1-3]。因其数字制造、设计空间近乎无限等诸多优势正在快速改变传统的生产方式和生活方式^[4-7]。作为使用最为广泛的 3D 打印技术之一,熔丝成型(Fused filament fabrication, FFF)能够便捷、高效地制造任意复杂几何形体。成型过程中,热熔喷头首先将材料丝加热至半熔融状态,在材料丝的推动下经由喷嘴挤出,然后喷头按照设计的模型轮廓和填充轨迹进行运动,与此同时将熔融材料挤出到指定位置,并与之前挤出的材料相黏结、凝固,最终逐层累加堆积成模型或产品。

FFF 产品的表面质量和机械强度等性能参数与传统方法制造的产品有较大的差距。而这些性能参数与挤出材料丝之间的结合颈有很大关系,结合颈越大,即代表结合程度越好,表面质量和机械强度等性能参数就会越理想^[8]。为了更有效地增大结合颈,需要明确其形成机理,因此,国内外一些学者针对结合颈建立了一系列理论模型。FRENKEL^[9]基于表面张力作用下的牛顿黏性流动建立了两个球形体之间的结合颈模型,之后由 ESHELBY^[10]进行了校正以满足连续性方程。POKLUDA 等^[11]提出了一种改进的结合颈模型,该模型考虑了表面张力做功和黏性耗散的平衡,但忽略了喷头对材料丝的挤压影响。GURRALA 等^[12]基于 FRENKEK 的模型原理建立了两个圆柱体之间的结合颈模型。以上都是基于两个球形或圆柱体截面提出的结合颈模型,普遍忽略了成型过程中由于过程参数的数值不同,喷头对材料丝的挤压影响,即形成结合颈的挤出材料丝截面为椭圆形的实际情况。此外,学者们在结合颈的试验研究方面,也进行了大量工作。BELLEHUMEUR 等^[13]将 FFF 工艺热分析时得到的试验数据与通过球形结合颈模型估算的理论结果进行了对比,探究了将球形结合颈模型应用于 FFF 工艺的可能性。SUN 等^[14]通过试验确定了 FFF 产品在不同加工条件下的温度曲线以及结合颈的大小,发现挤出材料丝之间的聚结现象会影响其层内和层间的结合颈,挤出材料丝的表面

张力在结合颈的形成中起着至关重要的作用。BALANI 等^[15]通过试验研究发现,对于 PLA 材料,当材料丝的温度低于 156 °C 时,相邻材料丝之间的结合颈便不再生长。CHAUNIER 等^[16]设计了可以研究球体与圆柱体烧结现象差异的试验装置,研究表明,除了较低温度(80~100 °C)情况,球形结合颈模型可以用于预测圆柱体之间形成的结合颈,但有一定的误差。

上述文献普遍都是针对圆形材料丝截面进行的研究,忽略实际情况下喷头对材料丝的挤压影响,即挤出材料丝截面为椭圆形。此时,材料丝之间会形成纵向和横向两条长度不等的结合颈,因此,球形或圆柱体结合颈模型并不适用。针对实际情况下 FFF 样件挤出材料丝之间的结合颈进行理论建模,并结合试验研究不同打印层厚度及路径宽度对形成结合颈的影响规律。通过对比分析理论与试验结果,验证理论模型的正确性。

1 结合颈模型

由于受到喷头的挤压,挤出材料丝截面为椭圆形,其间会形成纵向和横向两条长度不等的结合颈,如图 1 所示。假设在 FFF 样件中,相同的情况发生在任意两个相邻的挤出材料丝之间,其间形成结合颈时表面张力做功等于黏性力做功,并且忽略结合后材料丝长度的变化。

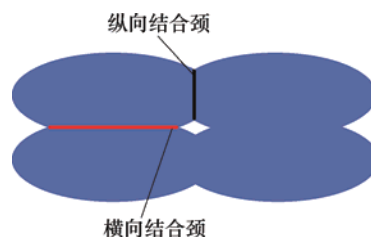


图 1 结合颈示意图

分别假设挤出材料丝椭圆形截面的长、短半径及挤出材料丝的长度为 a 、 b 和 l , 如图 2 所示。在相邻挤出材料丝结合的过程中,由于其结合程度较小,因此假设结合时的物质流通发生在以接触点处 r_0 (椭圆的曲率半径)为半径的圆内,并且在任意 t 时刻其瞬时半径、结合颈长度以及瞬时角分别为 r , $2y$ 和 2θ (图 2), 它们有着如下关系

$$y = r \sin \theta \quad (1)$$

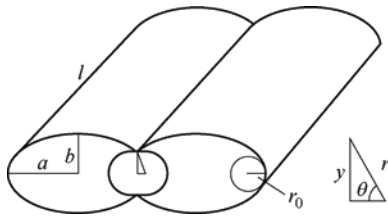


图2 FFF中结合颈形成的阶段

根据体积守恒原则(相邻挤出材料丝结合前的总体积与结合过程中的总体积相等),可获得结合过程中任意时刻 t 的材料丝半径 r 与初始半径 r_0 之间的关系式

$$r = \frac{\sqrt{\pi r_0}}{\sqrt{\pi - \theta + \sin \theta \cos \theta}} \quad (2)$$

$$r_0 = \frac{b^2}{a}$$

当相邻挤出材料丝相互结合时,其任意时刻 t 的瞬时表面积为

$$S = \frac{4lb^2\sqrt{\pi}}{a} \frac{\pi - \theta}{\sqrt{\pi - \theta + \sin \theta \cos \theta}} \quad (3)$$

在表面张力的影响下,材料丝结合的表面张力做的功为^[11]

$$W_s = -\Gamma \frac{dS}{dt} \quad (4)$$

式中, Γ 为表面张力系数,将式(3)代入式(4)即可得到表面张力做功的表达式

$$W_s = \frac{4\sqrt{\pi}lb^2\Gamma}{a} \frac{(\pi - \theta)\cos^2\theta + \sin\theta\cos\theta}{[(\pi - \theta) + \cos\theta\sin\theta]^{3/2}} \dot{\theta} \quad (5)$$

初始条件为

$$\theta(0) = \theta_0 = 0 \quad (12)$$

由式(1)可知

$$\frac{y}{r} = \sin \theta \quad (13)$$

将式(2)代入式(13)中可得结合半颈 y 的表达式

$$y = \frac{\sin \theta \sqrt{\pi} b^2}{a \sqrt{\pi - \theta + \sin \theta \cos \theta}} \quad (14)$$

同理可以得到横向结合颈瞬时半角的变化率以及结合半颈。

利用初始条件对式(11)进行求解可得到某一时刻

$$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt}$$

假设相邻挤出材料丝结合时流动的流体为牛顿流体,牛顿流体的黏性力做功 W_v 可以表达为^[9]

$$W_v = \iiint_V 3\eta \dot{\epsilon}^2 dV \quad (6)$$

式中, η 为材料的黏度; V 为相邻挤出材料丝结合后的体积; $\dot{\epsilon}$ 为流体应变率。

假设应变率 $\dot{\epsilon}$ 在整个区域中是连续的,则 $\dot{\epsilon}$ 可以表达为

$$\dot{\epsilon} = \frac{\partial v_y(A)}{\partial y} = \frac{v_y(A) - v_y(O)}{r} \quad (7)$$

式中, $v_y(A)$ 为材料由点挤出材料丝中心移动到接触面的速度。 $v_y(O)$ 为材料在两相邻挤出材料丝接触面上的流动速度,其值为零。

$$v_y(A) = \frac{\sin \theta (\theta - \pi) \cdot \sqrt{\pi} r b^2}{(\pi - \theta + \sin \theta \cos \theta)^{3/2} \cdot a} \dot{\theta} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)中即可得到应变率 $\dot{\epsilon}$

$$\dot{\epsilon} = \frac{(\theta - \pi) \sin \theta}{(\pi - \theta + \sin \theta \cos \theta)} \dot{\theta} \quad (9)$$

将式(9)代入式(6)中即可得到黏性力做功 W_v

$$W_v = \frac{6\pi l \eta b^4}{a^2} \frac{(\pi - \theta)^2 \sin^2 \theta}{(\pi - \theta + \sin \theta \cos \theta)^2} \dot{\theta}^2 \quad (10)$$

令表面张力做功 W_s (式(5))与黏性力做功 W_v (式(10))相等,即可得到结合颈瞬时半角的变化率

$$\dot{\theta} = \frac{2\Gamma a}{3\sqrt{\pi} b^2 \eta} \left[\frac{[(\pi - \theta) \cos^2 \theta + \sin \theta \cos \theta][\pi - \theta + \sin \theta \cos \theta]^{1/2}}{(\pi - \theta)^2 \sin^2 \theta} \right] \quad (11)$$

刻的结合颈瞬时半角,然后将求得的瞬时半角代入式(14)中即可确定某一时刻的结合颈长度。在挤出材料丝结合的过程中,结合颈并不是一直处于生长状态,当温度低于某一临界值时结合颈便停止生长^[9],因此需要分析挤出材料丝从熔融温度下降到临界温度的时间。

依据文献[14],挤出材料丝的冷却模型表达式为

$$T = T_\infty + (T_0 - T_\infty) \cdot e^{-mx} \quad (15)$$

$$m = \frac{\sqrt{1 + 4\alpha\beta} - 1}{2\alpha} \quad x = vt \quad \alpha = \frac{k}{\rho C v}$$

$$\beta = \frac{hP}{\rho C A v}$$

式中, T_{∞} 为加工环境的包络温度; T_0 为熔融温度, T 为挤出材料丝的实时温度; ρ 为材料的密度; C 为材料的比热容; A 为椭圆截面的面积; P 为椭圆截面的周长; k 为材料的热导率; h 为系统对流系数。

2 试验研究

2.1 样件制备

利用 D-FORCE V2 型 FFF 3D 打印机^[17]制备了不同过程参数的矩形薄板样件, 如图 3 所示。样件为聚乳酸(PLA)材料, 具有热塑性好、强度高、加工性能优异等特点, 被广泛应用在塑料加工、注塑成型等工程领域^[18]。

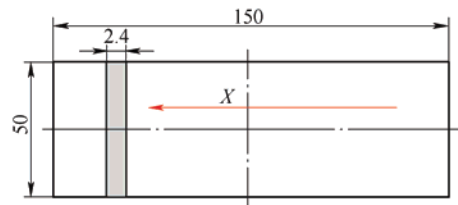


图 3 样件示意图(单位: mm)

样件共九种类型, 每种类型各制备了 3 个样件。使用符号 X_E^L-i , $i=1\sim4$ 以代表各样件, 其中 L 为打印层厚度, E 为路径宽度, i 为样件编号。样件打印层厚度分别设置为 0.20 mm、0.15 mm 和 0.10 mm; 路径宽度分别为 0.2 mm、0.3 mm 和 0.4 mm, 具体情况如表 1 所示。需要注意的是, 样件除了打印层厚度以及路径宽度不同之外, 其他过程参数的设置均相同, 例如打印速度、打印方向、熔融温度等。

表 1 样件及材料的具体参数

样件 ($i=1, 2, 3$)	$X_{0.2}^{0.2}-i$	$X_{0.3}^{0.2}-i$	$X_{0.4}^{0.2}-i$	$X_{0.2}^{0.15}-i$	$X_{0.3}^{0.15}-i$	$X_{0.4}^{0.15}-i$	$X_{0.2}^{0.1}-i$	$X_{0.3}^{0.1}-i$	$X_{0.4}^{0.1}-i$
打印层厚度 L / mm	0.2			0.15			0.1		
路径宽度 E / mm	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4
轮廓线数量	6	4	3	6	4	3	6	4	3
打印速度 v / (mm/s)	60								
打印方向	X (0°)								
热导率 k / (W/m·K)	0.08								
系统对流系数 h / (W/(m ² ·K))	0.195								
密度 ρ / (kg/m ³)	1 250								
比热容 C / (J/kg·K)	2 000								
挤出温度 T_0 / $^\circ\text{C}$	200								
临界温度 T / $^\circ\text{C}$	156								

2.2 结合颈测试

为确定 FFF 样件的结合颈, 本文利用电子显微镜(型号: JT-H360-4K)进行了初步测试和分析, 然后利用场发射扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM, 型号: Zeiss ULTRA 55)完成了精确测试。针对每个样件, 合理选择典型位置(材料丝黏合正常、无缺陷的位置)的 3 个不同截面进行测试, 以确保结果具有代表性和可重复性。每个样件共完成 10 组 试验, 总计获得 270 组结合颈的测试数据。为进一步降低误差, 保证测试结果的准确性和有效性, 以每个样件 10 组数据的平均值作为单个样件的分析结果。

3 结果分析

3.1 冷却时间

图 4 为不同过程参数下挤出材料丝冷却时间曲线。从图中可以看出挤出材料丝在短时间内从熔融温度下降到临界温度, 且其冷却时间随着路径宽度或打印层厚度的增大而增加。表 2 详细列出了不同过程参数下挤出材料丝从熔融温度下降到临界温度所需时间。由表 2 可知, 不同类型样件之间的冷却时间有着细微的差别, 例如当路径宽度 E 为 0.3 mm 时, 冷却时间随着打印层厚度 L 的增加而缓慢增加, 其最大值为 0.54 s ($X_{0.3}^{0.2}$)。当打印层厚度 L 为 0.2 mm

时, 冷却时间同样随着路径宽度 E 的增加而缓慢增加, 最大值为 $0.59 \text{ s} (X_{0.4}^{0.2})$ 。

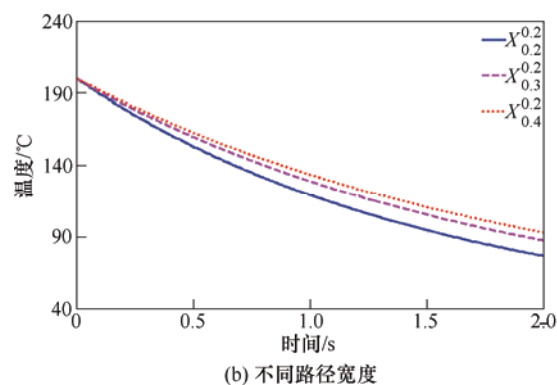
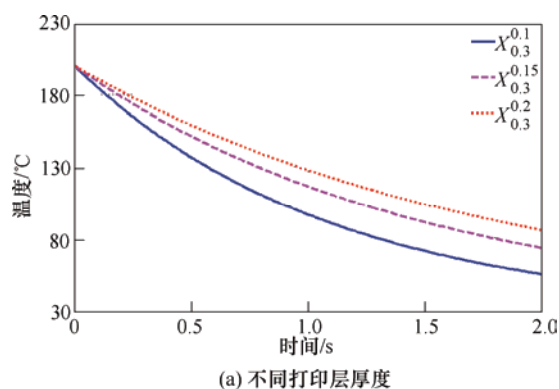


图 4 不同过程参数下挤出材料丝冷却时间曲线

表 2 冷却时间

样件	$X_{0.2}^{0.2}$	$X_{0.2}^{0.15}$	$X_{0.2}^{0.1}$	$X_{0.3}^{0.2}$	$X_{0.3}^{0.15}$	$X_{0.3}^{0.1}$	$X_{0.4}^{0.2}$	$X_{0.4}^{0.15}$	$X_{0.4}^{0.1}$
冷却时间/s	0.46	0.39	0.29	0.54	0.44	0.32	0.59	0.47	0.33

3.2 打印层厚度、路径宽度对结合颈的影响

图 5 对比分析不同类型的 FFF 样件结合颈长度的理论与试验结果, 由图可见, 纵、横两个方向上的结果吻合度都较好(误差范围 4%~18%), 验证了理论模型的正确性, 即本文提出的理论模型能够准确预测 FFF 样件的结合颈长度。此外, 当打印层厚度增大时, 纵向结合颈增大, 而横向结合颈减小; 而当路径宽度增大时, 横向结合颈增大, 纵向结合颈减小, 具体数值如表 3 所示。以路径宽度 0.4 mm 为例, 当打印层厚度从 0.1 增加至 0.2 mm 时, 横向结合颈减小 6.73%(由 295.66 降至 275.76 μm), 而纵向结合颈增大 141.52%(由 30.90 增至 74.63 μm); 当打印层厚度为 0.15 mm 时, 随着路径宽度的增大(由 0.2 增至 0.4 mm)横向结合颈增大 132.81%(由 122.72 增至 285.71 μm), 纵向结合颈减小 19.33%(由 64.00 降至 51.63 μm)。可见, 增大打印层厚度或路径宽度可以总体上提高结合颈质量。

虽然本理论模型可以预测 FFF 样件的结合颈, 但仍有必要对上述误差原因进行分析, 其可能来自于理论建模和 试验测试两个方面。其中, 理论误差包括将 FFF 样件的截面轮廓假设为椭圆以及所有的材料丝结合过程都相同, 模型建立忽略了横向剪切应力、纤维排列不规则、界面缺陷、残余应力以及

材料参数分散性的影响; 而试验误差也客观存在, 例如测试时样件摆放位置、仪器灵敏度漂移、试验方法等造成的影响。

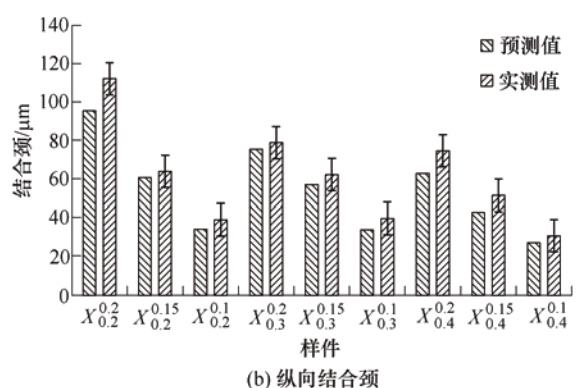
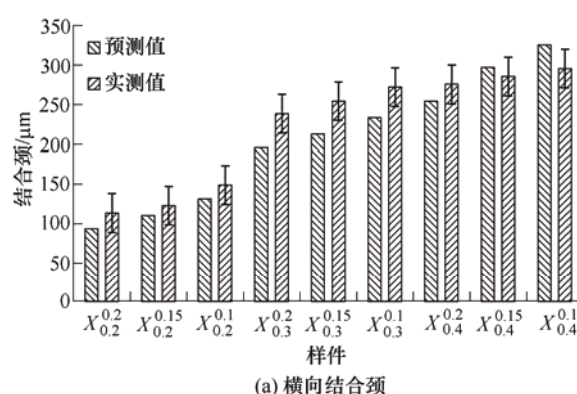


图 5 不同过程参数下 FFF 样件结合颈长度

表 3 理论分析与试验测试结果

	样本	$X_{0.2}^{0.2}$	$X_{0.2}^{0.15}$	$X_{0.2}^{0.1}$	$X_{0.3}^{0.2}$	$X_{0.3}^{0.15}$	$X_{0.3}^{0.1}$	$X_{0.4}^{0.2}$	$X_{0.4}^{0.15}$	$X_{0.4}^{0.1}$
横 向 结 合 颈	理论结果/ μm	93.57	110.2	131.4	195.79	212.8	233.5	254.5	297.4	325.9
	试验结果/ μm	113.39	122.72	148.72	238.76	254.42	272.29	275.76	285.71	295.66
	误差(%)	17.47	10.20	11.65	18.00	16.36	14.25	7.71	3.93	9.28
	试验结果偏差/ μm	13.45	9.52	14.38	15.77	14.96	10.23	13.98	8.89	12.53
纵 向 结 合 颈	理论结果/ μm	95.40	60.78	34.38	75.48	57.21	33.89	63.05	42.94	27.32
	试验结果/ μm	111.97	64.00	39.18	78.90	62.33	39.78	74.63	51.63	30.90
	误差(%)	14.79	5.03	12.25	4.33	8.21	14.81	15.52	16.83	11.58
	试验结果偏差/ μm	11.54	8.22	13.36	15.21	14.43	9.27	11.44	11.56	12.65

3.3 扫描电镜分析

图 6 是表 3 中所列 9 种样件截面放大 300 倍后的扫描电镜图像。通过对比分析可知,当路径宽度保持不变,打印层厚度 L 从 0.1 增大到 0.2 mm 时,纵向结合颈明显增大,即纵向结合质量提高;当打

印层厚度保持不变,路径宽度 E 从 0.2 增大到 0.4 mm 时,横向结合颈显著增大,即横向结合质量提高。因此,提高打印层厚度可以明显增大纵向结合颈;而增大路径宽度可以显著提高横向结合颈。此分析从微观角度进一步说明理论模型的正确性。

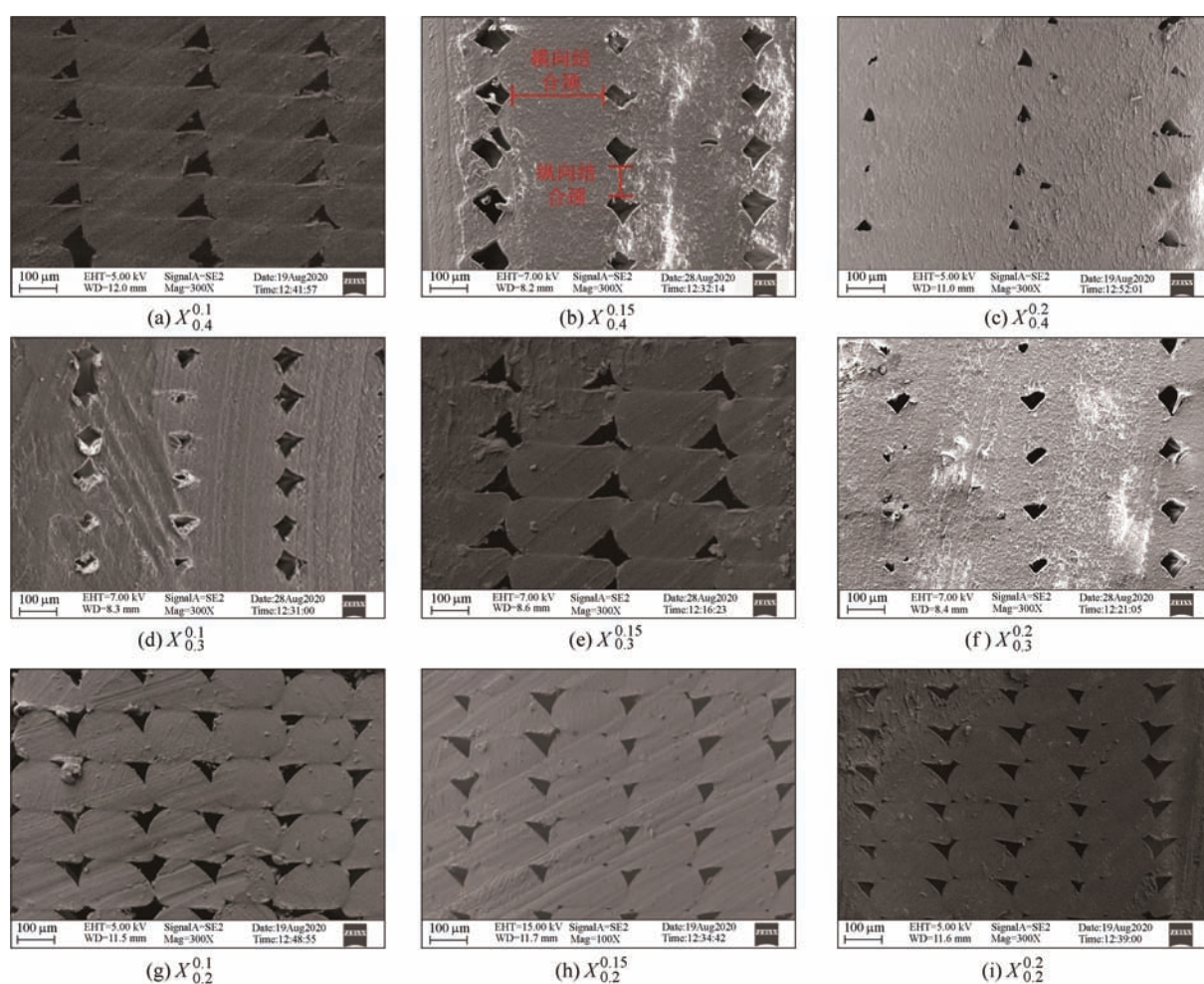


图 6 不同类型样件的截面扫描电镜图像

4 结论

(1) 挤出材料丝会在短时间内从熔融温度冷却到临界温度(即冷却时间短); 随着路径宽度或打印层厚度的提高, 冷却时间延长。

(2) 提高打印层厚度, 能增大纵向结合颈, 同时略微降低横向结合颈; 提高路径宽度, 会增大横向结合颈, 但略微降低纵向结合颈。总体上, 打印层厚度或路径宽度越大, FFF 产品结合质量越好, 即成型质量越高。

(3) 建立的 FFF 样件结合颈理论模型能够准确地预测样件中结合颈的长度, 理论模型正确、可靠。

(4) 利用扫描电镜从微观角度对样件进行分析, 结果进一步验证结论(2)的正确性。

参 考 文 献

- [1] ZHAO Cang, PARAB N, LI Xuxiao, et al. Critical instability at moving keyhole tip generates porosity in laser melting[J]. *Science*, 2020, 370: 1080-1086.
- [2] CUNNINGHAM R, ZHAO Cang, PARAB N, et al. Keyhole threshold and morphology in laser melting revealed by ultrahigh-speed x-ray imaging[J]. *Science*, 2019, 363: 849-852.
- [3] 唐梓珏, 刘伟鬼, 颜昭睿, 等. 基于熔池动态特征的金属激光熔化沉积形状精度演化行为研究[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(15): 39-47.
TANG Zijue, LIU Weiwei, YAN Zhaorui, et al. Study on evolution behavior of geometrical accuracy based on dynamic characteristics of molten pool in laser-based direct energy deposition[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(15): 39-47.
- [4] 王迪, 邓国威, 杨永强, 等. 金属异质材料增材制造研究进展[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(1): 186-198.
WANG Di, DENG Guowei, YANG Yongqiang, et al. Research progress on additive manufacturing of metallic heterogeneous materials[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(1): 186-198.
- [5] 杨延华. 增材制造(3D 打印)分类及研究进展[J]. *航空工程进展*, 2019, 10(3): 309-318.
YANG Yanhua. Analys of classifications and characteristics of additive manufacturing (3DPrint)[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2019, 10(3): 309-318.
- [6] 李涤尘, 贺健康, 田小永, 等. 增材制造: 实现宏微结构一体化制造[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(6): 129-135.
LI Dichen, HE Jiankang, TIAN Xiaoyong, et al. Additive manufacturing : Integrated fabrication of macro/microstructures[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(6): 129-135.
- [7] VYAVAHARE S, TERAIIYA S, PANGHAL D, et al. Fused deposition modelling: A review[J]. *Ahead-of-Print*, 2019, 26(1): 177-201.
- [8] ABBOT A C, TANDON G P, BRADFORD R L, et al. Process-structure-property effects on ABS bond strength in fused filament fabrication[J]. *Additive Manufacturing*, 2017, 19: 29-38.
- [9] FRENKEL J. Viscous flow of crystalline bodies under the action of surface tension[J]. *Science of Sintering*, 1945, 9(5): 501-559.
- [10] ESHELBY J D. Seminar on the kinetics of sintering[J]. *JOM*, 1949, 158(11): 796-813.
- [11] POKLUDA O, BELLEHUMEUR C T, VLACHOPOULOS J. Modification of frenkel's model for sintering[J]. *Aiche Journal*, 1997, 43(12): 3253-3256.
- [12] GURRALA P K, REGALLA S P. Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modelling[J]. *Virtual & Physical Prototyping*, 2014, 9(3): 141-149.
- [13] BELLEHUMEUR C, LI Longmei, SUN Qian, et al. Modeling of bond formation between polymer filaments in the fused deposition modeling process[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2004, 6(2): 170-178.
- [14] SUN Qian, RIZVI G M, BELLEHUMEUR C T, et al. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2008, 14(2): 72-80.
- [15] BALANI S B, CHABERT F, NASSIET V, et al. Toward improvement of the properties of parts manufactured by FFF (fused filament fabrication) through understanding the influence of temperature and rheological behaviour on the coalescence phenomenon[C]// *AIP Conference Proceedings*, 2017, 1896(1): 040008.
- [16] CHAUNIER L, DELLA V G, LOURDIN D, et al. Viscous sintering kinetics of biopolymer filaments extruded for 3D printing[J]. *Polymer Testing*, 2019, 77: 1-6.
- [17] JIANG Shijie, SHI Yinfang, YANNICK S, et al. Investigation on the effect of road width on the inherent characteristics of FDM plates[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(15): 226-232.
- [18] FARAH S, ANDERSON D G, LANGER R. Physical and mechanical properties of PLA and their functions in widespread applications - a comprehensive review[J]. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2016, 107: 367-392.

作者简介: 姜世杰, 男, 1985 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为机械系统振动/噪声的测试、分析与控制以及振动利用。
E-mail: jiangsj@me.neu.edu.cn