

基于UV喷墨系统提升3D打印模型表面着色效果

刘瑜，姚山，矫轶男，薛铠华
(大连理工大学，大连 116024)

摘要：目的 研究基于UV喷墨方法获得高质量的3D打印彩色外观。方法 基于熔融沉积的成型方法，设计并加工不同打印层厚及倾斜角度的直角梯台模型，通过UV喷墨平台对模型表面进行标准色块着色处理，论述阶梯效应对喷墨着色涂层的影响机理，以及喷墨对于3D打印阶梯效应的修复作用，显微观察模型表面图像，并测量色块颜色的色度值。**结果** 比较分析得出，打印层厚和倾斜角度导致的未着色条纹是影响3D打印模型表面喷墨着色效果的主要因素。**结论** 通过UV白墨涂覆的方法可以修复阶梯效应，从而获得高质量的3D打印彩色外观。

关键词：彩色3D打印；UV喷墨；阶梯效应；颜色表征；增材制造

中图分类号：TS206 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2018)05-0196-07

DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.05.037

Improving the Surface Coloring Effect of 3D Printing Model Based on UV Ink-jet System

LIU Yu, YAO Shan, JIAO Yi-nan, XUE Kai-hua
(Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

ABSTRACT: The work aims to study the high-quality 3D printed color appearance obtained based on UV ink-jet system. Based on the FDM method, the right angle ladder models with different printing thicknesses and inclination angles were designed and processed. The model surface was subject to the standard coloring of color lump by UV inkjet platform. The mechanism of influence of the staircase effect on the inkjet coloring coating and the repair effect of the inkjet on the 3D printing were discussed. The model surface image was subject to the microscopic observation and the chromatic value of the color lump was measured. Based on the comparative analysis, the uncolored stripes caused by the printing thickness and inclination angle were the main factors that affected the inkjet coloring effect on the 3D printing model surface. The staircase effect can be repaired by UV white ink coating to obtain high-quality 3D printed color appearance.

KEY WORDS: color 3D printing; UV inkjet; staircase effect; color characterization; additive manufacturing

3D打印技术又称为快速成型技术(Rapid Prototyping)或增材制造技术(Additive Manufacturing)^[1]。日渐成熟的3D打印技术已经突破了传统制造技术在加工复杂结构上的技术瓶颈，未来的主流发展趋势将聚焦在多材料、多功能梯度、多色及真彩色3D打印技术上^[2—3]。彩色3D打印技术在快速原型、建筑施工、地理测绘、文物保护、艺术创作等诸多领域应用前景广阔^[4—5]。近年来在国内外的研究中，已有多种实现彩色3D打印的技术方法及商品化装备^[6—8]。

由于3D打印时采用逐层打印的成形方式，因此

层与层之间会有阶梯产生，称之为“阶梯效应”^[9]，阶梯效应对3D打印模型表面着色效果有着决定性的影响。为了降低阶梯效应对表面质量的影响，近年来研究人员对此展开了大量研究。研究人员通过提出各自的对表面粗糙度的评价指标，并根据指标进行优化，从而改善3D打印样件表面质量^[10—11]，解决方法包括减小分层厚度、选择合理的分层及加工方向，但在实际的加工过程中，较为复杂的模型对其进行成型方向优化比较困难，且优化成型方向还需考虑支撑结构、成型精度等问题^[12—13]；较小分层厚度会大大降低成

收稿日期：2017-08-03

作者简介：刘瑜（1996—），女，大连理工大学硕士生，主攻彩色3D打印技术。

通信作者：姚山（1966—），男，大连理工大学教授、博导，主要研究方向为材料成型数字化技术。

型效率^[14-15], 在实际应用中受到工艺和设备等方面的局限。另外, 近年来在印刷领域内, UV墨因其环保性好、高效等优势成为目前最受瞩目的新型油墨。墨水固化过程中UV油墨经聚合物高密度交联反应所产生的组成结构具有高度的坚韧性和抗污染、抗磨损以及抗溶剂等特性, 其适用于多种非吸收性材料, 目前UV喷墨技术已经非常成熟^[16-17]。基于以上问题, 文中提出利用UV喷墨对3D打印模型表面的阶梯进行覆盖后再着色的方法来提高模型表面的着色质量。

1 3D打印模型表面UV喷墨着色机理分析

1.1 3D打印模型表面阶梯效应分析

3D打印是利用计算机将成型零件的3D模型切片再叠加打印成型的技术^[18], 在分层叠加的过程中, 模型表面层与层之间会形成一个台阶, 称为“阶梯效应”。其台阶高度取决于CAD三维模型数据离散化处理时所切分的层厚高度。无论使用何种成型方式或成型材料, 在不进行后处理修饰的条件下, 模型表面的阶梯纹理是3D打印固有的成型特征。

由于单层数据的数控成型过程独立且不可并行, 所以模型的加工效率取决于切分的层厚高度大小, 其切分层厚越大, 所需要的加工时间越短, 但同时也使得模型表面的阶梯纹理更加明显。在喷墨打印头的有效喷射高度区间内, 以简化的直角梯台模型斜面为模拟参考, 3D打印样件表面的阶梯效应对喷墨着色涂层的影响机理见图1。

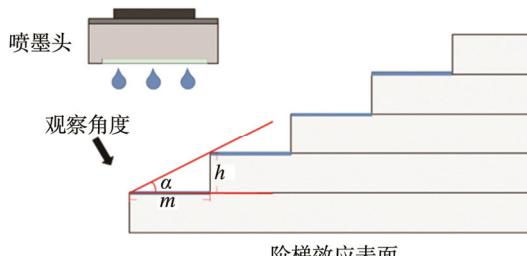


图1 阶梯效应对喷墨着色涂层的影响机理

Fig.1 Influence mechanism of staircase effect on inkjet coloring coating

图1中, 喷墨打印头垂直于成型样件的叠层方向, 样件斜面的倾斜角度为 α , 3D打印层厚为 h , 如果对表面进行喷墨着色, 则油墨只能附着于试样表面台阶的水平方向区域, 台阶的竖直方向区域仍然裸露且呈现打印材料的基体颜色。从观察角度看, 会有宽度为 d 的未着色区域, 其中 $d=hsin\alpha$ 。可见, 3D打印样件的表面着色效果受到层厚 h 和倾斜角度 α 的影响。当层厚一定时, 倾斜角度 α 越大时, 未着色区域宽度 d 越大; 当倾斜角度 α 一定时, d 随着 h 的增大而增大。

1.2 UV白墨对阶梯效应的修复作用

UV墨在固化之前具有流动性, 通过在具有阶梯效

应的模型表面进行UV墨涂覆的方法可以覆盖模型表面阶梯。彩色UV墨在多层叠加或者基底颜色较深时会出现严重的偏色现象^[19-20], 故选择UV白墨。白墨不仅能覆盖3D打印模型表面阶梯效应, 同时还能覆盖打印材料的基底颜色。原理分析见图2a。由于液体张力的作用, 墨水液滴会形成图2b所示的曲面覆盖直角阶梯, 在气固液三相交界的2处分别取一微元小液块分析其受力情况。竖直壁侧的小液块受到3个力的作用: 附着力 F , 伸展力 f 和表面张力 $f^{[21]}$ 。三力平衡时有:

$$f = \alpha l \quad (1)$$

$$f' = f \cos \theta_1 = mg = \rho g 2dh \quad (2)$$

$$h = \frac{\alpha \cos \theta_1}{2\rho g d} \quad (3)$$

式中: α 为液体的表面张力系数; ρ 为液体的密度; θ 为液体与固体表面浸润角。水平面上的液面的形状是由Y-L方程决定的, 理想情况下接触角与三相间相互作用力的关系可用杨氏方程式(4)来描述。

$$\gamma_{LV} \cos \theta_2 = \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad (4)$$

当平面上方边缘处也存在液滴且侧壁液体高度接近上平面时, 上下2个液滴会汇合为在一起以减小表面能, 从而覆盖直角阶梯, 见图2b。

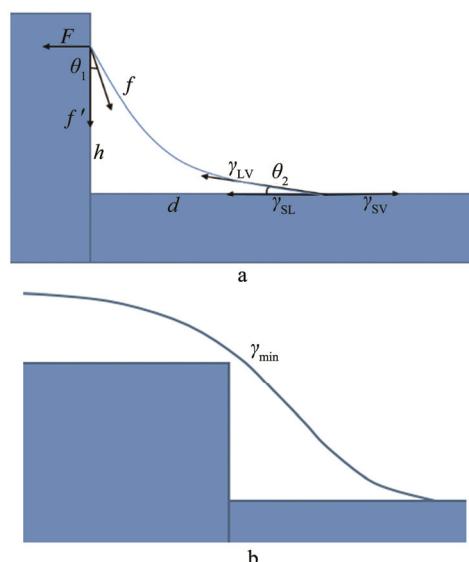


图2 白墨液滴覆盖直角阶梯原理

Fig.2 Principle of white ink droplet covering right angle ladder

阶梯效应是3D打印固有的表面特征, 而打印层厚和倾斜角度是影响样件着色的两大主要因素。文中基于FDM的3D打印成型方法, 设计并加工了不同层厚不同倾斜角度的直角阶梯样块。通过观察白色样块着色情况可知, 阶梯效应和倾斜角度都会导致样块表面出现未着色条纹区域, 这严重影响了色彩表现。通过在灰色样块表面进行白墨涂覆的方式不仅可以去除阶梯效应造成的着色问题, 还能覆盖打印材料本身的颜色, 从而获得更高质量的彩色外观。

2 实验

2.1 设备与材料

实验设备: Epson R1900 UV 喷墨打印头; 闪铸 Dreamer FDM 3D 打印机; 3nh NS810 分光测色仪(深圳市三恩时科技有限公司); 艾尼提 WiFi 无线显微镜(北京爱迪泰克有限公司)。实验材料: LED 硬性 UV 墨水(CMYK 4 色); PLA 白色和灰色 3D 打印丝材。

2.2 实验步骤

1) FDM 样块打印。设计梯台实验样块, 按层厚高度分为 A、B、C 3 组, 每组打印 4 个白色样块和 4 个灰色样块, 斜面倾斜角度 α 分别为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$, 样块高度为 10 mm, 宽度 W 为 100 mm, 同时设计 2 个 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的平板试样作为倾斜角度 0° 的 D 组。使用闪铸 Dreamer FDM 3D 打印机分别打印 A 组、B 组、C 组、D 组实验样块, 采用 PLA 丝材, 打印参数见表 1。

表 1 直角梯台试样 3D 打印工艺参数
Tab.1 Process parameters of 3D printed right angle ladder samples

分组	层厚/mm	斜面倾角/(°)	材料	填充率/%
A1	0.3	15, 30, 45, 60	白色PLA	30
A2			灰色PLA	
B1	0.2	15, 30, 45, 60	白色PLA	30
B2			灰色PLA	
C1	0.1	15, 30, 45, 60	白色PLA	30
C2			灰色PLA	
D1	0.1	0	白色PLA	30
D2			灰色PLA	

2) 样块表面着色。使用 Illustrator CS 5 图形软件设计打印色块图案, 品红色块的色板值为 $C=0$,

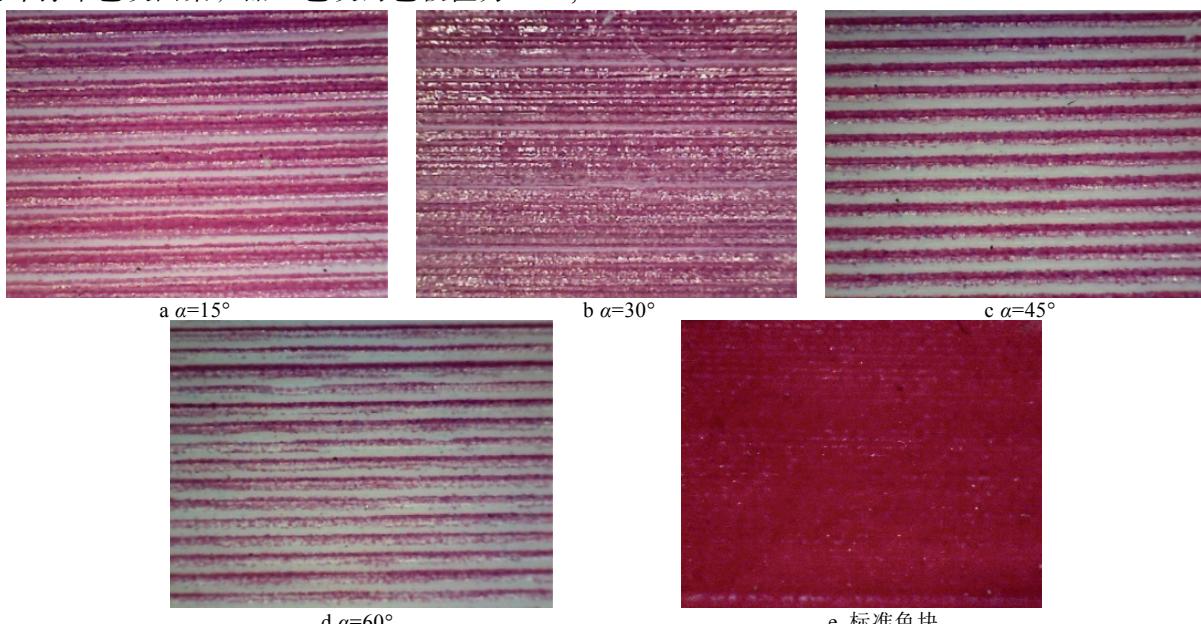


图 3 试样表面在不同倾斜角度下的品红色块图像

Fig.3 The magenta image of the sample surface at different angles of inclination

$M=100\%, Y=0, K=0$, 白色色块的色板值为 $C=0, M=0, Y=0, K=0$ 。驱动 EPSON R1900 UV 喷墨实验平台, 首先分别在 A1、B1、C1 样块斜面上打印一层品红色块, 同时将 D1 组样块倾斜放置进行打印, 放置角度分别为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$, 以相同喷墨参数制作色块。然后依次在灰色样块 A2、B2、C2 上打印 1—5 层白色样块后打印 1 层品红色块进行着色, 同时将 D2 组样块分别以 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 的倾斜角度放置并以相同喷墨参数制作色块。由于墨水在相纸上会有渗透作用, 所以不能直接用来作为该实验的测量标样。为了达到更好的对比效果, 故选用在高光相纸上打印 1—5 层白墨后再着色的样块为色差测量标样, 2—5 层白墨与 1 层白墨上着色效果的色差值分别为 1.28, 1.43, 1.55, 1.54, 5 个测量标样之间的色差可忽略不计。

3) 图像观察与色差测量。使用艾尼提 WiFi 无线显微镜对实验试样表面色块图像进行观察, 放大倍数为 60 倍。使用 3nh NS810 分光测色仪测量色块颜色, 采用 CIE-1976-L*a*b* 颜色空间标准, 在 D65 光源条件下测量各组色块的 L^*, a^*, b^* 颜色数据, 每个色块测量 6 次取平均值。

3 结果与讨论

3.1 试样表面着色图像观察分析

根据前文的分析可知, 阶梯纹理和倾斜角度会使着色样件表面形成具有基体颜色的带状条纹与彩色条纹交替组合而成的着色图案。以品红色块为例, A1 组样块倾斜表面着色效果见图 3, 可见当层厚 h 一定时, 随着倾斜角度的增加, 未着色条纹的宽度增大, 着色区域减小, 颜色逐渐失真。

观测不同打印层厚下,以45°倾斜角度品红色块为例,各组表面着色图案见图4。可以看出,在45°倾斜角度下,随着层厚的降低,阶梯效应的影响逐渐降低。在单位观测范围内,未着色带状区域逐渐密集

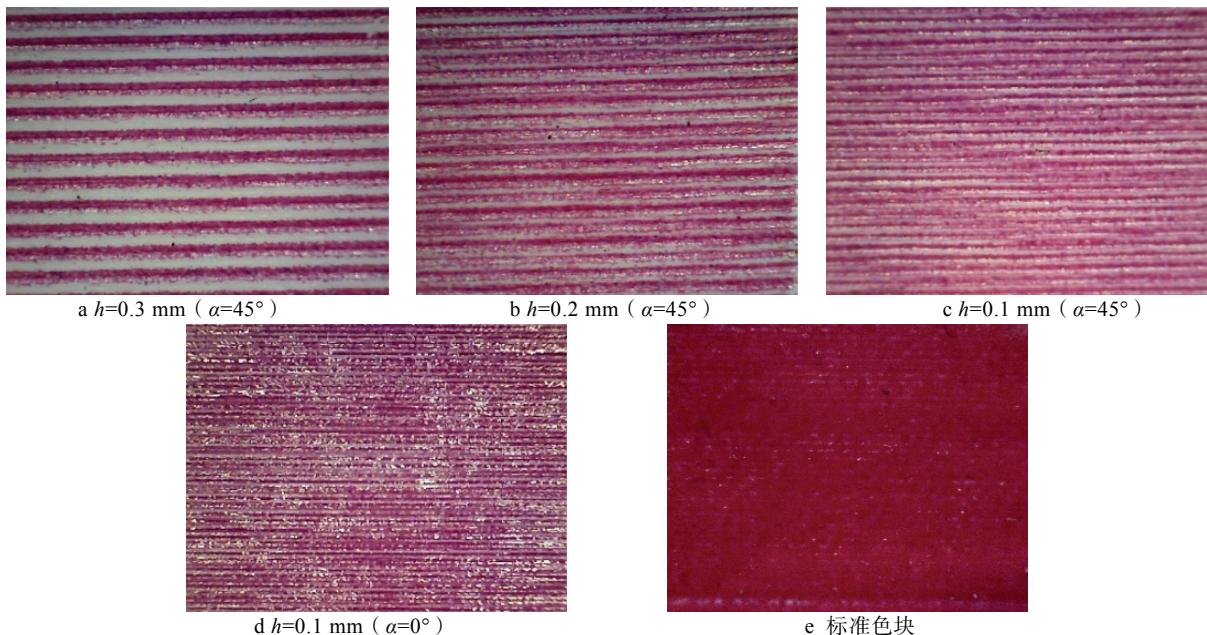


图4 试样表面在不同层厚高度下的品红色块图像
Fig.4 The magenta image of the sample surface at different layers of height

3.2 UV白墨涂覆后再着色图像观察分析和颜色再现分析

着色效果除了图像观察的方法之外还可以用与标准色板的色差来表征。明度、饱和度和色调是反映颜色表征的3个基本特性, L^* 表征亮度值, 取值范围为0~100; a^* 和 b^* 表征颜色坐标值, 取值范围为-128~127。获取的 $L^*a^*b^*$ 值同时也可以转换为CIE LCH颜色模型来表征颜色的明度、饱和度和色调。2种颜色的差别可以由色差值表征, 色差 ΔE 的计算公式为:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (5)$$

2种颜色的 ΔE 值越小, 则2种颜色越接近。与标样颜色比对, L^* 值大表示颜色偏白, L^* 值小表示颜

色偏黑; a^* 值大表示偏红, a^* 值小表示偏绿; b^* 值大表示颜色偏黄, b^* 值小表示颜色偏蓝。FDM打印材料颜色各异, 实验中所用的丝材为灰色PLA丝材, 色差值的测量标样为高光相纸上经过1—5层白墨涂覆后着色的品红色块。分光测色仪采用CIE-1976-L a^*b^* 颜色空间标准, 在D65光源条件下分别测量各组色块的 L, a, b 颜色数据, 计算得出色差值。

A2, B2, C2组样块斜面涂覆1—5层白墨后着色效果与标准样板的色差变化见图5。可以看出, 层厚为0.3 mm时, 白墨层数多于3层时色差不随着白墨层数的增加而变化。整体趋势为随着倾斜角度的增加色差增大, 且倾斜角度大于45°后, 图5中色差变化的斜率增大, 倾斜角度对色差值的影响增大。层厚为

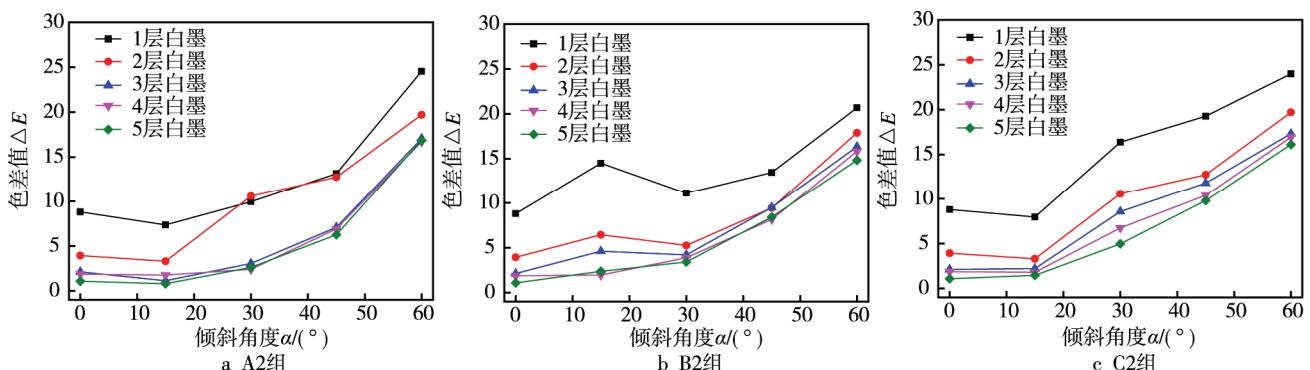


图5 A2, B2, C2组样块与标准样块的色差变化
Fig.5 Variation of color difference between the samples of A2, B2, C2 group and standard model

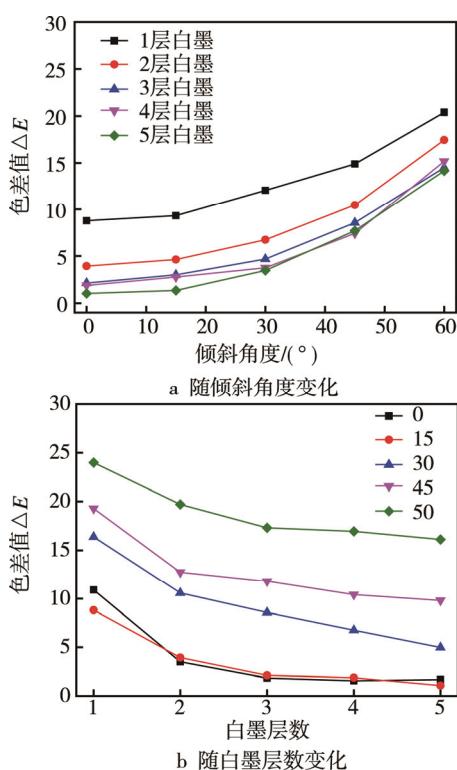


图 6 D2 组样块与标准样块色差变化

Fig.6 Variation of color difference between the samples of D2 group and standard model

0.2 mm 或 0.1 mm 时, 从图 5 中可见白墨层数为 2 层时着色效果与 3 层及更多层白墨的效果相差较小, 但仍存在一定的差别, 为了探究这一现象的形成原理, 进一步对 D2 组的样块进行了色差值的测量, 见图 6。图 6a 所示的色差值变化与图 5 中层厚为 0.1 mm 或 0.2 mm 的样块斜面的测量结果相同, 可见白墨层数

为 2 层时的着色效果未能达到 3 层及以上白墨层数的效果不是由于阶梯效应所导致的。由图 6b 可知当倾斜角度为 0°且不存在阶梯效应的情况下也需要 3 层以上白墨才能达到所能接受的色差范围之内, 且随着倾斜角度的变化。虽然色差值在增大但是变化趋势与 0°时一致, 这就表明打印材料本身的基底颜色也会对着色效果造成影响, 涂覆 3 层白墨后能完全覆盖打印材料的颜色。

为了进一步验证实验结果, 用手持式显微镜对白墨涂覆阶梯的过程进行了记录, 见图 7。可以看出, 涂覆 1 层白墨时每个台阶上会有 2 个墨滴, 其中 1 个墨滴会将直角覆盖, 墨水固化后形成一个曲面替代直角。另一滴墨水则会和下一层靠近直角的墨滴汇合在一起, 将阶梯棱包覆, 第 1 层的 2 滴墨之间会形成一个凹槽, 在喷覆第 2 层白墨时墨滴会流入凹槽, 此时就基本能将直角阶梯覆盖, 但从图 7 中也可见, 直角棱处的基体颜色还未能完全覆盖。在覆盖第 3 层白墨后, 样块表面较为平整, 已完全不存在阶梯效应, 且完全覆盖基体颜色。将白墨上方界面以数据点的形式提取后进行直线拟合, 结果见图 8。白墨层数大于或等于 3 层时, 线性拟合相关系数的平方均大于 0.99, 可见, 通过白墨涂覆的方式可以改善 3D 打印样件的表面质量, 解决阶梯效应造成的着色问题。

实验中, 在样块斜面上涂覆 3 层白墨就可以解决 FDM 打印材料颜色和表面阶梯效应带来的色差影响, 而涂覆 3 层或更多层白墨后仍存在的色差就是由斜面倾斜角度所造成的。为解决斜面倾斜角度较大时带来的色差问题, 可以通过改变喷涂方向或改进 FDM 打印工艺的方法来解决。

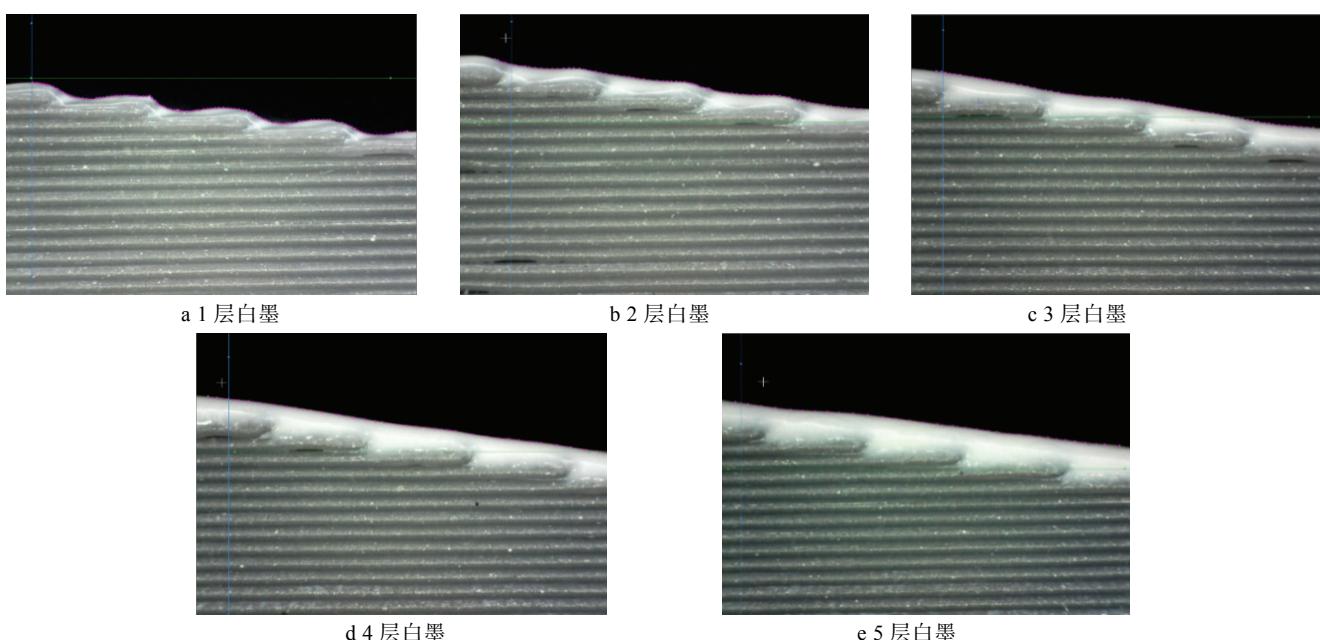


图 7 层厚为 0.3 mm 的样块斜面喷覆 1—5 层白墨效果

Fig.7 Effect of 0.3 mm thick sample slope coated with 1-5 layers of white ink

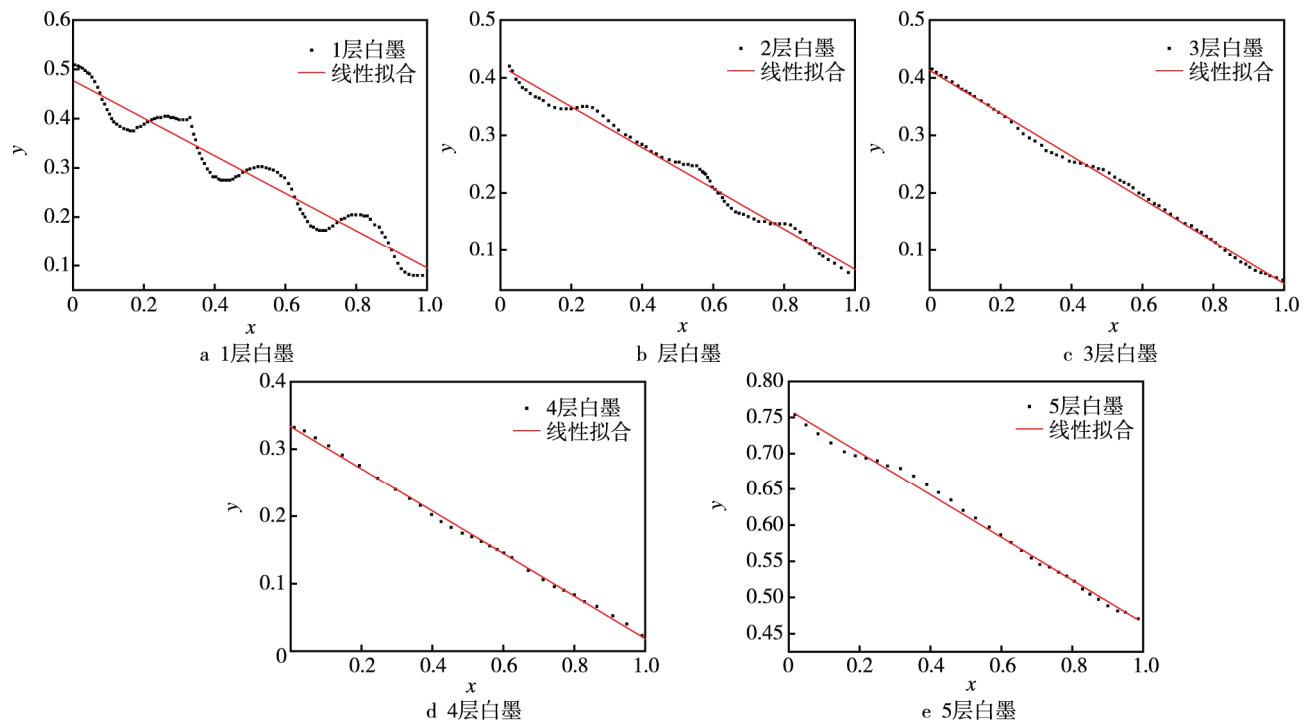


图8 层厚为0.3 mm的样块白墨涂覆后的表面数据拟合
Fig.8 Data fitting of 0.3 mm thick sample surface coated white ink

4 结语

阶梯效应是3D打印技术中固有的成型特征,文中基于FDM的3D打印成型方法,设计并加工了不同层厚不同倾斜角度的直角阶梯样块,并利用UV喷墨系统对其表面进行着色。通过观察白色样块着色情况可知,打印层厚 h 和倾斜角度 α 都会导致样块表面出现未着色条纹区域。当层厚一定时,倾斜角度 α 越大时,未着色区域宽度 d 越大,而当倾斜角度 α 一定时, d 随着 h 的增大而增大,这严重影响了色彩表现。为解决这一问题,进一步对灰色FDM样块表面进行白墨涂覆再着色的实验,实验结果表明通过白墨涂覆的方式不仅可以去除阶梯效应造成的着色问题,还能覆盖打印材料本身的基底颜色,从而获得更高质量的彩色外观。

在实际应用中,FDM打印丝材有多种颜色,但是目前大多还停留在单色打印,随着人们需求的提高,彩色3D打印技术将具有良好的发展潜力和广阔的应用前景,其对应的关键技术也将成为重点的研究方向。文中的白墨涂覆方法能够解决或改善阶梯效应以及打印材料基底颜色带来的色差问题,如辅以立体喷涂技术则可获得更高精度的彩色3D打印样件。

参考文献:

[1] 韩霞,杨恩源.快速成型技术与应用[M].北京:机

械工业出版社,2012.

HAN Xia, YANG En-yuan. Rapid Prototyping Technology and Application[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.

- [2] 肖承翔,李海斌.国内外增材制造技术标准现状分析与发展建议[J].中国标准化,2015(3): 73—75.
XIAO Cheng-xiang, LI Hai-bing. Status Analysis of Domestic and Foreign Additive Manufacturing Technical Standards and Developmental Suggestions[J]. China Standardization, 2015(3): 73—75.
- [3] 史玉升,张李超,白宇,等.3D打印技术的发展及其软件实现[J].中国科学:信息科学,2015, 45(2): 197—203.
SHI Yu-sheng, ZHANG Li-chao, BAI Yu, et al. The Development of 3D Printing Technology and Its Software Implementation[J]. Science China: Information Sciences, 2015, 45(2): 197—203.
- [4] SAHI S E, JIANG Y, SPENCE A D. Oriented 3-D Ink Jet Printing[J]. Computer-Aided Design and Applications, 2009, 6(3): 399—406.
- [5] STANIC M, LOZO B, SVETEC D G. Colorimetric Properties and Stability of 3D Prints[J]. Rapid Prototyping Journal, 2012, 18(2): 120—128.
- [6] BYNUM D K. Automated Manufacturing System Using Thin Sections: US, 5088047A[P]. 1992.
- [7] SUGAVANESWARAN M, ARUMAIKKANNU G. Modeling for Randomly Oriented Multi Material Additive Manufacturing Component and Its Fabrication[J]. Materials & Design, 2014, 54(4): 779—785.
- [8] DIMITROV D, SCHREVE K, BEER N D. Advances in Three Dimensional Printing-state of the Art and Future

- Perspectives[J]. Rapid Prototyping Journal, 2006, 12(3): 136—147.
- [9] 龚运息, 陈晨, 夏名祥, 等. FDM 3D 打印模型表面阶梯效应的分析[J]. 制造技术与机床, 2016(4): 27—30.
GONG Yun-xi, CHEN Chen, XIA Ming-xiang, et al. Step Effect Analysis of FDM 3D Printing Model Surface[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2016(4): 27—30.
- [10] 许中明, 王鸿博, 杨亘. 几何参数对 3D 打印零件轮廓精度影响的研究[J]. 机械设计与制造, 2017(5): 113—115.
XU Zhong-ming, WANG Hong-bo, YANG Gen. Research on the Influence of Geometrical Parameters on the Contour Precision of 3D Printing Parts[J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(5): 113—115.
- [11] AGARWALA M K, JAMALABAD V R, LANGRANA N A, et al. Structural Quality of Parts Processed by Fused Deposition[J]. Rapid Prototyping Journal, 1996, 2(4): 4—19.
- [12] KUMAR K, KUMAR G S. An Experimental and Theoretical Investigation of Surface Roughness of Poly-jet Printed Parts[J]. Virtual & Physical Prototyping, 2015, 10(1): 23—34.
- [13] TSUI L Y, HONG W, GONG H. A Study of the Staircase Effect Induced by Material Shrinkage in Rapid Prototyping[J]. Rapid Prototyping Journal, 2005, 11(2): 82—89.
- [14] 穆存远, 宋祥波. 快速成型台阶误差分析及其降低措施[J]. 机械设计与制造, 2011(4): 228—229.
MU Cun-yuan, SONG Xiang-bo. Step Error Analysis and Its Reduce Measures for Rapid Prototyping[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(4): 228—229.
- [15] OLLISON T, BERISSO K. Three-dimensional Printing Build Variables that Impact Cylindricity[J]. Journal of Industrial Technology, 2010, 26(1): 1—10.
- [16] 易青. UV-LED 喷墨油墨的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2014.
YI Qing. Research on UV-LED Inkjet Ink[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2014.
- [17] 何留喜, 陈广学. 基于 UV 喷墨的彩色 3D 打印研究[J]. 包装工程, 2015, 36(9): 134—138.
HE Liu-xi, CHEN Guang-xue. 3D Color Printing Based on UV Ink-jet Technology[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(9): 134—138.
- [18] 张学军, 唐思熠, 肇恒跃, 等. 3D 打印技术研究现状和关键技术[J]. 材料工程, 2016, 44(2): 122—128.
ZHANG Xue-jun, TANG Si-yi, ZHAO Heng-yue, et al. Research Status and Key Technologies of 3D Printing [J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(2): 122—128.
- [19] 王换美, 陈广学. UV 喷墨打印机色域的研究[J]. 包装工程, 2013, 34(21): 110—113.
WANG Huan-mei, CHEN Guang-xue. Gamut of UV Ink-jet Printer[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(21): 110—113.
- [20] 王镛凯. 基于 UV 喷墨技术的手机壳立体打印[J]. 印刷技术, 2016(15): 30—32.
WANG Yong-kai. Three-dimensional Printing of Mobile Phone Case Based on UV Inkjet Technology[J]. Printing Technique, 2016(15): 30—32.
- [21] 何济洲. 毛细管中液柱的高度[J]. 南昌大学学报(工科版), 1995, 17(2): 80—82.
HE Ji-zhou. The Height of the Liquid Cylinder in the Capillarity[J]. Journal of Nanchang University(Engineering & Technology Edition), 1995, 17(2): 80—82.