水性胶对纸基3D打印中纸张表面颜色的影响研究

何留喜，陈广学
（华南理工大学，广州 510640）

摘要：目的 研究纸基3D打印中水性胶涂布对纸张表面颜色的影响。**方法** 以纸基3D打印的方式输出黄、品、青、黑、白、灰等6种纯色的立方体样本，分别测量6个样本的6个面的色度值，然后在6个样本表面均匀涂布一层水性乳胶，再分别测量6个样本的6个面的色度值。**结果** 水性胶涂布前，6个样本的上表面和下表面之间的颜色色差均在2.02以下，4个侧面间的颜色色差均在2.60以下，但6个样本的上下表面和侧面的颜色色差则较大，最大的色差已经超过25；水性胶涂布后，6个样本上表面和下表面的色差在2.44以下，4个侧面的颜色色差在2.72以下，但6个样本的上下表面和侧面的颜色色差有大幅度降低，除黑色之外，其他颜色样本的表面与侧面色差均在4.72以下；同时，涂胶前后6个样品的表面的色差值均在2.69以下。**结论** 水性胶对纸基3D打印中纸张表面颜色的影响较小，对纸张侧面颜色的影响较大，涂胶操作可以使得3D打印的侧面颜色接近于表面颜色水平，有利于纸基3D打印形成更逼真的3D颜色效果，对纸基3D打印的颜色精度控制有着非常重要的意义。

关键词： 纸基；3D打印；颜色精度；色差；水性胶
中图分类号： TS801.3　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1001-3563(2016)03-0153-04

Effect of Aqueous Adhesives on Color of Paper Surface in Paper-based 3D Printing

HE Liu-xi, *CHEN Guang-xue*
(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

ABSTRACT: The aim of this work was to study the effect of aqueous adhesives on color of paper surface in paper-based 3D printing. Six cubes of black, grey, white, yellow, magenta and cyan were printed in Matrix 300A, and the chromatic values on six faces of each cube were respectively measured before and after all the faces of six cubes were coated with aqueous adhesives. Before the coating operation, color differences between the top and the bottom faces on six cubes were all below 2.02, color differences among the four side faces were all below 2.60, but color differences between surfaces (the top faces and the bottom faces) and side faces were larger, the maximum was above 25. After the coating, color differences between the top and the bottom faces were all below 2.44, color differences among the four side faces were all below 2.72, while color differences between surfaces and side faces were greatly reduced, except for black color, color differences of other colors between surfaces and side faces were all below 4.72. Moreover, before and after the coating, color differences between surfaces on the six cubes were all below 2.69. Relative to the side face, the effect of aqueous adhesives on paper surface was respectively little. The coating operation could reduce the gap of color difference between surface and side face, which was in favor of a more realistic 3D color reproduction and the color accuracy control.

KEY WORDS: paper-based; 3D printing; color accuracy; color difference; aqueous adhesives

收稿日期： 2015-06-21

作者简介： 何留喜（1987—），男，河南人，华南理工大学硕士生，主攻印刷包装材料与印前图文处理。
通讯作者： 陈广学（1963—），男，工学博士，华南理工大学教授、博导，主要研究方向为数字印刷及印刷包装材料等。

20世纪80年代，Charles Hull申请了一项光固化成形的专利，并发明了第1台实用3D打印机——光固化成形装置[1]。3D打印是一种数字制造技术，通过层制造的方式来实现三维模型的成形，具有较强的材料适应性，金属、橡胶、陶瓷，甚至于食品原料[2—3]都可以作为其成形材料。凭借得天独厚的优势和媒体的广泛推介，近年来，越来越多的公司和企业开始进入3D打印市场，3D打印机种类繁多，仅仅是面向个人的桌面级3D打印机[4]就让人眼花缭乱。

目前主流的3D打印技术主要有4种：立体光固化成形、选择性激光烧结成形、熔融沉积成形和分层实体制造[5—7]。这4种技术虽然各有优势，但都没有完美解决全彩色3D打印的难题。Matrix 300A是一款纸基3D打印机，借助纸张良好的色彩呈现性[8]，并将3D打印的“加法制造”方式和传统制造的“减法制造”方式结合在一起，通过彩色纸张的逐层切割和堆叠来实现全彩色的三维模型的打印。无论是对设计者还是对用户来讲，实现三维模型精确的色彩再现都是十分必要的。有学者做过这方面的研究工作，Maja Stanic等人试图评估3D彩色打印样品暴露在氙弧光源下的耐光性，但由于缺乏一定程度的可用性，3D打印机的比色特性成效甚微[9]。Brittany D. Hensley等人借助尤尔尼尔逊修正的妞介堡方程和打印样品光谱吸收率的主成分分析法，预测Zcrop公司的光谱Z-510打印机打印样品的RGB颜色值[10]。基于这些研究成果和研究方法，文中以纸基3D打印技术为基础，探讨纸基3D彩色打印的颜色精度控制方法。

1 纸基3D打印技术

MCOR科技提供的Matrix 300A是一款纸基3D打印机，其主要消耗品是A4纸（或信纸）、切割刀片和水性胶。Matrix 300A包括2个部分：一部分是2D彩色打印组件，是一台标准的Epson 310N喷墨打印机；另一部分是纸基3D打印组件，主要有上纸台、送纸辊、构建台和打印头，打印头上有叼纸牙、切刀和涂胶轮。

与其他3D打印技术一样，纸基3D打印机的源文件也是3D数字文件，文件格式有STL（Stereo Lithography），WRL（VRML2，Virtual Reality Modeling Language）和OBJ等3种。打印机配套的Slice IT软件可将数字模型等层厚分为许多2D分层彩页数据（见图1a），并通过局域以太网方式传输给2D彩色打印组件和3D打印组件。Epson喷墨打印机根据分层数据会通过双面打印输出相应的彩页（见图1b），打印好的彩页需要按照顺序装在3D打印组件的上纸台上，这些彩页的边缘均印刷有相应的条码，以备3D打印组件叼纸牙进行页码顺序的识别。在3D打印之前，构建板上需要事先粘上一张空白的A4纸，其作用是保证后续越来越高的3D实物能够牢固地附着在构建板上。如图1c所示，将彩页装在上纸台，开始打印后，涂胶轮会首先在构建台上的白纸表面进行涂胶，然后叼纸牙会识别上纸台最上层一张彩页的条形码，并与之前传输过来的2D分层彩页数据进行对比，如果匹配，则将最上层彩页拉入构建台，构建台会上升与最顶层的加热板接触，使彩页在压力和高温下与底层纸张平整、牢固地粘在一起，构建台落下以后切刀会进行该分层二维轮廓的切割，之后又是新一轮涂胶、识别、叼纸、拖拉、压平加热、切割等操作，直至打印完成。打印完成以后，从构建台上将纸块取出，剥除多余部分（见图1d），得到最终的彩色3D模型（见图1e）。

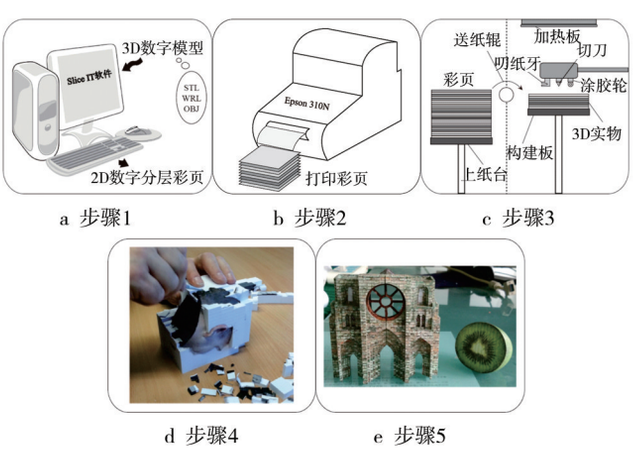

图1 Matrix 300A彩色3D打印流程

Fig.1 Flow chart of 3D color printing in Matrix 300A

2 实验

2.1 器材

材料：定量为80 g/m²、厚度为103.2 μm、白度为94% ISO的A4纸，Epson黄、品、青、黑四色墨水，PANDA水性胶。

设备和仪器：3D Max软件，Matrix 300A纸基3D打印机，软毛刷，烘干箱，X-Rite 530密度计。

2.2 标版

使用3D Max三维软件制作图2所示的6个彩色正

方体,正方体的尺寸为50 mm×50 mm×55 mm,6个正方体的R,G,B颜色数据分别为黑色R0G0B0,灰色R128G128B128,白色R255G255B255,黄色R255G255B0,品红色R255G0B255,青色R0G255B255。

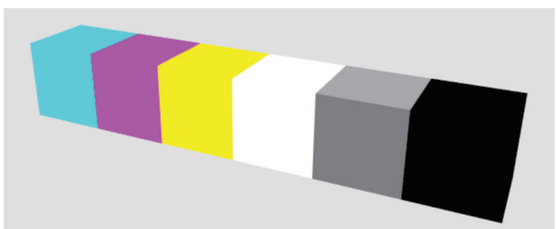

图2 三维立方体样本

Fig.2 Three-dimensional samples of cubes

2.3 步骤

步骤:使用Matrix 300A纸基3D打印机输出6种颜色的立方体样本;使用X-Rite 530密度计测量样本6个面的L,a,b颜色数据,每个面均匀选择9个点进行测量,并以平均值作为该面的颜色数据;使用软毛刷对6个样本表面进行水性胶涂布;涂胶后将样本至于烘干箱中,在50 ℃条件下烘干2 min;得到干燥的样本以后,使用X-Rite 530密度计测量6个样本6个面的颜色数据,同样对每个面测量9次,求取平均值。

3 结果与讨论

3.1 水性胶涂布科学性分析

文中水性胶涂布是人工操作,难以保证样本表面的均匀涂布,而涂布的均匀性对颜色数据影响较大,因此需要对该涂布操作的科学性进行验证。某个面颜色数据的标准偏差不仅可以表示该表面测量数据之间的波动情况,同时还可以用来评价涂布的均匀性。以黄色样本6个面L分量的9次测量值的标准偏差(见表1)为例,由表1可以看出,水性胶涂布前后,黄色立方体样本6个面上L值的标准偏差均在0.31以下,一方面表明纸基3D打印得到的立体表面精度较高,另一方面表明了该涂布操作具有一定的科学性,不会影响样本6个面颜色数据的准确性。这是由于水性胶具有较好的渗透性、挥发性和透明度,可以通过纸张毛细管良好的渗透能力[11],在高温下能快速挥发,并且干燥后具有良好的透明度,不同的涂胶厚度对颜色的遮盖能力大致相同。

表1 黄色样本6个面上颜色数据L分量的标准偏差

Tab.1 Standard deviations of L component of color data on six faces of yellow sample

项目	涂胶前标准偏差	涂胶后标准偏差
上表面	0.12	0.13
下表面	0.25	0.06
侧面1	0.19	0.16
侧面2	0.24	0.16
侧面3	0.12	0.19
侧面4	0.23	0.31

3.2 涂胶前样本色差

涂胶前6个样本各自6个面的色差见表2,其中ΔE_0是6个样本上表面和下表面的色差,ΔE_1,ΔE_2,ΔE_3分别为任意选取一个侧面为参考面时,其他3个面与参考面之间的色差。由表2可知,样本各自的上表面和下表面的色差均在2.02以下,4个侧面之间的色差均在2.60以下,均符合印刷品质量要求的国家标准,可以认为上表面和下表面的颜色相同,4个侧面的颜色相同。这是由纸基3D打印方式造成的,样本的上表面和下表面均是纸张的表面,而样本的侧面是由纸张堆叠而成,其颜色也是纸张侧面的颜色叠加而成。

表2 涂胶前样本6个面的色差

Tab.2 Color differences on six faces of samples before coating

颜色	ΔE_0	ΔE_1	ΔE_2	ΔE_3
黑	1.55	1.17	0.17	1.30
灰	1.65	1.74	0.20	1.44
白	0.38	1.02	0.21	0.94
黄	1.84	1.42	1.42	1.94
品红	2.02	2.60	0.25	1.70
青	2.00	2.05	0.29	1.55

将样本各自的上表面和下表面颜色数据的平均值作为样本的表面颜色数据,将4个侧面的颜色数据平均值作为样本的侧面颜色数据,计算样本表面和侧面颜色之间的色差,见图3(斜纹),6个样本各自的表面与侧面色差均较大,除白色和青色样本之外,其他样本的表面颜色和侧面颜色可以认为是2种完全不同的颜色。这个现象主要是由3方面的原因造成的:纸张表面与侧面的物理平整性有着根本的区别,纸张表面是通过压榨、涂布、压光等一系列造纸流程而得到的,而纸张侧面是经过切纸操作形成的,两者会产生不同的光学效应;油墨在纸张表面和侧面发生不同的

作用，在纸张表面油墨主要发生铺展作用，颜料成分均匀铺展，而在纸张侧面油墨是通过渗透作用而实现颜色的呈现，由于纸张内部纤维纵横交错，颜料渗透的均匀性较差[12]；三维模型由双面打印的纸张堆叠而成，然而纸张经过双面打印后仍然无法被油墨完全渗透，纸张侧面仍会有留白现象，进入人眼的是彩色部分和留白部分共同产生的反射光，这必然造成表面颜色和侧面颜色之间的差别。

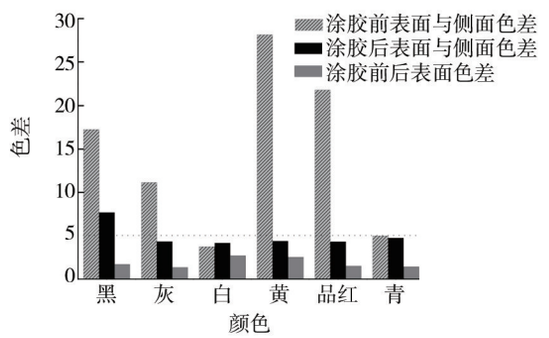

图3 涂胶前后6个样本表面与侧面色差

Fig.3 Histogram of color differences between surfaces and side faces of six samples before and after coating

3.3 涂胶后样本色差

涂胶后6个样本各自的6个面色差见表3（表3中各数据的意义与表2相同）。观察表3可知，涂胶后，6个样本各自的上表面与下表面色差均在2.44以下，4个侧面之间的色差均在2.72以下，该结果与涂胶前保持一致，样本的上表面和下表面颜色相近，4个侧面颜色相近。观察图3（黑色）可知，涂胶使得样本各自的表面与侧面色差大幅减小，甚至已经在一般印刷品可以接受的色差范围内，这是因为水性胶作用于纸张侧面，使得油墨进一步渗透，从而改善了样本侧面的留白状况。黑色样本表面与侧面色差较大，主要是因为黑色油墨具有较强的遮盖性，墨层厚度较小[13]，涂胶后纸张侧面的留白情况比较严重。

3.4 涂胶前后样本色差对比

计算涂布前和涂布后6个样本的表面颜色之间的色差，并绘制图3所示柱状图（灰色）。水性胶涂布前后，样本表面颜色之间的色差最大值为2.69（白色样本），表明涂布水性胶对样本表面颜色的影响较小。

一般而言，3D打印机要想实现较好的彩色打印效果，打印机的色彩特性化是非常必要的，但纸基3D打印过程分为彩色喷墨打印和三维模型构建2个步骤，彩色喷墨打印固然可以通过颜色特性化来实现喷墨打印的所见即所得[14]，但三维构建步骤中存在纸张选取、模型设计、模型的位置和角度等多个不可控制的因素，而且模型侧面呈色是一个复杂的光学和物理过程[12,15]，这都给纸基3D打印机的颜色特性化带来了困难。在纸基三维模型表面进行水性胶的涂布，基本不改变模型表面的颜色，却能够明显减小侧面与表面颜色之间的色差，显著提高模型侧面的色彩精度。由此，纸基3D打印得到的三维彩色模型，可通过模型表面水性胶的涂布来改善其表面色彩精度。

表3 涂胶后样本6个面的色差

Tab.3 Color differences on six faces of samples after coating

颜色	ΔE_0	ΔE_1	ΔE_2	ΔE_3
黑	0.64	1.22	1.54	1.53
灰	1.60	1.79	1.63	2.72
白	1.44	1.80	1.43	1.21
黄	2.14	1.86	0.50	1.75
品红	1.41	0.85	0.68	1.16
青	2.44	0.78	1.79	2.54

4 结语

纸基彩色3D打印以成品A4纸为打印基材，采用堆叠纸张的方式来实现三维模型的构建，充分发挥了纸张优良的色彩呈现性，目前来讲，是一种能较好实现全彩色3D打印的方式。采用PANDA水性胶涂布于纸基3D打印模型表面，经干燥后，基本不影响模型表面的颜色属性，反而可以明显减小模型侧面颜色和表面颜色之间的色差，有效减小模型侧面和表面的颜色差别，提高模型的色彩精度。然而，纸基3D打印也存在一些难以克服的问题，例如基材是A4纸就限制了它的打印精度只能达到一张A4纸的厚度，且难以实现光滑三维曲面等打印。3D彩色印刷仍然是一个不断发展的技术，这意味着不仅要对现有的技术进行深入研究，最大限度地发挥其应有的作用和优势，还应该充分利用这些优势，从中提炼更多的可能性，为彩色3D打印的进一步发展提供新思路。

参考文献：

[1] CHARLES H. Stereolithography：Plastic Prototypes from CAD Data without Tooling[J]. Modern Casting，1988，78（8）：38.

[2] 李光玲. 食品3D打印的发展及挑战[J]. 食品与机械，2015，31（1）：231—234.
LI Guang-ling. Development and Challenge of 3D Print in the

（下转第164页）

[8] 余丽,匡华,徐丽广,等. 食品包装用纸中残留污染物分析[J]. 包装工程,2015,36(1):6—11.
YU Li,KUANG Hua,XU Li-guang,et al. The Analysis of Residual Contaminants in Food Packaging Paper[J]. Packaging Engineering,2015,36(1):6—11.

[9] 赵蜀燕,格林·菲尔. 紫外光对荧光增白剂衰减的影响研究[J]. 中国印刷与包装研究,2011(5):50—52.
ZHAO Shu-yan,GREEN P. Effect of UV Light on the Attenuation of Fluorescent Whitening Agent[J]. China Printing and Packaging Study,2011(5):50—52.

[10] ISO 13655:2009,Graphic Technology-spectral Measurement and Colorimetric Computation for Graphic Arts Images[S].

[11] 沈永嘉,李红斌,路炜. 荧光增白剂[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
SHEN Yong-jia,LI Hong-bin,LU Wei. Fluorescent Whitening Agent[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2004.

[12] 田全慧,刘真. 纸张荧光增白剂对印刷色彩管理影响的评价与控制[J]. 中国印刷与包装研究,2010(6):21—27.
TIAN Quan-hui,LIU Zhen. Evaluation and Control on Effect of Fluorescent Whitening Agent on Paper Printing Color Management[J]. China Printing and Packaging Study,2010(6):21—27.

[13] HOMANN J P. Digital Color Management:Principles and Strategies for the Standardized Print Production[M]. Berlin:Springer,2009.

[14] CHAIKOVSKY S. Effects of Optical Brightening Agents on Color Reproduction in Digital Printing[D]. San Luis Obispo:California Polytechnic State University,2012.

[15] HERSCH R D. Spectral Prediction Model for Color Prints on Paper with Fluorescent Additives[J]. Applied Optics,2008,47(36):6710—6722.

[16] GREEN P. Color Management Understanding and Using ICC Profiles[M]. UK:Wiley,2010.

[17] 戚永红,郑元林. ISO 13655M系列条件的应用分析[J]. 印刷技术,2013(15):44—45.
QI Yong-hong,ZHENG Yuan-lin. Analysis of the Application of ISO 13655M Conditions[J]. Printing Technology,2013(15):44—45.

(上接第156页)

Food Industry[J]. Food & Machinery,2015,31(1):231—234.

[3] ALBOUY B,LUCAS Y,TREUILLET S. 3D Modeling from Uncalibrated Color Images for a Complete Wound Assessment Tool[C]// Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc,2007:3323—3326.

[4] ZOLFAGHARIFARD E. Home Makers:3D Printing Has Helped Fuel a New Generation of DIY Producers[J]. Engineer,2012,63:37—38.

[5] AGRAWAL S,ANTUNES J P,THERON E,et al. Physical Modeling of Catchment Area by Rapid Prototyping Using GIS Data[J]. Rapid Prototyping Journal,2006,12(2):78—85.

[6] RUIZ C R,CABREDO R,MONTEVERDE L J,et al. Combining Shape and Color for Retrieval of 3D Models[C]// Fifth International Joint Conference on INC,IMS and IDC,2009:1295—1300.

[7] KUWATA T,MATSUBARA S,SUZUKI M. 3D color Doppler of Monoamniotic Twin Cord Entanglement[J]. Archives of Gynecology and Obstetrics,2010,281(5):973—974.

[8] 朱志伟,陈广学,陈奇峰. 喷墨打印纸表面特性对色彩复制的影响[J]. 包装工程,2012,33(3):109—112.
ZHU Zhi-wei,CHEN Guang-xue,CHEN Qi-feng. Influence of Ink-jet Paper Surface Characteristics on Color Reproduction[J]. Packaging Engineering,2012,33(3):109—112.

[9] STANIC M,LOZO B,SVETEC D G. Colorimetric Properties and Stability of 3D Prints[J]. Rapid Prototyping Journal,2012,18(2):120—128.

[10] HENSLEY B D,FERWERDA J A. Colorimetric Characterization of a 3D Printer with a Spectral Model[C]// Color & Imaging Conference,2013:160—166.

[11] 张岩,李仁爱,曹云峰. 基于图像技术的喷墨打印纸表面孔隙分析[J]. 包装工程,2015,36(9):129—133.
ZHANG Yan,LI Ren-ai,CAO Yun-feng. Pore Analysis of Inkjet Paper Surface Based on Image Technology[J]. Packaging Engineering,2015,36(9):129—133.

[12] 刘莹莹,钱军浩. 油墨转移渗透对印品质量影响的模型研究[J]. 包装工程,2012,33(3):117—120.
LIU Ying-ying,QIAN Jun-hao. Study of Print Quality Based on Ink Transfer and Penetration[J]. Packaging Engineering,2012,33(3):117—120.

[13] 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.

[14] CHEN L,CHEN G X,XU R X. Research on Color Characterization for Inkjet Printer Based on the Spectral Murray-Davies and YNSN Model[J]. Journal of Information and Computational Science,2014,11(15):5621—5630.

[15] 郝兰芸,钱军浩. 接触印刷过程中纸张油墨结合效应的研究[J]. 包装工程,2012,33(1):92—94.
HAO Lan-yun,QIAN Jun-hao. Research of Bonding Effect of Ink and Paper During Contact Printing[J]. Packaging Engineering,2012,33(1):92—94.