

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2016.01.010

# 基于刨切策略的纸基彩色3D打印提速方法

袁江平, 陈广学, 俞朝晖, 何留喜

(华南理工大学 制浆造纸工程国家重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:** 为了改善纸基类彩色3D打印技术产业化所面临的打印周期长问题, 利用现有的STL文件几何信息, 提出了一种新的基于刨切策略的快速稳定着色算法。利用分层后的3D数据模型中切层斜率 $D$ 值的正负来判定着色面, 并采用改进型着色油墨进行选择性的单面着色替换双面着色来实现打印提速。结果表明, 在给定的3D彩色模型中, 从上至下刨切法、从下至上刨切法、正公差刨切法、负公差刨切法4种常用刨切策略提速效率指数 $E_s$ 都高于0.5, 其中负公差刨切法的提速效果最明显。由此可知, 在现有耗材和设备的基础上, 纸张着色判定的正面优先简化模型, 能够低成本地提高纸基彩色3D打印速度。

**关键词:** 3D打印; 刨切策略; 打印速度; STL文件; 纸基材料

中图分类号: TS805.3

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2016)01-0053-06

## Speedup Method of Paper-Based 3D Color Printing Based on Slicing Strategies

YUAN Jiangping, CHEN Guangxue, YU Zhaohui, HE Liuxi

(State Key Laboratory of Pulp and Paper Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** To optimize the issue of long printing cycle which is in the way of the industrialization of paper-based 3D printing, a new fast and reliable coloration algorithm based on slicing strategies was proposed by using geometric information in STL files. The layer coloring surface is determined by  $D$  value that represented the positive or negative slope of layer in the 3D model after slicing, and colored with advanced inks to print single-sided instead of two-sided to accelerate the printing speed. According to the given 3D models, based on four slicing strategies including top-down slicing, bottom-up slicing, positive tolerance slicing and negative tolerance slicing, their coefficients of speedup scale were introduced and calculated; those  $E_s$  values were all bigger than 0.5, and the  $E_s$  value of negative tolerance method was the biggest. Therefore, this new algorithm based on existing materials and apparatus provided a lower-cost method to decrease the printing cycle of paper-based 3D color printing within the case of simple model.

**Key words:** 3D printing; slicing strategy; printing speed; STL file; paper-based material

## 0 引言

3D打印技术是未来制造业的主流方向, 在个性化制造、智能制造以及文化创意等新兴领域掀起了新的应用狂潮<sup>[1-4]</sup>。3D打印技术的成型原理不同, 导

致所用基材不同。随着人们对模型颜色精度需求的深度化以及三维设计软件的专业化<sup>[5]</sup>, 彩色3D打印技术逐渐成为市场新宠, 其中基于粉基和纸基的工艺尤甚。自从2005年由Zcrop公司率先研发的高精度、宽色域的粉基彩色3D打印机Z510问世以来<sup>[6]</sup>,

收稿日期: 2015-06-11

作者简介: 袁江平(1988-), 男, 江西九江人, 华南理工大学硕士生, 主要研究方向为纸基3D打印和色彩管理,

E-mail: yuanjiangping2009@126.com

高精度彩色 3D 打印技术变成了 3D 设备巨头研发的重点。爱尔兰 Mcor 科技公司也在 2012 年德国法兰克福国际印刷展上发布了其具有划时代意义的产品——IRIS 系列纸基彩色 3D 打印机，其再现颜色能真正实现 100 万多种<sup>[7]</sup>，从此 3D 打印产业跃入了彩色 3D 打印技术时代。

基于粉基的彩色 3D 打印机是基于喷墨打印技术原理，通过喷射的彩色胶黏剂选择性黏合粉末的一种技术<sup>[8]</sup>。该技术虽然能够实现更加精细的 3D 彩色模型打印，但是由于环保性较差和成本较高等问题导致其在产业化应用过程中受限。而基于纸基的彩色 3D 打印机，是通过着色纸张分切后逐层黏合而成的快速成型技术，在颜色再现方面具有独特的优势，同时，由于其基材是双面施胶的 A4 大小办公用纸和特定渗透性油墨，因此在文化创意领域产业化应用中具有极大的潜力。

当前，关于彩色 3D 打印技术的研究主要集中于模型的颜色特性和分层精度方面，而对于彩色 3D 打印机的打印速度方面的研究文献甚少，对基于纸基的彩色 3D 打印设备的研究则更少<sup>[9]</sup>，而提升打印速度是纸基彩色 3D 打印机国产化 and 产业化的重中之重。对于粉基 3D 模型颜色特性的研究有：M. Stanic 等人详细对比了 Z510 设备打印样品在特定参数条件下颜色特性和稳定性<sup>[10]</sup>；Mohammad Vaezi 等人基于 ZP102 石膏粉和 Zb56 黏结剂，探讨了分层厚度和黏结剂饱和度对 3D 打印工艺的影响机制<sup>[11]</sup>；Carinna Parraman 等人提出了一种确定和维持 3D 成品颜色的有效方法<sup>[12]</sup>。对于彩色 3D 模型分层精度的研究有：A. Dolenc 等人探讨了基于样件特征多样性的最优刨切厚度方法<sup>[13]</sup>；P. Kulkarni 等人研究了基于样件曲率和切层间所形成尖端高度的最优刨切厚度方法<sup>[14]</sup>；Liao. Y. S 等人开发了一种新的基于均匀厚度的正负公差判定刨切策略<sup>[15]</sup>。本文在这些研究的基础上，基于适应性较强的从上至下刨切法、从下至上刨切法、正公差刨切法、负公差刨切法 4 种刨切策略，利用 STL 格式文件的几何信息，对采用恒定刨切厚度的纸基彩色 3D 打印速度提升方案进行了探讨，并且对比了相应的提速效果，据此为改善纸基类彩色 3D 打印技术产业化所面临的打印周期长等问题提供一定的理论参考。

## 1 着色策略

着色策略即彩色分切模型着色面的选择和打印的方案，它是影响打印速率和色彩一致性的关键性因素。目前绝大多数纸基彩色 3D 打印机采用双面全

纸基上色法，也就是在往造型区前对单张纸的正反面喷墨上色，这样能充分保证纸张呈现分层颜色。然后纸张在造型区按照正面从下往上粘胶和裁切，直至模型完成。这种着色方法明显增加了着色时间和控制复杂性，同时，由于所用着色剂具极易渗透和扩散的特性，过多的油墨容易造成纸际间纵向扩散而加剧色偏效应<sup>[16]</sup>。对于比较规则的彩色柱状模型生产，上述问题不是很明显，但对于空洞和曲状外形等个性化零件来说却不可忽略。

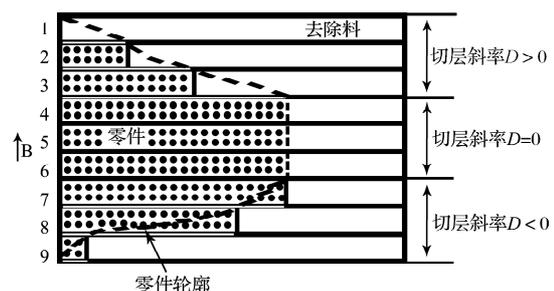
由于纸基模型在成型过程中要进行垂直纸面裁切，需要保证个性化零件中每层相对临层多露出一水平面（以下简称露出面）进行充分着色，再利用着色剂的纵向扩散特性使一面着色，以达到从工艺上缩短加工时间和缓解着色过渗的问题。上述每层相对多露出面确定为着色面的判定，可以通过 STL 格式文件进行算法处理。

### 1.1 STL 的 ASCII 格式文件特性和表示

STL 文件已成为 RP 的标准格式，从几何上看，每个空间小三角形面片都用三角形的 3 个顶点坐标和三角形面片的法向量来描述，且法向量由实体的内部指向外部。为保证模型的合法性，避免数据错误，STL 文件以及几何模型必须遵循右手法则、边法则、定点法 N 和面法 N 等规则。STL 文件一般有 ASCII 和二进制 2 种格式，其中采用二进制的 STL 文件要比 ASCII 的文件小得多，但是 ASCII 码输出形式可以直接阅读和检查。STL 文件描述了小三角面的法向量以及其 3 顶点的坐标，法向量指向去除边料外向方向。该方法主要基于 ASCII 格式的 STL 文件开发新算法来控制着色面。

### 1.2 不同刨切方法下的露出面分析

纸基胶合成型所产生的相对层露出面随刨切方法的不同而不同，目前常用的 4 种刨切方法为：从上至下刨切法、从下至上刨切法、正公差刨切法、负公差刨切法。前 2 种方法在现有机型中更为常用，后 2 种刨切方法在刨切尺寸上进行了优化，是新一代纸基类 3D 彩色打印机的发展方向。图 1 所示为弧形表面加工微层露出面着色案例。



a) 从上至下法

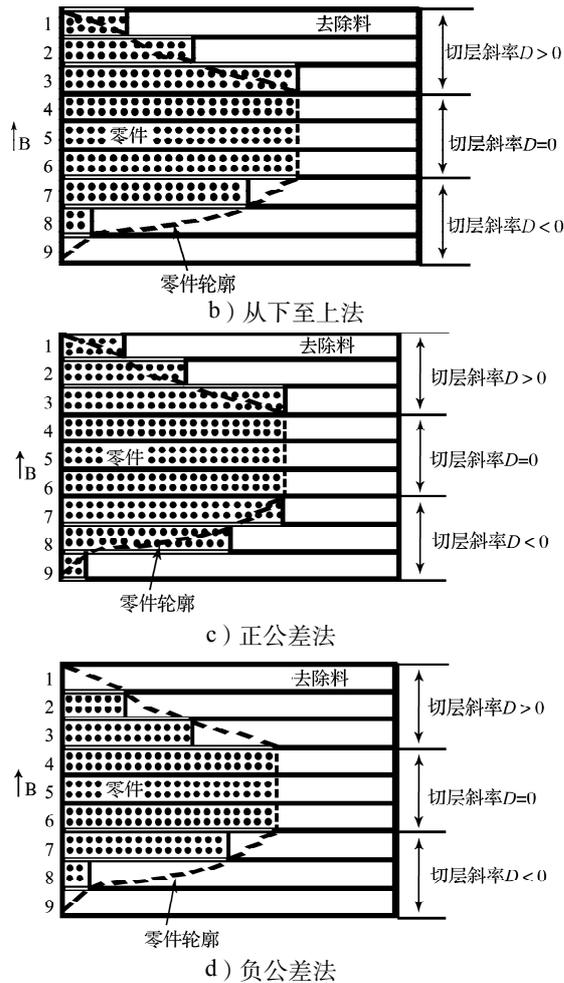


图1 4种刨切策略下的胶合纸张的零件和去除料的边界切面正视图

Fig. 1 The cross-sectional view of the interface between the part and the waste material in four slicing strategies

图1中, 有2个不同的区域, 被虚线包围的区域是3D零件的截面, 加点区域是被刨切后薄层的截面。其中B表示建造方向, 用双线表示的是纸张该面着色。切层斜率 $D$ 则定义为分割小三角形的标准面法向量与建造方向B向量的数量积。从图1a和图1b中可以发现, 传统刨切规则下, 不同的方法产生的露出面不同, 即使在同一刨切方法下, 由于零件局部结构的不同, 露出面也不同。图1c和图1d同样具有上述特性, 然而判定规则不同, 也给露出面判定提供了新的方法。

图1a展示了从上至下刨切法中, 零件局部含有曲线和直线外形的9层纸黏合边界露出面的特点。纸板的第1~3层具有相同的判定露出面条件, 也就是切层斜率 $D > 0$ 下, 每张纸的着色面应选择正面为着色面。第4~6层的零件斜率为0, 表明该边界和裁切方向垂直, 露出面判定条件下, 本来正反两面着色亦可。但其中第3层与4层交界处斜率符号发生变化, 有明显的露出面, 因而知第4层选择正面着色; 而

第5层与第6层, 从传递的方便性来考虑, 选择正面着色更好。第7~9层则是露出面判定条件为切层斜率 $D < 0$ , 应选择纸张的反面着色。

图1b展示了从下至上刨切法中, 零件局部含有曲线和直线外形的9层纸黏合边界露出面的特点。纸板的第1~3层具有相同的判定露出面条件, 也就是切层斜率 $D > 0$ 下, 每张纸的着色面应选择正面为着色面; 第4~6层的零件斜率为0, 表明该边界与裁切方向垂直, 露出面判定条件下, 本来正反两面着色亦可, 因其中第6层与第7层交界处斜率符号发生变化, 有明显的露出面, 因而知第6层选择反面着色, 而第4层与第5层从传递的方便性考虑, 选择正面着色更好; 第7~9层是露出面判定条件为切层斜率 $D < 0$ , 应选择纸张的反面着色。

图1c展示了正公差刨切法中, 零件局部含有曲线和直线外形的9张纸黏合边界露出面的特点。纸板的第1~3层具有相同的判定露出面条件, 也就是切层斜率 $D > 0$ 下, 每张纸的着色面应选择正面为着色面; 第4~6层的切层斜率为0, 表明该边界与裁切方向垂直, 露出面判定条件下, 正反两面着色亦可, 但是考虑到传递的方便性, 选择正面着色更好; 第7~9层则是露出面判定条件为切层斜率 $D < 0$ , 应选择纸张的反面着色。

图1d展示了负公差刨切法中, 零件局部含有曲线和直线外形的9张纸黏合边界露出面的特点。纸板的第1~3层具有相同的判定露出面条件, 也就是切层斜率 $D > 0$ 下, 每张纸的着色面应选择正面为着色面; 第4~6层的切层斜率为0, 表明该边界和裁切方向垂直, 露出面判定条件下正反两面着色亦可, 但第4层与第3层交界处有正面露出面、第6层与第7层交界处有反面露出面时, 则应相对选择其着色面; 同时, 从传递的方便性来考虑, 第5层选择正面着色更好; 第7~9层则是露出面判定条件为切层斜率 $D < 0$ , 应选择纸张的反面着色。

通过对图1a~d中判定结果的分析, 可以发现, 纸张着色面的判定具有严密可靠的判定规则, 同时也表现出了一定的规律。基于上述刨切策略, 可以分别归纳为纸张着色判定的理论原模型(简称理论原模型)和纸张着色判定的正面优先简化模型(简称正面优先简化模型), 相应的算法也分为2种, 具体的着色策略如表1所示。

1) 理论原模型。在该模型中,  $D$ 值在 $D < 0$ 的区间内, 4种刨切方法下都是选择反面着色; 而在 $D > 0$ 的区间内, 都选择正面着色; 在 $D = 0$ 的时候, 着色面判断较为复杂。当 $D = 0$ 时, 也即该纸张与 $D$ 值小

于0的纸张黏结时,自下而上法和负公差法具有相同的反面露出,而自上而下法与正公差法具有相同的露出面;当 $D=0$ 时,4种刨切方法下正反面亦可;当 $D=0^+$ 时,也即该纸张与 $D$ 大于0的纸张黏结时,自上而下法与负公差法具有相同的正面露出,而自下而上法与正公差法也具有相同的露出面。

**表1 2种模式下纸张着色策略对比**  
Table 1 Comparison of paper coloring strategies of two models

模型类别	刨切策略	$D$ 值				
		$(-\infty, 0)$	$0^-$	$0$	$0^+$	$(0, +\infty)$
纸张着色判定的理论原模型	自上而下法	反面	正/反面	正/反面	正面	正面
	自下而上法	反面	反面	正/反面	正/反面	正面
	正公差法	反面	正/反面	正/反面	正/反面	正面
	负公差法	反面	反面	正/反面	正面	正面
纸张着色判定的简化模型	自上而下法	反面	正面	正面	正面	正面
	自下而上法	反面	反面	正面	正面	正面
	正公差法	反面	正面	正面	正面	正面
	负公差法	反面	反面	正面	正面	正面

2) 正面优先的简化模型。在该模型中,不仅简化纸张着色工序以提升工作效率,而且纸张着色面判定更加清晰、简洁。其中,自上而下法和正公差法具有相同的着色面判定规则,即 $D$ 值在 $(-\infty, 0)$ 区间内时,纸张着色面为反面,其他一律为正面;而自下而上法与负公差法也具有相同的着色面判定规则,即 $D$ 值在 $(-\infty, 0]$ 区间时,着色面为反面,其他一律为正面着色。

## 2 着色判定算法的实现

### 2.1 $D$ 值的计算

如前所述, STL文件可用来描述小三角形的法向矢量和3个顶点的坐标,令纸基3D打印机的工作方向定为向量 $B$ ,每个小三角形的法向量为 $\xi$ ,每个小三角形的表面和水平轴的夹角为 $\theta$ ,则切层斜率 $D$ 定义为分割小三角形的标准面法向量 $\xi$ 与建造方向 $B$ 向量的数量积。则 $D$ 值的计算公式为: $D = B \cdot \xi$ ,其中 $\xi = n_x i + n_y j + n_z k$ 。同时,若 $D > 0$ ,则 $z$ 值交点处是正公差;若 $D < 0$ ,则 $z$ 值交点处是负公差。对于给定的彩色模型刨切,自上而下法和自下而上法可以直接判定,但对于正公差法和负公差法,需要结合 $D$ 值选择相应的刨切方法。其次,基于纸基厚度,一次增加相同厚度的一张纸。开始于第一个薄层材料的厚度,取任意一个和 $z$ 平面相交的小三角面,将其作为第一个小三角面来计算交点。下一步,计算小三角面的法向方向值并进行判定。

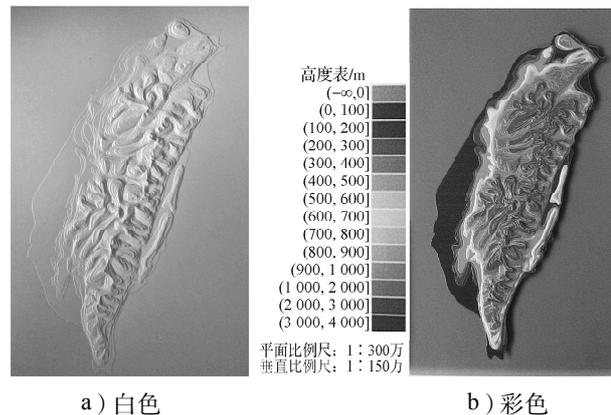
### 2.2 简化模型的着色判定算法流程

首先,输入打印模型的STL格式文件,根据样件

的细节特征和功能选择工作方向夹角的点值( $D$ )。得到的点依次被记录为一层轮廓环上的一点,然后寻找在和 $z$ 平面相交边相邻的小三角面中穿过 $z$ 平面的小三角面,并判断这些小三角面是不是已被刨切的小三角面。若不是,使用之前的方法来定位下一个交点;若是,连接这些交点,得到一个闭合的轮廓环。接下来,寻找其他还没被刨切,但也和 $z$ 平面相交的小三角形面。如果存在,则说明还存在另一个轮廓环,应重新选择一个小三角面作为第一小三角面,以寻找其他交点,使用相同的方法来形成一个封闭的轮廓环;如果不存在其他的小三角面,则说明所有和 $z$ 平面相交的小三角面都被刨切了。下一步,计算并记录每一个封闭环中的点积值 $D_{ij}$ ,并取 $L_m$ 为 $D_{ij}$ 值的平均值。在自上而下法和正公差法中,若 $L_m < 0$ ,则选择反面为着色面,否则相反;在自下而上法和负公差法中,若 $L_m \geq 0$ ,则选择正面为着色面,否则相反。最后,这些封闭的轮廓环形成了一个2D截面图,其包含的相交曲线就是需要寻找的切割工作路径。然后,加入另一个薄层材料层来计算下一层的刨切相交曲线。重复此过程,直到计算到工件最大的 $z$ 轴取值,完成所有刨切层的着色面选择。

### 2.3 模型验证

为验证上述算法流程的精准性,选取了包含一定曲度的台湾地区地形图(见图2)进行测试,并评估了着色算法对地图中半径为1mm的局部截面模型的提速效果。



**图2 白色和彩色打印的3D台湾地区地形图**  
Fig. 2 The printed white and colored 3D map of Taiwan

由于地形图中多涵盖凸半球和凹半球结构,按实际应用来讲,刨切时应分别讨论,鉴于刨切后独立的两部分效果与整体球被刨切效果相近,故采用球截面模型替代。试验中,刨切厚度选取0.1mm,分别用上述4种刨切方法进行刨切,所得结果见图3,并利用公式(1)计算相应的效率指数 $E_s$ 。

$$E_s = \frac{2N}{tN_{ce} + N_{cx}} - 1 \quad (1)$$

式中:  $N$  为刨切的总层数;  
 $N_{ce}$  为反面打印层数;

$t$  为反面打印速率权重系数, 一般机型的取值为1.2~1.5;

$N_{cx}$  为正面打印层数;

$E_s$  为该模型下的提速倍率, 其数值为0.34~1.00。

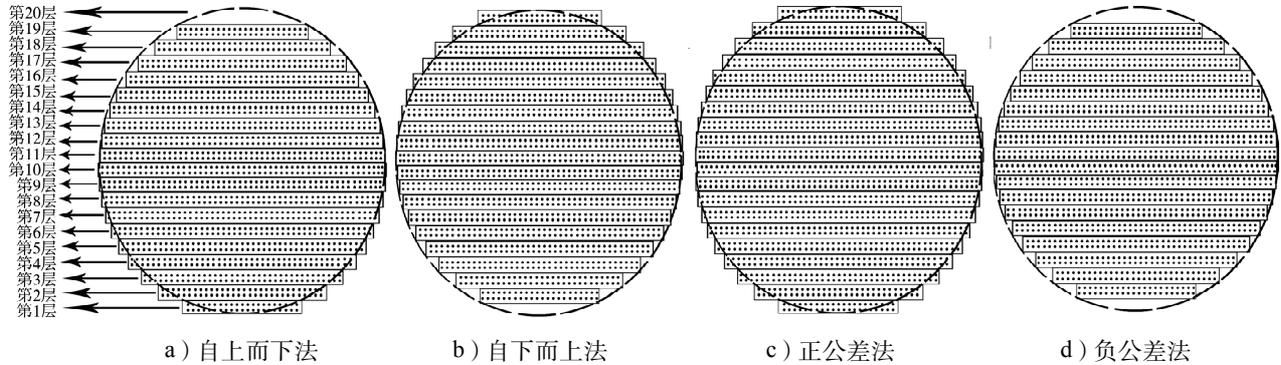


图3 4种刨切方式下的着色面对比

Fig. 3 Comparison of colored surface in four slicing strategies

4种刨切策略下的提速效率结果见表2。

表2 4种刨切策略下的提速效率对比

Table 2 Comparison of the speedup efficiency in four slicing strategies

方法	$t$	$E_s$
自上而下法	1.5	0.666
自下而上法	1.5	0.702
正公差法	1.5	0.600
负公差法	1.5	0.904

如图3所示, 球截面模型在自上而下法和自下而上法2种刨切策略中, 其正面着色和反面着色的层数分别反向对应; 而在正公差法中, 着色面数最多, 负公差法中着色面数最少。分析表2中的数据可知, 自上而下法与正公差法提速倍率较低, 主要是由反面着色数量较多造成的; 负公差法策略下的提速倍率最为明显; 同时, 4种刨切策略下的提速倍率都高于0.5, 可见该着色模型和算法可以有效缓解纸基3D打印产业化打印速度慢的问题。

### 3 结论

针对现有纸基彩色3D打印速度慢的现状, 从纸张着色策略角度探讨了从上至下刨切法、从下至上刨切法、正公差刨切法、负公差刨切法4种刨切方式下的提速方案, 提出了基于刨切策略的2种着色模型和相应算法流程, 并且给出了提速评估方案和 $E_s$ 的计算公式。从评估结果来看, 着色面判定简化模型和其算法下的提速效果比较明显, 提速倍率都高于0.5。由此可知, 基于着色判定的正面优先简化模型, 能够在现有耗材和设备的基础上, 低成本地提高纸基彩色3D打印速度, 因而是一种行之有效的优化方

案。随着纸基3D打印技术在创意文化领域产业化的不断深入, 在提升打印速度的同时保持色彩再现的高精度是下一步的研究重点。

### 参考文献:

[1] 乔益民, 王家民. 3D打印技术在包装容器成型中的应用[J]. 包装工程, 2012, 33(22): 68-72.  
 QIAO Yimin, WANG Jiamin. Application of 3D Printing Technology in Container Molding Design[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(22): 68-72.

[2] 高秦艳, 黄光辉. 论海派元素在创意文化衫设计中的应用[J]. 包装工程, 2013, 34(10): 10-14.  
 GAO Qinyan, HUANG Guanghui. The Application of Shanghai-Style Elements in the Creative Cultural Shirts[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(10): 10-14.

[3] 姚国红, 江平, 刘勇. 磁性油墨3D纹理装饰工艺在家电产品上的应用研究[J]. 包装工程, 2014, 35(10): 130-134.  
 YAO Guohong, JIANG Ping, LIU Yong. The Application of Magnetic Ink 3D Texture Decorating Technique in Household Electrical Appliances[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(10): 130-134.

[4] 吴平. 3D打印技术及其未来发展趋势[J]. 印刷质量与标准化, 2014(1): 8-10.  
 WU Ping. The New Trend of the 3D Printing[J]. Printing Quality & Standardization, 2014(1): 8-10.

[5] 王伟伟, 胡宇坤, 金心, 等. 传统文化设计元素提取模型研究与应用[J]. 包装工程, 2014, 35(6): 73-76, 81.  
 WANG Weiwei, HU Yukun, JIN Xin, et al. Research and Application of Extraction Model of Traditional Culture Design Elements[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(6): 73-76, 81.

[6] GRIMM T. User's Guide to Rapid Prototyping[M]. [S.l.]:

- Society of Manufacturing Engineers, 2004: 88–92.
- [7] MACCORMICK C. Mcor Introduces the Matrix 300+ 3D Printer[EB/OL]. [2015–06–07]. <http://mcor-technologies.com/mcor-introduces-the-matrix-300-3d-printer/>.
- [8] WALTERS P, HSUON D, PARRAMAN C, et al. 3D Printing in Colour: Technical Evaluation and Creative Applications [C]//Impact 6 International Printmaking Conference. [S. l.]: Impact Press Publications, 2009: 49–64.
- [9] HE Y, WU W, FU J. Rapid Fabrication of Paper-Based Microfluidic Analytical Devices with Desktop Stereolithography 3D Printer[J]. RSC Advances, 2015, 5(4): 2694–2701.
- [10] STANIC M, LOZO B, SVETEC D G. Colorimetric Properties and Stability of 3D Prints[J]. Rapid Prototyping Journal, 2012, 18(2): 120–128.
- [11] VAEZI M, CHUA C K. Effects of Layer Thickness and Binder Saturation Level Parameters on 3D Printing Process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 53(1/2/3/4): 275–284.
- [12] PARRAMAN C, WALTERS P, REID B, et al. Specifying Colour and Maintaining Colour Accuracy for 3D Printing [C]// Electronic Imaging 2008, International Society for Optics and Photonics. Carinna Parraman: [s.n.], 2008: 6805.
- [13] DOLENC A, MAKELA I. Slicing Procedures for Layered Manufacturing Techniques[J]. Computer-Aided Design, 1994, 26(2): 119–126.
- [14] KULKARNI P, DUTTA D. An Accurate Slicing Procedure for Layered Manufacturing[J]. Computer-Aided Design, 1996, 28(9): 683–697.
- [15] LIAO Y S, CHIU Y Y. A New Slicing Procedure for Rapid Prototyping Systems[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 18(8): 579–585.
- [16] 李莹. 纸张表面特性对印刷色彩再现的影响[J]. 包装工程, 2010, 31(7): 25–28.
- LI Ying. Influence of Surface Characteristics of Paper on Printing Color Reproduction[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(7): 25–28.

(责任编辑: 廖友媛)

- .....
- (上接第24页) Polyurethane Aqueous Dispersions Mixtures; Preparation and Characterization[J]. Polymer, 2009, 50(7): 1717–1722.
- [7] KIM B K, LEE J C. Waterborne Polyurethanes and Their Properties[J]. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 1996, 34(6): 1095–1104.
- [8] TIELEMANS M, ROOSE P, DE GROOTE P, et al. Colloidal Stability of Surfactant-Free Radiation Curable Polyurethane Dispersions[J]. Progress in Organic Coatings, 2006, 55(2): 128–136.
- [9] ASIF A, SHI W, SHEN X, et al. Physical and Thermal Properties of UV Curable Waterborne Polyurethane Dispersions Incorporating Hyperbranched Aliphatic Polyester of Varying Generation Number[J]. Polymer, 2005, 46(24): 11066–11078.
- [10] KIM Y B, KIM H K, YOO J K, et al. UV-Curable Polyurethane Dispersion for Cationic Electrodeposition Coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 157(1): 40–46.
- [11] 王建龙, 王正祥. 新型可紫外光固化水性聚氨酯的制备与表征[J]. 包装学报, 2012, 42(7): 49–52.
- WANG Jianlong, WANG Zhengxiang. The Preparation and Characterization of Novel UV Curable Waterborne Polyurethane[J]. Packaging Journal, 2012, 42(7): 49–52.
- [12] VALET A. Outdoor Applications of UV Curable Clearcoats—A Real Alternative to Thermally Cured Clearcoats[J]. Progress in Organic Coatings, 1999, 35(1): 223–233.
- [13] JUNG S J, LEE S J, CHO W J, et al. Synthesis and Properties of UV-Curable Waterborne Unsaturated Polyester for Wood Coating[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1998, 69(4): 695–708.
- [14] 徐克文, 赵石林. 丙烯酸改性水性聚氨酯乳液的合成及表征[J]. 新型建筑材料, 2006(7): 38–41.
- XU Kewen, ZHAO Shilin. Synthesis and Characterization of Acrylic Acid Modified Water Soluble Polyurethane Emulsion[J]. New Building Materials, 2006(7): 38–41.
- [15] YEGANEH H, LAKOURAJ M M, JAMSHIDI S. Synthesis and Properties of Biodegradable Elastomeric Epoxy Modified Polyurethanes Based on Poly(E-Caprolactone) and Poly(Ethylene Glycol)[J]. European Polymer Journal, 2005, 41(10): 2370–2379.
- [16] 林旭峰, 张守一, 钱军. UV固化水性超支化水性聚氨酯合成及性能研究[J]. 涂料工业, 2013, 43(4): 37–43.
- LIN Xufeng, ZHANG Shouyi, QIAN Jun. Synthesis and Properties of UV-Curing Waterborne Hyperbranched Polyurethane[J]. Paint & Coatings Industry, 2013, 43(4): 37–43.
- [17] FANG Z H, DUAN H Y, ZHANG Z H, et al. Novel Heat-Resistance UV Curable Waterborne Polyurethane Coatings Modified by Melamine[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(11): 4765–4768.
- [18] 李绍雄, 刘益军. 聚氨酯胶黏剂[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998: 276–278.
- LI Shaoxiong, LIU Yijun. Polyurethane Adhesives[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1998: 276–278.

(责任编辑: 徐海燕)