

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.09.014

熔融沉积成型混色打印机的设计与实现

尚晓峰¹, 王国民²

(1. 沈阳航空航天大学机电工程学院, 沈阳 110136; 2. 沈阳航空航天大学研究生院, 沈阳 110136)

摘要: 针对当前熔融沉积成型(FDM)打印机普遍只能打印单色零件的问题,设计了一种送丝机构与三进料挤出头相配合的混色打印机。设计了一种由几何信息和材料信息结合导出的统一接口文件,为混色打印机的运动系统和送丝系统提供了驱动数据源,通过调节色彩细分量并给三进料挤出头输送两种颜色的丝材打印出了两种颜色梯度渐变效果不同的零件。最后给三进料挤出头输送三种颜色的丝材也可打印出色彩更加丰富的零件。设计的混色打印机可一次成型梯度渐变色、多色的零件,为FDM彩色3D打印技术的进一步研究提供了参考。

关键词: 熔融沉积成型; 混色打印机; 色彩细分量; 梯度渐变色; 多色; 3D打印

中图分类号: TP302 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)09-0078-05

Design and Implementation of Fused Deposition Modeling Mixed Color Printer

Shang Xiaofeng¹, Wang Guomin²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Graduate School, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract : Aiming at the problem that the current fused deposition modeling (FDM) printer can only print monochrome parts, a mixed color printer with a filaments feeding mechanism and a three-feed extrusion head is designed. A unified interface file derived from the combination of geometric information and material information is designed to provide the drive data source for the motion system and filaments feeding system of the mixed color printer. By adjusting the color subdivision and feeding filaments with two colors to the three-feed extrusion head, the parts that two colors have different gradient effects are printed. Finally, the more colorful parts can be printed by feeding filaments with three colors to the three-feed extrusion head. The designed mixed color printer can be used to form gradient color and multicolor parts at a time, which provides a reference for further research of FDM colorful 3D printing technology.

Keywords : fused deposition modeling ; mixed color printer ; color subdivision ; gradient color ; multicolor ; 3D printing

熔融沉积成型(FDM)又称丝状材料熔融挤出成型,是当前最流行和最具生命力的3D打印技术之一。FDM工艺过程是首先给喷头加热,然后送丝机构将丝材送至喷头,利用丝材的热熔性,丝材受热在喷头内呈熔融态,喷头在运动控制指令下沿零件截面轮廓和内部填充轨迹运动,同时将熔融态的丝材挤出涂覆在工作台上迅速固化,当前层完成后喷头上升一个层厚进行下一层的涂覆,层层堆积将电脑中的三维模型变成实物^[1-3]。由于FDM技术具有成本低廉可自主组装机器、机器体积小可桌面化、系统复杂性低且稳定性高等优点而备受众多企业和

个人的喜爱,市场前景广阔。随着FDM技术的发展,人们对3D打印模型创意和美观程度的要求不断提高,如今只能打印单色模型的3D打印机显然已经远远达不到人们的要求^[4-5]。

虽然FDM打印耗材的种类和颜色多样,但是受到桌面3D打印机挤出头结构和控制系统的限制,使得打印机只能打印出与丝材颜色一致的零件,颜色单一不能满足个性化定制,极大地限制了FDM技术的进一步发展。为了解决这一问题,有人提出了多喷头的打印机结构,通过分别给每个喷头输送不同颜色的丝材可以打印出几种颜色简单叠加的模

通讯作者: 王国民,硕士研究生,研究方向为3D打印技术及其应用 E-mail: 1054172561@qq.com

收稿日期: 2018-07-16

引用格式: 尚晓峰,王国民. 熔融沉积成型混色打印机的设计与实现[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(9):78-82, 116.

Shang Xiaofeng, Wang Guomin. Design and implementation of fused deposition modeling mixed color printer[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(9):78-82, 116.

型,但是这种方案需在打印过程中更换喷头使得运动控制系统复杂,另外模型颜色种类有限并且无法打印出两种颜色渐变的模型^[6-7]。

针对以上彩色打印方案的不足,笔者设计了无需在打印过程中更换喷头、无需后续颜色处理,可一次成型梯度渐变色、多色的混色打印机。首先设计混色打印机的整体框架结构;然后安装上三进料挤出头与设计的送丝机构相匹配,通过控制两种不同颜色的送料电机给三进料挤出头送丝,从而打印出了两种颜色梯度渐变的模型;设计的打印机还可向三进料挤出头输送三种不同颜色的丝材以打印出更多颜色的模型,为彩色 3D 打印技术的进一步发展提供参考。

1 FDM 用材料

目前市场上的 FDM 用材料主要有:丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料 (ABS)、聚乳酸 (PLA)、高抗冲聚苯乙烯 (PS-HI) 等,笔者设计的混色打印机采用 PLA 作为成型材料,PLA 是一种新型的可生物降解材料,这对环境保护非常有利,是公认的环境友好型材料。另外 PLA 物理力学性能良好,具有良好的拉

伸强度及延展度也拥有良好的光泽性和透明度,打印的模型不易翘边且颜色鲜艳,被广泛地用作 FDM 打印耗材^[8]。

PLA 是由可再生的植物资源 (如玉米) 所提出的淀粉原料而制成的,其经颜料染色后可成为各种颜色的 PLA 成品。根据颜料的颜色混合原理,不同颜色的 PLA 丝材经喷头加热熔融混合后会产生新的颜色。通过控制两种颜色丝材的输送速度使零件在分层方向不同高度处对应不同的组成比例,从而使零件在分层方向的高度上呈现出两种颜色的梯度变化。如果给三进料挤出头同时输送三种不同颜色的丝材,在打印零件分层方向不同高度处设置不同的组成比例,最终打印零件会在分层方向高度上呈现更多的颜色,从而实现了 FDM 打印零件色彩丰富的目的。

2 混色打印机的设计

2.1 混色打印机组成

设计的混色打印机主要由工控机、三进料挤出头、热床、温控系统、运动系统以及送丝系统组成,具体组成框图如图 1 所示。

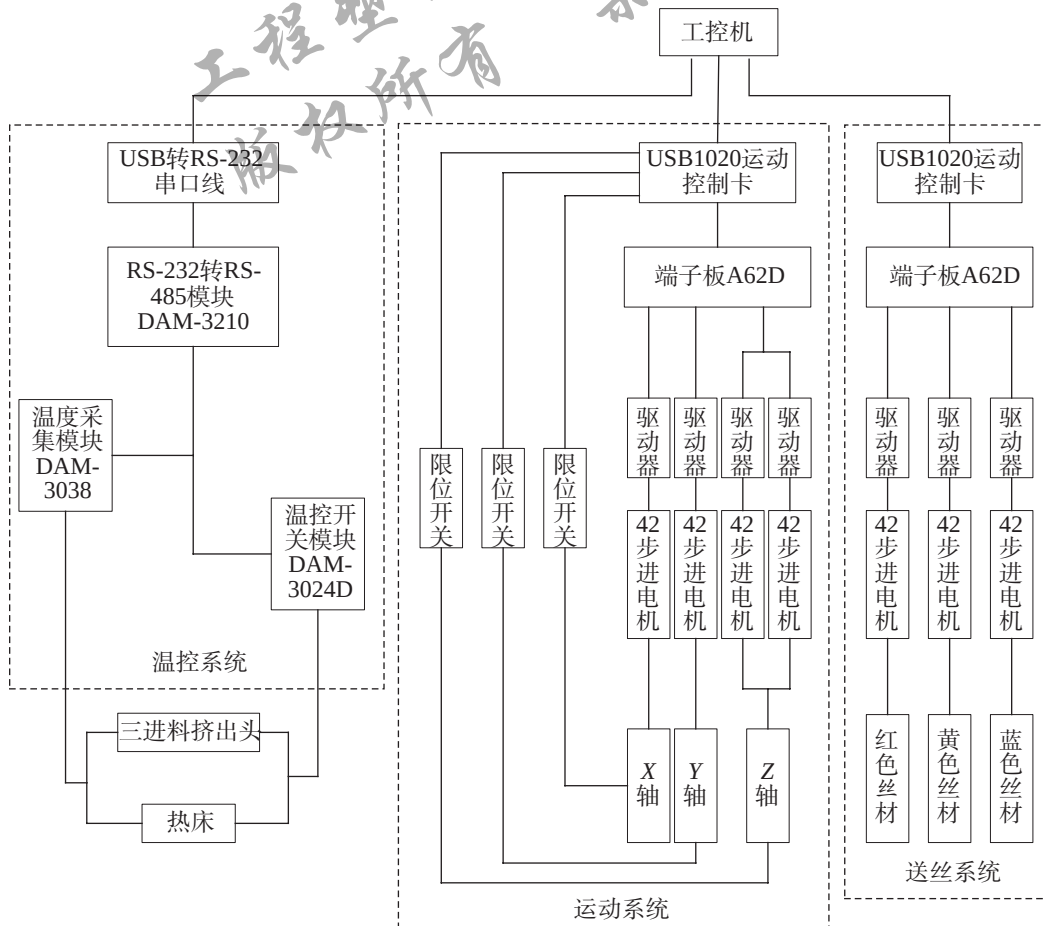
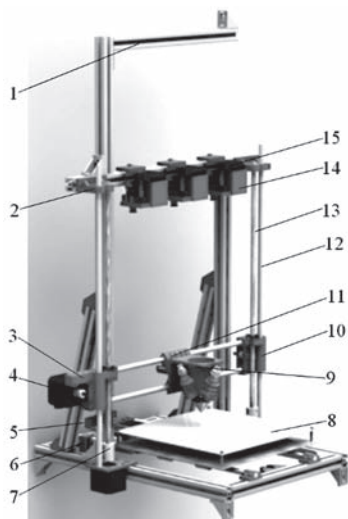


图 1 混色打印机组成框图

2.2 混色打印机的机械结构

设计的混色打印机的X轴、Y轴采用同步带传动,Z轴采用丝杠传动,主体框架采用铝合金型材,平台采用铝板,运动系统采用42步进电机驱动,具体的机械结构图如图2所示。



1—料架；2—丝杆、光轴固定件；3—X轴电机固定件；4—步进电机；
5—Z轴限位开关固定件；6—Y轴限位开关固定件；7—联轴器；
8—热床；9—三进料挤出头连接件；10—X轴、Z轴连接件；
11—挤出头固定件；12—光轴；13—丝杆；
14—送丝机构固定件；15—送丝机构

图2 混色打印机的机械结构图

X轴电机固定件和X轴、Z轴连接件里装有X光轴、直线轴承和铜螺母等配件,其中X光轴可实现X轴的固定,直线轴承与Z光轴配合可实现导向,铜螺母与丝杆配合可实现沿Z轴的运动。X轴电机,挤出头固定件和X轴、Z轴连接件之间通过传送带连接。挤出头固定件与三进料挤出头连接件固定且内装直线轴承与X光轴配合可实现三进料挤出头沿X轴的运动。Y轴电机通过传送带与平台连接可实现平台沿Y轴的运动。丝杆下部与Z轴电机通过联轴器连接,上部通过丝杆、光轴固定件固定在打印机框架上。在X轴电机固定件、Y轴限位开关固定件和Z轴限位开关固定件上分别装有限位开关用来规定三进料挤出头的原点位置。送丝机构通过导料管与三进料挤出头连接。通过在料架上放置不同颜色的PLA丝材即可完成混色打印。

2.3 送丝机构

设计的送丝机构中,主动轮采用齿轮结构、从动轮采用U型轴承结构,利用杠杆原理使从动轮将PLA丝材紧紧压在主动轮上,从而增大了丝材与两轮的摩擦力,使得主动轮转动时能够稳定、顺畅地带

动丝材运动。送丝机构具体结构如图3所示。其工作原理如下:首先将挤压手柄按下,此时的主动轮与从动轮分开,将PLA丝材从进料口插入经过主动轮与从动轮之间的缝隙后到达气动接头时松开挤压手柄,弹簧的弹力将从动轮紧紧压在主动轮上,从而使丝材被紧压在两轮之间;启动电机,主动轮转动带动丝材向下运动经气动接头连接的导料管后到达三进料挤出头,完成送丝。

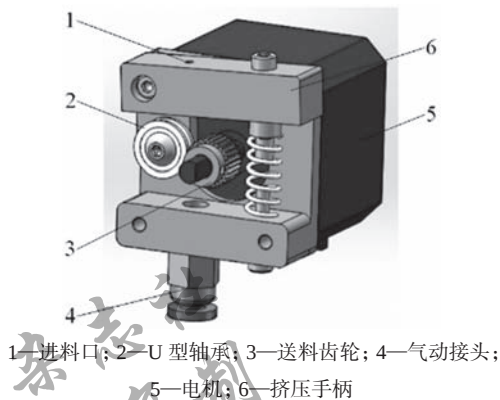
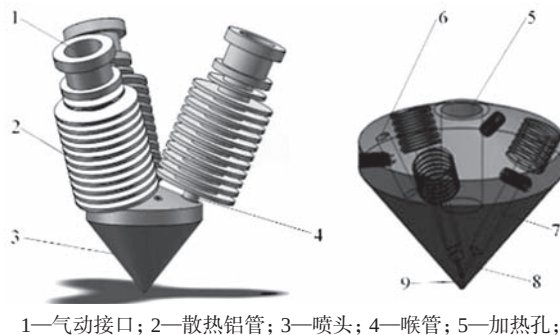


图3 送丝机构结构图

2.4 三进料挤出头

FDM打印机混色挤出头结构主要有双进料-挤出和三进料-挤出。设计的混色打印机可一次成型梯度渐变色、多色的零件,故三进料挤出头符合要求。三进料挤出头外观图和喷头透视图如图4所示。



1—气动接口；2—散热铝管；3—喷头；4—喉管；5—加热孔；
6—测温孔；7—熔融管道；8—引流管道；9—混合管道

图4 三进料挤出头外观图和喷头透视图

如图4所示,三进料挤出头主要由散热铝管、喉管和喷头组成。散热铝管上部的气动接口连接气动接头,可防止导料管的逆向移动。喉管起到连接散热铝管和喷头的作用且内置聚四氟乙烯管可防止丝材因热而粘附在内壁上,使送料更顺畅。喷头中部开加热孔放置加热棒,周围每隔120°开孔与进料装置相接,另设有测温孔放置测温装置,打印时丝材由进料装置进入喷头的熔融管道后被加热融化,受到自身的重力和上部丝材的推力作用经引流管道进入

混合管道,不同颜色的熔融态丝材在混合管道内混合后被挤出^[9]。

2.5 温控系统

RS-232 是工控机中运用最广泛的串行接口, RS-485 具有多点、双向通信的特点,允许多个发送器连接到一根总线上^[10]。温控系统采用分布式结构,作用是使挤出头加热到 200℃、热床加热到 55℃并保持温度恒定。具体实现方法是:在工控机上设置挤出头的目标温度为 200℃、热床的目标温度为 55℃;温度采集模块 DAM-3038 随时采集挤出头和热床的温度传输到工控机,与设置的目标温度相比较;运用 PID 算法,当采集到的温度低于目标温度时 DAM-3024D 继电器开关闭合向挤出头和热床加热,当采集到的加热温度高于目标温度时 DAM-3024D 继电器开关断开,停止加热挤出头和热床,从而使挤出头的温度稳定在 200℃、热床的温度稳定在 55℃。

3 混色打印的实现

3.1 混色打印原理

首先将零件三维模型的 STL 文件分层切片后生成二维平面配置文件,扫描并填充配置文件,保存并导出为通用分层接口 CLI 文件^[11]。然后可以利用分层切片和扫描填充处理的结果进行材料分配设计,根据 CLI 文件在零件分层方向不同高度处分配不同材料的组成比例,从而使零件的几何信息可以与材料信息有效结合^[12]。最后由几何信息和材料信息结合导出的统一接口 GMI 文件为运动系统和送丝系统提供驱动数据源,运动系统和送丝系统同时运动完成混色打印。

假设 V_1 , V_2 和 V_3 分别代表 3 种颜色丝材的组成比例,根据单位时间内总送丝量不变的原理,这里有 $V_1+V_2+V_3=1$ 。 V_1 , V_2 和 V_3 分别为:

$$\begin{cases} V_1 = f_1(H) \\ V_2 = f_2(H) \\ V_3 = f_3(H) \end{cases} \quad (1)$$

在式 (1) 中, H 是分层方向的高度, f_1 , f_2 和 f_3 分别是第一,第二和第三种颜色丝材组成比例的变化函数。理论上, f_1 , f_2 和 f_3 是连续函数,但由于快速成型层制造的特点, $H=mL$, 其中 m 是层数, L 是层的厚度,在实际加工中它们只能是一系列离散点。

实现混色打印的具体流程图如图 5 所示。首先运用 PID 算法使挤出头加热到 200℃、热床加热到 55℃并保持温度恒定,然后导入 GMI 文件后运动系

统和送丝系统同时被驱动,从而完成混色打印。

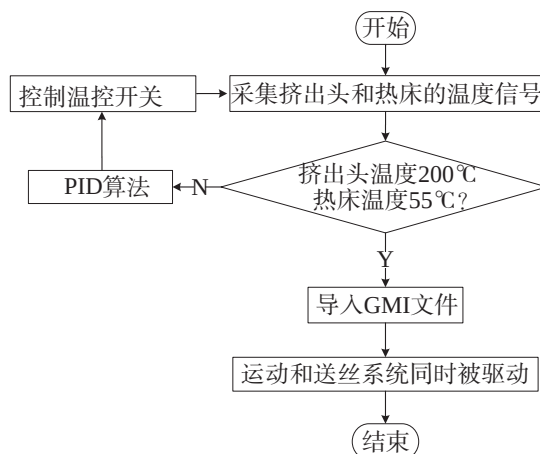


图5 混色打印过程流程图

3.2 两种颜色梯度渐变打印的实现

通过有规律地调节零件分层方向不同高度处两种颜色丝材的体积百分比可以得出零件分层方向不同高度处颜色呈现梯度变化。在三进料挤出头的其中一个进料口不进料的前提下,给另外两个进料口输送颜料。原色中的红色和蓝色丝材作从红色到蓝色梯度渐变的打印实验。此时材料组成比例 $V_3=0$, $V_1+V_2=1$ 。实验选择打印一个长 60 mm、宽 30 mm、高 50 mm 的长方体,向三进料挤出头输送红和蓝两种颜色的丝材,需要将零件的分层方向高度进行等分且在每一份高度开始处设置对应的进料比例,从而使零件在分层方向高度上实现从红色到蓝色的梯度渐变。

在零件分层方向不同高度处设置对应进料比例的方法是:保持单位时间内总送丝量 $v_{\text{总}}$ (即相当于总送丝速度) 不变,将 $v_{\text{总}}$ 均分成 N 份, N 定义为色彩细分量, $N=1,2,3, \dots, N_{\text{max}}=(H/L)-1$, 改变输送红色和蓝色丝材的速度即改变单位时间内的进料比例,每次的速度改变量为 $\Delta v=v_{\text{总}}/N$, 设输送红色丝材的速度为 $v_{\text{红}}$, 输送蓝色丝材的速度为 $v_{\text{蓝}}$, 则可得 $v_{\text{总}}=v_{\text{红}}+v_{\text{蓝}}$ ($v_{\text{总}}$, $v_{\text{红}}$, $v_{\text{蓝}}$ 均为标量), 此时零件的分层方向高度 H 被均分成 $N+1$ 份, 在 $[n/(N+1)] \cdot H$ 处 (其中 $n=0,1,2 \dots N$), 有:

$$v_{\text{红}}=v_{\text{总}}-n\Delta v; v_{\text{蓝}}=n\Delta v \quad (2)$$

由此可得 $[n/(N+1)] \cdot H$ 高度处红色和蓝色丝材的组成比例,红色丝材的组成比例 $V_1=v_{\text{红}}/v_{\text{总}}=1-(n/N)$, 蓝色丝材的组成比例 $V_2=v_{\text{蓝}}/v_{\text{总}}=n/N$ 。由此可以看出红色和蓝色丝材的组成比例由零件分层方向的高度和色彩细分量决定,在保持色彩细分量不变的前提下,红色丝材的组成比例随着零件分层方向高度

的增加逐渐减小到0,蓝色丝材的组成比例随着零件分层方向高度的增加逐渐增大到1,并且 $V_1+V_2=1$ 。

经上述计算后导出 GMI 文件为运动系统和送丝系统提供驱动数据源,然后运动系统和送丝系统同时被驱动,从而完成从红色到蓝色梯度渐变零件的打印。为了增加实验结果的可对比性, N 取1,2,4,8,12,16,打印出从红色到蓝色梯度渐变的长方体前表面照片,如图6所示(图6中的深色实际为红色,浅色实际为蓝色)。

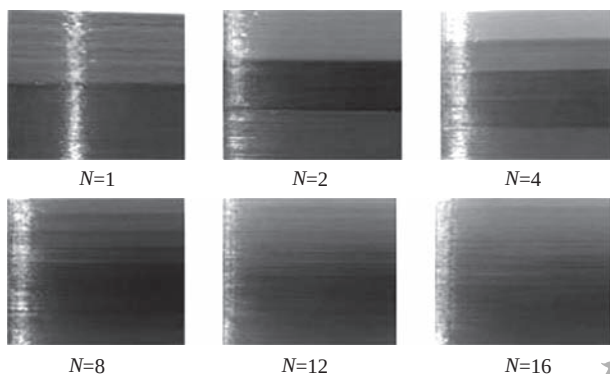


图6 不同 N 值时长方体前表面从红色到蓝色的梯度渐变情况

由图6可以看出,随着 N 值的增大,零件的分层方向高度被等分的份数增多,每次速度的改变量减小使得相邻高度处红色和蓝色丝材组成比例变化减小,打印出长方体的前表面从红色到蓝色梯度变化逐渐不明显,梯度渐变效果变好。

3.3 多色打印的实现

通过给三进料挤出头输送颜料三原色红、蓝、黄色丝材来实现多色打印。同样保持单位时间内总送丝量 $v_{\text{总}}$ 不变,改变红、蓝、黄色丝材的输送速度即可调节三种颜色丝材在零件分层方向不同高度处的组成比例 V_1 , V_2 和 V_3 ,且 $V_1+V_2+V_3=1$ 。红色丝材的组成比例 $V_1=v_{\text{红}}/v_{\text{总}}$,蓝色丝材的组成比例 $V_2=v_{\text{蓝}}/v_{\text{总}}$,黄色丝材的组成比例 $V_3=1-V_1-V_2$ 。首先将零件的高度进行等分,在每一份高度的开始处设置相应的组成比例 V_1 , V_2 和 V_3 ,且每一份高度对应的组成比例不同,然后导出统一接口文件(GMI)驱动运动和送丝系统,完成多色打印。红、蓝、黄混合后会产生更多的颜色呈现在零件分层方向的不同高度处,从而使打印零件的颜色更加丰富,可实现多彩色打印。

4 结论

(1) 设计的混色打印机整体框架可完成 X , Y 和 Z 轴运动;设计的送丝机构可完成对三进料挤出头的送丝;三进料挤出头可完成不同颜色的PLA丝材

熔融混合后挤出。

(2) 根据色彩细分量 N 确定零件分层方向不同高度处红色和蓝色丝材的组成比例,导出的统一接口文件(GMI)同时驱动运动系统和送丝系统,从而打印出分层方向高度上从红色到蓝色梯度渐变的零件。随着 N 值的增大,梯度渐变效果变好。

(3) 将零件的高度进行等分,调节每一份高度的红、蓝、黄色丝材的组成比例可打印出色彩更加丰富的零件。

(4) 设计的混色打印机可以打印出梯度渐变色、多色的零件,为彩色3D打印技术的进一步研究提供了参考。

参考文献

- [1] 刘斌,谢毅. 熔融沉积快速成型系统喷头应用现状分析[J]. 工程塑料应用, 2008, 36(12):68-71.
Liu Bin, Xie Yi. Analysis on application status for the spray head of fused deposition modeling system[J]. Engineering Plastics Application, 2008, 36(12):68-71.
- [2] 余东满,李晓静,王笛. 熔融沉积快速成型工艺过程分析及应用[J]. 机械设计与制造, 2011(8):65-67.
Yu Dongman, Li Xiaojing, Wang Di. Process analysis and application for rapid prototyping based on fused deposition modeling[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(8):65-67.
- [3] 侯清泉,刘春生. FDM快速成型机加工工艺方法研究[J]. 制造技术与机床, 2008(1):88-90.
Hou Qingquan, Liu Chunsheng. Research on manufacturing technology and method for FDM rapid prototyping machine[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2008(1):88-90.
- [4] 宋廷强,邢照合. 一种彩色FDM型3D打印机的设计与实现[J]. 电子技术应用, 2017, 43(4):69-71.
Song Tingqiang, Xing Zhaohe. Design and implementation of color FDM 3D printers[J]. Application of Electronic Technique, 2017, 43(4):69-71.
- [5] 沈冰夏,管宇鹏. FDM型混色3D打印机的设计[J]. 北京信息科技大学学报, 2016, 31(5):60-63.
Shen Bingxia, Guan Yupeng. A design of color mixing fused deposition modeling 3D printer[J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University, 2016, 31(5):60-63.
- [6] 韩善灵,李志勇,肖宇,等. 熔融沉积成型3D打印机混装装置的研究[J]. 机械设计与制造, 2015(11):116-118.
Han Shanling, Li Zhiyong, Xiao Yu, et al. Research of fused deposition modeling 3D printer for color mixture[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(11):116-118.
- [7] Han Shanling, Xiao Yu, Qi Tao, et al. Design and analysis of fused deposition modeling 3D printer nozzle for color mixing[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2017(2):1-12.

(下转第116页)

3 结论

(1) 研究了温度循环老化对 PP 材料耐刮擦性能的影响。发现随着温度循环次数的增加, PP 材料的拉伸强度、拉伸弹性模量以及压缩强度和压缩弹性模量的变化幅度较小,且呈无规律变化。其中,弹性模量的变化程度高于强度的变化程度。

(2) 通过分析发现随温度循环次数的增加, PP 皮层结晶度先有所降低而后趋于稳定,而 PP 刮擦深度随刮擦法向力增加的幅度以及相同刮擦法向力下的摩擦系数总体呈先明显升高而后趋于稳定的趋势。这两种变化趋势有一定的相关性,这说明皮层表面结晶度的下降是导致温度循环老化过程中 PP 材料耐刮擦性能降低的一个重要因素。提高 PP 皮层结构的性能对改善温度循环老化环境中 PP 材料的耐刮擦性能具有重要的影响。

参考文献

- [1] Kobayashi Y, Otsuki Y, Kanno H, et al. Relating scratch resistance to injection molding - induced morphology of polypropylene[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 120(1):141-147.
- [2] 袁海兵. 硅酮耐刮擦剂对车用 PP 复合材料性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(9):120-124.
Yuan Haibing. Effect of silicone anti-scratch agent on properties of polypropylene composites of automobile[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(9):120-124.
- [3] 余林华. 低散发耐刮擦汽车内饰用聚丙烯复合材料的研制[J]. 工程塑料应用, 2012, 40(9):9-12.
Yu Linhua. Polypropylene composite with low emission and scratch resistant used for automobile interior trim[J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(9):9-12.
- [4] Zhang Jianwei, Jiang Han, Jiang Chengkai, et al. Experimental and numerical investigations of evaluation criteria and material parameters coupling effect on polypropylene scratch[J]. Polymer Engineering & Science, 2018, 58(1):118-122.
- [5] Guadagno L, Fontanella C, Vittoria V, et al. Physical aging of syndiotactic polypropylene[J]. Journal of Polymer Science Part B Polymer Physics, 1999, 37(2):173-180.
- [6] 刘海林, 伍玉娇, 杨春萍. 聚丙烯材料老化性能研究进展[J]. 塑料科技, 2014, 42(9):117-120.
Liu Hailin, Wu Yujiao, Yang Chunping. Research progress in anti-aging properties of polypropylene materials[J]. Plastics Science and Technology, 2014, 42(9):117-120.
- [7] Moghbelli E, Browning R L, Boo W J, et al. Effects of molecular weight and thermal history on scratch behavior of polypropylene thin sheets[J]. Tribology International, 2008, 41(5):425-433.
- [8] Hossain M M, Browning R, Minkwitz R, et al. Effect of asymmetric constitutive behavior on scratch-induced deformation of polymers[J]. Tribology Letters, 2012, 47(1):113-122.
- [9] Zhang Jianwei, Jiang Han, Kan Guozheng, et al. A new form of equivalent stress for combined axial-torsional loading considering the tension-compression asymmetry of polymeric materials[J]. RSC Advances, 2015, 5:72 780-72 784.
- [10] Mark James E. Polymer Data Handbook[M]. New York:Oxford University Press, 1999:772.
- [11] Jiang H, Lim G T, Reddy J N, et al. Finite element method parametric study on scratch behavior of polymers[J]. Journal of Polymer Science Part B Polymer Physics, 2007, 45(12): 1 435-1 447.
- [12] 卓然然, 吴杰, 苏磊, 等. 压缩对含 β 成核剂等规聚丙烯注塑样品皮芯结构的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2014, 30(10):117-121.
Zhuo Ranran, Wu Jie, Su Lei, et al. Effect of compression on the skin core structure of β iPP injection samples[J]. Polymer Material Science & Engineering, 2014, 30(10):117-121.

(上接第 82 页)

- [8] 张来, 张文霞, 蔡广楠, 等. PLA 热性能参数的研究[J]. 塑料工业, 2012, 40(1):68-71.
Zhang Lai, Zhang Wenxia, Cai Guangnan, et al. Study on the thermal property parameters of PLA[J]. China Plastics Industry, 2012, 40(1):68-71.
- [9] 黄子帆, 马跃龙, 李俊美, 等. 熔融沉积成型彩色 3D 打印机的研究[J]. 机床与液压, 2017, 45(4):21-25.
Huang Zifan, Ma Yuelong, Li Junmei, et al. Research of colorful 3D printer fused deposition modeling[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(4):21-25.
- [10] 钱明贵. 熔融沉积成型进丝控制系统的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
Qian Minggui. Research on the control of the fused deposition modeling delivering filament system[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [11] 王腾飞. 3D 打印技术中分层与路径规划算法的研究及实现[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
Wang Tengfei. The research and implement of slicing and path planning algorithm in 3D printing technology[D]. Tianjin:Hebei University of Technology, 2015.
- [12] Wang Wei, Shang Xiaofeng. Functionally gradient material laser rapid prototyping technique[J]. Tsinghua Science & Technology, 2009, 14(S1):192-199.