

热塑性聚氨酯材料柔性外壳 3D 打印技术

高国华¹, 任 晗¹, 王 皓¹, 李炼石¹, 董增雅¹, 夏齐霄²

(1. 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 北京 100024; 2. 北京联合大学机器人学院, 北京 100020)

摘 要: 针对全柔性伸缩型机械臂外壳在 3D 打印过程中产生的不粘连现象, 提出了一种通过减少工件自身压缩量从而优化整体打印效果的方法. 运用 Inventor 三维建模软件结合 Cura 3D 打印软件对柔性臂外壳进行建模, 并利用 3D 打印机对热塑性聚氨酯材料进行 3D 打印加工. 通过观察试件的实际打印效果, 对打印过程中所产生的不粘连的失效形式进行了分析与研究, 在利用不同参数水平对同一试件进行打印后, 发现不同参数均通过影响工件的压缩量而影响最终的打印效果. 为减少工件受重力产生的压缩量, 分别提出设置温差、增加散热与增加表面支撑等改进方法, 并将改进后的打印效果与原打印效果进行了对比. 试验结果表明: 添加表面支撑的方法对提高打印效果作用最大, 可以将总体不粘连率从 8.2% 下降到 2.5%, 验证了所提出改进方案的合理性.

关键词: 3D 打印; 柔性材料; 热塑性聚氨酯; 不粘连

中图分类号: TP 202.2

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2018)04-0497-10

doi: 10.11936/bjtxb2017050018

3D Printing Technology for TPU Flexible Shell

GAO Guohua¹, REN Han¹, WANG Hao¹, LI Lianshi¹, DONG Zengya¹, XIA Qixiao²

(1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. College of Robotics, Beijing Union University, Beijing 100020, China)

Abstract: To reduce the phenomenon of inadhesion during the process of 3D printing, a method optimizing the print effect by reducing the compression degree was presented. The model of flexible shell was generated by Inventor and Cura, and it was produced using thermoplastic polyurethanes by 3D printing. The result of 3D printing did not accord with the anticipation, the inadhesion appeared on the surface of flexible shell, and the reason was explored in this study. Using different parameters to print the same shell, a result was confirmed that they are influencing the effect of 3D printing by changing the compression of height. For reducing the compression, some optimization methods were proposed, for example: adding supporting structure, turning on the radiator and setting the difference temperatures. Results show that all the methods have some influences on improving the print effect; however, adding supporting structure has more remarkable effect, and the inadhesion of 3D printing can be reduced from 8.2% to 2.5%. The optimization effect is verified.

Key words: 3D printing; flexible material; thermoplastic polyurethanes; inadhesion

3D 打印技术属于快速成型的一种加工方式, 也被称为增材制造(additive manufacturing, AM)^[1], 随着工业化进程的不断发展, 新的智能制造方法也越来越普及, 尤其是近年来, 3D 打印技术伴随着材料学和计算机学的发展, 取得了长足的进步^[2-4]. 3D

打印综合了控制工程、数字建模技术、化学与材料科学等诸多学科的先进技术, 被誉为“第三次工业革命”的核心技术^[5-7].

与传统的加工制造工艺相比, 3D 打印最大的优势就是可以快速形成复杂的表面结构甚至是装配结

收稿日期: 2017-05-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51675011)

作者简介: 高国华(1977—), 男, 教授, 主要从事机构创新设计方法、虚拟仪器方面的研究, E-mail: ggh0912@126.com

构^[8],既不用车磨刨铣,也不用开模注塑,这不仅大大节省了加工时间,同时又减少了经济、资源上的浪费^[9-10]. 3D打印技术适合单件小批量加工、新产品研发、模具调整以及仿形制造等过程^[11],便捷的操作方式和广阔的适用范围使它越来越成为了国内外研究的热点^[12].

利用柔性材料进行3D打印,可以快速得到适合柔性臂外形尺寸和运动性能的外壳组件. 本文首先总结了几种常用的柔性和刚性3D打印材料各自的优缺点,最终选定热塑性聚氨酯弹性体橡胶(简称“TPU材料”)作为本柔性臂试验台的打印材料. 通过观察TPU材料打印的柔性臂外壳的失效现象,结合多因素试验进行理论分析,可以得到3D打印机参数调整方案. 最后,本文将参数调整后的打印效果与默认参数的打印效果分别进行了比较.

1 3D打印柔性产品发展现状

在3D打印技术发展之初,受打印材料和打印设备的限制,大部分3D打印产品都是利用合成塑料、合成树脂等打印的刚性零件. 随着多学科多领域不同技术之间的相互影响,越来越多的打印材料和打印方式逐渐进入了人们的视野,比如近年来兴起的基于柔性材料的3D打印技术和基于生物材料的3D打印技术,其中一些成果甚至已经被产品化.

例如,美国SOLS公司在2014年首次面向普通消费者推出了一款的3D打印定制鞋垫,如图1所示. 该鞋垫具有吸收冲击、缓解足跟压力和对个人步态做出反应的能力. 整个打印过程十分简单,顾客只需要利用手机APP按操作进行扫描,并将扫描信息发送给SOLS服务提供商,即可快速完成打印. 它的打印材料来自NASA航天级柔性尼龙材料,能够在保证坚韧、耐磨度的同时给予顾客最舒适的触感.

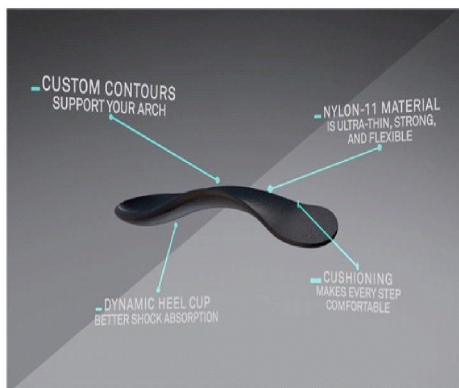
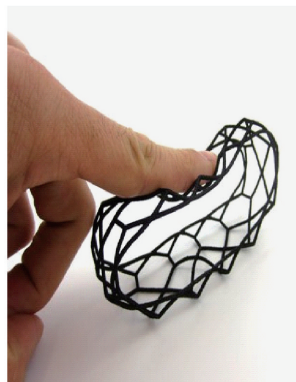


图1 3D打印柔性鞋垫

Fig. 1 Flexible insole with 3D print technology

Materialise公司也把柔性材料的3D打印技术运用到了饰品、服装定制等服务中,通过对聚氨酯和聚酰胺等材料进行3D打印,可以快速生成满足顾客个性化定制要求的产品,如图2所示.



(a) 3D打印饰品



(b) 3D打印钱包

图2 3D打印聚氨酯材料

Fig. 2 3D print by thermoplastic polyurethanes

2 3D打印的常用有机高分子材料

3D打印材料在3D打印技术发展的道路上提供了重要的物质基础,可以说材料学的发展决定着3D打印技术的加工质量及适用范围^[13-14]. 目前,3D打印材料从大类上可以分为金属和非金属2种,金属材料主要为钛合金不锈钢等超精细粉末,而非金属打印材料主要为丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物、聚乳酸等. 热塑性聚氨酯弹性体橡胶、聚烯烃系弹性体橡胶经常被用作生产手机外壳保护套、亲肤层包膜、垫片等产品,其加工方式一般为金属模具注塑加工^[15-17].

2.1 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物材料

丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(acrylonitrile butadiene styrene copolymers, ABS)最初是由美国橡胶公司于1947年研发成功的,迄今已经经历了半个多世纪的发展^[18]. 中国对ABS材料的生产研发始

于1963年,并于1975年建成国内第1套 10^3 吨级ABS材料生产设备^[19]。ABS材料不仅具备PB橡胶的韧性以及低温环境下的抗冲击性,同时还具备聚丙烯腈材料的耐热性能和聚苯乙烯的刚性、光泽^[20]。作为目前产量最高、应用最广的聚合物共混物^[21],ABS塑料被广泛应用到了机械、电气等工业元件中。在3D打印技术发展之初,ABS被广泛用作打印材料,但是由于其在加工时受热会产生较强烈的气味并挥发出一有毒蒸汽,需在通风良好的环境下进行打印。

2.2 聚乳酸材料

与ABS塑料相比,聚乳酸(poly-lactic acid, PLA)材料的产量要小很多,价格也更加昂贵,但是PLA材料相比ABS材料有着更多优点。PLA是一种生物降解材料,它比ABS更环保,常常用来生产一次性输液用具、免拆型手术缝合线、药物缓释包装剂等^[22],无毒、环保的特性使得它在医疗领域有着广泛的应用。另外,PLA材料还具备良好的物理机械性能,适用于吹塑、热塑等各种加工方法,加工方便。它还具有防潮性、耐油脂性和密闭性强等特点^[23]。从打印效果看,PLA材料比ABS更容易塑形,模型光泽性好,色彩艳丽,而ABS材料在加工后需要对表面进行一定处理。从打印过程看,PLA在打印过程中对打印底板的粘连性好,不易发生翘边,而ABS材料在打印过程中冷却变形程度较大,容易产生翘边现象,需要将热床调至更高温度。

与ABS材料相比,PLA材料也存在一些不足:在加热到一定温度时,ABS会慢慢转换成凝胶液体,没有相变,而PLA会直接由固体变为液体,容易造成喷嘴堵塞。

2.3 柔性打印材料

热塑性聚氨酯弹性体橡胶(thermoplastic polyurethanes, TPU)的主要特性有:硬度范围广,而且随着硬度的增加,其产品仍保持良好的弹性和耐磨性,机械强度高,耐寒性突出,加工性能好,耐油,耐水,耐霉菌,再生利用性好。因其结构特性,常被广泛应用于煤矿、汽车、机械、纺织等的各个领域^[24]。热塑性弹性体(thermoplastic elastomer, TPE)本文特指苯乙烯系热塑性弹性体。TPE环保无毒安全,应用范围广,有优良的着色性,触感柔软,耐候性,抗疲劳性和耐温性,加工性能优越,无须硫化,可以循环使用降低成本,既可以二次注塑成型,也可以单独成型^[25]。2种材料相比较,TPU的特点就是强度高,耐磨性好,常被用于加工手机保护套等,TPE

材料的机械性能比TPU材料低,尤其是抗拉强度远远低于TPU材料,但是它质地疏松多孔,触感舒适度更好,常被用来加工护手的橡胶垫、瑜伽垫等^[26]。

3 柔性打印材料的优势与限制

3.1 柔性材料的优势

3D打印技术在医疗领域有很多应用,但是大部分还处于试验阶段,例如:对病人的骨骼、器官等进行超声波扫描后,利用3D打印技术对实际组织结构进行复刻,以便于医生能够更清晰直观地观察到病人的实际受伤情况及病症,从而确定更合理的手术方案^[27-29]。

柔性材料相比刚性材料能够更能够模拟人体组织器官在受力后的变形情况,使医生可以对其先进行模拟操作。柔性3D打印在外科损伤修复中也有很多应用空间,比如对骨折的病人,由于每个病人的体型、受伤位置都是不相同的,柔性3D打印技术可以快速地制造出合适尺寸的绑带等^[30],其无毒、亲肤的材料特征也大大增加了其在医疗领域的运用空间^[31-32]。在机械行业,柔性材料的3D打印技术对于一些非标准件的柔性铰、垫圈的加工有着很大的发挥空间,还有一些封闭的气囊结构利用3D打印技术也可以简化加工过程。

3.2 柔性材料打印技术的限制

目前,大部分的增材式3D打印机的挤出结构都是针对硬度较高的PLA和ABS等材料进行设计的,它们在实际工作的过程中是通过电机带动摩擦导轮从而带动料丝向喷头挤压而完成下料的。摩擦力的大小不仅由材料间的摩擦因数决定,而且还和材料间表面的接触压力密切相关,TPU和TPE等柔性材料由于其弹性太大,很难从挤出机得到足够的摩擦力来向下运动,因此需要对现有下料结构进行改进。熔融的TPU材料由于表面张力比PLA等材料要小很多,因此在送料过程中容易倒流进入喉管与打印头金属加热管之间,影响散热的同时还会导致喉管高温蒸发或料丝挤压堵塞。由于TPU比PLA柔软,因此,不能够远端送料,只能近端送料。要利用柔性材料得到更好的打印效果,就需要更精密的近端送料结构或更适合的打印设定参数。

4 利用TPU材料打印柔性外壳

4.1 柔性外壳的主要功能

本试验台柔性臂需要具备伸缩和弯曲功能,其

外壳就需要既能包覆柔性臂骨架,又能随骨架一起伸缩,在对比了 TPU 与 TPE 的打印试件强度后,最终选用机械性能更好的 TPU 材料来加工外壳。图 3 所示为本柔性臂的主体结构和变形过程,它由间距 100 mm 的 4 根直径 2.5 mm 的玻璃纖維棒作为支撑和驱动,节片共有 4 个,间距为 150 mm,由 PLA 材料打印而成,主要作用是保持玻璃纖維棒间的横向间距。为了保持节片间的轴向间距,同时又使得该柔性机械臂结构具备伸缩功能,每 2 片节片之间需要添加 1 节类似波纹管的结构,也就是本文所研究的利用 3D 打印机打印的 TPU 材质柔性臂外壳。

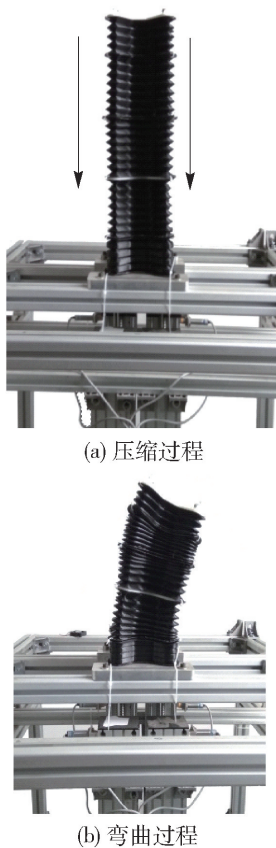


图 3 柔性臂外壳弯曲、压缩过程

Fig. 3 Bending and compression process of manipulator's shell

4.2 柔性外壳的外形尺寸

该柔性臂的设计要求为:末端能够在最短的时间内到达指定目标点并稳定;能够以最小的操控力度来进行控制,达到最高的灵活性;在全压缩状态下,最底部外壳结构能够保持最稳定的直立姿态。

根据以上要求,最底部外壳结构被设计为了一种边缘为斜面结合竖直面设计结构。TPU 柔性外壳的褶皱坡角和壁厚直接影响该全柔性机械臂的伸

缩性和运动特性。

受底部驱动滚珠丝杠行程限制,该柔性臂的设计最大伸长高度为 700 mm,最小收缩高度为 300 mm,因此柔性臂外壳在全压缩状态下高度应当小于 300 mm,而伸展后长度应当大于 700 mm。为了使柔性臂外壳拉伸与压缩量保持相等,将柔性外壳原长度定为 500 mm 左右。由于 3D 打印机的最大打印尺寸高度仅为 220 mm,因此将外壳分为 4 个部分进行打印。在柔性外壳压缩时,褶皱边缘会向内收缩挤压到驱动玻纤,褶皱高度越大,这种现象越明显,但是褶皱高度变小,收缩率又会受到影响,综合计算后,将褶皱数目定为 5 层(边缘 2 组半层合计为 1 层),则每层褶皱层高度为 25 mm,连同上下 2 层连接部分的厚度,试件总高度为 140 mm。

在褶皱部分由于存在小坡角斜边特征,打印坡角越小,越容易出现由重力导致的边缘塌陷、堆料不均等现象。因为随着坡角减小,料丝在沿着斜面堆叠过程中会更向外侧倾覆,受重力影响就会越大。但是该设计需要褶皱角度更小,因为褶皱角度越小,褶皱就会越密集,从而驱动力就会越小(类似弹簧受力,相同线径、外径的弹簧,其单位长度下匝数越多越密集,拉压相同长度,驱动力越小)。在同一试件上将褶皱坡角从小到大进行梯度变化($\theta_1 > \theta_2$),可以直观地看出打印效果在逐渐变好,如图 4 所示。

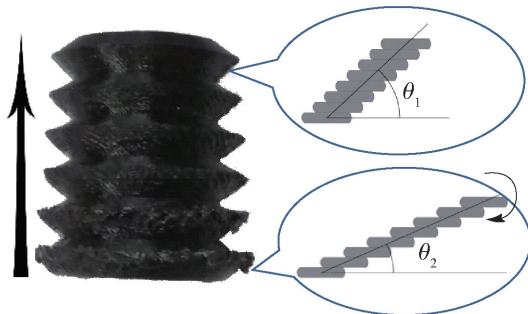


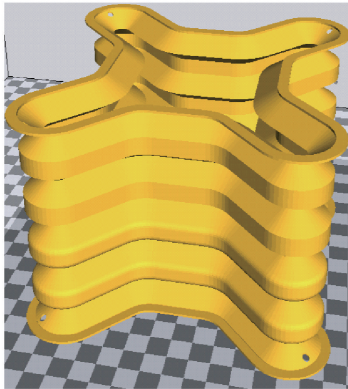
图 4 打印效果随倾角变化趋势

Fig. 4 Comparison of 3D printing effect

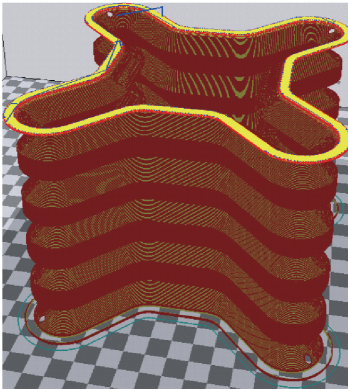
受重力的影响,每层堆料都会受到一个向外的力矩,这个力矩最终导致了打印斜面的倾覆。为了确定 TPU 材料的最小打印坡角,需要进行试验确定。经过多次试验,发现打印 TPU 材料在打印坡角 θ 大于 30° 时,不会出现明显的失效,因此,将本柔性臂外壳的褶皱坡角设计为 30° 。另外,为了使柔性臂能够在运动结束后快速稳定,需要通过减少外壳的质量来抑制惯性影响,打印试件需尽量轻薄,因此打印厚度最小可以设为喷头出料直径 0.4 mm。

4.3 打印过程

图5为柔性臂套管从3D模型的建立到最终打印成品的过程,主要步骤为:



(a) 柔性臂外壳3维立体建模模型



(b) 根据该模型生成的3D打印文件喷头路径,层高为0.2 mm



(c) 利用TPU材料通过3D打印得到的柔性臂外壳成品

图5 3D打印过程

Fig. 5 Process of 3D printing

1) 建立柔性臂外壳的 Inventor 三维模型并转化为 STL 标准三维面片型的数据文件格式。

2) 导入 Cura 添加 3D 打印机的打印温度、打印速度、热床温度、风扇功率、外壳厚度、填充密度、表面支撑形式等参数,生成 G-code 文件。

3) 将 G-code 文件导入 3D 打印机,完成打印。

利用 TPU 材质打印的成品外壳的伸缩性和强度都能满足设计要求,它的耐曲挠性、优异的耐磨性

等材料特性使其能够在恶劣的工况下也能充分地支撑和保护全柔性机械臂的正常运行。利用 3D 打印技术加工这种复杂的波纹管结构可以省去注塑加工方式的开模过程,大大减少了制造成本,同时还提高了生产效率。利用 3D 打印 TPU 来制造柔性臂外壳虽然具备很多优点,但是经过对工件的加工细节进行观察,发现会有断层的加工缺陷,就是上下 2 个或多个加工层没有粘接到一起,产生不粘连现象,如图 6 所示。



图6 不粘连现象的产生

Fig. 6 Inadhesion of shell

在柔性臂外壳处于压缩状态时,外壳上的少许断层不会对柔性臂整体产生很大影响,但是如果柔性臂处于拉伸状态,整个外壳受轴向拉力,断层就会沿着切面方向迅速扩展,最终使外壳撕裂。因此,探究不粘连现象发生的原因,并得出相应的解决方案,是本文研究的重点。

5 试验及分析

5.1 不粘连现象影响因素的确定

不粘连现象最早被认为是由于打印温度不稳定所导致的,而且其发生的概率也是随机的,但是随着后期打印试件高度的增加,不粘连现象的发生不仅越来越频繁,并且其发生的位置也显现出了一定的趋势性。为了探究 3D 打印机参数设定对工件打印效果的影响,需要进行多因素试验来探究是哪些参数影响了最终的打印效果。通过观察发现,不粘连率越高的试件在高度上塌缩得越严重,因此为验证不粘连现象的发生是否与被打印试件的高度有关,在设定温度为恒温 195 °C (TPU 材料的通用打印温度平均值)下相隔 10 mm 的打印高度差对 10 组试件进行不粘连层总高度进行测量统计,统计数据如表 1 所示。

由表中数据可以得出一些初步结论:

1) 不粘连现象的出现虽然具备随机性,但是在

表1 195 °C不粘连层数概率统计表

Table 1 Probability statistics of inadhesion at 195 °C

H_0/mm	h/mm	不粘连 集中高 度/mm	不粘连 总高度/ mm	不粘连层累 计高度占总 高度比/%
10	0	0	0	0.0
20	0	0	0	0.0
30	0	15~16	0.2	0.7
40	0	0	0	0.0
50	0	45~46	0.4	0.8
60	0.17	49~60	0.8	1.3
70	0.30	55~68	0.6	0.9
80	0.67	50~80	2.2	2.8
90	1.10	45~90	3.6	4.0
100	1.40	46~96	4.0	4.0

高度为 50 mm 以下发生的平均概率基本为 0.

2) 不粘连现象在高度为 50 mm 以上的试件中集中发生,而且其分布也集中在 45 mm 以上.

3) 高度差 h 随着总高度 H_0 的增加而增加.

本试验设定的打印层高是 0.1 mm,出料圆截面直径是 0.4 mm,在一般材料(类似 ABS 或 PLA 等较硬材料)的打印过程中,料丝会在每层之间有轻微的挤压力,这样打印出来的每层材料间结合得会更加紧密,不易产生断层的现象.随着试件总高度的提高,其在收缩率一定的条件下,总高度差应该也会逐步提高,但是实际情况是在工件高度小于 50 mm 时,工件的总高度并没有压缩,且不粘连现象也在随机出现.据分析,此现象产生的原因应为以下几点:

1) 在试件高度小于 50 mm 时,由于试件底层的堆叠收缩并不明显,料丝喷出后的横截面会随着喷头与打印层间间距变大而逐渐由平行于下层表面而转化为垂直于下层表面进行堆叠,料丝直径为 0.4 mm,层高设定为 0.2 mm,也就是料丝直径减去层高还有 0.2 mm 的余量,这个余量弥补了工件自身的收缩.

2) 随着收缩量的增加,喷头与打印层之间的间距也在加大,缺少了挤压作用就会使不粘连现象产生.

以上 2 点可以说明,工件高度 50 mm 以下时,不存在高度差,但是存在不粘连现象的原因.

5.2 双因素试验

打印机喷头的调温功能依靠热电阻来完成,本试验采用的 3D 打印机的热敏电阻为铂电阻,在打印过程中会根据设定温度参数为中值来进行调节,TPU 材料的最佳打印温度在 220 °C 以下,由于散热环境以及喷头的实际工况,实际工作温度会有约 ± 1

°C 的误差.

3D 打印机喷头的喉管材料为聚四氟乙烯,这种材料可以在 250 °C 以下保持其低摩擦因数等材料特性,为避免 TPU 材料送料过快使得熔液倒流进入喉管与打印头金属加热管的缝隙之间,导致喉管散热不良而高温蒸发或料丝散热不良高温碳化堵塞,打印速度应设置在 60 mm/s 以下.

从同一温度下的不同高度工件的打印效果试验来看,不粘连现象的出现和工件总高度 H_0 有着显著关系.由于被打打印试件质地较柔软,顶部平面在打印完成后冷却时会受内应力影响轻微翘曲变形,因此在测量打印成品高度时分别取顶面直线段、四周圆弧处和直线段与圆弧交界处测量高度差,求平均数记为平均高度差 h .打印温度作为打印机的关键参数,对打印成型效果也起着决定性作用,因此该双因素试验所涉及的参数为:试件总高度 H_0 和打印温度从 195 °C (TPU 材料的最低适应打印温度)开始,以 3 °C 为温度变化梯度,一直到 210 °C,对高度从 100 ~ 140 mm,以 20 mm 为高度差的 3 组试件分别进行打印.通过测量试件 3 个位置高度差之和、平均高度差 h 、不粘连层总高度 μ ,计算不粘连层累计高度比值 ξ ,不粘连层数概率统计数据如表 2 所示.

表2 不同温度下不粘连层数概率统计表

Table 2 Probability statistics of inadhesion at different temperatures

温度 $C/^\circ\text{C}$	H_0/mm	h_0/mm	h/mm	μ/mm	$\xi/\%$
195	100	4.0	1.33	4.0	4.0
	120	4.5	1.5	11.4	9.5
	140	5.8	1.93	14.0	10.0
198	100	4.1	1.37	3.6	3.6
	120	5.2	1.73	8.5	8.5
	140	6.5	2.17	12.2	8.7
201	100	4.4	1.47	2.5	2.5
	120	5.5	1.83	8.8	7.3
	140	6.8	2.27	11.0	7.9
204	100	4.9	1.63	2.4	2.4
	120	5.5	1.83	9.1	7.6
	140	7.2	2.40	11.5	8.2
207	100	5.1	1.70	2.6	2.6
	120	6.2	2.07	9.0	7.5
	140	7.9	2.63	13.3	9.5
210	100	5.6	1.87	4.5	4.5
	120	6.6	2.20	12.0	10.0
	140	8.5	2.83	15.7	11.2

根据表2中数据绘制温度和打印高度对应不粘连概率曲面图,如图7所示.该曲面存在一个较明显的“低谷”,这就是不粘连发生概率最小的区域,范围集中在201~204℃.

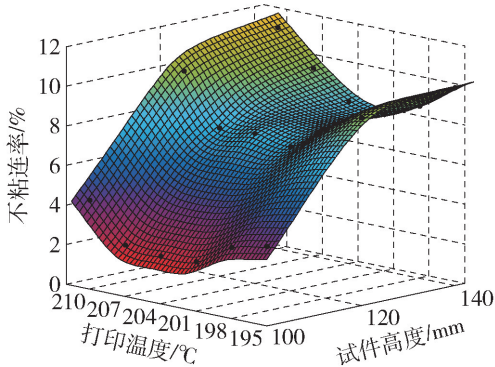


图7 不粘连率变化趋势
Fig.7 Trend of inhesion

5.3 不粘连现象影响因素的确定

通过打印多组不同高度的试件,发现不粘连现象普遍存在于模型试件坡角较小或圆角急弯处,还有顶部的斜坡处.经过对打印过程进行观察,发现当打印进行到一定高度时,喷头与工件之间的距离会逐渐增加.柔性材料的打印过程相比刚性材料更复杂,由于受到重力的影响,随着打印高度的增加,工件受重力作用所产生的压缩量也在逐步地加大,据此判断,这就是导致3D打印机喷头与工件间的间距 h 逐渐拉大的原因.而3D打印机喷头与工件间间距的拉大势必会使得料丝在下落过程中过度散热,最终在堆叠到前一层表面时失去黏性,产生不粘连现象,如图8所示.

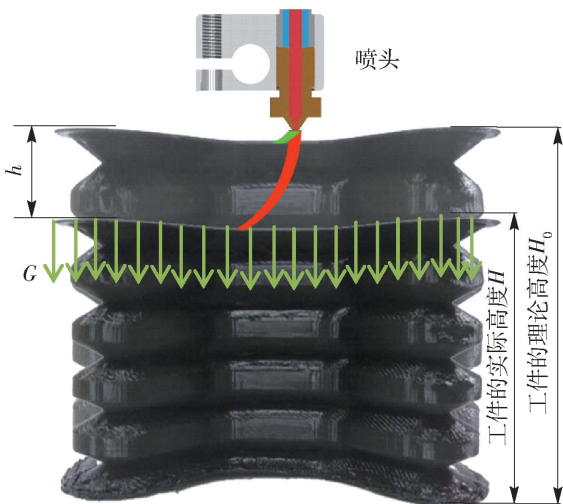


图8 堆料冷却行程 h
Fig.8 Cooling distance of TPU

根据以往对其他材料打印参数的设定对应打印效果来看,都是当打印温度在材料适用温度的高值时,粘连效果最好且纹理最细密.但是从表2和图4数据和趋势来看,随着打印温度的升高,其粘连效果却出现了先变好后变坏的现象.经过分析,该现象发生的原因应当为:打印温度较低时,虽然被打印件冷却速度快,底部受重力产生的压缩量较小,但是低温下料丝不能够充分熔融粘合,因此不粘连率较高.随着温度的升高,材料融化效果更好,以至于在打印过程中粘连的更致密,但同时,过高的打印温度会使工件在每一层堆叠打印过程中经历更长的冷却时间,在堆料完全冷却前,其材料刚度较低,从而受到重力的影响更大,产生更多的压缩,经过几百层的积累后,压缩量越来越大,使得被打印件的顶部逐渐远离喷头,最终产生不粘连的现象,反而降低了打印效果.因果关系如图9所示.

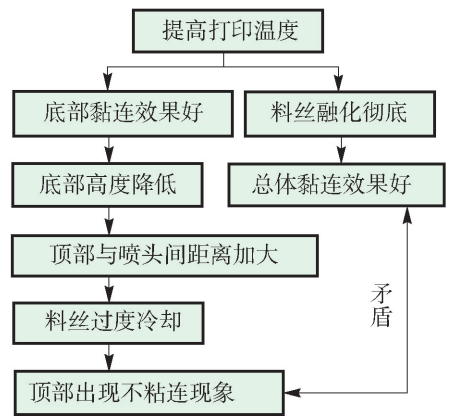


图9 打印温度的提高对打印效果的影响
Fig.9 Consequence of the temperature increase

6 解决方案及效果

6.1 避免产生不粘连现象的方法

对已有样本参数进行分析后,发现不同参数都是通过影响工件压缩量从而影响工件的打印效果的,因此,要减少不粘连现象的发生,就需要减少工件在打印过程中受重力作用产生的压缩量.通过分析,可以得出几种改进方案来减少工件在打印过程中的压缩量.

6.1.1 设置温差

在打印试件底部时(本打印试件的实际高度与理论打印高度间出现明显高度差时,试件高度大概为40mm),将打印机喷头温度设定在材料最优温度范围(195~210℃)中的低值195℃,就可以保证底

部的压缩量尽量减少.而在打印试件顶部(40 mm 以上)时,将温度设定为试验总结出的最优打印温度 203 ℃.运用这种方法理论上可以通过减少 40 mm 以下部分打印堆料的压缩量来提高整体打印效果.但是,随着打印试件高度的增加,底部受压力影响越来越大,试件整体压缩量也会逐渐变大,这种方法对过高的试件打印效果改进有限.

6.1.2 增加散热风扇功率

散热风扇是作用是冷却堆叠完成的熔融堆料,使其刚度在堆叠后能够迅速提高.在打印 PLA 等较硬材料时,通常将风扇功率设定为 60%,这种功率下材料内部既能够以较快速度冷却,同时又不会使表面迅速凝结,产生较重的打印纹理.TPU 材料与 PLA 不同,它的比热容比 PLA 更大,散热更慢,如果熔融的料丝不及时得到冷却,打印试件高度的压缩量也会很明显,因此需要将散热风扇调到 100% 满功率运行,以快速冷却堆叠完成的料层,从而减少压缩量.这样既能使试件的外形尺寸精度得到保证,又能为下一层堆料提供更坚实的打印基础.

6.1.3 添加支撑与后加工

为了减少本工件柔性臂外壳在打印过程中受重力的影响,只依靠调节打印温度来控制压缩量是比较困难的,适当添加表面支撑也是减少压缩量的关键.在以往打印 PLA 和 ABS 等刚性材料时,表面支撑的作用主要是对斜面和模型顶部形成支撑,防止在打印过程中下一层堆料无法牢固黏结在上一层堆料之上.表面支撑一般为回型分布,在工件打印完成后可以从表面剥离.相似地,在打印 TPU 等柔性材料时也可以通过增加内表面支撑的方式来提高打印效果,但是其原理和与对普通刚性零件的斜面支撑不同.在打印柔性材料时,表面支撑的作用主要是让褶皱之间形成一个较稳定的支撑立面,从而减少工件在打印过程中受重力影响而产生的压缩,以此来提高打印效果.

6.2 效果对比

3 种方案都是从不同角度减少工件压缩量来保证打印效果的,为了充分体现出不同优化方法对实际打印效果的影响,独立运用不同方法对原试件进行打印,并分别将打印效果与默认设置时(203 ℃)的打印效果进行对比.由于不粘连现象一般集中出现在试件高度高于 50 mm 时,取打印完成的 4 个试件在 50 mm 高度以上时不粘连率的累加值绘制效果对比,如图 10 所示.

从试验结果可以看出:

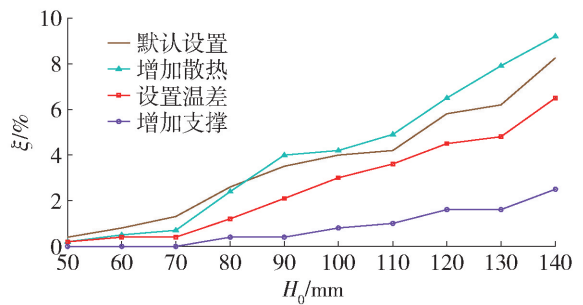


图 10 不同优化方法效果对比

Fig. 10 Comparison of final effect by different optimization methods

1) 添加表面支撑的方法对减少不粘连概率的发生效果最明显,能够将不粘连率总体下降 5.7% 左右.但是随着打印高度的增加,不粘连率也稍有增加.这个现象是合理的,因为尽管添加了表面支撑,提高了试件在垂直方向的刚性,但是柔性材质受重力产生的压缩还是不可避免.这种方法还有一个缺点:TPU 的表面支撑很柔软,不能像 PLA 等材料的支撑一样在打印完成后受力脆性断裂,另外,支撑与打印表面黏合力较强,在去除过程中很容易撕开外壳表面.

2) 将散热风扇开启,在打印到 80 mm 之前是有一定效果的,但是随着打印高度的增加,该方法却显现出了一定的副作用.通过分析,这种现象产生的原因可能为:由于增加了散热效果,试件底部可以迅速冷却,刚度迅速得到提升,受重力而产生的压缩量相应减少,因此最上层表面就会更晚地远离喷头,打印效果得到提高.但是重力使试件产生压缩不可避免,最终喷头还是会逐渐远离最上层表面,而散热风扇又会迅速地使料丝冷却,以至于料丝在下落过程中就已经冷却到失去了黏性.因此,该方法适合在试件出现明显压缩前使用.

3) 设置温差的方法也是通过减少试件底部的压缩量来提高整体打印效果的.利用这种方法可将不粘连率总体下降 1.7%.在试件受重力影响出现明显压缩前,其效果和开启散热风扇的效果相近.随着打印高度的不断增加,压缩量逐渐增大,试件顶部逐渐远离喷头,由于打印温度较高,料丝的黏性会更好,因此在后期打印效果会比只增加散热的打印效果更好.

7 结论

1) 不粘连现象一般是由于喷头顶与上层表面接触不佳导致的,随着打印高度的增加,外壳的压

缩量随之增加,不粘连率也在增大. 据此可以证实:随着压缩量的增加,喷头逐渐远离上层表面,最终导致了不粘连现象的发生.

2) 通过减少工件的压缩量,可以有效地降低不粘连率,应用设置温差、增加表面支撑、增加散热风扇功率等方式都能够在不同程度上减少工件的压缩量,最终达到提高打印效果的目的.

3) 添加表面支撑的方法可以最大程度上减少工件的压缩量从而降低不粘连率,打印效果在所有优化方案中也是最好的,这也直接验证了通过减少工件压缩量来降低不粘连率是可行的.

4) 本试验的打印周期较长,每一组样本的完成都要经历数小时,在有限的时间里,无法将试验参数的变化范围设定得更多更精确. 未来可以结合响应曲面法等参数值优选方法对试验进行设计,得到最优的参数取值区,减少试验样本采集时间.

参考文献:

[1] 李彦生, 尚奕彤, 袁艳萍, 等. 3D 打印技术中的数据文件格式[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(7): 1009-1016.
LI Y S, SHANG Y T, YUAN Y P, et al. File formats of 3D printing technology[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(7): 1009-1016. (in Chinese)

[2] 黄树槐, 张祥林, 马黎, 等. 快速原型制造技术的进展[J]. 中国机械工程, 1997, 8(5): 8-12.
HUANG S H, ZHANG X L, MA L, et al. State of the art in worldwide rapid prototyping manufacturing[J]. China Mechanical Engineering, 1997, 8(5): 8-12. (in Chinese)

[3] 黄树槐, 肖跃加, 莫健华, 等. 快速成形技术的展望[J]. 中国机械工程, 2000, 11(2): 195-200.
HUANG S H, XIAO Y J, MO J H, et al. Development of ultra-precision manufacturing and its key technologies[J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(2): 195-200. (in Chinese)

[4] 刘光富, 李爱平. 快速成形与快速制模技术[M]. 上海: 同济大学出版社, 2004: 18-25.

[5] 孙镇镇. 3D 打印材料及其发展问题与趋势[J]. 中国粉体工业, 2016(1): 4-6.
SUN Z Z. 3D printing materials and their development problems and trends[J]. Chinese Powder Industry, 2016(1): 4-6. (in Chinese)

[6] 张晓敏, 郭奕斌. 3D 打印技术在遗传性骨病治疗的应用与展望[J]. 分子诊断与治疗杂志, 2014(1): 47-51.
ZHANG X M, GUO Y B. Application and outlook of 3-

dimensional printing technology in the treatment of hereditary osteopathy[J]. Journal of Molecular Diagnosis and Therapy, 2014(1): 47-51. (in Chinese)

[7] 常昱茜. 3D 打印技术的优势分析及应用范围[J]. 科学导报, 2016(4): 265.
CHANG Y Q. Advantage analysis and application range of 3D printing technology [J]. Science Herald, 2016(4): 265. (in Chinese)

[8] 孙柏林. 试析“3D 打印技术”的优点与局限[J]. 自动化技术与应用, 2013, 32(6): 1-6.
SUN B L. Analysis of the advantages and limitations of 3D printing technology [J]. Techniques of Automation and Application, 2013, 32(6): 1-6. (in Chinese)

[9] RAYNER A. Making guns at home: ready, print, fire [N]. The Economist, 2013-05-03(1).

[10] BOBBLEHEADS. 3D-print your face in chocolate for that special Valentine's Day gift [N]. The Guardian, 2013-01-04(1).

[11] SCANS E M. 3D printing technique: US patent, No. 5204055[P]. 1993-06-16.

[12] SACHS E, CIMA M, WILLIAMS P, et al. Three dimensional printing: rapid tooling and prototypes directly from a CAD model [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1990, 39(1): 201-204.

[13] 杜宇雷, 孙菲菲, 原光, 等. 3D 打印材料的发展现状[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2014, 29(1): 20-24.
DO Y L, SUN F F, YUAN G, et al. Development status of 3D printing materials[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2014, 29(1): 20-24. (in Chinese)

[14] 余冬梅, 方奥, 张建斌. 3D 打印材料[J]. 金属世界, 2014(5): 6-13.
YU D M, FANG A, ZHANG J B. 3D print material[J]. The Word of Metal, 2014(5): 6-13. (in Chinese)

[15] 弘成海, 王晓东, 刘边楠. 增韧 POM 材料[J]. 延边大学学报(自然科学版), 2002, 28(1): 67-71.
HONG C H, WANG X D, LIU B N. Study on toughen POM [J]. Journal of Yanbian University (Natural Science), 2002, 28(1): 67-71. (in Chinese)

[16] 任树岭. 热塑性聚氨酯注塑成型制品不良原因及处理方法[J]. 聚氨酯工业, 2005, 20(2): 34-37.
REN S L. The cause and treating measures of thermoplastic polyurethane injection moulding failing products[J]. Polyurethane Industry, 2005, 20(2): 34-37. (in Chinese)

[17] 蒋玉新. 浅谈热塑性聚氨酯的注塑工艺性能[J]. 聚氨酯工业, 1999(1): 32-34.

- JIANG Y X. Brief reference to injection molding characters of thermoplastic polyurethane [J]. Polyurethane Industry, 1999(1): 32-34. (in Chinese)
- [18] 黄立本, 张立基, 赵旭涛. ABS树脂及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 1-2.
- [19] 张传贤. 兰州石化公司ABS树脂研究开发历程[J]. 石化技术与应用, 2003, 21(1): 29-36.
- ZHANG C X. Research and development process of ABS resin [J]. Petrochemical Technology and Application, 2003, 21(1): 29-36. (in Chinese)
- [20] 林志勇, 张欣颖, 付愉, 等. ABS树脂国内市场回顾与展望[J]. 弹性体, 2007, 17(2): 81-84.
- LI Z Y, ZHANG X Y, FU Y, et al. Retrospect and prospect of ABS resin in domestic market[J]. Elastomer, 2007, 17(2): 81-84. (in Chinese)
- [21] 陆书来, 罗丽宏, 何琳, 等. ABS树脂的技术概况和发展趋势[J]. 化工科技, 2003, 11(5): 55-59.
- LU S L, LUO L H, HE L, et al. Technical survey and developing trend of absresin [J]. Science & Technology in Chemical Industry, 2003, 11(5): 55-59. (in Chinese)
- [22] 彭瑾. PLA-PEG-PLA载药缓释微球的研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
- PENG J. Research of drug sustained-release microspheres based on PLA-PEG-PLA [D]. Chengdu: Sichuan University, 2005. (in Chinese)
- [23] 沈学友. 新型绿色包装材料——聚乳酸[J]. 包装世界, 2005(1): 59.
- SHEN X Y. A new type of green packaging material—polylactic acid [J]. Packaging World, 2005(1): 59. (in Chinese)
- [24] 李樾. 热塑性聚氨酯弹性体性能的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2010.
- LI Y. The study on theroplastic polyurethane [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2010. (in Chinese)
- [25] 化信. 新型超柔 SantopreneTPE[J]. 化工新型材料, 2005(7): 69.
- HUA X. Advanced elastomer SantopreneTPE [J]. New Chemical Material, 2005(7): 69. (in Chinese)
- [26] 刘伯元. 热塑性弹性体 TPE、TPU 和 TPV 的研究及市场开发[J]. 闽江学刊, 2004(3): 22-27.
- LIU B Y. Research and market development of thermoplastic elastomer TPE, TPU and TPV [J]. Journal of Yuejiang, 2004(3): 22-27. (in Chinese)
- [27] 王彩梅, 张卫平, 李志疆. 3D打印在医疗器械领域的应用[J]. 生物骨科材料与临床研究, 2013, 10(6): 26-28.
- WANG C M, ZHANG W P, LI Z J. The application of 3D printing in medical device field [J]. Orthopaedic Biomechanics Materials and Clinical Study, 2013, 10(6): 26-28. (in Chinese)
- [28] 王安琪, 冯晓明, 杨昭鹏, 等. 3D打印在医疗器械领域的应用现状及展望[J]. 中国医疗器械信息, 2014(8): 1-7.
- WANG A Q, FENG X M, YANG Z P, et al. Development and advances of additive manufacturing in medical devices [J]. China Medical Equipment Information, 2014(8): 1-7. (in Chinese)
- [29] 管吉, 杨树欣, 管叶, 等. 3D打印技术在医疗领域的研究进展[J]. 中国医疗设备, 2014, 29(4): 71-72.
- GUAN J, YANG S X, GUAN Y, et al. Research progress of 3D printing technology in medical domain [J]. China Medical Equipment, 2014, 29(4): 71-72. (in Chinese)
- [30] LICHTENSTEIN J T, ZELLER A N, LEMOUND J, et al. 3D-printed simulation device for orbital surgery[J]. Journal of Surgical Education, 2017, 74(1): 2-8.
- [31] ERNOULT C, BOULETREAU P, MEYER C, et al. Reconstruction assisted by 3D printing in maxillofacial surgery[J]. Journal of Stomatology, Maxillo Facial and Oral Surgery, 2015, 116(2): 95-102.
- [32] BAUERMEISTER A J, ZURIARRAIN A, NEWMAN M I. Three-dimensional printing in plastic and reconstructive surgery: a systematic review [J]. Annals of Plastic Surgery, 2015, 77(5): 569-576.

(责任编辑 杨开英)