

工艺·设备

套筒接杆护套小总成3D打印工艺的研究

谢嘉诚¹, 杨海威²

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 上汽通用汽车有限公司 整车制造工程部, 上海 200120)

摘要: 动力工具通常带有套筒和接杆, 为避免操作工在紧固操作过程中直接接触旋转的套筒和接杆, 设计了既安全又便于安装的热塑性聚氨酯(TPU)套筒接杆护套小总成。针对套筒接杆护套小总成, 运用SolidWorks和Teamcenter软件进行3D建模与整车环境虚拟评估; 利用3D打印技术制备TPU试样, 通过正交试验方法分析打印工艺参数对试样硬度和拉伸性能的影响, 得到了较为理想的套筒接杆护套小总成3D打印工艺参数组合: 打印层高 0.2 mm, 壁厚 1.2 mm, 打印温度 220 °C, 打印速度 35 mm·s⁻¹。在该优化工艺条件下打印的套筒接杆护套小总成满足使用要求。

关键词: 套筒; 接杆; 护套; 3D打印; 热塑性聚氨酯

中图分类号: TQ330.6⁺6

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2024)04-0293-06

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2024.04.0293



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

近年来, 增材制造技术在各领域不断发展。增材制造也称3D打印, 是一种以数模为基础, 采用各种耗材, 例如聚乳酸(PLA)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)树脂、热塑性聚氨酯(TPU)等, 根据层层堆叠的原理制造实体零件的技术^[1-2]。熔融沉积成型(Fused Deposition Modeling, FDM)是一种通过加热热塑性材料至其软化温度并挤出, 从下往上叠加成型的制造工艺。一般打印流程包含数模导入、数模处理、调整工艺参数、打印切片、模型后处理等多个步骤。

对于3D打印工艺参数, 迟百宏等^[3]通过正交试验发现, 打印层高、填充角度以及打印温度对试样力学性能都有影响, 影响程度从大到小的排序为打印温度、打印层高、填充角度。朱彦博等^[4]对TPU软材料性能和层间粘合研究表明: TPU软材料可以支持FDM模式3D打印, 且打印层高对打印型件的影响较大, 打印层高越大, 打印层间粘接面积越小, 型件易变形; 打印层高越小, 打印层间粘接面积越大, 型件不易变形。此外, 采用TPU软材料打印的型件具有良好的回弹性和可弯折性。

李婷婷等^[5]研究指出, TPU护套材料表现出优异的抗撕裂性能, 老化后力学性能没有显著的变化。贾郑铭^[6]研究了TPU硬度对摩擦性能的影响, 其中邵尔A型硬度为70度的TPU具有良好的延展性。C. H. LEE等^[7]研究了TPU蜂窝式气垫与PLA无纺布相结合的力学性能, 结果表明: TPU蜂窝式气垫型材具有优异的抗冲击性, 可用于冲击保护。C. YANG等^[8]使用ANSYS有限元软件对PLA/TPU并用材料进行模拟分析, 发现其具有良好的减震性能。岳敏等^[9]调查发现, 国内外已经应用3D打印技术成功打印出球鞋、自行车轮胎和汽车轮胎等弹性体制品。总体而言, 虽然人们对TPU材料的力学性能进行了一定的研究, 但是在探究其工艺影响因素方面仍然不足。

动力工具通常带有套筒和接杆, 为避免操作工在紧固操作过程中直接接触旋转的套筒和接杆, 制备既安全又便于安装的套筒接杆护套小总成尤为重要。本工作对套筒接杆护套小总成的3D打印工艺进行研究, 以期制备其他类型的护套小总成提供参考。

作者简介: 谢嘉诚(1996—), 男, 上海人, 同济大学在职硕士研究生, 主要从事汽车总装工艺的研究。

E-mail: 780318776@qq.com

引用本文: 谢嘉诚, 杨海威. 套筒接杆护套小总成3D打印工艺的研究[J]. 橡胶工业, 2024, 71(4): 293-298.

Citation: XIE Jiacheng, YANG Haiwei. Research on 3D printing process for sleeve and extension sheath small assembly[J]. China Rubber Industry, 2024, 71(4): 293-298.

1 FDM适用耗材和套筒接杆护套小总成简介

1.1 常见的两种FDM适用耗材

(1) ABS树脂。ABS树脂历史悠久,其强度高、柔韧性好、机械加工性能和耐热性能优异,外观呈不透明象牙色,在常温下无毒、无味、吸水率低,可着成各种颜色,并具有90%的高光泽度,是制作工程机械零部件优先使用的材料。目前,ABS树脂仍然是大型FDM技术3D打印机的主要打印材料。ABS树脂的缺点是在打印过程中会产生气味,毒性高于PLA^[10],而且由于其冷收缩性,在打印过程中型件易与打印平台脱离,因此打印过程中需要有加热底板和恒温封闭仓。

(2) TPU。TPU是介于橡胶与塑料之间的一种热塑性弹性体,具有高张力、高拉力、强韧和耐老化等特性。J. H. XIAO等^[11]研究表明,采用FDM技术制备的具有最佳力学性能的TPU试样的拉伸强度为46.7 MPa,拉断伸长率为702%。

相对ABS树脂,TPU具有高弹性、可形变的特征,其套筒接杆护套小总成适合在现场安装和调试;ABS较为坚硬,其套筒接杆护套小总成不便于现场安装调试和拆卸。

1.2 套筒接杆护套小总成

(1) 套筒及护套。套筒指的是紧固或松卸螺栓和螺母的一种专用工具的一部分。通常内六棱型套筒与连接套筒的动力工具构成一个整体,套筒的内六棱根据螺栓和螺母而定。套筒护套是指套在套筒外壁的一层仿形护套。套筒在汽车厂的总装车间内应用十分广泛,几乎每一把动力工具都需要搭配合适的套筒来完成不同的工艺操作。

(2) 接杆及护套。接杆也称为延长杆或加长杆,是套筒类成套工具不可缺少的一部分,加装在套筒与动力工具之间。接杆护套是指套在接杆外壁的一层仿形护套。接杆用于延长动力工具,以便拆卸和更换仅凭套筒和动力工具无法接触的螺栓和螺母,例如汽车总装线整车前舱的部分工位,通过加装长接杆,可提升操作可达性,便于操作。

(3) 套筒接杆护套小总成。套筒接杆护套小总成指的是以套筒护套和接杆护套组成的整个护套总成。套筒和接杆通过销等机械连接组成一个整体。套筒接杆护套小总成的优势为便于安装、

应力分散,可以减少后期更换频次。

采用3D打印技术制作TPU套筒接杆护套小总成安装于动力工具的套筒和接杆上是非常适合的,这是因为当操作工对整车进行紧固操作时,动力工具的套筒和接杆都是高速旋转的,优异的抗撕裂性能可确保护套小总成经久耐用,不易磨损、破坏。

2 三维建模与虚拟评估

2.1 三维建模

2.1.1 套筒护套

采用SolidWorks软件进行建模,设计护套时需要考虑护套内壁的凸起筋便于卡入套筒的凹槽内,同时护套内壁与套筒外壁间应有约0.2 mm间隙,以确保套筒旋转过程中套筒旋转而手握护套不发生跟转,如图1所示。

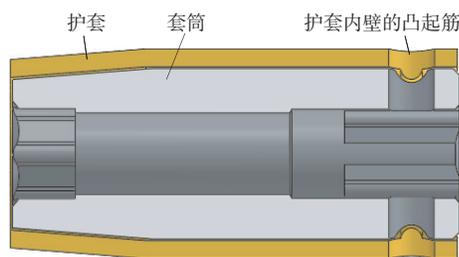


图1 套筒及护套的剖面图

Fig. 1 Section diagram of sleeve and sheath

2.1.2 接杆护套

采用SolidWorks软件进行建模,设计护套时需要考虑护套内壁的凸起筋便于卡入接杆的凹槽内,同时护套内壁与接杆外壁间应有约0.4 mm间隙,以确保接杆旋转过程中接杆旋转而手握护套不发生跟转,如图2所示。

2.2 套筒接杆护套小总成的整车环境虚拟评估

将设计好的套筒接杆护套小总成模型导入

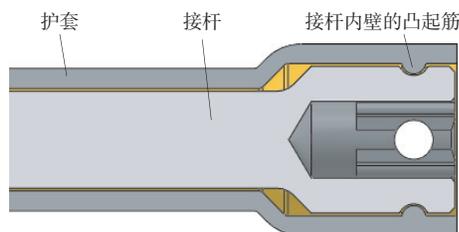


图2 接杆及护套的剖面图

Fig. 2 Section diagram of extension and sheath

Teamcenter软件内,根据整车数模环境,检查在实际工况下护套是否与周边零件存在干涉情况,如图3所示。对目标汽车厂的生产车型进行比对操作后确认,在所有工况下护套都不与整车零件产生干涉。

3 正交试验

3.1 正交试验因子

护套在使用过程中会因操作工握持而与旋转

的接杆接触,从而受到摩擦力的作用,因此需要考虑材料的力学性能。

对于3D打印,需要设置的工艺参数较多,本研究选择打印层高、壁厚、打印温度和打印速度4个关键参数作为正交试验因子进行分析。

打印层高是指打印喷头与打印平台之间的距离^[12],一般打印层高越小,打印层与层之间连接越紧密,打印质量越好,但打印时间会延长。

壁厚是指型件内外表面之间需要打印填充的

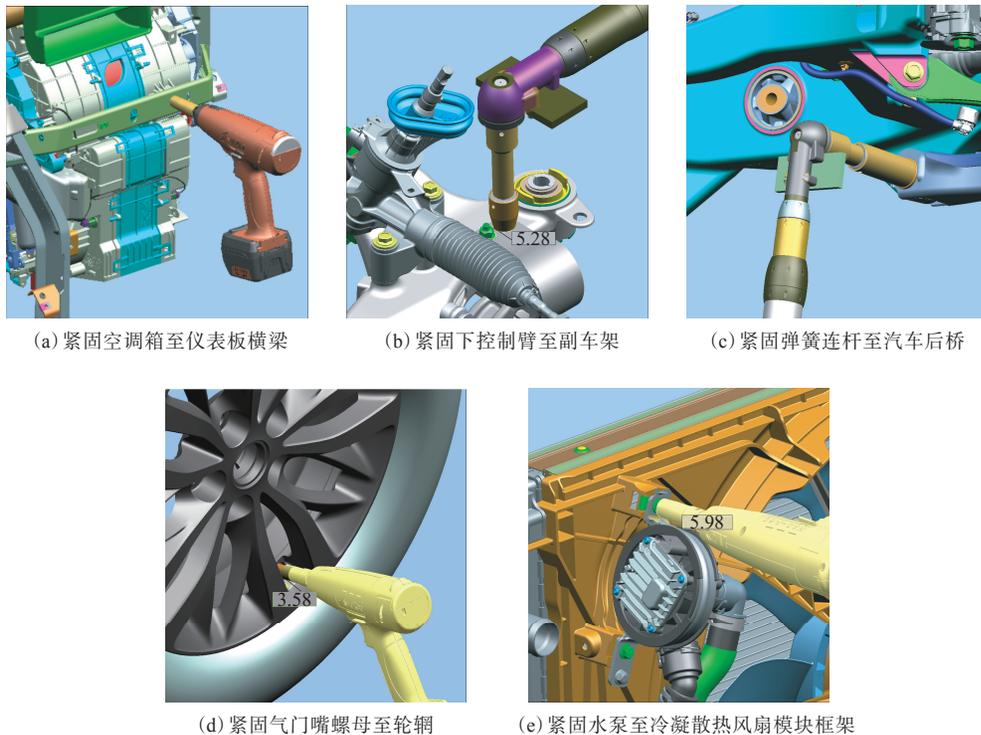


图3 套筒接杆护套小总成与周边零件的干涉情况

Fig. 3 Interferences between sleeve and extension sheath small assemblies and surrounding parts

厚度。

打印温度是指喷头传递给打印耗材的温度,打印喷头通常是金属材料,导热性佳,打印喷头的作用是用来融化丝状耗材的。

打印速度是指打印喷头移动的速度,通常打印速度越高,打印时间越短,但打印质量也会受到一定影响。

3.2 正交试验方案

由于所选关键参数较多,采用正交试验方法进行试验,设计了四因子三水平正交试验表:打印层高水平1—3分别为0.1,0.2,0.3 mm,壁厚水平1—3分别为0.4,0.8,1.2 mm,打印温度水平1—3

分别为220,230,240 °C,打印速度水平1—3分别为30,35,40 mm·s⁻¹。正交试验方案如表1所示,一共存在9组不同的工艺参数组合,分别对打印试样进行硬度测试和拉伸试验。

3.3 正交试验结果与讨论

3.3.1 硬度测试分析

采用LX-DS型邵氏硬度计,遵循GB/T 2411—2008^[13]制备试样并进行测试。实验室温度为21~22 °C,湿度为52%~53%,所有试样均在室温环境下静置超过24 h。每个试样选取A—E 5个点进行邵尔D型硬度的测试,然后计算平均值并换算为邵尔A型硬度,结果如表2所示。

表1 正交试验方案

试验方案	打印层高/ mm	壁厚/mm	打印温 度/°C	打印速度/ (mm · s ⁻¹)
1	0.1	0.4	220	30
2	0.1	0.8	240	35
3	0.1	1.2	230	40
4	0.2	0.4	240	40
5	0.2	0.8	230	30
6	0.2	1.2	220	35
7	0.3	0.4	230	35
8	0.3	0.8	220	40
9	0.3	1.2	240	30

表2 试样的硬度测算结果

试验 方案	邵尔D型硬度						邵尔A型 硬度
	A	B	C	D	E	平均值	
1	28.5	27.5	23.0	23.5	32.5	27.0	91.25
2	33.5	33.0	33.5	32.5	37.0	33.9	92.44
3	28.0	31.0	32.5	31.0	29.5	30.4	91.84
4	22.0	28.5	25.5	28.5	22.5	25.4	90.97
5	29.0	28.5	30.0	32.5	28.0	29.6	91.70
6	26.0	24.5	25.0	27.0	27.0	25.9	91.06
7	31.0	31.0	32.5	32.0	33.5	32.0	92.12
8	28.5	33.5	33.0	26.5	32.5	30.8	91.91
9	34.5	35.5	35.5	37.0	38.0	36.1	92.83

从表2可以看出,试样的邵尔D型硬度平均值从高到低的前3个试验方案排序为9,2,7,该3个试验方案对应试样的邵尔A型硬度分别为92.83,92.44和92.12度。

对试样的邵尔D型硬度进行正交试验分析,结果如表3所示。

表3 各因子水平试样的邵尔D型硬度平均值

因 子	水平		
	1	2	3
打印层高	30.43	26.97	32.97
壁厚	28.13	31.43	30.80
打印温度	27.90	30.67	31.80
打印速度	30.90	30.60	28.87

从表3可以看出,试样的邵尔D型硬度平均值从高到低的因子水平排序为:打印层高 0.3,0.1,0.2 mm,壁厚 0.8,1.2,0.4 mm,打印温度 240,230,220 °C,打印速度 30,35,40 mm · s⁻¹。

3.3.2 拉伸试验分析

采用QJ211S-10 kN型万能拉伸试验机,遵循

GB/T 1040.2—2022^[14]制备试样并进行测试。每个试验方案制备3个试样,均在拉伸标距25 mm、拉伸速度500 mm · min⁻¹下拉伸,拉伸前均设置0.5 N的力消除弹性体与夹具头之间的应力,结果取平均值。

分析试验数据得到:试样的拉伸强度从大到小的前3个试验方案排序为5,3,6,这3个试验方案试样的拉伸强度分别为17.12,17.10,16.96 MPa;试样的拉断伸长率从大到小的前3个试验方案排序为6,7,2,这3个试验方案试样的拉断伸长率分别为478.77%,474.62%,464.96%。

由此可见,在有效试验方案试样内,拉伸强度和拉断伸长率最大的是试验方案6试样。

对试样的拉伸强度进行正交试验分析,结果如表4所示。

表4 各因子水平试样的拉伸强度平均值

因 子	水平		
	1	2	3
打印层高	15.56	16.47	13.24
壁厚	14.19	16.34	17.03
打印温度	15.49	15.82	15.44
打印速度	15.57	15.25	16.21

从表4可以看出,试样的拉伸强度从大到小的因子水平排序为:打印层高 0.2,0.1,0.3 mm,壁厚 1.2,0.8,0.4 mm,打印温度 230,220,240 °C,打印速度 40,30,35 mm · s⁻¹。

综上所述,方案6工艺参数组合(打印层高 0.2 mm,壁厚 1.2 mm,打印温度 220 °C,打印速度 35 mm · s⁻¹)较为理想。

4 成品试验

4.1 强度模拟分析

经过上述试验确定护套的最佳3D打印工艺参数后,对套筒护套和接杆护套分别施加350 r · min⁻¹的顺时针离心力角速度(动力工具的常见转速,保证紧固件的紧固性能),进行强度模拟分析,结果分别如图4和5所示。

从图4和5可以看出,套筒护套和接杆护套的强度分布较为接近,强度最大值均出现在末端。

由于仿真模拟得到的套筒护套和接杆护套的

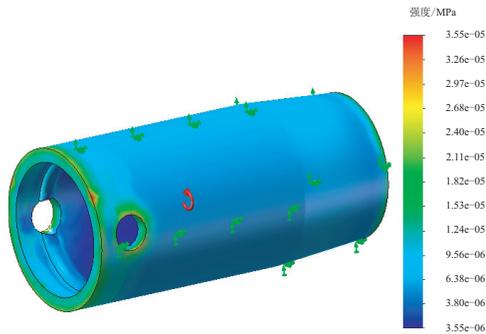


图4 套筒护套的强度仿真结果

Fig. 4 Simulation result of strengths of sleeve sheath

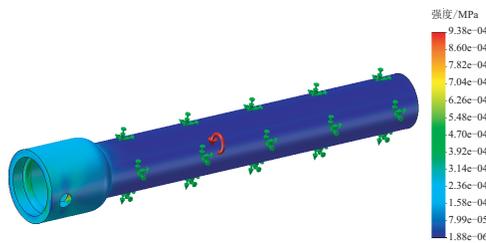


图5 接杆护套的强度仿真结果

Fig. 5 Simulation result of strengths of extension sheath

强度均远小于拉伸试验得到的最佳3D打印试验方案6试样的强度(16.96 MPa),因此3D打印套筒接杆护套小总成能满足使用要求。

4.2 尺寸精度测量

将优选出的最佳工艺参数导入3D打印切片软件并批量试制套筒接杆护套小总成,对成品进行尺寸测量,部分结果如表5所示。

表5 套筒护套的3D打印尺寸

Tab. 5 3D printing sizes of sleeve sheaths mm

项 目	内直径 (顶部)	外直径 (顶部)	总长	销子孔 直径	内直径 (底部)	外直径 (底部)
试件1	17.13	21.26	50.65	5.12	19.53	23.27
试件2	17.22	21.23	50.64	5.08	19.58	23.24
试件3	17.41	21.24	50.72	5.03	19.45	23.21
试件4	17.42	21.23	50.74	5.15	19.43	23.18
试件5	17.18	21.08	50.76	5.13	19.63	23.10
试件6	17.27	21.38	50.63	5.13	19.49	23.31
试件7	17.16	21.36	50.73	5.12	19.54	23.39
试件8	17.15	21.22	50.75	5.23	19.33	23.07
试件平均值	17.24	21.25	50.70	5.12	19.50	23.22
数模理论值	17.12	21.16	50.79	5.23	19.53	23.56

从表5可以看出,套筒接杆护套小总成中套筒护套的3D打印尺寸平均值相对数模理论值的公差基本控制在 ± 0.2 mm,满足设计尺寸精度要求。

4.3 车间验证

在某汽车总装车间和分装车间进行套筒接杆护套小总成的安装和调试,其需满足安装便利和使用安全等要求。经车间反馈,该TPU套筒接杆护套小总成形变特性好,较为柔软,便于直接安装于套筒和接杆表面;手握护套操作时护套不随套筒或接杆本体旋转,安全性达标,其使用寿命超过3个月。

5 结论

通过四因子三水平正交试验研究了3D打印工艺参数打印层高、壁厚、打印温度和打印速度对TPU试样的硬度和拉伸性能的影响。

(1) 试样的硬度平均值从高到低的各因子水平排序为打印层高 0.3, 0.1, 0.2 mm, 壁厚 0.8, 1.2, 0.4 mm, 打印温度 240, 230, 220 $^{\circ}\text{C}$, 打印速度 30, 35, 40 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$; 试样的邵尔A型硬度最大值为92.83度。试样的拉伸强度从大到小的各因子水平排序为打印层高 0.2, 0.1, 0.3 mm, 壁厚 1.2, 0.8, 0.4 mm, 打印温度 230, 220, 240 $^{\circ}\text{C}$, 打印速度 40, 30, 35 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$; 试样的拉伸强度最大值为17.12 MPa, 拉断伸长率最大值为478.77%。较为理想的套筒接杆护套小总成打印工艺参数组合为打印层高 0.2 mm, 壁厚 1.2 mm, 打印温度 220 $^{\circ}\text{C}$, 打印速度 35 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(2) 套筒接杆护套小总成在汽车总装车间、分装车间投产应用证明,3D打印公差基本控制在 ± 0.2 mm,产品使用寿命不短于3个月。

参考文献:

- [1] 刘峰. FDM成型关键装备及工艺试验研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2017.
LIU F. Experimental study on key equipment and process of FDM technology[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2017.
- [2] 王龙, 白海清, 李超凡, 等. 聚丙烯3D打印剪切螺帽设计及仿真分析[J]. 塑料科技, 2023, 51(8): 98-102.
WANG L, BAI H Q, LI F C, et al. Design and simulation analysis of a polypropylene 3d printed shear screw[J]. Plastics Science and Technology, 2023, 51(8): 98-102.

- [3] 迟百宏, 马昊鹏, 刘晓军, 等. 3D打印参数对TPU制品力学性能的影响[J]. 塑料, 2017, 46(2): 9-12.
CHI B H, MA H P, LIU X J, et al. The influence of 3D printing process parameters on the mechanical behavior of TPU products[J]. *Plastics*, 2017, 46(2): 9-12.
- [4] 朱彦博, 杜森, 陆超华, 等. 3D打印TPU软材料工艺参数对层间粘接的影响[J]. 高分子学报, 2018(4): 532-540.
ZHU Y B, DU M, LU C H, et al. Influence of 3D printing parameters on the interlayer bonding strength for TPU soft materials[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2018(4): 532-540.
- [5] 李婷婷, 韦一力, 吴芳芳, 等. 电动汽车直流充电枪电力电缆材料性能测试与评价[J]. 浙江电力, 2021, 40(1): 67-71.
LI T T, WEI Y L, WU F F, et al. Testing and evaluation on power cable material properties of electric vehicle DC charging gun[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2021, 40(1): 67-71.
- [6] 贾郑铭. 热塑性聚氨酯水润滑轴承材料的摩擦学性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.
JIA Z M. Study on tribological properties of thermoplastic polyurethane water-lubricated bearing materials[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2021.
- [7] LEE C H, LOU C W, HSING W H, et al. Thermoplastic polyurethane (TPU) honeycomb air cushion combined with polylactic acid (PLA) nonwoven fabric for impact protection[J]. *Advanced Materials Research*, 2008, 55-57: 401-404.
- [8] YANG C, VORA H, CHANG Y B. Application of auxetic polymeric structures for body protection[C]. *Proceedings of ASME 2016 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*. USA: Stowe, 2016: 1-5.
- [9] 岳敏, 李红伟, 李海燕. 3D打印在弹性体领域的应用[J]. 橡胶工业, 2019, 66(10): 795-798.
YUE M, LI H W, LI H Y. The application of 3D printing in the field of elastomers[J]. *China Rubber Industry*, 2019, 66(10): 795-798.
- [10] WOJTYLA S, KLAMA P, BARAN T. Is 3D printing safe? Analysis of the thermal treatment of thermoplastics: ABS, PLA, PET, and nylon[J]. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2017, 14(6): 1-21.
- [11] XIAO J H, GAO Y F. The manufacture of 3D printing of medical grade TPU[J]. *Progress in Additive Manufacturing*, 2017, 2(3): 117-123.
- [12] 谢仁古丽·麦提图尔荪, 李楠, 乌日开西·艾依提. 3D打印工艺参数对TPU试样力学性能的影响[J]. 机电工程技术, 2023, 52(3): 30-33.
XIERENGULI M T T E S, LI N, WURIKAIXI A Y T. Effect of 3D printing process parameters on mechanical properties of TPU samples[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2023, 52(3): 30-33.
- [13] 全国塑料标准化技术委员会. 塑料和硬橡胶 使用硬度计测定压痕硬度(邵氏硬度): GB/T 2411—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [14] 全国塑料标准化技术委员会. 塑料 拉伸性能的测定 第2部分: 模塑和挤塑塑料的试验条件: GB/T 1040. 2—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.

收稿日期: 2023-11-26

Research on 3D Printing Process for Sleeve and Extension Sheath Small Assembly

XIE Jiacheng¹, YANG Haiwei²

(1. Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. SAIC General Motors Co., Ltd, Shanghai 200120, China)

Abstract: Power tools usually come with sleeves and extensions. To avoid direct contact between workers and rotating sleeves and extensions during fastening operations, a thermoplastic polyurethane (TPU) sleeve and extension sheath small assembly was designed to be both safe and easy to install. For the sleeve and extension sheath small assembly, SolidWorks and Teamcenter softwares were used for 3D modeling and virtual assessment of the vehicle environment. TPU samples were trial-produced using 3D printing technology, and through the orthogonal experimental method, the influence of printing process parameters on the hardness and tensile properties of the samples was analyzed, and an ideal combination of 3D printing process parameters of the sleeve and extension sheath small assembly was obtained: printing layer height 0.2 mm, wall thickness 1.2 mm, printing temperature 220 °C, and printing speed 35 mm · s⁻¹. The sleeve and extension sheath small assembly printed under this process condition met the usage requirements.

Key words: sleeve; extension; sheath; 3D printing; TPU