

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.03.015

摩托车金属连接件 ABS 轻量化设计与 FDM 增材制造

唐锋^{1,2}, 熊建武^{1,2}, 胡智清³, 徐文庆³

(1. 湖南工业职业技术学院, 长沙 410208; 2. 复杂薄壁精密零件智能柔性加工技术湖南省工程研究中心, 长沙 410082;

3. 湖南财经工业职业技术学院, 湖南衡阳 421002)

摘要: 针对摩托车金属连接件轻量化需求, 对金属连接件进行了两次轻量化优化设计, 第一次是在满足连接件使用性能的前提下更改连接件材料, 由铝合金更改为丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料 (ABS) 塑料, 此次更改, 实现 60% 的减重; 第二次也是在满足连接件使用性能的基础上采用 Altair Inspire 软件对其进行拓补优化、几何重构及强度校核, 得到适合于 3D 打印的结构, 相对第一次优化后的结构实现 79% 的减重效果, 通过两次轻量化优化设计后连接件相对于原始金属连接件实现了 92% 的减重, 然后通过切片软件设置切片层厚、连接件摆放位置等参数对连接件三维数据进行前处理, 最后通过 3D 打印机实现摩托车连接件 FDM 快速制造, 为摩托车金属零件轻量化设计与制造提供了一种新的思路。

关键词: 金属连接件; 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料; 轻量化; 增材制造; 拓补优化; 熔融沉积

中图分类号: TH391.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)03-0086-05

ABS Lightweight Design of Motorcycle Metal Connector and FDM Additive Manufacturing

Tang Feng^{1,2}, Xiong Jianwu^{1,2}, Hu Zhiqing³, Xu Wenqing³

(1. Hunan Industry Polytechnic, Changsha 410208, China; 2. Hunan Engineering Research Center of Intelligent Flexible Machining Technology for Complex Thin-walled Precision Parts, Changsha 410082, China; 3. Hunan Financial & Industrial Vocational Technical College, Hengyang 421002, China)

Abstract : Aiming at the lightweight requirement of motorcycle metal connectors, two times of lightweight optimization design of metal connectors were carried out, the first time was to change the materials of the connectors under the condition of satisfying the service performance of the connectors, change from aluminum alloy to acrylonitrile butadiene styrene (ABS) plastic, this change, to achieve 60% weight loss; The second time, the structure was optimized, geometrically reconstructed and strength checked by using Altair Inspire software to obtain a structure suitable for 3D printing, compared with the structure optimized for the first time, 79% weight reduction was achieved. Through two times of light weight optimization design, the connector realized 92% weight reduction compared with the original metal connector, then, the 3D data of the connectors are pre-processed by setting the thickness of the slices and the position of the connectors by the slicing software. Finally, the motorcycle connector FDM is rapidly manufactured by the 3D printer, it provides a new idea for the lightweight design and manufacture of motorcycle metal parts.

Keywords : metal fitting; acrylonitrile butadiene styrene; lightweight; additive manufacturing; topology optimization; fused deposition

轻量化是制造业领域的一个重要研究方向, 同时也是设计者不断追求的目标^[1], 轻量化可以降低汽车、飞机的燃油消耗, 可以降低航空飞船的发射成本, 目前实现轻量化的主要方法有以下两种: 一是

使用轻质材料, 如钛合金、铝合金、镁合金、高分子材料、复合材料等, 二是使用轻量化结构, 如中空结构、蜂窝结构、薄壁结构、一体化结构、镂空点阵结构等^[2]。增材制造技术的快速发展促进了产品轻量化

基金项目: 湖南省教育厅科学研究项目 (21C1065), 湖南省“十四五”教育科学规划课题 (ND214247), 湖南工业职业技术学院校级课题 (GYKYYJ202005)

通信作者: 熊建武, 硕士, 教授、高级工程师, 主要从事机械设计制造、职业教育研究

收稿日期: 2022-02-12

引用格式: 唐锋, 熊建武, 胡智清, 等. 摩托车金属连接件 ABS 轻量化设计与 FDM 增材制造 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(3):86-90, 112.

Tang Feng, Xiong Jianwu, Hu Zhiqing, et al. ABS lightweight design of motorcycle metal connector and FDM additive manufacturing[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(3):86-90, 112.

技术的广泛研究与应用^[3],由于传统的机械零件受限制于设计制造方式不能做到效能最优,现在可以通过拓扑优化结合增材制造的方式取得零件更优化的材料分布,以较少的材料实现更佳的性能^[4],多年来,零件结构由于加工制造的约束难以对轻量化做出很大的贡献,但基于 3D 打印加工制造方法而进行的自由设计,可以通过多孔结构和晶格结构来对零件的内部结构进行优化,是轻量化设计的一个重要突破^[5],应用点阵结构对零件进行轻量化设计时可以使零件在质量减轻的同时具有比强度高、比刚度高以及断裂韧性强等优良的力学性能,而且可以降低振动和噪声^[6],由此可见,增材制造技术使得轻量化设计“如虎添翼”。

笔者基于熔融沉积 (FDM) 增材制造技术,研究某款摩托车金属连接件的轻量化设计,为增材制造广泛应用于各行各业提供帮助。

1 轻量化设计

采用软件 Altair Inspire 进行摩托车金属连接件轻量化设计,该软件是一款强大的拓补优化软件,帮助设计师快速确定设计方案,从而降低成本、减少开发时间,减轻质量等,真正实现从概念到实现的整个产品开发周期中完成仿真驱动设计^[7-9]。某款摩托车结构部件,如图 1 所示。

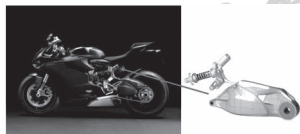


图 1 摩托车连接件

摩托车连接件原材料为铝合金,质量 658.3 g,连接件根据实际的受载情况进行适当的简化调整,主要的载荷来自减震器端和摩托车车架连接端,三组安装孔载荷来表征安装孔的固定情况,如图 2 所示。摩托车连接件丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料 (ABS) 轻量化设计流程,如图 3 所示。

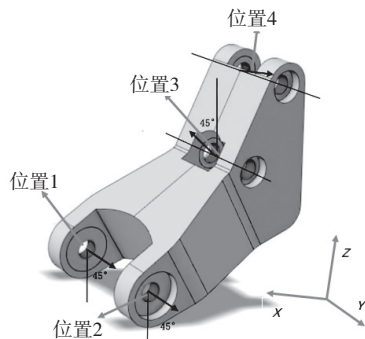


图 2 连接件约束及受载情况

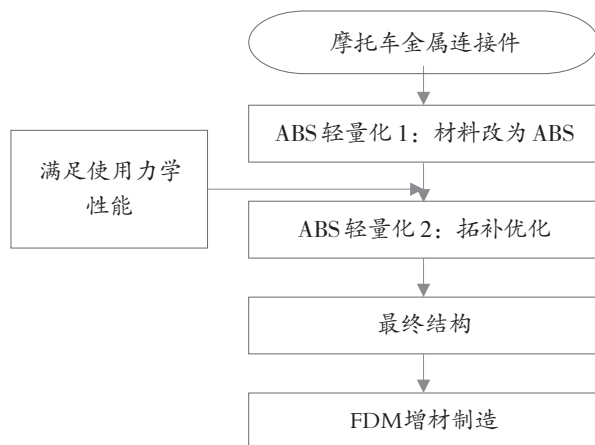


图 3 ABS 轻量化设计流程

1.1 连接件 ABS 轻量化分析

(1) 连接件受力分析。

载荷条件:

位置 1: 350 N, 平行于 XZ 平面, 与 Z 负方向夹角 45°, 方向向量是 $(-0.70711, 0, -0.70711)$;

位置 2: 350 N, 平行于 XZ 平面, 与 Z 负方向夹角 45°, 方向向量是 $(-0.70711, 0, -0.70711)$;

位置 3: 1350 N, 平行于 XZ 平面, 与 Z 正方向夹角 45°, 方向向量是 $(0.70711, 0, 0.70711)$;

位置 4: X 负方向 900 N, 900 N, 平行于 XY 平面, 方向向量是 $(-1, 0, 0)$, 作用点两孔连接中心位置。

ABS 材料的力学参数为: 拉伸弹性模量 2000 MPa、泊松比 0.35、密度 1060 kg/m³、屈服应力 45 MPa。

对摩托车连接件改为 ABS 材料进行强度分析, 设置分析单元尺寸为 2 mm, 计算速度/精度选择“更准确”, 使用“惯性释放”, 对单一载荷工况进行分析。

(2) ABS 轻量化初始强度分析结果。

通过 Inspire 软件进行结构初始强度分析, 得到最大等效应力值、最大位移和最小安全系数^[10-11], 见表 1。由上分析可知, 在满足力学要求的前提下, 摩托车铝合金连接件改为 ABS 材料完全能满足使用性能, 更改 ABS 材料后的连接件质量 258.4 g, 实现了近 60% 的减重^[12]。

表 1 初始强度分析结果

最大等效应力 / MPa	最大位移 / mm	最小安全系数
14.6	0.28	3.1

1.2 拓补优化

为了实现更大程度的减重效果, 对 ABS 连接件进行拓补优化分析^[13-14]。

(1) 指定设计空间。

图 4 为拓扑优化设计空间。指定摩托车 ABS 连接件主体部分为设计空间,如图 4 中的标识部位。零件的安装孔位及周边区域为非设计空间,如图 4 中的其余部分。

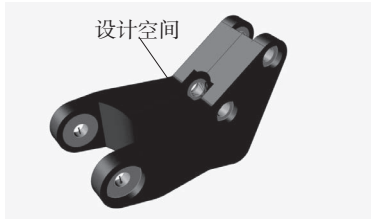


图 4 拓扑优化设计空间

(2) 优化形状控制设定。

所优化的零件为对称结构,因此设计空间设定为对称的形状控制,且选择 XZ 平面作为形状控制平面,如图 5 所示。

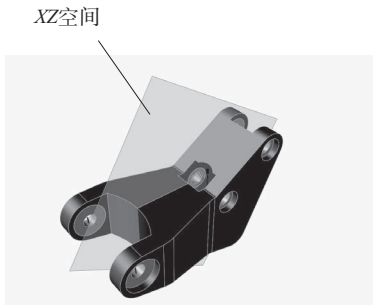


图 5 形状控制

(3) 优化参数设置。

为探索最优设计结果,分别以最大刚度和最小质量作为优化目标制定优化方案。以最大刚度为优化目标时,其质量目标分别设定为 10%,15%,20% 和 30%;以最小质量作为优化目标时,其最小安全系数分别设定为 0.9,1,1.2 和 1.3。UPBox 可打印的最小圆柱尺寸为 2 mm,因此为提高后期 3D 打印的成功率,将厚度约束设置为 5 mm。不同优化方案详细的优化参数列于表 2。

表 2 拓扑优化方案

优化方案	优化目标	质量目标 /%	最小安全系数	厚度约束 /mm
方案 1	最大刚度	10		5
方案 2	最大刚度	15		5
方案 3	最大刚度	20		5
方案 4	最大刚度	30		5
方案 5	最小质量		0.9	5
方案 6	最小质量		1	5
方案 7	最小质量		1.2	5
方案 8	最小质量		1.3	5

(4) 优化结果探究。

几种不同方案的拓扑优化结果列于表 3。

表 3 拓扑优化结果

优化方案	最大等效应力 /MPa	最大位移 /mm	最优结构质量 /g
方案 1	29.2	0.42	65.1
方案 2	14.2	0.22	45
方案 3	11.2	0.41	58
方案 4	16.1	0.24	40
方案 5	15.67	0.29	43.9
方案 6	11.5	0.22	39.2
方案 7	11.52	0.41	48
方案 8	20.5	0.15	40

由表 3 的分析结果可以看出,以最小质量为优化目标的轻量化设计效果较好,其中方案 6 优化后的结构质量最轻即 39.2 g,且最大等效应力、最大位移和最小安全系数均满足使用要求。基于方案 6 优化后的结构形状,如图 6 所示。



图 6 优化后的结构

1.3 几何重构

基于方案 6 的优化结果,采用“手动”的方式完成几何的逆向重构。

拓扑优化后,用包裹、桥接、拆分等工具进行手动重构,如图 7 所示。

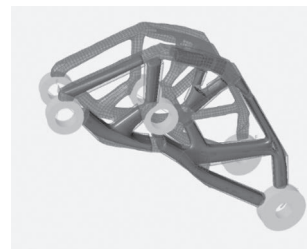


图 7 手动几何重构

结构为对称零件,使用镜像工具将做好的重构镜像过去。

拓扑优化的结果零件上面只有两根横梁,导致模型强度不够,不符合 3D 打印工艺要求,故在零件上面增加了一根横梁,如图 8、图 9 所示。

对重构零件进行合并,使用圆角处理重构结果与非设计空间之间的衔接。

1.4 强度校核

设置分析单元尺寸为 2 mm,计算速度 / 精度



图 8 拓补优化后结构



图 9 复合 3D 打印工艺结构

选择“更准确”,使用惯性释放,对单一载荷工况进行分析^[15]。结构强度校核分析的最大等效应力值、最大位移和最小安全系数列于表 4。

表 4 强度校核分析结果

最大等效应力 /MPa	最大位移 /mm	最小安全系数
15.67	0.29	2.9

通过拓扑优化、几何重构后连接件的质量为 52.6 g,相对于 ABS 连接件未拓扑优化的质量 258.4 g,质量减轻了 79%。

2 FDM 增材制造

笔者试验基于 FDM 工艺,以 ABS 为打印材料,选用北京太尔时代 UPBOX 3D 打印设备以及 UP Studio3.1 为 3D 模型切片参数分析软件^[16-17]。以轻量化设计优化分析结果为前提,分别以原始模型、轻量化设计输出模型以及以原始模型为主模型,轻量化设计输出为子模型(子模型置于主模型内部)的结合模型展开 3D 打印制作。

载入轻量优化模型 .stl 文件到 UPStudio3.1.2,选择摆放位置,考虑圆孔平行于打印平台,避免分层出现阶梯效应,选择摆放文字(连接件侧面平行于打印平台),原始模型摆放位置如图 10 所示。

根据受力分析,设置填充密度。因整体受力点较多,选择层厚 0.15 mm,动态层厚 0.1 mm。

主模型填充密度设置为 100%,支撑密度设置为 20%,支撑角度参设置为 45°。

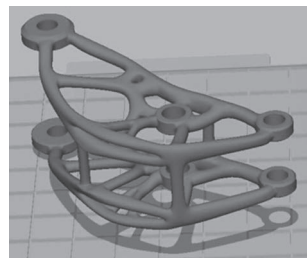


图 10 原始模型摆放位置

打印参数设置为:打印最慢速度 10 mm/s,短轮廓速度为 5 mm/s,第一层速度取 30%,第一层送进比例为 100%,裙边 0;打印喷头温度 274℃,打印平台 90℃;起始点类型为固定类型,且 X、Y 轴起始点为 0,接头延伸 0.8 mm,且接头交叉。

按以上打印参数设置打印 ABS 连接件模型,打印完成图如图 11 所示,轻量化设计模型成品图如图 12 所示。

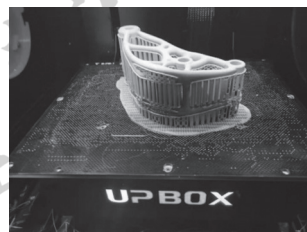


图 11 打印完成



图 12 轻量化设计模型成品

3 轻量化校核

摩托车金属连接件在优化前的质量为 658.3 g,该材料为铝合金,通过两次 ABS 轻量化设计之后的质量为 52.6 g,实现了 92%的减重。图 13 为摩托车金属连接件轻量化设计前结构,图 14 为摩托车金属连接件 ABS 轻量化设计后结构。

轻量化设计之后的部件强度校核结果,最大米塞斯等效应力 15.67 MPa,最大位移 0.29 mm,最小安全系数 2.9。对摩托车金属连接件进行 ABS 轻量化设计实现了 92%的减重,摩托车 ABS 连接件的最大米塞斯等效应力 15.67 MPa,最小安全系数 2.9,强度不超过材料的屈服应力,满足实际的强度需求。

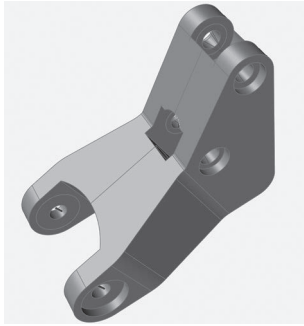


图 13 摩托车金属连接件轻量化设计前结构

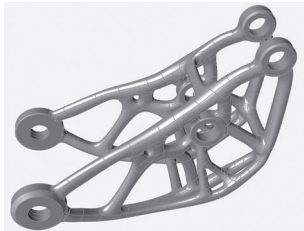


图 14 摩托车金属连接件 ABS 轻量化设计后结构

4 结论

针对摩托车金属连接件轻量化需求,对连接件进行了两次轻量化优化设计,第一次是在满足连接件使用性能的前提下更改连接件材料,由铝合金更改为 ABS 塑料,此次更改实现 60% 的减重;第二次也是在满足连接件使用性能的基础上进行拓扑优化,得到适合于 3D 打印的结构,相对第一次优化后的结构实现 79% 的减重效果,通过两次轻量化优化设计后 ABS 连接件相对于金属连接件实现了 92% 的减重效果,效果显著,最后通过 3D 打印机实现摩托车连接件 FDM 快速制造。

参考文献

- [1] 姜涛,程筱胜,崔海华,等. 3D 打印相关技术的发展现状[J]. 机床与液压,2018,46(3):154-160,146.
Jiang Tao, Cheng Xiaosheng, Chui Haihua, et al. Development status of 3D printing technology[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018,46(3):154-160,146.
- [2] 涂传连. 基于 Voronoi 图的 3D 打印轻量化结构设计及其应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2019.
Tu Chuanlian. Design and application of lightweight structure for 3D printing based on Voronoi diagram[D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2019.
- [3] 孙登广,戴宁,黄任凯,等. 轻量化蜂窝 3D 打印路径自适应生成技术[J]. 计算机集成制造系统,2018,24(8):1 902-1 909.
Sun Dengguang, Dai Ning, Huang Renkai, et al. Adaptive path generation for 3D printing of lightweight cellular[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018,24(8):1 902-1 909.
- [4] 袁磊. 面向 3D 打印的轻量化结构研究[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学,2019.
Yuan Lei. Research on lightweight structure for 3D printing[D]. Hohhot:Inner Mongolia University of Technology, 2019.
- [5] 阴璇. 基于 3D 打印技术的机械零件创新自由设计[D]. 太原:太原科技大学,2016.
Yin Xuan. Innovative and free design of mechanical parts based on 3D printing technology[D]. Taiyuan:Taiyuan University of Science and Technology, 2016.
- [6] 郭自闯,李范春,张荣磊,等. 点阵压气机叶轮轻量化设计及力学性能分析[J]. 推进技术,2022,43.DOI:10.13675/j.cnki.tjjs.200831.
Guo Zichuang, Li Fanchun, Zhang Ronglei, et al. Lightweight design and static analysis of compressor lattice impeller[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022,43.DOI:10.13675/j.cnki.tjjs.200831.
- [7] 黄琳琪,陈显扬,陈韵律,等. 基于 3D 打印的机械零件轻量化设计与制造[J]. 机电工程技术,2020,50(8):96-99.
Huang Linqi, Chen Xianyang, Chen Yunlu, et al. Lightweight design and manufacture of mechanical parts based on 3D printing[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2020,50(8):96-99.
- [8] 潘晓勇,刘勇,都方均. 基于 Solid Thinking Inspire 的 3D 打印轻量化设计与应用研究[J]. 电子世界,2018(21):113-114,117.
Pan Xiaoyong, Liu Yong, Du Fangjun. Research on 3D printing lightweight design and application based on SolidThinking Inspire[J]. Electronic world, 2018(21):113-114,117.
- [9] 罗勇,杜平,朱丽君,等. 基于 Inspire 软件的拓扑优化设计案例分析[J]. 制造技术与机床,2021(11):31-34.
Luo Yong, Du Ping, Zhu Lijun, et al. A case study of topology optimization design based on Inspire software[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2021(11):31-34.
- [10] 余海伟,袁军堂,汪振华. 面向增材制造的轻量化炮口制退器创新构型设计与性能改进[J]. 机械设计,2021,38(S2):40-45.
Yu Haiwei, Yuan Juntang, Wang Zhenhua. Novel design of lightweight muzzle brake with enhanced performance for additive manufacturing[J]. Journal of Machine design, 2021,38(S2):40-45.
- [11] 魏 Chunyu, Pan Jie, He Meishuang. Lightweight research on casting crane frame based on 3D printing technology[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020,48(6):66-69.
- [12] 张霞峰,赵荣丽,林剑,等. 3D 打印技术在创客机器人轻量化中的应用研究[J]. 机床与液压,2021,49(2):40-43,65.
Zhang Xiaofeng, Zhao Rongli, Lin Jian, et al. Application research of 3D printing technology in lightweight of maker robot[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021,49(2):40-43,65.

- Processing and Applications, 2017, 29(1):52-56.
- [15] 赵振强, 邓剑锋, 肖新莉, 等. 电视机面壳热流道直接进胶模具设计 [J]. 模具技术, 2017(5):14-19, 27.
Zhao Zhenqiang, Deng Jianfeng, Xiao Xinli, et al. Design of direct injection mould for hot runner of TV front cover[J]. Die and Mould Technology, 2017(5):14-19, 27.
- [16] 陈鹏, 刘仕昌, 徐秋红. 塑料面板的热流道倒装注塑模的创新设计 [J]. 工程塑料应用, 2013, 41(11):67-69.
Chen Peng, Liu Shichang, Xu QiuHong. Creative design of hot runner inverse-installing injection mold for plastic cover[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(11):67-69.
- [17] 曾炬. 成型高光面板新型倒装热流道系统的研究 [J]. 模具工业, 2020(9):53-57.
Zeng Ju. Development of new inverted hot runner system for high-gloss panel[J]. Die & Mould Industry, 2020(9):53-57.
- [18] 弗伦克勤, 扎维斯托夫斯基. 注射模具的热流道 [M]. 徐佩弦译. 北京: 化学工业出版社, 2005.
Frenkler D, Zawistowski H. Hot Runners in Injection Moulds[M]. Xu Peixian translate. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [19] 王春艳, 陈国亮. 塑料成型工艺与模具设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
Wang Chunyan, Chen guoliang. Plastic injection molding and mold design[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2019.
- [20] 甘俊通. 进退螺纹结构的化妆品瓶盖注射模设计 [J]. 模具制造, 2018(6):43-48.
Gan Juntong. Design of injection mold for cosmetic bottle cap with advance and retreat thread structure[J]. Die & Mould Manufacture, 2018(6):43-48.

.....

(上接第 90 页)

- [13] 陈继文, 陈清朋, 王琛, 等. 面向熔融沉积成型技术的曳引机壳拓扑结构优化设计 [J]. 中国工程机械学报, 2019, 17(4):304-310.
Chen Jiwen, Chen Qingpeng, Wang Chen, et al. Topology optimization design of traction machine shell oriented fused deposition modeling technology[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2019, 17(4):304-310.
- [14] 姜缪文, 闫健卓, 陈继民. 基于拓扑优化的军用头盔内胆结构三维打印 [J]. 兵工学报, 2017, 38(9):1 845-1 853.
Jiang Miuwen, Yan Jianzhuo, Chen Jimin. 3D Printing of military helmet liner structure based on topology optimization[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(9):1 845-1 853.
- [15] 陈弗德, 孟凡召. 基于山地自行车支架的拓扑优化设计与 3D 打印 [J]. 汽车实用技术, 2021(19):48-50.
Chen Fude, Meng Fanzhao. Topology optimization design and 3D printing based on mountain bike bracket[J]. Practical Automotive Technology, 2021(19):48-50.
- [16] 陈继文, 陈清朋, 胡秀龙, 等. 面向 3D 打印的码垛机械手小臂轻量化设计 [J]. 中国工程机械学报, 2020, 18(1):45-50, 55.
Chen Jiwen, Chen Qingpeng, Hu Xiulong, et al. Lightweight design of small arm for palletizing manipulator facing 3D printing[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2020, 18(1):45-50, 55.
- [17] 王翠翠, 李明鹏, 王戈, 等. 植物纤维 / 热塑性聚合物预浸料在汽车轻量化领域的应用进展 [J]. 林业科学, 2021, 57(9):168-180.
Wang Cuicui, Li Mingpeng, Wang Ge, et al. Application progress of plant fiber /thermoplastic polymer prepreg in automotive lightweight Field[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(9):168-180.