

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.08.005

PBAT基3D打印材料制备及其在上肢固定器中应用

阳范文¹, 陈海莲¹, 宋佳奇¹, 陈志琪¹, 潘均安¹, 梁宇熙¹, 聂羽慧¹, 冯泳婷¹, 邓健能², 何健²

(1. 广州医科大学生物医学工程系, 广州 511436; 2. 广州海珥达环保科技有限公司, 广州 510430)

摘要:以聚对苯二甲酸己二酸丁二酯(PBAT)为基材,添加扩链剂2,5-二甲基-2,5-二(叔丁基过氧基)己烷(双二五)、碳酸钙和淀粉等,通过转矩流变仪熔融共混制备了改性PBAT材料,研究了双二五用量对材料加工性能和力学性能的影响。结果表明,当双二五质量分数不低于0.5%时,转矩随时间增加呈现先增大后减小、然后又增大的变化趋势;随着双二五用量增加,材料在480 s时的扭矩明显增加。材料的最佳配方(质量分数)为PBAT 58.5%,碳酸钙20%,玉米淀粉20%,乙烯-乙酸乙烯酯蜡1%,双二五0.5%,其拉伸强度为9.5 MPa、断裂伸长率为336.4%、撕裂强度为45.8 N/mm。在最佳配方下,通过双螺杆挤出机熔融共混制备了PBAT基3D打印材料,然后采用单螺杆3D线材挤出机制备了3D打印线材,在打印温度为180℃、打印速度为5 mm/s的条件下进行熔融沉积3D打印,制备出椭圆孔洞完整、外观和内表面光滑的上肢固定器,在骨折固定和康复治疗领域具有良好的应用前景。

关键词:聚对苯二甲酸己二酸丁二酯; 熔融共混; 3D打印; 上肢固定器

中图分类号: TQ914.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)08-0025-06

Preparation of 3D Printing Material based on PBAT and Its Application in Upper Limb Fixator

Yang Fanwen¹, Chen Hailian¹, Song Jiaqi¹, Chen Zhiqi¹, Pan Junan¹, Liang Yuxi¹, Nie Yuhui¹, Feng Yongting¹, Deng Jianneng², He Jian²

(1. Department of Biomedical Engineering, Guangzhou Medical University, Guangzhou 511436, China;

2. Guangzhou Haierda Environmental Protection Technology Co., Ltd., Guangzhou 510430, China)

Abstract: Using polybutylene adipate terephthalate (PBAT) as the base material, adding chain extender 2,5-dimethyl-2,5-di(tert-butylperoxy)hexane (bis 25), calcium carbonate, starch, etc. as modifiers, and the modified PBAT materials were prepared by melt blending with torque rheometer. The effects of the contents of bis 25 on the processing properties and mechanical properties of the materials were studied. When the mass fraction of bis 25 is no lower than 0.5%, as time increases, the torque shows a trend of first increasing then decreasing, and then increasing again. The torque of the material increases significantly at 480 s with the increase of the content of chain extender bis 25. The best formula (mass fraction) for the modified PBAT material is that PBAT 58.5%, calcium carbonate 20%, corn starch 20%, ethylene-vinyl acetate wax 1%, chain extender bis 25 0.5%, its tensile strength is 9.5 MPa, elongation at break is 336.4%, tear strength is 45.8 N/mm. Under the best formula, the PBAT-based 3D printing material was prepared by melt blending with a twin-screw extruder, and a 3D printing filament was prepared by a single-screw 3D filament extruder. The fused deposition 3D printing was performed under the conditions of temperature at 180℃ and printing speed of 5 mm/s, then an upper limb fixator with a complete oval hole, smooth appearance and inner surface was prepared, which has a good application prospect in the field of fracture fixation and rehabilitation.

Keywords: polybutylene adipate terephthalate; melt blending; 3D printing; upper limb fixator

骨折固定器作为一种医用支撑装置,主要目的是固定、支持、保护和矫正人体的受伤患处和畸形部位^[1-2]。骨折固定的方法主要为手术复位和骨折外

固定^[3-5],通常优先采用骨折外固定保守治疗,目前传统的外固定方法主要有两种:石膏固定和夹板固定。由于石膏的体积大,长期压迫会引起关节僵硬

基金项目: 2020 广东省攀登计划项目 (pdjh2020a0479), 广医大 - 广州海珥达公司联合研究项目

通信作者: 阳范文, 博士, 教授, 主要从事医学高分子材料改性和 3D 打印研究

收稿日期: 2021-06-07

引用格式: 阳范文, 陈海莲, 宋佳奇, 等. PBAT 基 3D 打印材料制备及其在上肢固定器中应用 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(8): 25-30.

Yang Fanwen, Chen Hailian, Song Jiaqi, et al. Preparation of 3D printing material based on PBAT and its application in upper limb fixator[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(8): 25-30.

和肌肉萎缩,而石膏的紧度会引起皮肤溃疡、湿疹、皮肤过敏等;当用夹板固定时,由于夹板不完全与骨折处契合,故患肢容易因外力冲击而造成再次移位。

针对传统骨折固定器的不足,通过3D打印技术为不同年龄、身高、性别、的患者个性化定制精准性高、尺寸形状匹配度好、透气性好的生物可降解骨折康复固定器^[6-8]成为一种新的骨折固定器制备方法。3D打印技术是一种基于数字化的增材制造技术,可实现形状设计的个性化需求而不会增加制造成本,在满足个性化医疗器械需求、提高临床疗效等方面具有独特优势^[9-11]。采用3D打印技术制备的手术导航板在提高脊椎、心脏、肝脏等复杂手术方面有效提高了手术的准确度和成功率,展示出良好的临床应用前景^[12-14]。采用生物可降解高分子材料制备的骨折固定器,使用后可降解,符合绿色环保的发展理念。聚对苯二甲酸己二酸丁二酯(PBAT)和聚己内酯(PCL)等具有良好的热塑性加工性能,通过添加无机组分、纤维等^[15-16]对其进行改性可降低收缩率,笔者所在团队先后开展了具有抑菌功能、低收缩率的PBAT打印材料^[17]、PBAT/滑石粉3D打印材料^[18]和聚乳酸(PLA)/PBAT共混材料^[19]等研究,采用其制备具有抑菌功能的肿瘤放疗体位固定器,为患者提供一种定位更精准、更安全和更匹配的新型医疗器械。

PBAT在加工过程中因高温和剪切作用易引发分子链降解,熔体强度降低,导致熔融沉积3D打印过程中的熔体流动不稳定,对制品的性能和外观产生不利影响。针对上述问题,笔者在PBAT熔融共混改性过程中添加扩链剂2,5-二甲基-2,5-二(叔丁基过氧基)己烷(简称双二五)对PBAT扩链,制备了改性PBAT材料,研究双二五用量对材料熔融黏度和力学性能的影响,筛选最佳的双二五用量,以提高材料的熔体强度,满足3D打印需求。在此基础上,开展上肢固定器具的3D建模,然后采用熔融沉积3D打印制备上肢固定器具,以满足上肢骨折固定器的个性化定制需求,为骨折康复固定提供一种新型医疗器械,在提高骨折治疗的临床效果、改善患者康复的舒适度和克服传统固定器具的不足等方面具有重要意义。

1 实验部分

1.1 主要原料

PBAT: TH801,新疆蓝山屯河化工股份有限公

司;

乙烯-乙酸乙烯酯(EVAC)蜡: EVA-3,德国巴斯夫公司;

碳酸钙: 5 μm (3000目),连州市金福粉体科技有限公司;

双二五: TX 101,天津阿克苏诺贝尔过氧化物有限公司;

玉米淀粉: 市售。

1.2 主要仪器与设备

转矩流变仪: RT0I-55/20型,广州市普同实验分析仪器有限公司;

热压成型机: BL-6170-A型,东莞宝轮精密检测仪器有限公司;

小型精密双螺杆挤出机: MEDI-22/40型,广州市普同实验分析仪器有限公司;

单螺杆3D线材挤出机: RCSI-20/28型,广州市普同实验分析仪器有限公司;

冲片机: CP-25型,上海化工机械四厂;

3D打印机: FTT型,广州畅德科技有限公司;

3D扫描仪: LD-1302型,济南鲁雕三维数控设备有限公司;

电子拉力试验机: CMT40204型(20 kN),深圳新三思材料检测有限公司。

1.3 试样制备

(1) PBAT 熔融共混改性。

按照表1配方准确称取各原材料并混合均匀。采用转矩流变仪熔融共混制备改性PBAT材料,温度设定为170℃、转速50 r/min、混炼时间8 min。然后用热压成型机将上述材料在180℃下压制成薄片,热压工艺为预热时间7 min、热压时间1 min、冷却时间5 min。

表1 改性PBAT材料各组分质量分数

组 分	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]
PBAT	59	58.75	58.5	58.25	58
玉米淀粉	20	20	20	20	20
碳酸钙	20	20	20	20	20
EVAC 蜡	1	1	1	1	1
双二五	0	0.25	0.5	0.75	1

(2) 双螺杆挤出制备3D打印材料。

筛选出最佳配方后,采用双螺杆挤出机在温度170℃、螺杆转速300 r/min的条件下将最佳配方对应的改性PBAT材料制备成3D打印材料。

(3) 3D线材制备。

将上述制得的3D打印材料在80℃下干燥4 h后,采用单螺杆3D线材挤出机在温度170℃、螺

杆转速 30 r/min 的条件下制备直径 (1.75 ± 0.05) mm 的 3D 打印线材。

1.4 性能测试

(1) 转矩流变性能测试。

设定温度为 170℃、转速 50 r/min、混炼时间 8 min,将原材料按表 1 配方称量后加入设备中,测试转矩随温度的变化曲线。

(2) 力学性能测试。

将改性 PBAT 薄片试样放置 24 h 后,利用冲片机制备标准力学性能测试样条,采用电子拉力试验机按 GB/T 1040.1-2018 测试拉伸强度和断裂伸长率,拉伸速率为 500 mm/min;按照 GB/T 529-2008 测试材料的撕裂强度。

2 结果与讨论

2.1 改性 PBAT 材料的性能分析

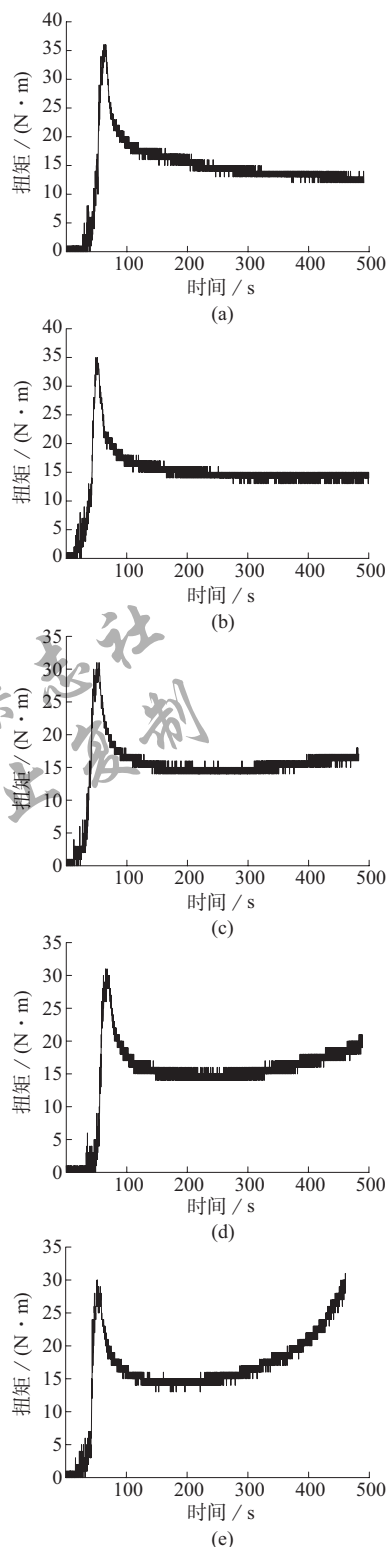
(1) 双二五用量对材料转矩流变性能影响。

不同双二五用量的材料的转矩流变性能影响如图 1 所示,典型转矩值见表 2。

由图 1 可知,当材料中没有添加双二五时,转矩随时间增加呈现先增大后减小的变化趋势,混炼时间达到 480 s 时材料的转矩仍然有略有降低,此时的转矩为 13 N·m,说明在没有添加抗氧剂或扩链剂的情况下, PBAT 大分子链在熔融共混过程中有轻微降解,黏度不断下降,故转矩呈下降趋势。当材料中添加质量分数 0.25% 的双二五时,转矩随时间增加呈现先增大后减小、然后趋于稳定的变化趋势,呈现典型的热塑性材料的熔融加工特征;随着双二五用量进一步增加,转矩随时间增加呈现先增大后减小、然后又增大的变化趋势;双二五用量越多,材料在 480 s 时的转矩越大;当双二五质量分数为 1% 时,其 480 s 时的转矩为 29 N·m,比双二五质量分数为 0.25% 时增加约一倍。产生上述现象的原因是双二五是一种过氧化物,在熔融共混过程中会引发 PBAT 分子链产生扩链反应,导致熔体黏度增加;故双二五用量越多,扩链程度越大,转矩越高。

(2) 双二五用量对材料拉伸性能的影响。

双二五用量对材料拉伸强度、断裂伸长率的影响如图 2 所示。由图 2 可知,随着双二五用量增加,材料的拉伸强度呈现先略有减小、然后不断增大的变化趋势,当双二五质量分数为 0.5% 时拉伸强度为 9.5 MPa,质量分数为 1% 时达到最大值 12.8 MPa;断裂伸长率呈现先减小后增加、然后又减小的变化趋势,当双二五质量分数为 0.5% 时达



双二五质量分数: a—0%; b—0.25%; c—0.5%; d—0.75%; e—1%

图 1 不同双二五用量的材料转矩流变曲线

表 2 不同双二五用量的典型转矩值

项 目	双二五质量分数 / %					N · m
	0	0.25	0.5	0.75	1	
最大转矩	36	35	32	31	30	
480 s 转矩	13	15	17	20	29	

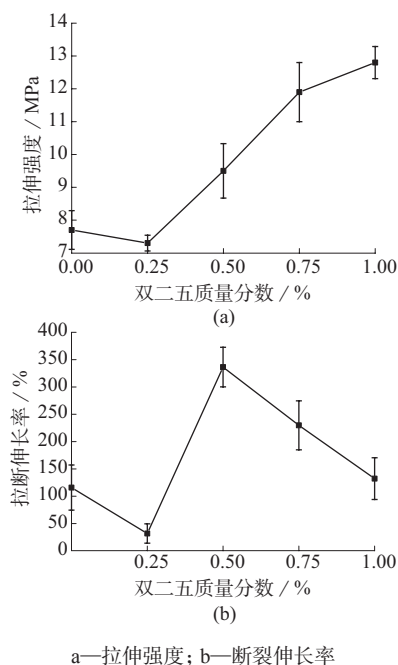


图2 不同双二五用量的材料拉伸性能

到最大值 336.4%。产生上述现象的原因是与熔融共混过程中分子链的断裂和扩链效应有关,熔融共混过程中的热量和剪切导致 PBAT 分子链断裂,双二五引发 PBAT 分子链的扩链反应弥补分子链断裂造成的材料性能下降;故添加量越大,扩链程度越高,拉伸强度越大;然而,当双二五用量太多时,可能导致 PBAT 大分子链之间少量的交联反应,分子链的活动受阻,故断裂伸长率反而略有降低。

(3) 双二五用量对材料撕裂强度的影响。

双二五用量对材料撕裂强度的影响如图 3 所示。由图 3 可知,材料撕裂强度随着双二五用量的增加呈现先减小后增大、然后趋于基本稳定的变化趋势,在双二五质量分数为 0.5% 时撕裂强度为 45.8 N/mm,质量分数为 0.75% 时达到最大值 46.7 N/mm。

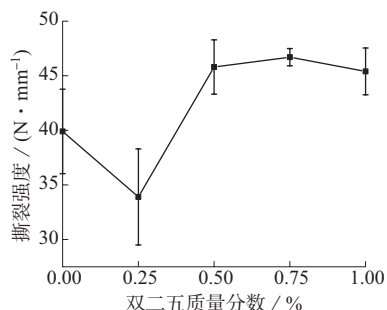


图3 不同双二五用量的材料撕裂强度

通过上述研究可知,当双二五质量分数为 0.5% 时,在 400 s 以后转矩有少许升高、断裂伸长率达到最大值、撕裂强度也较高,此时材料的综合性能最

佳。故确定综合性能最佳的材料配方(质量分数): PBAT 58.5%,碳酸钙 20%,玉米淀粉 20%,EVAC 蜡 1%,双二五 0.5%,材料的拉伸强度为 9.5 MPa、断裂伸长率为 336.4%、撕裂强度为 45.8 N/mm。

2.2 上肢固定器的 3D 打印研究

(1) 上肢固定器的 3D 扫描和建模方法。

首先,采用三维扫描仪对模特的胳膊进行 3D 扫描,设定扫描次数 6 次,获取基本的图像数据;然后,采用软件对图像进行封闭、平滑、处理后得到一个封闭的上肢图像,结果如图 4 所示。

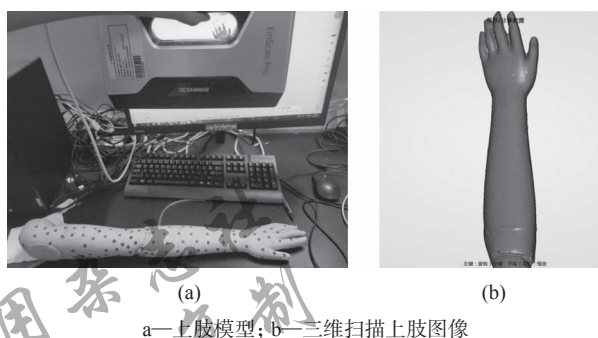


图4 上肢模型与三维扫描图像

将扫描得到的上肢图像导入 Geomagic Studio 软件中,调整大小与位置,通过裁剪截取所需的位置获得上肢固定器的基本模型。然后,通过修饰、增厚、打孔等操作,设计具有一定厚度,表面无孔洞、有圆孔和椭圆孔的三种上肢固定器的 3D 模型,结果如图 5 所示。

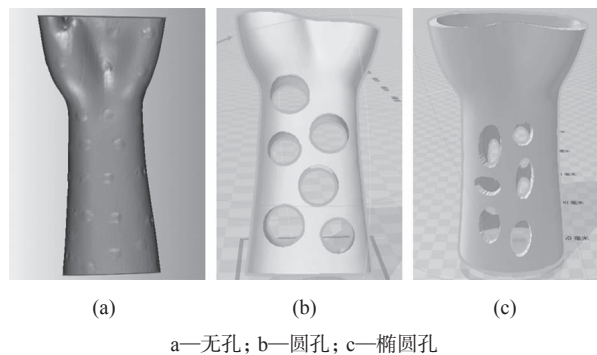


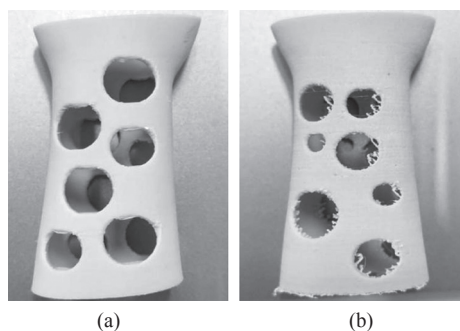
图5 上肢固定器的 3D 模型

(2) 打印工艺研究。

打印温度和打印速度对上肢固定器打印效果的影响如图 6 和图 7 所示。

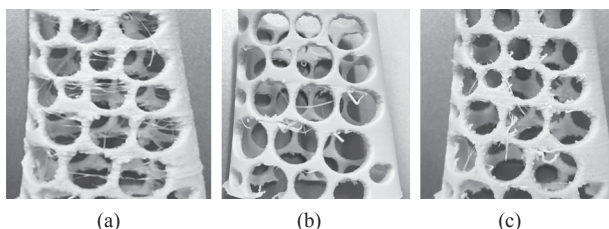
从图 6 可知,打印温度 180℃ 条件下打印样品的外观光滑,无毛边,效果优于 190℃ 打印的样品。故选择打印温度为 180℃。

从图 7 可知,打印速度太慢或者太快,容易出现毛边或拉丝等现象,中等打印速度 (5 mm/s) 制备



打印温度: a—180℃; b—190℃

图6 不同打印温度下的打印效果



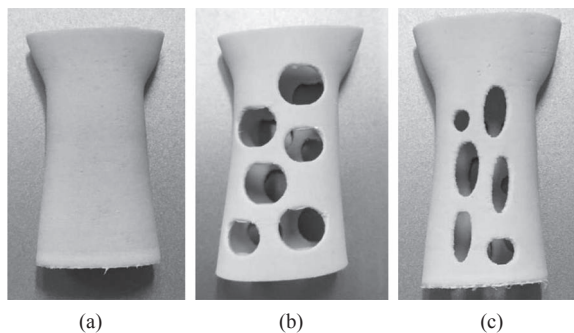
打印速度: a—1 mm/min; b—5 mm/min; c—7 mm/min

图7 不同打印速度下的打印效果

的样品的毛边和拉丝最少、效果最佳。故选择打印速度为 5 mm/s。

(3) 上肢固定器的 3D 打印制备。

将 3D 打印机的温度设定为 180℃,打印速度为 5 mm/s,采用制备的 3D 线材打印上肢固定器,结果如图 8 所示。从图 8a 可知,对于没有孔洞的模型,可以顺利打印出上肢固定器样品,外观效果良好。但是该类样品存在透气性不佳、打印效率较低等不足。而在模型表面设计一些孔洞,一方面可提高打印效率、节约原材料,同时可改善上肢固定器的舒适性和透气性,因为表面的孔洞有利于排气和排汗,从图 8b 和图 8c 发现,设计孔洞的固定器也更加美观。

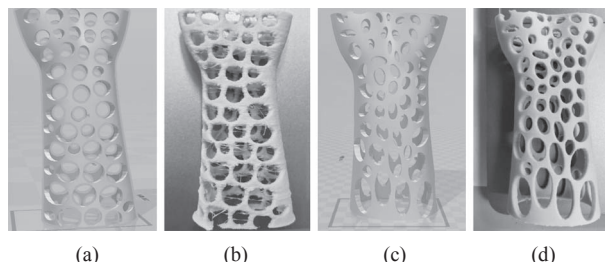


a—无孔; b—圆孔; c—椭圆孔

图8 上肢固定器的 3D 打印样品照片

根据上述实验结果,对图 8b 和图 8c 的 3D 模型进一步增加孔洞数量和优化排列方式,优化后的 3D 模型和打印产品如图 9 所示。从图 9 可知,优化后的上肢固定器中,孔洞数量有了明显增加。比较

圆孔和椭圆孔的 3D 打印产品,设计有圆孔的产品打印时出现了较多的拉丝现象;而设计有椭圆孔的产品没有出现拉丝现象,孔洞完整,外观和内表面光滑。原因与圆孔打印过程中孔洞直径大、孔洞之间的连接部位尺寸变化跳动较大有关,这会导致喷头回丝控制难度大,进而导致拉丝较严重;而对于椭圆孔洞,通过优化排列方式,孔洞之间的连接部位尺寸相对均匀,喷头回丝相对容易,故打印产品外观良好。



a—优化后的圆孔 3D 模型; b—圆孔产品;

c—优化后的椭圆孔 3D 模型; d—椭圆孔产品

图9 上肢固定器的优化 3D 模型和打印产品

综上所述,采用熔融沉积 3D 打印机在打印温度 180℃、打印速度 5 mm/s 的条件下,可制备表面有椭圆孔、外观良好的上肢固定器产品。

3 结论

(1) 当双二五质量分数为 0.25% 时, PBAT 改性材料的转矩随时间增加呈现先增大后减小、然后趋于平衡的趋势;当双二五质量分数不低于 0.25% 时,转矩随时间增加呈现先增大后减小、然后又增大的变化趋势;随材料中双二五用量增加,480 s 时的扭矩增大。

(2) 随双二五用量增加,材料的拉伸强度呈现先略有减小、然后不断增大的变化趋势,断裂伸长率呈现先减小后增加、然后又减小的变化趋势,撕裂强度呈现先减小后增加、然后趋于稳定的变化趋势。

(3) 3D 打印材料综合性能最佳的配方(质量分数)为 PBAT 58.5%、碳酸钙 20%、玉米淀粉 20%、EVA 蜡 1%、双二五 0.5%,其拉伸强度为 9.5 MPa、断裂伸长率为 336.4%、撕裂强度为 45.8 N/mm。

(4) 采用自制的 3D 打印线材在打印温度 180℃、打印速度 5 mm/s 条件下进行熔融沉积 3D 打印,可制备表面有椭圆孔洞的上肢固定器,其孔洞完整,外观和内表面光滑。

参考文献

- [1] 高峰,段鑫,刘佳鑫,等. 老年髋部骨折患者手术时机及运动锻炼综述[J]. 华西医学, 2020, 35(10): 1263-1266.
- Gao Feng, Duan Xin, Liu Jiaxin, et al. Timing of surgery and exercise training of hip fracture in the elderly[J]. West China

- Medical Journal, 2020, 35(10):1 263–1 266.
- [2] 王瑞禄, 马秉灵, 王颖. 创伤性多发肋骨骨折手术治疗的研究进展 [J]. 创伤外科杂志, 2021, 23(1):70–73.
Wang Ruilu, Ma Bingling, Wang Ying. Research progress on surgical treatment of traumatic multiple rib fractures[J]. Journal of Traumatic Surgery, 2021, 23(1):70–73.
- [3] 李小红, 彭长辉, 黄敏章, 等. 传统手法复位石膏外固定与手术内固定对桡骨远端骨折疗效比较 [J]. 中外医学研究, 2020, 18(5):33–35.
Li Xiaohong, Peng Changhui, Huang Minzhang, et al. Comparison of the clinical effects of traditional manual reduction and plaster external fixation and surgical internal fixation for distal radius fracture[J]. Chinese and Foreign Medical Research, 2020, 18(5):33–35.
- [4] 张学平. 手术复位钢板内固定与手法复位石膏外固定对四肢骨折的临床疗效比较 [J]. 家庭医药, 2019(1):60–61.
Zhang Xueping. Comparison of the clinical efficacy of surgical reduction and plate internal fixation and manual reduction and plaster external fixation for limb fractures[J]. Home Medicine, 2019 (1):60–61.
- [5] 马嘉, 孟庆峰, 郑连翔, 等. 手术治疗与手法复位石膏外固定治疗桡骨远端骨折的效果对比 [J]. 中国当代医药, 2018, 25(22):103–106.
Ma Jia, Meng Qingfeng, Zheng Lianxiang, et al. Effect comparison of surgical treatment and manual reduction plaster external fixation in the treatment of distal radius fracture[J]. China Modern Medicine, 2018, 25 (22):103–106.
- [6] 罗时杰, 胥光申, 王飞雷, 等. 定制化腕部矫形器的数字化制造实现与优化 [J]. 西安工程大学学报, 2019, 33(2):206–211.
Luo Shijie, Xu Guangshen, Wang Feilei, et al. Realization and optimization of digitized manufacturing of customized wrist orthosis[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2019, 33(2):206–211.
- [7] 刘非, 邱冰, 薛向东, 等. 基于 3D 打印技术的个性化外固定支具设计 [J]. 中国矫形外科杂志, 2016, 24(24):2 260–2 263.
Liu Fei, Qiu Bing, Xue Xiangdong, et al. Design of personalized external fixators based on 3D printing[J]. Orthopedic Journal of China, 2016, 24(24):2 260–2 263.
- [8] 张强, 曹杰, 莫中军. 3D 打印技术在康复矫形器研发中的应用 [J]. 中国设备工程, 2019(22):153–154.
Zhang Qiang, Cao Jie, Mo Zhongjun. Application of 3D printing technology in research and development of rehabilitation orthosis[J]. China Plant Engineering, 2019(22):153–154.
- [9] 于秉利. 浅析 3D 打印技术原理及应用 [J]. 中国科技纵横, 2018, 5(1):2–3.
Yu Bingli. Analysis of the principle and application of 3D printing technology[J]. China Science & Technology Panorama Magazine, 2018, 5(1):2–3.
- [10] Tack P, Victor J, Gemmel P, et al. 3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review[J]. Biomed Eng Online, 2016, 15(1).doi:10.1186/s12938-016-0236-4.
- [11] 陈海莲, 梁宇熙, 阳范文, 等. PCL 抑菌改性及其在肿瘤放疗体位固定器 3D 打印中的应用 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(5):29–33, 45.
Chen Hailian, Liang Yuxi, Yang Fanwen, et al. Antibacterial modification of PCL and its application on 3D printing for tumor radiotherapy fixator[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(5):29–33, 45.
- [12] 李慧英, 杜立龙. 3D 打印技术在骨科中的应用进展 [J]. 天津医药, 2018, 46(9):1 023–1 026.
Li Huiying, Du Lilong, et al. Recent advances of three-dimensional printing technology in orthopaedics[J]. Tianjin Medical Journal, 2018, 46(9):1 023–1 026.
- [13] 邓滨, 欧阳汉斌, 黄文华. 3D 打印在医学领域的应用进展 [J]. 中国医学物理学杂志, 2016, 33(4):389–392.
Deng Bin, Ouyang Hanbin, Huang Wenhua. Application progress of three-dimensional printing in medical field[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2016, 33 (4):389–392.
- [14] 黄楚红, 黄文华, 黄国志. 3D 打印技术在康复医学中的应用与研究进展 [J]. 中国康复医学杂志, 2020, 34(1):95–99.
Huang Chuhong, Huang Wenhua, Huang Guozhi. Application and research progress of 3D printing technology in rehabilitation medicine[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2020, 34 (1):95–99.
- [15] 阳范文, 陈海莲, 赵珊, 等. 一种纤维增强 PCL 复合材料及其制备方法 :CN110804292A[P]. 2020-03-13.
Yang Fanwen, Chen Hailian, Zhao Shan, et al. A fiber reinforced PCL composite and its preparation method:CN110804292A[P]. 2020-03-13.
- [16] 阳范文, 林承光, 沈佳豪, 等. 一种低收缩 3D 打印材料及其制备方法与应用 :CN108659476A[P]. 2020-09-04.
Yang Fanwen, Lin Chengguang, Shen Jiahao, et al. A low shrinkage 3D printing material and its preparation method and application:CN108659476A[P]. 2020-09-04.
- [17] 柳蔚洲, 欧阳阅翰. PCL/硫酸钡抗菌复合材料的制备与性能 [J]. 合成材料老化与应用, 2019, 48(3):88–91.
Liu Weizhou, Ouyang Yuehan. The Preparation and properties of PCL / BaSO₄ antibacterial composite [J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2019, 48(3):88–91.
- [18] 宋佳奇, 陈美曦, 陈海莲, 等. 一种基于 PBAT/滑石粉的 3D 打印材料研制 [J]. 合成材料老化与应用, 2020, 49(4):27–29.
Song Jiaqi, Chen Meixi, Chen Hailian et al. Development of 3D printing material based on PBAT / talcum powder[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2020, 49(4):27–29.
- [19] 颜颖达, 赵珊, 阳范文, 等. PLA/PBAT 共混体系的制备与性能 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(11):36–41, 46.
Yan Yingda, Zhao Shan, Yang Fanwen, et al. Preparation and properties of PLA / PBAT blends[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(11):36–41, 46.