

DOI: 10.7652/xjtuxb201912010

个性化聚醚醚酮植入物的制造工艺研究

刘绘龙, 刘亚雄, 孙文森, 赵广宾
(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了解决个性化假体数控加工材料浪费严重、加工成本高、异形薄壁件加工困难,以及增材制造力学性能不足的难题,提出了一种利用光固化 3D 打印技术制造个性化聚醚醚酮(poly-ether-ether-ketone, PEEK)假体的耐高温树脂注塑模具,并进一步通过注塑工艺获得高强度个性化假体的方案。该方案充分地结合了 3D 打印技术和传统注塑技术的优势,即利用 3D 打印技术实现复杂的结构形状,利用传统注塑技术实现优异的综合力学性能。研究了在模芯设计过程中分型面的设计原则、模芯合模固定方式的选择原则以及模芯是否填充材料的原则。利用该方案制造了个性化 PEEK 颅骨和下颌骨假体,并对注塑件进行结晶度测试、组织观察。结果显示,PEEK 注塑件的结晶度为 30.82%,注塑件组织致密,无孔隙和缺损。因此,采用 3D 打印和注塑相结合的方案制造具有综合力学性能的个性化 PEEK 植入物是可行的,对个性化 PEEK 植入物在临床的广泛应用具有一定的参考作用。

关键词: 聚醚醚酮;3D 打印;树脂模芯;注塑;个性化

中图分类号: TB324 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)12-0072-08

Manufacturing Process of Personalized Polyetheretherketone Implants

LIU Huilong, LIU Yaxiong, SUN Wensen, ZHAO Guangbin
(State Key Laboratory of Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To solve the problems, including serious material waste in CNC machining, high processing cost, difficult processing of thin-wall shaped parts, and insufficient mechanical properties of additive manufacturing, a 3D printing stereolithography is used to manufacture high-temperature resistance resin injection mold for personalized polyetheretherketone (PEEK) prosthesis, and a high strength personalized prosthesis is then obtained by injection molding process. The program fully combines the advantages of 3D printing technology with traditional injection molding technology, namely 3D printing technology realizes complex structural shapes, and traditional injection molding technology achieves excellent comprehensive mechanical properties. In the mold core design process the design principle of the parting surface, the selection principle of the mold core fixing method and the principle of whether the core is filled with materials are considered. Personalized PEEK skull and mandibular prosthesis are fabricated by using this protocol, and crystallinity test and tissue observation of the injection molded parts are carried out. The results show that the crystallinity of PEEK injection molded parts reaches 30.82%, and the injection molded parts are densely organized without porosity and defects.

Therefore, it is feasible to manufacture personalized PEEK implants with comprehensive mechanical properties by combining 3D printing technology with injection molding technology, especially for the applications of personalized PEEK implants to clinical cases.

Keywords: polyetheretherketone; 3D printing; resin mold core; injection molding; personalization

聚醚醚酮(poly-ether-ether-ketone, PEEK)具有优良的生物相容性、放射线透过性,磁共振扫描不会产生伪影,与皮质骨的弹性模量接近,不会产生安检报警和冬凉夏暖问题等优点,多年来一直备受骨科专家和材料研究人员的青睐^[1-3],多用于整形外科、颅骨修复^[4]。

目前,PEEK 的主要加工工艺有数控加工、增材制造和注塑 3 种。对于 PEEK 等高分子材料以及常用的金属材料,数控加工能达到很高的加工精度。但是,数控加工材料浪费严重、加工成本高,尤其是加工异形薄壁零件时,制造工艺复杂、成品率较低。

增材制造(3D 打印)虽然能提高材料利用率,不受零件复杂程度的限制,但国内推出的高温 3D 打印机 FUNMAT HT 等通过增材制造(如熔融沉积、选择性激光烧结^[5-9])方式制造的 PEEK 零件,普遍存在材质疏松、零件分层、力学性能低的问题,机械性能难以满足行业使用的要求^[4,10-12]。

传统注塑加工高分子材料,由于需要金属模具,主要用于大批量生产,加工小批量及单件零件的成本高、效率低。金属模具注塑高分子材料,由于金属模具冷却较快,影响了高分子材料的结晶,必须在注塑时加热模具,注塑件取出后进行热处理环节改善结晶情况,设备要求多,工艺复杂。因此,对于个性化 PEEK 假体植入物,使用金属模具注塑,加工成本高、效率低^[13]。因此,如何用较低的成本制造优异机械性能和生物相容性的个体化植入物成为一个亟待解决的问题。

增材制造技术的优点是擅长制造复杂结构和个性化结构,缺点是制件性能不足,即增材制造擅长控形,但控性能力不足。制造过程是一个不同工艺复合叠加的过程,如果片面强调增材制造独立于其他工艺之外,单独实现一个产品的各种性能要求,并不能真正发挥增材制造的优势。将增材制造技术与传统制造工艺相结合,而不是单独使用增材制造技术,一直是重要的应用方法和应用方向。

为了克服个性化假体数控加工材料浪费严重、加工成本高、异形薄壁件加工困难,以及增材制造力学性能不足的问题,本文提出一种利用光固化 3D

打印技术制造个性化 PEEK 假体的耐高温树脂注塑模具,并进一步通过注塑工艺获得高强度个性化假体方案。该工艺扩展了增材制造技术在医疗领域的应用,个性化 PEEK 假体有望应用于颅骨、下颌骨、关节、脊椎骨骼等各种复杂骨科场合。

1 工艺设计及特点

本文采用的 3D 打印与注塑技术相结合的工艺方案的基本步骤是:①将病人的 CT 数据导入 Mimics 软件,生成病人的骨骼 STL 模型;②通过 3-matic 软件设计出个性化 PEEK 修复假体;③基于假体结构进行布尔运算和抽壳设计,获得注塑模芯;④利用光固化 3D 打印设备制造出注塑模芯;⑤将注塑模芯安装固定进行注塑。

该方案的主要优点有两个:一是制造出的个体化 PEEK 假体具有 3D 打印假体的个体化结构特征;另一个是制造出的 PEEK 假体具备注塑工艺的良好综合力学性能。与本课题组之前提出的个性化 PEEK 颅骨植入物多点柔性注塑工艺^[4]相比,该方案的优势包括:①模芯的构建过程大大简化,节省了大量的人力物力;②注塑件精度高,不需要后续的打磨去除台阶效应;③该 3D 打印的注塑模芯的密封性优于其大量钢针所构建的模具内表面空间,因此注塑件的致密性更高,强度更高;④该注塑模芯由于是高分子材料,导热性较差、散热慢。相比 P20 模具钢的导热系数 51.5 W/(m·℃),ABS 导热系数仅为 0.18 W/(m·℃)^[14]。高分子模芯注塑 PEEK 材料的优点为:模芯在注塑过程中不需要模具加热系统,较差的导热性有利于 PEEK 内部晶体结构的生长、完善与平衡,使得 PEEK 样件的结晶充分、凝固稳定。

2 模芯结构设计

该方案中的一个关键环节就是个性化 PEEK 假体模芯的设计,具体设计流程如图 1 所示。

模芯设计的内容具体包括:分型面选择、合模方式、抽壳设计、进胶口位置选择、排气孔设计等。模芯为高分子材质,容易扩充进胶口和排气孔的尺寸,

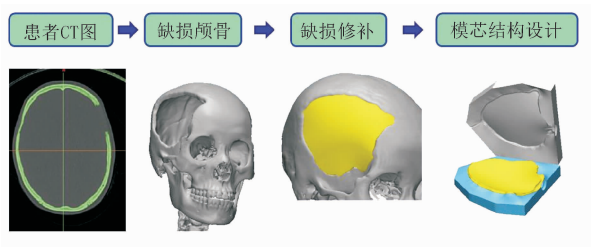


图1 个性化 PEEK 假体模芯设计流程

因此模芯进胶口和排气孔的设计尺寸以较小为宜,进胶口一般设计直径为 6~8 mm,排气孔一般设计直径为 0.7 mm。模芯厚度根据注塑 PEEK 假体的体积大小和注塑参数来确定。

2.1 分型面选择

在模芯设计过程中,分型面的选择极为重要。传统金属模具分型面的选取原则:便于塑件脱模和简化模具机构;尽可能不影响塑件外观,产生的溢料便于消除和修整;利于排气;便于模具加工^[15-17]。金属模具刚性大,为了便于产品脱模,分型面一般选在产品的最大轮廓线处。针对少数形状复杂的产品,金属模具必须设置多个分型面才能完整取出注塑产品。

个性化 PEEK 假体的结构形状复杂多变,经常会出现多个局部最大轮廓线。因此,选择合适的分型面至关重要,它不仅影响着 PEEK 假体的成型效果和脱模工序,而且影响着设计模具的人力成本和生产效率。针对单个分型面很难满足注塑 PEEK 假体的脱模要求的问题,提出以下 3 种模芯分型面选择方案。

(1)最大轮廓线。最大轮廓线分型符合传统模具设计标准,也是模芯分型面设计中最基本的一种设计开模方式。金属模具的最大轮廓线分型面一般是平面分型面或台阶分型面,特殊情况下加入圆弧等曲面构成曲面分型面。

个性化 PEEK 假体形状结构复杂,最大轮廓线基本是三维空间结构。注塑模芯分型面全部属于不规则曲面分型面。最大轮廓线分型面是一种适合大体积、非复杂结构的 PEEK 假体模芯设计,便于加工和注塑假体脱模,如图 2 所示。

胸椎骨假体模芯就是根据最大轮廓线原则设计的分型面。由图 2 可以看出,分型面从假体的最大轮廓线向外延伸,与六面体的 4 个边界相交,完成模芯的分型任务。PEEK 假体经过注塑成型,可以很容易取出,不会破坏模具结构,模具可以实现多次重复注塑,大大提高了树脂的利用价值。

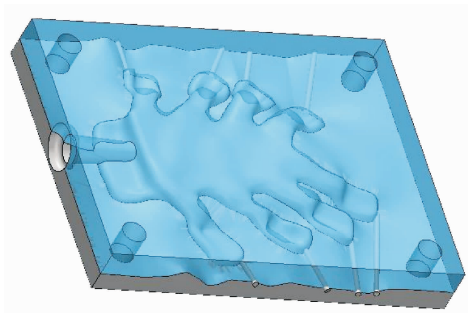
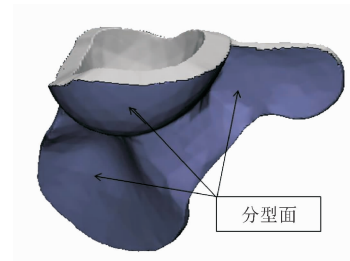
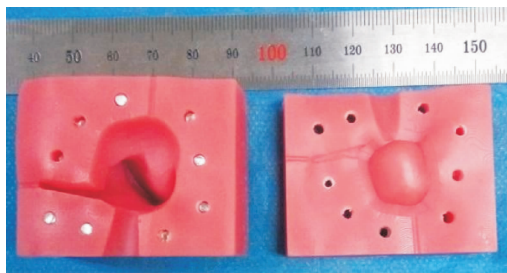


图2 胸椎骨假体模芯最大截面面积分型面

(2)局部破坏模芯。增材制造的模芯是一种高分子聚合物,相对于无法破坏的金属模具,高分子模芯具有一定程度的灵活性和可塑性。当嵌入模具的 PEEK 假体难以取出时,可以采用局部破坏模芯的办法,取出假体。个性化 PEEK 假体中存在一些复杂结构的假体,单个分型面无法取出 PEEK 假体,只能破坏模芯的结构,取出完整的假体。关节窝模芯设计如图 3 所示。



(a)关节窝假体模型



(b)关节窝模芯

图3 关节窝模芯设计

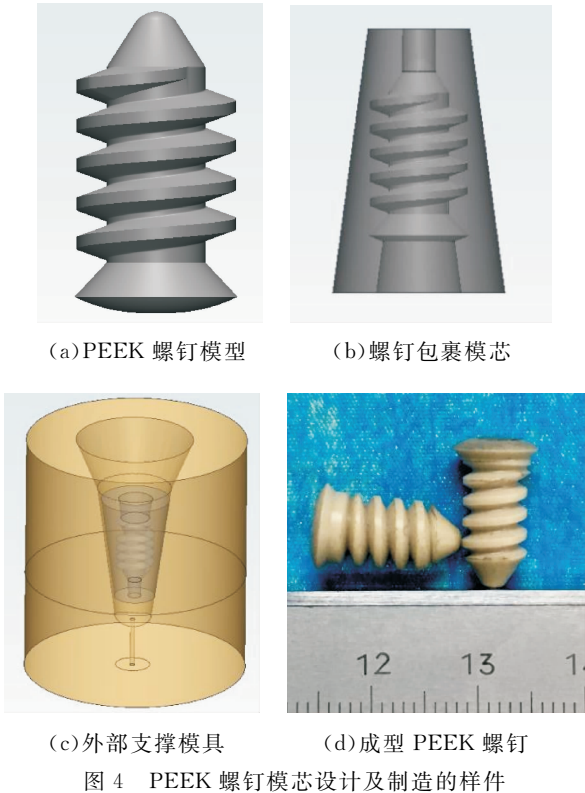
图 3a 为关节窝假体的三维模型结构。由于该模型结构复杂,单个分型面无法使其完全脱模,多个分型面不仅会降低模芯的强度和精度,影响假体的表面质量,而且增加了模具设计和装配的难度。采用局部破坏模具的方法,不仅减少模具设计工作量,而且注塑的 PEEK 假体精度更高、可靠性更高。

高分子模芯虽然可以破坏,但需要考虑破坏模具的时间成本和模具成本。尤其在破坏模具的过程中容易损伤 PEEK 假体表面,甚至造成假体面片撕

裂。在模具设计过程中,应尽量避免破坏模具。

(3)省略分型面。省略分型面即不设计分型面,将剖切模具的理念发挥到极致。高分子模芯包裹注塑 PEEK 样件,注塑完成后包裹的模芯全部破坏去掉。

此方案是将复杂且体积较小的 PEEK 假体注塑模具设计成封闭式模芯。模芯表面只设计注塑进料口和排气孔。注塑 PEEK 假体一旦成形,需要破坏模芯才能取出 PEEK 假体,且取出的假体表面质量极高,没有分型面造成的飞边痕迹。省略分型面模芯与局部破坏模芯不同,省略分型面模芯尺寸略大于 PEEK 假体尺寸,强度不高,易破坏,模芯外表面需要辅助更大的模具作为强度支撑框架。此方案使用范围较局限,一般用于微型且结构复杂的注塑件的模具设计,如图 4 所示。



PEEK 螺钉结构复杂,尺寸微小,适合使用省略分型面设计注塑模芯。考虑到 PEEK 螺钉的螺纹连续性,带分型面的注塑模芯会形成不连续的分型面飞边,造成螺纹的纹路断裂错位。因此,PEEK 螺钉通过一个较薄的包裹模芯来塑形见图 4b,注塑完成后直接破坏掉包裹模芯,保留下完整的螺纹路径。

2.2 模芯合模方式

注塑模具分型面又称为合模面。金属模具合模面一般为平面,为了保证注塑模具动模和定模合模

时的精确定位和自动导向,模具结构一般设计有导向机构。导向机构的形式一般有导柱导向和锥面定位两种。金属模具一般以大批量、自动化注塑为主,导柱导向机构使用较为普遍^[18-19]。

借鉴金属模具的设计经验,结合个性化 PEEK 假体复杂结构的特点,我们选择锥面定位的导向机构。光固化模芯的分型面一般为复杂的空间曲面结构,具有一定的倾斜角度,使得模具扣合时可以自动定位。这种合模方式不仅具有自动导向定位作用,而且可以承受一定的侧压力。因此,模芯的合模方案包括 3 种方案:斜面自动扣合、密布螺栓连接、稀疏螺栓连接。

(1)斜面自动扣合。由于增材制造的模芯合模面为倾斜面,可以自动定位扣合,只需要两侧夹紧,就可以保证模芯的合模强度,如图 5 所示。这种方案结构简单,操作方便,是一种常见的选择方案。但是,考虑到注塑压力较高,偶尔会有 PEEK 熔融胶体溢出,所以模芯两侧的夹紧力要求加高,一般两侧加钢板固定。

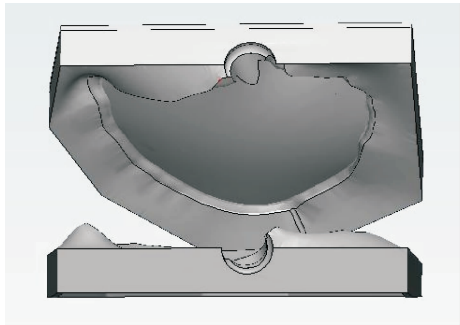


图 5 颅骨假体模芯斜面自动扣合方式

(2)密布螺栓连接是一种连接强度极高的合模方案。密布螺栓连接的合模强度极高,模芯受力均匀,是最可靠的合模方案。但是,密布的螺钉导致装卸螺钉的工作量大大增加,使用不方便。密布螺栓连接一般使用在精度要求较高、假体结构复杂的情况,如图 6 所示。

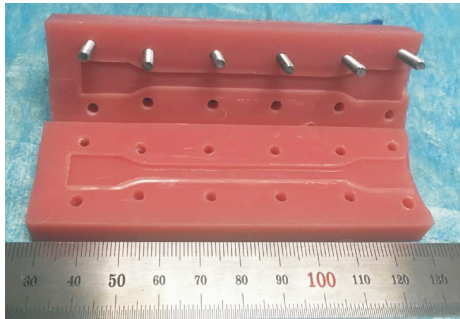


图 6 拉伸样件模芯密布螺栓连接合模方式

(3)稀疏螺栓连接是斜面自动扣合和密布螺栓连接的折中方案。为了满足一定的合模强度和不增加太大的工作量,选择稀疏螺栓连接方案,取得一个强度和效率的平衡点。

图7的模芯用于注塑 PEEK 力学拉伸测试样件。模芯中间有两个螺钉连接固定,辅助其他支撑工具增加合模强度。在大量制造标准样件的实验中可以大大减少合模固定时间。

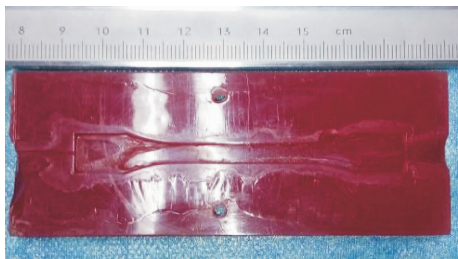


图7 拉伸样件模芯稀疏螺栓连接合模方式

2.3 模芯抽壳设计

光固化模芯注塑 PEEK 假体的成本主要取决于耐高温树脂材料的耗用量。在能够满足注塑使用的前提下,减少树脂消耗量,可以大大减少工艺成本,在商业应用中,极大地提高产品的市场竞争力。

减少耐高温树脂的使用量的方法一般是在模芯厚的部位进行抽壳设计。由于增材制造工艺不考虑成型复杂结构的加工成本,通过局部抽壳设计可以大大减少部分样件的树脂使用量。抽壳空心部分可以使用石膏等背衬材料填充。根据是否抽壳加填充材料,模芯可以分为单一材质模芯和抽壳填充模芯两种类型。

(1)单一材质模芯。普通模芯,尤其是 PEEK 假体尺寸较小的注塑模芯,都是直接设计成单一材质模芯,不加填充材料。单一材质模芯设计简单,强度比抽壳填充其他材质的模芯强度要高,使用性能更好。牙齿注塑模芯、小段下颌骨模芯等体积较小,基本都是单一材质模芯,如图8所示。

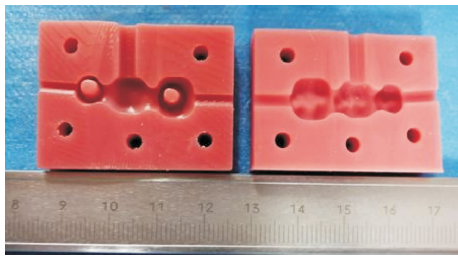


图8 牙桥单一材质模芯

(2)抽壳填充模芯。体积较大的 PEEK 假体如颅骨、大段下颌骨的模芯设计过程中,需要添加抽壳

设计,减少耐高温树脂使用量。该类型模芯一般结构简单、尺寸较大,抽壳后节省的树脂量比较可观,是一种十分具有经济效益的方法。抽壳后的填充材料一般选用速固的石膏、锡铅合金等材料。由于采用的树脂本身导热性比较差,因此抽壳设计并不会对模芯散热造成影响。

图9为颅骨 PEEK 假体的光固化注塑模芯。通过抽壳设计,模芯的侧壁形成填充空腔,降低了树脂的使用量。经测量,该模芯抽壳后体积为实心模芯体积的 24.05%,意味着可以减少 24.05%的光固化树脂使用量。

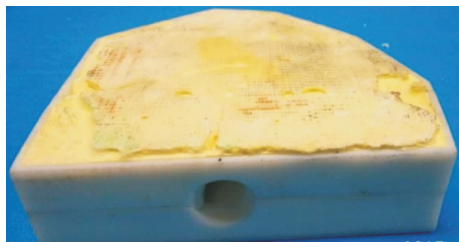


图9 石膏增强型模芯

3 注塑机与模芯连接装置

注塑成型工艺能一次成型出外形复杂、尺寸精确、可带有各种金属嵌件的三维尺寸模塑制品,注塑成型的制品占塑料制品总量的 20%~30%。注塑机与金属模具适用于大批量、高精度制品的生产制造,一般有固定的装配定位标准^[20-21]。为了将增材制造的个性化 PEEK 假体模芯应用于普通注塑机上,设计相应的金属连接固定装置,此处称之为外模具框架结构。外模具结构对外应满足注塑机的定位装夹标准,对内能固定支撑高分子模芯。

根据人体颅骨尺寸,暂定注塑模具尺寸内部包容体积为 150 mm×150 mm×100 mm,外部边缘突出尺寸为 30 mm,配合注射机的固定尺寸。模具的浇口尺寸参考注塑标准和注塑机的要求来确定^[22]。定位圈的外孔、内孔、厚度尺寸分别为 100 mm、35 mm、15 mm;浇口套尺寸为 B 型 40 mm×20 mm,浇口套的尾端需要切削加工成与模芯连接的 45°倒角。根据相关模具的设计原则^[23],进行外模具的设计和加工,如图10所示。

4 个性化 PEEK 假体注塑实验

(1)PEEK 颅骨修复体注塑。该病例为病人车祸导致颅骨大面积缺损,个性化 PEEK 颅骨假体设计厚度为 3 mm,最大长度 98 mm,模芯设计厚度为

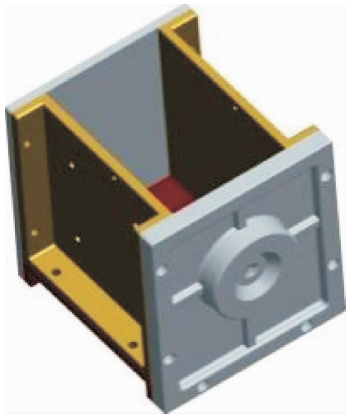
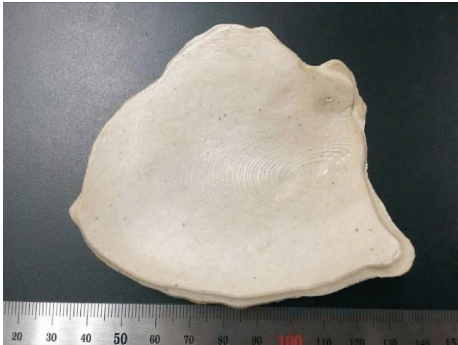
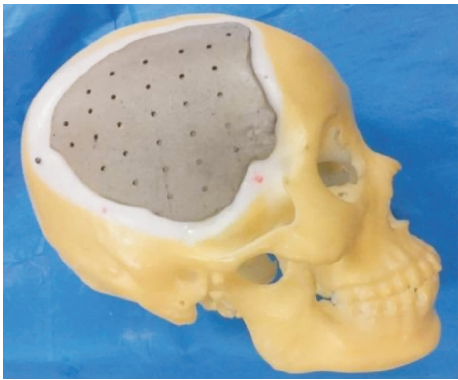


图 10 金属模具框架结构

2 mm。使用个性化 PEEK 假体注塑工艺,分型面采用最大轮廓线原则,合模方式采用斜面自动扣合方式,采用模芯抽壳填充石膏的设计方案,获得成形良好的颅骨 PEEK 修复假体,如图 11 所示。本实验为体外手术模拟实验,非手术植入使用。



(a)PEEK 颅骨假体



(b)PEEK 颅骨假体组装

图 11 注塑个性化 PEEK 颅骨假体

(2)PEEK 下颌骨假体注塑。根据某患者的下颌骨 CT 数据,通过软件重建出患者的骨骼模型,进而设计出个性化的下颌骨假体。分型面采用最大轮廓线原则,合模方式采用密布螺栓连接方式,采用单一材质模芯的设计方案,制造出个性化 PEEK 下颌

骨假体,如图 12 所示。



图 12 注塑个性化 PEEK 下颌骨假体

5 个性化 PEEK 假体组织观察

5.1 差示扫描量热法(DSC)结晶度测试

采用 DSC 测量 PEEK 注塑样件的结晶度^[24]。对于结晶聚合物,用 DSC 测定其结晶熔融时,得到的熔融峰曲线和基线所包围的面积,可直接换算成热量。此热量是聚合物中结晶部分的熔融热。PEEK 完全结晶的熔融函数取 130 J/g,升温区间为 25~400 ℃,升温速率为每分钟 10 ℃。

图 13 为 PEEK 吸热曲线,从图中可以得到:个性化 PEEK 假体注塑工艺制造的 PEEK 样件的结晶度为 30.82%,剖面线区代表 PEEK 里结晶部分的熔融热量。外科植入物用 PEEK 聚合物的标准规范规定:注塑 PEEK 假体的结晶度标准范围 20%~45%之间。实验结果符合 PEEK 医疗器械植入物的标准范围。

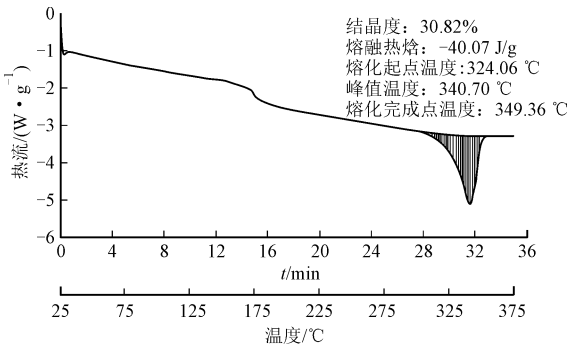


图 13 PEEK 吸热曲线图

5.2 电镜组织观察

对个性化 PEEK 假体样件进行表面喷金处理,使用扫描式电子显微镜观察 PEEK 假体内部微观组织形态。所用扫描式电子显微镜为日本日立公司所产的 S-3000N 设备。

从图 14 中可以看出:PEEK 注塑件组织致密,无孔隙和缺损。相比较 3D 打印工艺,注塑制造的 PEEK 假体的致密性得到了很大的提升。

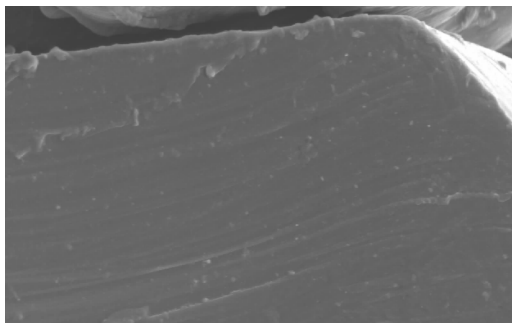


图14 PEEK 样件扫描电镜图($\times 500$)

6 结 论

(1)为了克服个性化假体数控加工材料浪费严重、加工成本高、异形薄壁件加工困难,以及增材制造力学性能不足的问题,本文提出一种利用光固化制造个性化 PEEK 假体的耐高温树脂注塑模具,并进一步通过注塑工艺获得高强度个性化假体的方案。

(2)模芯分型面的设计方案包括最大轮廓分型面设计、局部破坏模芯设计、省略分型面设计。常规模芯设计使用最大轮廓分型面设计,局部破坏模芯分型面设计适用于大尺寸且复杂结构样件的分型面,省略分型面设计适用于体积较小且结构复杂的 PEEK 假体注塑模芯设计。

(3)模芯的合模固定方式包括斜面自动扣合、密布螺栓连接、稀疏螺栓连接。斜面自动扣合是常用的模芯合模固定方式,当合模强度不足时,选择密布螺栓连接和稀疏螺栓连接,区别是前者使用螺钉更多,连接更稳固,操作更复杂。

(4)以模芯是否加填充材料分为单一材质模具和抽壳填充模具。模芯加背衬复合材料可以降低耐高温树脂的消耗量,减少成本,但同时降低了模具的强度,增加了设计工作量。体积较小的模芯适合单一材质模具,体积较大的模芯适合制成抽壳填充模具。

(5)采用本文提出的工艺方案制造了个性化 PEEK 颅骨和下颌骨假体,并对注塑件进行结晶度测试、组织观察。结果显示,PEEK 注塑件的结晶度为 30.82%,注塑件组织致密,无孔隙和缺损,说明采用增材制造和注塑相结合的方案制造具有综合力学性能的个性化 PEEK 植入物是可行的。

参考文献:

[1] CHO D Y, LIAU W R, LEE W Y, et al. Preliminary experience using a polyetheretherketone (PEEK) cage

in the treatment of cervical disc disease [J]. *Neurosurgery*, 2002, 51(6): 1343-1350.

[2] BAIDYA K P, RAMAKRISHNA S, RAHMAN M, et al. Quantitative radiographic analysis of fiber reinforced polymer composites [J]. *Journal of Biomaterials Applications*, 2001, 15(3): 279-289.

[3] 邓纯博, 刘冬妍, 刘吉泉, 等. 聚醚醚酮及其复合材料作为骨科植入物的研究进展 [J]. *生物医学工程与临床*, 2009, 13(5): 473-477.

DENG Chunbo, LIU Dongyan, LIU Jiquan, et al. Advance in polyetheretherketone (PEEK) and its composite material for orthopaedic implants [J]. *Biomedical Engineering and Clinical Medicine*, 2009, 13(5): 473-477.

[4] 谭力新, 刘亚雄, 陈若梦, 等. 个性化聚醚醚酮颅骨植入物多点柔性注塑工艺 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(8): 130-136.

TAN Lixin, LIU Yaxiong, CHEN Ruomeng, et al. Multi-point flexible molding for personalized PEEK skull repair [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(8): 130-136.

[5] GHITA O, JAMES E, DAVIES R, et al. High temperature laser sintering (HT-LS): an investigation into mechanical properties and shrinkage characteristics of poly (ether ketone) (PEK) structures [J]. *Materials & Design*, 2014, 61: 124-132.

[6] 赵峰, 李涤尘, 靳忠民, 等. PEEK 熔融沉积成形温度对零件拉伸性能的影响 [J]. *电加工与模具*, 2015(5): 43-47.

ZHAO Feng, LI Dichen, JIN Zhongmin, et al. Effect of PEEK fused deposition modeling temperature on tensile properties of parts [J]. *Electromachining & Mould*, 2015(5): 43-47.

[7] SCHMIDT M, POHLE D, RECHTENWALD T. Selective laser sintering of PEEK [J]. *CIRP Annals*, 2007, 56(1): 205-208.

[8] 刘婷婷. 唐都医院成功实施国际首例 3D 打印 PEEK 肋骨植入术 [J]. *中华医学信息导报*, 2017(12): 7.

LIU Tingting. Tangdu Hospital successfully implemented the first international 3D printed PEEK rib implant [J]. *China Medical News*, 2017(12): 7.

[9] DENG Xiaohu, ZENG Zhi, PENG Bei, et al. Mechanical properties optimization of poly-ether-etherketone via fused deposition modeling [J]. *Materials*, 2018, 11(2): 216.

[10] 赵帝. 仿生人工骨 3D 打印流场仿真分析及试件力学性能研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2015: 51-57.

[11] WU Wenzheng, GENG Peng, LI Guiwei, et al. Influ-

- ence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS [J]. *Materials*, 2015, 8(9): 5834-5846.
- [12] 张钰. 聚醚醚酮仿生人工骨 3D 打印热力学仿真及实验研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2014: 5-8.
- [13] 王新宇, 阮诗伦, 常保宁, 等. 聚醚醚酮材料改性、加工与应用 [J]. *精密成形工程*, 2016, 8(1): 27-31, 42.
WANG Xinyu, RUAN Shilun, CHANG Baoning, et al. Material modification, processing and application of PEEK [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2016, 8(1): 27-31, 42.
- [14] 陈再枝, 蓝德年. 模具钢手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 121-123.
- [15] 王臣松, 景许, 杨世通. 注射模分型面设计原则及实例 [J]. *模具制造*, 2017, 17(11): 40-43.
WANG Chensong, JING Xu, YANG Shitong. Design principle and example of parting surface for injection mold [J]. *Die & Mould Manufacture*, 2017, 17(11): 40-43.
- [16] 郭继祥, 李会. 注塑模具结构中的分型面设计 [J]. *电加工与模具*, 2010(6): 48-50, 63.
GUO Jixiang, LI Hui. The insert designing of injection-mold's dividing face [J]. *Electromachining & Mould*, 2010(6): 48-50, 63.
- [17] 张朴. 注塑模具分模方法的研究与应用 [J]. *模具技术*, 2017(1): 34-36.
ZHANG Pu. Research and application of injection mould parting methods [J]. *Die and Mould Technology*, 2017(1): 34-36.
- [18] 刘超. 挡沙弯管塑件注塑工艺设计与模具开发 [D]. 北京: 北京交通大学, 2016: 53-59.
- [19] 赵世超, 鉴冉冉, 谢鹏程, 等. 注塑机合模技术探讨与发展 [J]. *塑料*, 2018, 47(2): 75-78.
ZHAO Shichao, JIAN Ranran, XIE Pengcheng, et al. Discussion and development of plastic injection molding machine [J]. *Plastics*, 2018, 47(2): 75-78.
- [20] 张琦. 介绍一种模具固定工具 [J]. *工程塑料应用*, 1991, 19(2): 32.
ZHANG Qi. Introducing a mold fixing tool [J]. *Engineering Plastics Application*, 1991, 19(2): 32.
- [21] 高明亮. 注塑模的装配、试模与维修 [J]. *机械*, 2011, 38(S1): 160-161.
GAO Mingliang. Assembly, test and maintenance of injection molds [J]. *Machinery*, 2011, 38(S1): 160-161.
- [22] 任天娟. 基于 CAD/CAE/CAM 一体化技术的注塑模具设计制造研究 [D]. 西安: 长安大学, 2016: 25-32.
- [23] 王静. 基于 CAE 分析的塑料框架注塑模设计 [J]. *塑料科技*, 2010, 38(8): 68-71.
WANG Jing. Design of injection mold for plastic frame based on CAE analysis [J]. *Plastics Science and Technology*, 2010, 38(8): 68-71.
- [24] 柯扬船, 郑玉斌, 吴忠文. 聚醚醚酮结晶度的测定 [J]. *材料研究学报*, 1996, 10(2): 205-209.
KE Yangchuan, ZHENG Yubin, WU Zhongwen. The measurements of crystallinity degree of peek [J]. *Chinese Journal of Material Research*, 1996, 10(2): 205-209.

[本刊相关文献链接]

- 范勋健, 陈瑱贤, 曹卓, 等. 个体化骨肌多体动力学和有限元联合建模的肩胛骨锁定板生物力学评估方法. 2019, 53(7): 168-176. [doi:10.7652/xjtuxb201907023]
- 赵广宾, 安超, 秦勉, 等. 聚醚醚酮/羟基磷灰石复合植入物的制备及性能研究. 2019, 53(4): 72-78. [doi:10.7652/xjtuxb201904011]
- 冯晓静, 崔滨, 刘亚雄, 等. 利用模型分解的曲面分层五轴挤出打印装置及工艺. 2019, 53(4): 24-30. [doi:10.7652/xjtuxb201904004]
- 刘永财, 刘亚雄, 伍言龙, 等. 镁/聚己内酯的熔融挤出增材制造工艺研究. 2019, 53(2): 70-79. [doi:10.7652/xjtuxb201902010]
- 赵广宾, 王会友, 秦歌, 等. 脑深部刺激电极表面多壁碳纳米管的电泳沉积工艺研究. 2019, 53(2): 142-149. [doi:10.7652/xjtuxb201902019]
- 陈冬, 王亚宁, 刘亚雄, 等. 双投影光固化成型方法研究. 2017, 51(2): 149-154. [doi:10.7652/xjtuxb201702023]
- 谭力新, 刘亚雄, 陈若梦, 等. 个性化聚醚醚酮颅骨植入物多点柔性注塑工艺. 2016, 50(8): 130-136. [doi:10.7652/xjtuxb201608021]

(编辑 杜秀杰)