

3D打印技术在脊柱外科和医学教育中的应用

周平辉 肖慧 毛颖基 魏邦国 陈宇 赵宇朋 管晶晶 许盼盼

【摘要】 3D打印技术作为二十世纪八十年代产生的新兴技术,发展迅速,被认为是第三次工业革命的代表之一,改变了传统的制造方式,被广泛应用到多种领域,在医学领域有着举足轻重的地位。3D打印使得脊柱外科手术操作和医学教育产生了巨大的改变,如在手术辅助、打印个性化植入物、组织工程、医患沟通交流方面,对学生、实习生或缺乏经验的年轻医生的学习训练均起着十分重要的作用。本文主要简述3D打印在脊柱外科手术辅助和医学教育实践中的应用。

【关键词】 3D打印;脊柱外科;医学教育

3D打印是一种由数字信息生成物理模型、快速成型的打印技术,通过CT和MRI扫描获得数据,重建三维图像,将得到的数据输入3D成型仪器中,在不使用模具的情况下,运用数字技术材料打印机将可粘合材料沉积层层打印,“克隆”出物体的精细结构。3D打印技术作为一项前沿技术,近年来呈爆炸式应用于多种领域,目前在医疗、工业、建筑、航空航天等多种领域应用广泛,在医学领域应用也越来越多^[1,2]。

医学中有很多难点,就脊柱外科而言,脊柱解剖学结构复杂,术中存在各种不确定因素,病人对自身病情没有明确的认知,医患交流困难。同时,学生学习相关内容较为吃力,医学教育难度较大。近年来统计表明,脊柱相关方面的疾病在国内呈现出上升的趋势,脊柱复杂的解剖学结构要求手术医生必须有着熟练的手术技术,一旦失误就有可能给病人带来无法承受的后果。3D打印技术的出现改变了这一现状,利用3D打印1:1还原的能力,打造出三维病理模型,根据模型可以术前精确模拟手术,学生可以直观地观察三维立体结构模型进行学习,医务人员利用模型向病人讲解交流等。

3D打印提供了一种革命性医疗保健的可能性,使得脊柱外科手术在治疗安全上得到了一定的保障,以其自身的优势可以在一定程度上降低手术难度,提高了手术成功率,以前所未有的方式改善人们的生活,提高病人的生活质量^[3,4]。因此,本文拟通过文献综述,并从3D打印在脊柱外科临床上的应用、3D打印在医学教育上的应用两个方面去探讨3D打印在医学领域的作用。

一、文献检索策略

本文通过中文检索词“3D打印”“脊柱外科”“骨科”“医学教育”以及英文检索词“three-dimensional printing”“3D printing”“spine surgery”、“orthopedics”、“medical education”在中国知网、万方数据库、维普数据库、PubMed等平台进行检索,筛选近五年内发表的文献,最终纳入文献40篇,其中中文文献16篇,英文文献24篇(图1)。文献纳入标准为:①已正式发表的期刊文献;②文献内容与3D打印、脊柱外科、医学教育密切相关;③同类研究中质量、证据等级较高的文献;④语言为中文及英文的文献。文献排除标准为:①文献质量、证据等级较低的文献;②学位论文、会议类文献;③非中文及英文的文献;④无法获得全文的文献。

二、3D打印在脊柱外科临床上的应用

脊柱为人体中轴骨骼,具有减震、运动、支撑体重,保护脊髓、骨盆和腹腔脏器,保证大脑与内脏信号传输等重要功能,脊柱损伤病变后果较严重,由于脊柱的解剖学结构和其周围神经血管毗邻关系均较为复杂,使得脊柱手术难度很大,成为制约手术成功率的一大因素^[5]。临床上与脊柱相关的疾病主要分为:第一是脊柱方面的骨折脱位,常见的有颈椎、胸椎、腰椎的骨折脱位。第二是脊柱退变性疾病,常见的有颈椎病、腰椎滑脱症、腰椎间盘突出症等。第三是脊柱畸形方面的疾病,比较常见的有脊柱侧凸、后凸畸形、脊柱的半

索,筛选近五年内发表的文献,最终纳入文献40篇,其中中文文献16篇,英文文献24篇(图1)。文献纳入标准为:①已正式发表的期刊文献;②文献内容与3D打印、脊柱外科、医学教育密切相关;③同类研究中质量、证据等级较高的文献;④语言为中文及英文的文献。文献排除标准为:①文献质量、证据等级较低的文献;②学位论文、会议类文献;③非中文及英文的文献;④无法获得全文的文献。

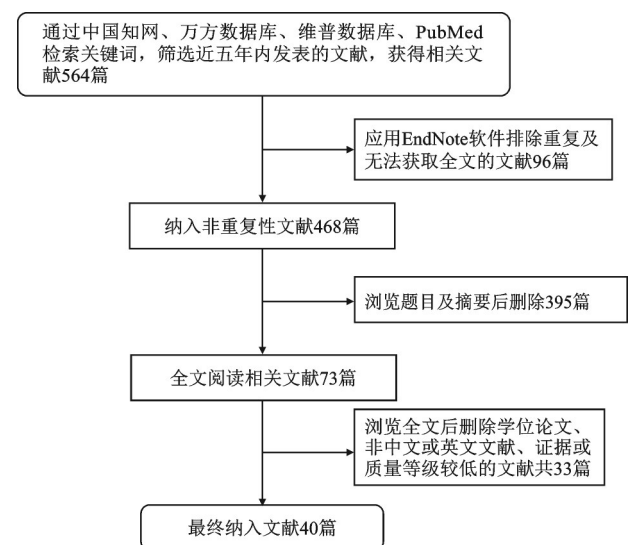


图1 文献筛选流程图

DOI:10.3969/j.issn.1674-8573.2020.02.016

基金项目:国家自然科学基金青年资助项目(31700854);安徽省教学研究一般基金资助项目(2018jyxm0824)

作者单位:蚌埠医学院第一附属医院,安徽蚌埠 233030

通信作者:许盼盼,E-mail:2420848374@qq.com

椎体畸形等。脊柱感染、脊柱肿瘤、脊柱结核以及脊柱骨缺损等疾病也是脊柱外科的范畴。

(一) 手术辅助

1. 脊柱骨折

脊柱骨折大约占全身骨折的 6.4%，脊柱骨折可损伤马尾神经或脊髓，严重时甚至有生命危险，因此脊柱受损后，无论是初步的救治和转运还是高级的手术操作，对于维持脊柱的正常外观结构和支撑功能均十分重要。目前治疗脊柱骨折的主要方法是内固定术，其中椎弓根螺钉置钉技术多见，甚至是某些疾病治疗的“金标准”。与徒手椎弓根螺钉置钉技术相比，3D 打印椎弓根螺钉置钉技术能显著地减少置钉的时间和提高手术的精准率。特别是颈椎前路椎弓根螺钉置钉，因为没有明显的骨性标记物，手术时易损伤周围组织结构，一直以来都是外科医生面临的难点与挑战^[6,7]。

3D 打印技术可以“克隆”出 1:1 的实物病理模型，医生可通过该病理模型进行模拟手术，选择特定的治疗方案，精确手术，对复杂又有难度的手术进行术前评估，降低手术的不确定性^[8]。Yang 等^[9]关于三维打印模型辅助螺钉在寰枢椎内固定的研究中得出结论，3D 打印模型可以更好地反映出骨折的具体位置、脱位程度及骨破坏面积，可以帮助医生确定螺钉放置的位置，提高放置精度，降低了损伤血管神经的概率等。对于颈椎骨折的病人，3D 打印模型易于看到椎动脉的位置，有助于手术过程中螺钉置钉的位置、角度和长度改变^[5]。3D 打印导航模块可帮助寰枢椎椎弓根螺钉达到微创个体化的精确置入。Pu 等^[10]将 49 例寰枢椎骨折脱位病人分为两组进行治疗，3D 打印导航模板组 25 例，传统手术组 24 例，在螺钉置入位置的正确率中，3D 打印导航模板组为 98%，传统手术组为 75%。

2. 脊柱畸变

脊柱畸形是指脊柱发生形态上的异常，偏离正常位置，脊柱的畸变使得脊柱无法发挥其正常功能，常见的类型有后凸、侧凸等，脊柱畸形病情十分复杂，因脊柱畸变常伴有多种解剖结构如周围神经、血管的异常等，椎体本身变异多样，脊柱的稳定性失衡，可能伴有心肺发育障碍，椎管也常畸形等，所以手术治疗难度大，成功率较低，是否能够准确置入螺钉是手术成功的关键^[11]。

治疗首先是对脊柱畸变处进行 CT 扫描，然后进行三维重建，将得到的三维数据输入 3D 成型仪器中，打印出仿真模型模拟手术，最后确定椎弓根最适的置入位置和角度。Modi 等^[12]在治疗脊柱侧凸病人时运用传统方法共置入 854 枚螺钉，结果发现，近三分之一的螺钉位置不准确，调整后复查仍有十分之一的置钉位置不正确。卢炯炯等^[13]通过手术对比，3D 打印组螺钉置钉位置准确率高于 CT 三维扫描组，矫正率和并发症发生率均明显低于 CT 三维扫描组，差异均具有统计学意义。

3. 脊柱结核

骨与关节结核是由结核分枝杆菌侵入骨或关节而引起的一种继发性感染性疾病，而脊柱结核的发病率在骨与关节

结核发病率中占首位，约占 50%，且由于结核对脊柱椎体及邻近脊髓的破坏，使得脊柱和脊神经的生理功能受到限制，脊柱结核的常见临床症状是背痛，最常累积腰椎，严重者甚至危及生命^[14,15]。

目前脊柱结核的手术方式主要是病灶清除和脊柱功能重建，随着椎弓根螺钉置钉技术的发展，使得脊柱功能重建有了很大突破，特别是脊柱后凸的处理，是目前效果最好的方式之一。椎弓根螺钉置钉技术虽然效果很好且应用范围广泛，但其存在一个制约手术效果的关键因素：置钉准确率。由于脊柱结核病人的脊柱本身存在骨质破坏，很难承受多次的置钉尝试，所以提高置钉的准确率对于提高脊柱结核病人的手术效果至关重要。传统的置钉技术主要是通过骨性标志和临床经验尝试置钉，这种方法置钉难度高，就算是经验丰富的医生，也存在置钉角度和深度偏差的情况，而 3D 打印椎弓根置钉技术可以明显改善置钉准确率和术后效果。Zhang 等^[7]对颈椎结核病人经 3D 辅助前路清创术及人工椎体置换术后，病人症状有所缓解，随访检查病人恢复良好。

同时由于结核对椎体的骨质破坏，脊柱手术在清除病灶后通常要植骨重建。3D 打印对植骨重建材料的选择又提供了一个新的思路，通过 3D 细胞打印，利用病人自身组织，通过 3D 打印的植骨材料和病人自体移植，获得同样无免疫排斥及生物相容性的效果，且 3D 打印通过数字化处理后的材料更加精确，不会对病人造成自体移植伤害等。

4. 脊柱肿瘤

脊柱是骨肿瘤转移的好发部位，肿瘤侵犯正常骨组织，影响脊柱的稳定性并伴有神经症状，脊柱肿瘤的病死率和致残率都比较高，目前治疗脊柱转移瘤最基本的方法就是手术切除，但脊柱解剖结构和周围组织关系复杂，不同脊柱节段的形态结构和毗邻关系不同。所以，无论是手术入路还是实行方案，处理难度都有差异，因此手术难度较大^[16]。脊柱肿瘤手术的关键是精准切除肿瘤并重建脊柱稳定性。3D 打印对手术的术式选择、手术入路和脊柱稳定性的重建均有一定的意义。

术前可以打印 3D 高仿真脊柱模型，确定瘤体空间状态、侵犯情况以及周围组织受压情况，明确瘤体周围毗邻关系，为病人制定个性化手术方式，确定最适手术入路，术前可模拟手术操作，有助于手术的成功^[17]。章玉冰等^[18]对 16 例脊柱肿瘤病人的病椎进行打印，参考病椎模型，制定最适手术方案，术前模拟操作等，结果显示 16 例手术均成功，精确切除了病灶，内置物的位置合适。总体来看 3D 打印对脊柱肿瘤手术有着很大的辅助作用。Mobbs 等^[19]通过 3D 打印技术成功完成了对病人颈椎肿瘤的切除和对脊柱的重建。Girolami^[20]等关于定制 3D 打印假体脊柱肿瘤整块切除后椎体重建的研究结果表明 3D 打印技术可以有效地应用于定制脊柱椎体假体。

3D 打印技术被广泛应用于脊柱外科手术中，通过 3D 打印技术进行术前规划、辅助置钉、模拟手术等等，从而选择最

适手术方案,精确手术,提高手术成功率。3D打印技术不断深入脊柱外科手术中,并且发挥着至关重要的作用。因此,3D打印技术在脊柱外科上的应用是复杂脊柱外科手术治疗的新契机。

(二)个性化植入物

人体构造精密复杂,常规植入物难以达到预期的效果,而3D打印可为病人量身定制植入物,做到精确匹配,满足病人个性化需求,且3D打印制造假体的时间较短。3D打印假体的微孔有利于组织附着,增加了支撑面积,使机体与植入物存在骨性结合,有更好的稳定性^[19]。

脊柱的个性化植入物主要有两种,一种主要起支撑作用,如人工椎体假体,第二种不仅起支撑作用还富有生物活性,如利用3D打印技术制作的生物支架。Choy等^[21]应用个性化3D打印椎体重建青少年T₁₂原发性骨肿瘤。武汉同济医院骨科和肿瘤科团队在对病人治疗脊柱肿瘤时,将脊柱整块切除,并通过3D打印出个性化人工脊柱,成功完成了对病人脊柱的重建^[22]。3D打印个性化定制椎间融合器植入物更加精细、准确,对于颈椎特殊的不规则形态,3D打印的椎间融合器更加适应,与损坏椎间隙的匹配十分完美^[23]。Spetzger等^[24]通过3D打印技术制作个体化椎间融合器,术后病人椎间融合器脱位和下沉的情况明显降低,且不需要额外内固定。吴敏飞等^[25]回顾性分析了65例脊髓型颈椎病手术,其中30例作为试验组植入3D打印椎间融合器,35例作为对照组植入普通异体骨块,试验组术后并发症发生率为6.7%,对照组为25.7%;相同时间段试验组生理曲度小于对照组,两组病人不同时间段椎体前缘高度和椎体后缘高度均随着距离手术时间延长而减小,但试验组相同时间段的椎体前缘高度和椎体后缘高度均小于对照组;两组病人术前JOA评分无统计学差异,但术后不同时间段试验组的JOA评分均大于对照组,且差异均具有统计学意义。可见3D打印的椎间融合器真实有效地提高了手术成功率。He等^[26]为病人切除颈椎肿瘤,对颈椎进行了全颈椎体的切除,并个性化制作3D打印微孔钛假体替换,重建脊柱的稳定性,病人术后恢复良好,生活工作不受影响。

三、3D打印在组织工程的应用

3D打印骨支架也在开展,是近年来研究的一大热点,动物模型已经证实了其可行性。外科临床上,由感染、结核、肿瘤、创伤造成脊柱骨质破坏多见,成骨细胞和破骨细胞只具有修复轻微骨损伤的能力,当发生严重的骨损伤时,主要通过植骨重建弥补缺损组织。当前的植骨重建方法主要有自体移植、同种异体移植和金属替代物。但这些方法目前尚存在着难以攻克的问题,如自体移植物的尺寸是受限的,且供体部位时伴有并发症现象;同种异体移植,虽然其供应较多,但是存在免疫排斥的风险;金属替代物存在免疫排斥,生物相容性及可选用的金属匮乏等问题。

随着3D打印的发展,一种新的植骨重建方式运用而生,利用数字化、准确性及可控性3D打印出的支架与组织工程结合,将细胞、生长因子等混入3D打印的支架中,为细胞生

长、增殖及分化提供载体,可植入机体病变部位,继续增殖、分化,支架能够与周围组织更好地匹配并完成修复,形成新的与自身功能和形态相适应的组织或器官,可以有效的避免上述问题,制造出替代自身骨的生物材料。理想的支架是构建良好骨组织的核心,3D打印的支架较传统的支架有着绝对的优势,3D打印技术层层打印的特点,可以高度模拟天然骨不同层次结构。3D打印的支架在三维方向上可调控,可以严格设定孔隙大小、孔形、孔隙率和孔间的互相联系,孔隙的设置对细胞提供了更大的表面积,相互联通通道的设计可以传递营养物质和排泄代谢废物,满足细胞对生长环境和力学性能的要求,为细胞的生长和骨的重建提供了适宜的生长环境^[27]。

Chou等^[28]发现3D打印的铁锰生物降解支架材料在体外测试显示具有良好的细胞相容性。水凝胶在结构、组成和力学性质上与天然软组织细胞外基质相似,目前已可应用包裹细胞的3D水凝胶进行活细胞或组织3D打印。综上所述,3D打印具有克服目前植骨重建局限性的潜力,且具有更多目前重建方式不具备的性能,随着3D打印的发展普及化,3D打印将更多地应用于临床。

四、3D打印在医学教育上的应用

(一)医患沟通

在医患关系紧张,医疗纠纷层出不穷的情况下,作为医护人员,做好医患沟通交流工作显得至关重要。在病人不具备专业的医学知识的背景下,医务人员给病人及其家属讲解手术原理耗费时间与精力,而现在医务人员可通过3D打印的病理模型对病人讲解疾患的复杂性和严重性,病人易于听懂接受,大致明白手术的风险,理解手术的性质,配合治疗,有助于双方沟通交流,避免医患矛盾^[29,30]。

(二)医学生教学

人体解剖结构复杂,目前的二维图像对于没有经验的医学生来讲很难在脑海中形成清晰的三维结构,尸体标本少,大多为正常结构且结构单一,所以目前医学教育有两大难点,首先,无法让学生有充分的感性认知;其次,学生和年轻医生无法充分接触手术和练习手术。因此,3D打印在此可发挥其独特的优越性。在医学教育中,利用3D打印的定制能力可以将疾患处的解剖学三维结构直观地展现给学生,资深医生更容易传达经验,学生更容易掌握、理解和记忆。由于手术无菌的要求,学生和年轻医生很难充分参与手术,可在3D实物模型上进行反复地手术练习,做到精准手术^[9,31,32]。

Wu等^[33]用3D辅助教学和传统教学两种方法进行脊柱教学考试时,得出3D辅助教学组学生平均分更高。西安交通大学将3D打印模型应用到颈椎教学中发现,可帮助规培生对疾病解剖学的认识,还可培养学生对骨科临床的兴趣,将主动权交给了学生,不再是灌输式教学^[34]。章浩等^[35]在椎弓根螺钉置钉技术教学过程中比较3D打印技术的应用和传统临床带教的效果,3D教学体系下的骨外科医生置钉操作用时更短,准确性更高,总的学习时间也少。椎间孔镜手术复杂,难度大,传统的教学是让缺乏经验的年轻医生经过长

时间的观摩后,在高年资医生指导下才能进行手术,观摩时视野受阻且没有感性的认知,运用 3D 打印的模型,年轻医生可以观察病理结构全貌,亲自反复操作练习,有效提高学习的效率^[36]。

五、3D 打印的局限性与未来展望

3D 打印目前还有一些局限性,因其制造成本高、准备图像打印模型的时间略长、材料来源有限,此外,化工工艺精细度和模型质量有待提高,临床上 3D 打印植入也存在定位不当,难以按照计划放置定制植入体的现象,这些都是当下待解决的问题^[37]。未来的 3D 打印有望能够打印出更高度仿真的模型,即把需要打印部位周围的软组织也打印出来,在视觉、触觉上更接近活体组织^[29,38]。打印出的假肢不仅是在人体结构上的模拟,还能做到在功能上的模拟。在组织工程方面,3D 打印技术可以彻底攻破将成骨细胞接种至 3D 打印的模型之中,植入体内继续生长的难题。目前还没有用活细胞进行 3D 打印,活细胞打印可能对未来细胞疗法在骨科领域的应用有所帮助^[37,39]。3D 打印技术还可以建立一个一体化平台,方便参与者的规划和沟通^[40]。随着科技的发展,数学医学的进步,3D 打印技术会为广大病人提供更好的服务。

参 考 文 献

- [1] Kim JW, Lee Y, Seo J, et al. Clinical experience with three-dimensional printing techniques in orthopedic trauma[J]. *J Orthop Sci*, 2018, 23(2): 383-388.
- [2] 温阳阳,李文龙,范亚楠,等.骨科 3D 打印技术的应用研究与前景展望[J]. *中国医药导报*, 2017, 16(6): 41-44.
- [3] Aimar A, Palermo A, Innocenti B. The role of 3D printing in medical applications: A state of the art [J]. *J Healthc Eng*, 2019: 5340616.
- [4] 刘建坤,邓树才. 3D 打印技术在脊柱外科中的地位与作用[J]. *中国组织工程研究*, 2017, 21(7): 1131-1136.
- [5] Wang YT, Yang XJ, Yan B, et al. Clinical application of three-dimensional printing in the personalized treatment of complex spinal disorders[J]. *Chin J Traumatol*, 2016, 19(1): 31-34.
- [6] Singhal AJ, Shetty V, Bhagavan KR, et al. Improved surgery planning using 3-D printing: a case study[J]. *Indian J Surg*, 2016, 78(2): 100-104.
- [7] Zhang YW, Deng L, Zhang XX, et al. Three-dimensional printing-assisted cervical anterior bilateral pedicle screw fixation of artificial vertebral body for cervical tuberculosis [J]. *World Neurosurg*, 2019, 127(3): 25-30.
- [8] 赵庆红,郭俊卿,高琰,等. 3D 打印技术在医疗领域的应用价值与展望[J]. *机械设计与制造*, 2018, 47(6): 1-5.
- [9] Yang M, Zhang N, Shi H, et al. Three-dimensional printed model-assisted screw installation in treating posterior atlantoaxial internal fixation[J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 11026.
- [10] Pu X, Yin M, Ma J, et al. Design and application of a novel patient-specific three-dimensional printed drill navigational guiding in atlantoaxial pedicle screw placement [J]. *World Neurosurg*, 2018, 114(1): e1-e10.
- [11] 李良生,芮钢,林山. 3D 打印技术在脊柱畸形矫正手术中的应用进展[J]. *中国骨科临床与基础研究杂志*, 2017, 9(6):370-378.
- [12] Modi H, Suh SW, Song HR, et al. Accuracy of thoracic pedicle screw placement in scoliosis using the ideal pedicle entry point during the freehand technique [J]. *Int Orthop*, 2009, 33(2): 469-475.
- [13] 卢炯炯,张宝,沈生军. 3D 打印技术在脊柱畸形矫正手术中的应用分析[J]. *世界最新医学信息文摘*, 2018, 18(73): 268-269.
- [14] Shi T, Zhang Z, Dai F, et al. Retrospective study of 967 patients with spinal tuberculosis [J]. *Orthopedics*, 2016, 39(5): e838-e843.
- [15] 沈兴利,张子凡,孙柏峰,等. 脊柱结核手术治疗研究进展[J]. *脊柱外科杂志*, 2018, 16(4): 253-256.
- [16] Choy WJ, Parr WCH, Phan K, et al. 3-dimensional printing for anterior cervical surgery: a review [J]. *J Spine Surg*, 2018, 4(4): 757-769.
- [17] 付军,郭征,王臻,等. 多种 3-D 打印手术导板在骨肿瘤切除重建手术中的应用[J]. *中国修复重建外科杂志*, 2014, 28(3): 304-308.
- [18] 章玉冰,余润泽,陶学顺,等. 3D 打印技术辅助脊柱肿瘤手术治疗的临床应用[J]. *实用癌症杂志*, 2019, 34(6): 1038-1040.
- [19] Mobbs R, Coughlan M, Thompson R, et al. The utility of 3D printing for surgical planning and patient-specific implant design for complex spinal pathologies: case report [J]. *J Neurosurg Spine*, 2017, 26(4): 513-518.
- [20] Girolami M, Boriani S, Bandiera S, et al. Biomimetic 3D-printed custom-made prosthesis for anterior column reconstruction in the thoracolumbar spine: a tailored option following en bloc resection for spinal tumors: Preliminary results on a case-series of 13 patients [J]. *Eur Spine J*, 2018, 27(12): 3073-3083.
- [21] Choy WJ, Mobbs RJ, Wilcox B, et al. Reconstruction of thoracic spine using a personalized 3D-printed vertebral body in adolescent with T9 primary bone tumor [J]. *World Neurosurg*, 2017, 10: 1032.e13-1032.e17.
- [22] 中新网. 华中地区首例植入 3D 打印人工脊椎手术成功[J]. *世界最新医学信息文摘*, 2018, 18(89): 3.
- [23] 吴天顺,陈扬,蓝涛,等. 脊柱 3D 打印椎间融合器材料的初步展望[J]. *生物骨科材料与临床研究*, 2018, 15(1): 58-63.
- [24] Spetzger U, Frasca M, Konig SA. Surgical planning, manufacturing and implantation of an individualized cervical fusion titanium cage using patient-specific data [J]. *Eur Spine J*, 2016, 25(7): 2239-2246.
- [25] 吴敏飞,矫健航,张善勇,等. 3D 打印椎间融合器在脊髓型颈椎病椎间盘摘除减压融合内固定术的应用效果[J]. *中华骨与关节外科杂志*, 2019, 12(2): 98-101.
- [26] He S, Yang X, Yang J, et al. Customized "whole-cervical-vertebral-body" reconstruction after modified subtotal spondylectomy of C2-C7 spinal tumor via piezoelectric surgery [J]. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*, 2019, 17(6): 580-587.
- [27] Zhang Y, Yu W, Ba Z, et al. 3D-printed scaffolds of mesoporous bioglass/gliadin/polycaprolactone ternary composite for enhancement of compressive strength, degradability, cell responses and new bone tissue ingrowth [J]. *Int J Nanomedicine*, 2018, 13: 5433-5447.
- [28] Chou DT, Wells D, Hong D, et al. Novel processing of iron-manganese alloy-based biomaterials by inkjet 3-D printing [J]. *Acta Biomater*, 2013, 9(10): 8593-8603.
- [29] Cho W, Job AV, Chen J, et al. A Review of current clinical applications of three-dimensional printing in spine surgery [J]. *Asian Spine J*, 2018, 12(1): 171-177.
- [30] Liew Y, Beveridge E, Demetriades AK, et al. 3D printing of patient-specific anatomy: a tool to improve patient consent and enhance imaging interpretation by trainees [J]. *Br J Neurosurg*, 2015, 29(5): 712-714.

- [31] 张亮, 邱宏. 3D打印技术在医学领域的应用[J]. 中国医学装备, 2018, 15(6): 154-157.
- [32] 赵少飞, 郭根玮, 周幸. 3D打印在骨科疾病诊疗中的应用进展[J]. 局解手术学杂志, 2018, 27(3): 225-228.
- [33] Wu AM, Wang K, Wang JS, et al. The addition of 3D printed models to enhance the teaching and learning of bone spatial anatomy and fractures for undergraduate students: a randomized controlled study[J]. *Ann Transl Med*, 2018, 6(20): 403.
- [34] 王栋, 赵波, 李锋涛. 上颈椎3D打印模型在骨科规范化培训教育中的应用[J]. 中国继续医学教育, 2015, 7(19): 23-24.
- [35] 章浩, 郑兴锋, 史晓辉, 等. 基于3D打印的椎弓根螺钉置钉技术教学体系的构建及评价[J]. 中国继续医学教育, 2018, 10(21): 25-27.
- [36] 黄国秀, 谭海涛. 3D打印模型在椎间孔镜手术教学中的应用进展[J]. 中国医学教育技术, 2017, 31(4): 460-464.
- [37] Mulford JS, Babazadeh S, Mackay N. Three-dimensional printing in orthopaedic surgery: review of current and future applications[J]. *ANZ J Surg*, 2016, 86(9): 648-653.
- [38] Pacione D, Tanweer O, Berman P, et al. The utility of a multimaterial 3D printed model for surgical planning of complex deformity of the skull base and craniovertebral junction[J]. *J Neurosurg*, 2016, 125(5): 1194-1197.
- [39] Skelley NW, Smith MJ, Ma R, et al. Three-dimensional Printing Technology in Orthopaedics[J]. *J Am Acad Orthop Surg*, 2019, 27(24): 918-925.
- [40] Wong KC. 3D-printed patient-specific applications in orthopaedics[J]. *Orthop Res Rev*, 2016, 8: 57-66.

(收稿日期: 2019-07-25)

(本文编辑: 龚哲妮)

本文引用格式

周平辉, 肖慧, 毛颖基, 等. 3D打印技术在脊柱外科和医学教育中的应用[J]. 骨科, 2020, 11(2): 168-172.

DOI: 10.3969/j.issn.1674-8573.2020.02.016.