

3D打印技术在脊柱外科中的应用进展

周驰雨, 初同伟

陆军军医大学第二附属医院新桥医院, 重庆 400037

【摘要】总结国内外脊柱外科,特别是在复杂脊柱疾病中(尤其是严重脊柱畸形和脊柱肿瘤)使用3D打印技术的文献,重点关注提到的3D打印种类、具体应用方法、治疗效果以及成本效益分析。对在脊柱外科手术中使用3D打印技术的文献进行电子检索,国内文献使用中国知网数据库进行检索,国外文献使用PubMed以及Web of Science数据库进行检索。检索词为:脊柱外科、3D打印技术、增材制造、快速成型、脊柱畸形、脊柱肿瘤;英文词为:Spine、Scoliosis、Spinal Tumor、3D printing、Additive manufacturing、Rapid prototyping。并对纳入的文献进行分类总结,检索到文献116篇(中文72篇,英文44篇),进行全文阅读分析后纳入文献35篇(中文15篇,英文20篇)。根据文献内容将3D打印应用分为手术导板、解剖模型以及个体化植入物。纳入文献提到的优点主要有减少手术时间、出血量、术中照射次数以及手术并发症发生率、改善治疗效果、提高患者满意度等。主要局限在于该技术目前缺乏统一标准、额外的打印费用、增加的学习成本、设计3D打印物耗费的时间以及植入物远期可靠性等。3D打印技术在脊柱疾病的治疗中确有价值,但在常见脊柱疾病中使用3D打印技术的意义和价值并不大,只有在较为复杂的病例中使用这项技术才能符合成本效益原则。

【关键词】3D打印;快速成型;增材制造;脊柱外科;综述

【中图分类号】R319

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2019)01-0060-05

Progress on application of 3D printing technology in spine surgery

ZHOU Chiyu, CHU Tongwei

Xinqiao Hospital, the Second Affiliated Hospital of Army Medical University, Chongqing 400037, China

Abstract: The literatures on the application of three-dimensional (3D) printing technology in spine surgery, especially in complex spinal deformities and spinal tumors are summarized. The review mainly focuses on the types of 3D printing, the specific application methods, treatment effects and cost-benefit analysis. The literatures are searched from China National Knowledge Infrastructure, PubMed and Web of Science. The keywords include Spine, Scoliosis, Spinal Tumor, 3D printing, Additive manufacturing and Rapid prototyping. A total of 116 literatures are retrieved, including 72 papers in Chinese and 44 papers in English. After full-text reading and analysis, only 35 literatures (15 in Chinese and 20 in English) were included in this study. According to the content of the literatures, the applications of 3D printing applied in spinal surgery were divided into surgical guide plates, anatomical models and individualized implants. The advantages mentioned in these literatures includes improvements of treatment outcomes and patient's satisfaction, reductions in operation time, amount of blood loss, number of intraoperative radiation and incidence of surgical complications. The main limitations of 3D printing technology include the lack of uniform standards, additional printing costs, increasing learning costs, taking a long time to design 3D printed materials, and the lack of long-term follow-up data to evaluate the reliability of implants. 3D printing technology is valuable in the treatment of spinal diseases, but the value of using 3D printing technology in common spinal diseases are not significant. Only using this technology in more complex cases can accord with cost-effective rule.

Keywords: three-dimensional printing; rapid prototyping; additive manufacturing; spine surgery; review

【收稿日期】2018-10-11

【基金项目】国家自然科学基金(81570800);陆军军医大学第二附属医院临床科研项目(2015YLC03)

【作者简介】周驰雨,硕士研究生,研究方向:数字医学与脊柱外科,E-mail: zhou2008@tmmu.edu.cn

【通信作者】初同伟,主任医师,博士生导师,研究方向:脊柱畸形与脊柱肿瘤的临床与基础研究,E-mail: chtw@sina.com

前言

近年来,高速发展的3D打印应用已经引起了医学界高度的关注。在外科领域中,这项技术对于提高手术的精准度以及改进治疗效果等方面有着巨大的潜力,特别是在脊柱外科,许多手术步骤复杂,术区牵涉许多重要的脊髓、神经根、椎旁血管等解剖结

构,而传统影像学二维平面资料难以全面反映病情。

在实际应用中,通过高分辨率CT和MRI的原始数据,医生可以在3D软件中重新构建个体化的人体组织,并将其打印成实际物体。这种实物与传统的平面影像学图像相比,除了精确度、分辨率都优于后者外,其立体感与可触摸感更是传统影像学资料所不具备的。除此之外,还可以依据打印出来的实物进行手术模拟,制作个体化手术导板以及作为植入物的塑形模具,较高级的3D打印技术则可以打印出个体化的植入物替代通用的器材,以达到更好的术后效果。同时,由于打印物真实地还原了病变组织,可以用于教育患者,使患者理解疾病情况及手术方式,以达到改善医患沟通的效果。

目前已经有文献报道3D打印技术在医学中的优点^[1]。本文目的在于分析纳入文献中提到的在脊柱疾病中使用3D打印技术应用的方法以及优缺点,重点关注3D打印技术的成本效益。

1 方法

电子检索已正式发表的国内外文献,时间限定于2000年1月~2018年3月,使用“脊柱外科、3D打印技术、增材制造、快速成型、脊柱畸形、脊柱肿瘤”作为主题词(英文主题词为:“Spine、Scoliosis、Spinal Tumor、3D printing、Additive manufacturing、Rapid prototyping”)搜索,以尽量涵盖所有脊柱外科使用3D打印技术的文章。纳入标准为:脊柱外科,3D打印技术,增材制造,快速成型,临床研究。排除标准为:非3D打印,非脊柱外科学,非临床用途,教学用途。国内使用中国知网数据库搜索,国外文献使用PubMed与Web of Science数据库。入选文献由第一作者独立严格筛选,文献语言使用中文及英语。对纳入的文献进行全文分析,进行应用分类,重点关注文献提到的具体方法、临床预后和效益成本。

2 结果

搜索结果显示,中文文献共计72篇,英文文献共计44篇。对文献进行筛选后,共纳入中文文献15篇,英文文献20篇。文献筛选策略见图1。纳入的文献中占比最高的是关于解剖模型的应用,占据总数的44%,这表明3D打印的解剖学模型是这项技术在脊柱外科中最重要的使用方法。其次是有关使用3D打印导板的文献,占文献数量的35%,这一类的文献大多是随机对照或者队列研究,具体分析在临床中使用3D打印导板后给患者带来的好处。打印个体化植入物的文献较少,仅占21%,这表明在人体植入物

这一类的应用中,3D打印技术处于发展的前期,这可能是由于个体化的打印物难以设立统一的标准进行临床应用,但涉及植入的文献都表明3D打印的植入物能较好地满足人的形态学需求,固定牢固、性能可靠,值得进一步大规模的临床实验。

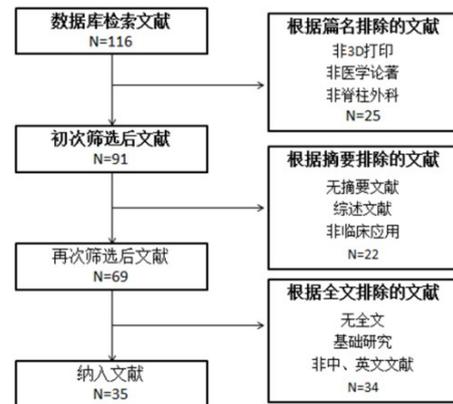


图1 检索策略和研究选择流程图

Fig.1 Search strategy and reasons for exclusion proportion

2.1 形态模型

使用3D打印技术制作形态模型是该技术在外科领域中最主要的应用方式。依据患者影像学数据可以精确地打印个体化的模型,用作手术计划制定和手术模拟,以便更好地了解术区变异情况,避免损伤重要结构^[2]。Wang等^[3]认为该技术的应用可以减少手术时间、术中透视次数以及出血量,同时有利于增加患者对疾病的了解,以达到更好的医患沟通效果。袁峰等^[4]认为在颈椎后纵韧带骨化病例中,3D打印模型能清晰全面反映椎管内骨化占位情况,对手术前、后路方式的选择有一定指导意义。

目前3D打印机制作的模型已经从单一白色、单一骨性模型发展到能打印出全彩、全组织模型。Goel等^[5]报道在先天性斜颈、短颈的患者治疗中,使用3D打印技术制作颅骨交界区彩色模型,除骨性结构外,还可添加神经、血管等重要毗邻结构,其研究结果显示,精确的3D模型为术区提供了明确的解剖学评估,尤其是在确定椎弓根螺钉置钉位置方面有传统透视无法匹敌的精确度。

在颈椎肿瘤的治疗中,En Bloc是最理想的手术方式,而传统资料难以全面反映病情。Xiao等^[6]认为3D打印彩色模型可以更好地区分正常组织与肿瘤组织,从而使外科医生可以更好地制定手术计划。王琪等^[7]报道脊柱肿瘤术前模型的建立可以指导术中更精确、完整地切除病变区域。而在脊柱畸形的治疗中,李彦明等^[8]认为打印的模型有助在术前了解各

椎体畸变情况,能有效地避免在发育严重狭窄的椎弓根中置钉。王虹等^[9]使用计算机辅助设计确定畸形矫形棒形态,并结合3D打印技术制作实物用于指导手术,研究结果认为打印组手术时间、出血量、平均X线照射次数均明显少于对照组,同时打印组的Cobb角纠正率以及置钉优良率也优于对照组。

脊柱椎弓根螺钉的置入是脊柱手术中常用的操作,而3D打印技术也能显著提高置钉的成功率。陈勤等^[10]报道在40例腰椎滑脱患者的治疗中,以随机对照的方式分为打印辅助置钉组及徒手置钉组,结果显示打印组置钉时间、穿刺次数以及置钉准确率等指标较对照组均有明显改善。杨泗华等^[11]研究表明,在强直性脊柱炎合并胸腰段椎体骨折的病例中使用3D打印技术制作椎体1:1模型,术前确定椎弓根螺钉置放位置并用于术中用于指导手术,结果显示实验组出血量、手术时间及术后引流量较对照组均有明显改善。

在脊柱的微创治疗方面,赖居易等^[12]认为3D打印的模型能帮助术前确定经皮椎间盘镜的入路点及工作通道角度等,研究的结果显示打印模拟组在手术时间、出血量及穿刺次数等方面均优于对照组。而Li等^[13]认为3D打印技术的确能减少腰椎间盘切除术后再次翻修手术的时间与出血量,但随访的结果显示打印组与对照组在ODI、JOA、VAS评分和围手术区并发症发生率与对照组相比无明显差异。

在儿童脊柱疾病治疗方面,也有学者认为重建的模型能有效地增加手术的安全性并改善预后^[14]。Karlín等^[15]采用回顾性分析研究17例儿童脊柱畸形的治疗,其中7例使用3D打印制作模型,10例使用传统二维影像学资料,研究结果显示打印组在术中透视次数、出血量以及畸形矫正率等方面均优于对照组。而在轻中度青少年特发性脊柱侧弯(主弯小于30°)的保守治疗中,Raux等^[16]使用光学三维扫描系统采集患者体表数据,并使用3D打印机制作支具,其产品与传统支具相比,无论是在制作速度、外形合适度、舒适感还是在矫形效果上都有很大的提高。

2.2 手术导板

作为3D打印在脊柱外科领域中的第二大类应用,手术导板主要用于椎弓根螺钉辅助置钉导板,其次为截骨导板。依据椎体表面形态数据结合工程设计能制作出完美贴合骨性表面的导板,能有效地在术中辅助外科医生进行操作。Kaneyama等^[17]在20例颈椎手术患者中使用3D打印技术制作的置钉导板辅助置钉,通过术前CT采集数据,使用3D打印机以非溶性丙烯酸酯为材料打印导板,等离子体消毒后用于手术中,共置钉80颗,术后CT复查显示,所有螺

钉都精确放置于预期位置,97.5%的螺钉完全放置于椎弓根皮质内,无一例并发症出现,并且减少术中的透视次数,同时报道每个导板价格平均为30美元,医疗支出的增幅并不明显。Chen等^[18]在43例腰椎后路固定术中使用3D打印的导板辅助置钉,与对照组相比,缩短手术时间、减少出血量、减少透视次数,但置钉准确度与对照组无差异,两组均未发生围手术期并发症。Liu等^[19]在重度脊柱畸形患者中使用3D打印技术制作置钉导板,共打入48枚椎弓根螺钉,置钉准确率达到93.8%,高于徒手置钉78.8%的准确率。

国内也有较多学者认为3D打印技术制作的导板可以有效提高置钉成功率。陈宣煌等^[20]在脊柱外科手术中使用3D打印技术制作个体化导板辅助放置椎弓根螺钉253枚,245枚达到理想效果,准确率高达96.84%。卢腾等^[21]在治疗颈椎畸形患者时制作了个体化的导板辅助置钉,明显减少了手术时间且术中未使用透视仪,消除了电离辐射的伤害,术后复查显示置钉优良率达97.1%,无并发症发生。吴超等^[22]以随机对照方式研究18例胸腰椎骨折的患者,结果显示打印导板组的出血量、手术时间、术中透视次数均少于对照组,同时置钉成功率及预后改善程度也均优于对照组;而且认为3D打印辅助置钉导板与计算机导航系统比较,前者的手术时间及出血量较后者明显减少,而置钉的准确率相同^[23]。

3D打印技术制作的导板是基于骨性组织表面形态,若导板位置放置不佳则依然有可能导致置钉失败。于海龙等^[24]在胸椎肿瘤术中用打印导板辅助置钉14枚,12枚位置良好,有2枚穿破椎弓根壁,但最终位置也在可接受范围内。因此,宁金沛等^[25]提出导板的使用需要清除骨表面的软组织才能获得较好的精度。而姜良海等^[26]则认为使用3D打印技术制作的标杆型导板能有效克服传统通道型导板使用时因软组织条件不好而造成的导板无法与骨面严密贴服而带来的误差。

在截骨导板方面,Lin等^[27]报道在骶骨神经鞘瘤的治疗中,采集影像数据制作出骶骨模型,结合计算机辅助设计截骨导板(依托对侧骶棘为接骨面),实现了外科医生对术区解剖结构的精确认识,术中无损伤任何神经根及硬脊膜,术后未发现脊柱不稳的情况。付军等^[28]在31例骨肿瘤患者中使用3D技术建立病灶数字化模型,预先确定手术范围及方式,并根据需要制作术区导板,结果显示较同期对照组,手术时间明显缩短,术中透视次数减少;但也提到由于存在术前3D建模设计和导板制作,大幅增加了术前时间,同时也出现了3例术中导板发生断裂的情况。

2.3 个体化植入物

相较于传统植入物的减材批量制造方式,3D打印技术逐层叠加的增材制造能定制出符合个体患者的特定植入物。Mroz等^[29]用3D打印技术制作的人工腰椎间盘,结合有限元软件分析处理假体应力、摩擦力及耐用性等问题,研究结果显示制作的假体不仅能全面满足腰椎活动的需要,还同时恢复了正常的椎间高度和腰段脊柱的生理曲度。而Knutsen等^[30]认为目前3D打印制作的椎间盘融合器缺乏可靠的力学测试,也无统一的测试标准,需要做更多的研究来优化3D打印融合器的设计和制作。

在脊柱肿瘤的治疗中,手术切除是目前最重要也是最有效的方法,以往钛笼结合椎弓根螺钉植入的固定技术已能达到稳定病变节段的效果,但长期随访依然能发现不少断钉、断帮和钛笼塌陷的病例。这往往是由于植入骨骨化不良、钛笼末端较尖锐等造成的应力增大引起的。对此,3D打印技术则能根据患者的个体化数据进行制作,能更好地还原人体正常结构,植入物与相邻椎体拟合度较好,可以获得更好的外观效果。此外,目前主流打印技术制作的钛合金多孔结构能有效地让自体组织细胞向内生长,以达到更好的结构稳定性。Mobbs^[31]等在高位(C₁-C₂)脊索瘤的治疗中,使用3D打印技术制作个体化带钉道的钛基假体来修复切除区域的缺损,术后9月随访无松动、移位等现象产生。同时也报道了在1例先天性半椎体患者中,根据患者病变椎体数据制作的个性化3D打印钛笼,并进行后路融合。在12个月的随访中,患者腰椎活动度较术前明显增加,VAS评分显著下降,Oswestry指数从术前68%降至0%,术后1年随访X线复查显示:钛笼与邻近骨组织融合成熟,无沉降移位现象。Xu等^[32]在颈2椎体尤文肉瘤的治疗中也认为用3D打印钛合金植入物能有效地重建C2椎体。Choy等^[33]在治疗1例14岁女性胸9椎体肿瘤患者的治疗中使用3D打印制作钛合金椎体假体植入替代病椎,认为这项技术能基于个体制作定制化假体,为植入后的固定提供更好的生理契合度,同时通过预先制定手术计划,显著减少手术时间。Kim等^[34]报道1例骶骨骨肉瘤患者全骶骨切除后使用3D打印钛合金骶骨植入的临床研究,术后病人仅出现了轻微的左下肢肌力下降,并于2周后恢复,1年随访显示钛合金植入物与周围骨组织紧密融合,患者无需辅助装置便能行走自如。Wei等^[35]在骶骨肿瘤En Bloc术中使用3D打印假体重建腰骶髂部结构,认为有以下优点:(1)定制的3D打印植入物综合SPF、PPRF及ASCF等术式的优点,提供了一个广泛、稳定

的重建结构;(2)多孔结构的打印假体有利于骨组织的长入,为远期骨性融合创造良好的条件。

3 结论

3D打印技术作为一种新兴科技,其医学应用产品主要为形态模型、手术导板以及个体化植入物等,其三维可视性使得医师在处理复杂脊柱手术上获得了以前通过平面影像资料无法得到的精确数据,再通过合理的术前设计使得在手术中能有效地避免损伤术区重要结构,极大地降低手术风险,节省手术时间。在个体化植入物的制作中,3D打印技术展示了其优于传统假体的个性化、多孔化等特点,但是在耐用性以及可靠性方面依然欠缺长期随访数据,同时3D技术制作模具所消耗的时间、设计软件的专业性以及打印产生的额外费用等问题限制了该技术的通用性,所以在常见脊柱疾病中使用3D打印技术的意义和价值并不大,只有在较为复杂的病例中使用这项技术才能符合成本效益。

【参考文献】

- [1] PROVAGGI E, LEONG J J, KALASKAR D M. Applications of 3D printing in the management of severe spinal conditions[J]. Proc Inst Mech Eng H, 2017, 231(6): 471-486.
- [2] WU A M, SHAO Z X, WANG J S, et al. The accuracy of a method for printing three-dimensional spinal models[J]. PLoS One, 2015, 10(4): e124291.
- [3] WANG Y, YANG X, YAN B, et al. Clinical application of three-dimensional printing in the personalized treatment of complex spinal disorders[J]. Chinese Journal of Traumatology, 2016, 19(1): 31-34.
- [4] 袁峰, 陆海涛, 邓斌, 等. 3D打印模型在颈椎后纵韧带骨化手术减压方式选择中的应用[J]. 中国组织工程研究, 2016, 20(39): 5852-5858.
- [5] YUAN F, LU H T, DENG B, et al. Application of a three-dimensional printing model of surgical decompression for cervical ossification of the posterior longitudinal ligament[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2016, 20(39): 5852-5858.
- [6] GOEL A, JANKHARIA B, SHAH A, et al. Three-dimensional models: an emerging investigational revolution for craniocervical junction surgery[J]. J Neurosurg Spine, 2016, 25(6): 740-744.
- [7] XIAO J R, HUANG W D, YANG X H, et al. En Bloc resection of primary malignant bone tumor in the cervical spine based on 3-dimensional printing technology[J]. Orthop Surg, 2016, 8(2): 171-178.
- [8] 王琪, 刘军, 王亚楠, 等. 3D打印技术在脊柱肿瘤手术中的应用[J]. 解放军医药杂志, 2016, 28(11): 16-19.
- [9] WANG Q, LIU J, WANG Y N, et al. Three dimensional printing guide in application of surgery for spinal tumor [J]. Medical & Pharmaceutical Journal of Chinese People's Liberation Army, 2016, 28(11): 16-19.
- [10] 李彦明, 李明, 张国友, 等. 3D打印在脊柱侧凸矫形中的应用初探[J]. 第二军医大学学报, 2016, 37(2): 231-235.
- [11] LI Y M, LI M, ZHANG G Y, et al. Application of 3D printing in orthopedics of scoliosis[J]. Academic Journal of Second Military Medical University, 2016, 37(2): 231-235.

- [9] 王虹, 丁煥文, 刘宝, 等. 计算机辅助技术联合3D打印模板在脊柱畸形矫正手术中的应用研究[J]. 中国临床解剖学杂志, 2016, 34(4): 392-396.
WANG H, DING H W, LIU B, et al. The research of computer aided design and 3D printing in spinal deformity surgery[J]. Chinese Journal of Clinical Anatomy, 2016, 34(4): 392-396.
- [10] 陈勤, 陈荣春, 游辉, 等. 3D打印技术在腰椎滑脱椎体椎弓根螺钉置入技术中的应用[J]. 中国医学创新, 2015, 12(35): 59-62.
CHEN Q, CHEN R C, YOU H, et al. Preliminary application of the 3D printing technology in lumbar spondylolisthesis pedicle screws[J]. Medical Innovation of China, 2015, 12(35): 59-62.
- [11] 杨泗华, 张翔, 于一凡, 等. 3D打印辅助经后路椎弓根钉棒内固定治疗强直性脊柱炎合并胸腰段椎体骨折的临床应用研究[J]. 中国数字医学, 2016, 7(11): 77-80.
YANG S H, ZHANG X, YU Y F, et al. Clinical application of 3D printing rapid prototyping assisted posterior reduction and pedicle screw-rod fixation in the treatment of thoracolumbar vertebral fracture with ankylosing spondylitis[J]. China Digital Medicine, 2016, 7(11): 77-80.
- [12] 赖居易, 何升华, 孙志涛, 等. 3D打印技术在腰椎经皮椎间孔镜髓核摘除术中的应用[J]. 广东医学, 2016, 37(S1): 137-139.
LAI J Y, HE S H, SUN Z T, et al. 3D printing application in lumbar vertebral surgery[J]. Guangdong Medical Journal, 2016, 37(S1): 137-139.
- [13] LI C, YANG M, XIE Y, et al. Application of the polystyrene model made by 3-D printing rapid prototyping technology for operation planning in revision lumbar discectomy[J]. J Orthop Sci, 2015, 20(3): 475-480.
- [14] SAKAI T, TEZUKA F, ABE M, et al. Pediatric patient with incidental os odontoideum safely treated with posterior fixation using rod-hook system and preoperative planning using 3D printer: a case report[J]. J Neurol Surg A Cent Eur Neurosurg, 2017, 78(3): 306-309.
- [15] KARLIN L, WEINSTOCK P, HEDEQUIST D, et al. The surgical treatment of spinal deformity in children with myelomeningocele[J]. J Pediatr Orthop B, 2017, 26(4): 375-382.
- [16] RAUX S, KOHLER R, GARIN C, et al. Tridimensional trunk surface acquisition for brace manufacturing in idiopathic scoliosis[J]. Eur Spine J, 2014, 23(S4): 419-423.
- [17] KANEYAMA S, SUGAWARA T, SUMI M. Safe and accurate midcervical pedicle screw insertion procedure with the patient-specific screw guide template system[J]. Spine, 2015, 40(6): 341-348.
- [18] CHEN H, WU D, YANG H, et al. Clinical use of 3D printing guide plate in posterior lumbar pedicle screw fixation[J]. Med Sci Monit, 2015, 21: 3948-3954.
- [19] LIU K, ZHANG Q, LI X, et al. Preliminary application of a multi-level 3D printing drill guide template for pedicle screw placement in severe and rigid scoliosis[J]. Eur Spine J, 2017, 26(6): 1684-1689.
- [20] 陈宣煌, 许卫红, 黄文华, 等. 基于3D打印的腰椎椎弓根螺钉数字化置入及临床应用[J]. 中国组织工程研究, 2015, 19(17): 2752-2757.
CHENG X H, XU W H, HUANG W H, et al. Digital placement and clinical application of lumbar pedicle screws based on 3D printing[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2015, 19(17): 2752-2757.
- [21] 卢腾, 李浩鹏, 臧全金, 等. 椎弓根螺钉导航模板在上颈椎手术中的应用[J]. 生物骨科材料与临床研究, 2015, 12(6): 29-32.
LU T, LI H P, ZANG Q J, et al. The use of pedicle screw navigational template in upper cervical surgery[J]. Orthopaedic Biomechanics Materials and Clinical Study, 2015, 12(6): 29-32.
- [22] 吴超, 谭伦, 林旭, 等. 3D打印个体化定位导板与计算机导航系统治疗颈椎骨折脱位的疗效比较[J]. 四川医学, 2015, 36(4): 452-455.
WU C, TAN L, LIN X, et al. Fracture and dislocation of the cervical spine treated with individualized navigation templates by three-dimensional printing technique or computer-aided navigation system: a comparative study[J]. Sichuan Medical Journal, 2015, 36(4): 452-455.
- [23] 吴超, 谭伦, 林旭, 等. 3D打印个体化矢状曲度模板及椎弓根螺钉导航模板在胸腰椎骨折脱位术中的应用[J]. 中国修复重建外科杂志, 2015, 29(11): 1381-1388.
WU C, TAN L, LIN X, et al. Clinical application of individualized reference model of sagittal curves and navigation templates of pedicle screw by three-dimensional printing technique for thoracolumbar fracture with dislocation[J]. Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery, 2015, 29(11): 1381-1388.
- [24] 于海龙, 王洪伟, 曹志强, 等. 数字化导航模板在颈胸段后路椎管内肿瘤切除减压、后路钉棒系统内固定术中的应用[J]. 解放军医药杂志, 2015, 27(11): 29-31.
YU H L, WANG H W, CAO Z Q, et al. Digital guiding plate in application of posterior tumor resection and decompression of cervical and thoracic spinal canal and posterior pedicle screws fixation[J]. Medical & Pharmaceutical Journal of Chinese People's Liberation Army, 2015, 27(11): 29-31.
- [25] 宁金沛, 吴卫东, 覃求, 等. 3D打印个体化导航模板在胸椎和颈椎椎弓根螺钉植入的临床应用[J]. 实用骨科杂志, 2015, 21(5): 385-389.
NING J P, WU W D, QIN Q, et al. Application of patient-specific drill template in the thoracic and cervical pedicle screw implantation: a clinical study[J]. Journal of Practical Orthopaedics, 2015, 21(5): 385-389.
- [26] 姜良海, 谭明生, 董亮, 等. 标杆型3D打印导板辅助寰枢椎椎弓根置钉准确度分析[J]. 脊柱外科杂志, 2016, 14(4): 205-210.
JIANG L H, TAN M S, DONG L, et al. Accuracy assessment of a 3D printed navigational guiding template for atlantoaxial pedicle screw placement[J]. Journal of Spinal Surgery, 2016, 14(4): 205-210.
- [27] LIN C, FANG J, LIN R. Resection of giant invasive sacral schwannoma using image-based customized osteotomy tools[J]. Eur Spine J, 2016, 25(12): 4103-4107.
- [28] 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.
FU J, GUO Z, WANG Z, et al. Use of four kinds of three-dimensional printing guide plate in bone tumor resection and reconstruction operation[J]. Chinese Journal of Reparative and Reconstructive Surgery, 2014, 28(3): 304-308.
- [29] MROZ A, SKALSKI K, WALCZYK W. New lumbar disc endoprosthesis applied to the patient's anatomic features[J]. Acta Bioeng Biomech, 2015, 17(2): 25-34.
- [30] KNUTSEN A R, BORKOWSKI S L, EBRAMZADEH E, et al. Static and dynamic fatigue behavior of topology designed and conventional 3D printed bioresorbable PCL cervical interbody fusion devices[J]. J Mech Behav Biomed, 2015, 49: 332-342.
- [31] MOBBS R J, 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.
- [32] XU N, WEI F, LIU X, et al. Reconstruction of the upper cervical spine using a personalized 3D-printed vertebral body in an adolescent with ewing sarcoma[J]. Spine, 2016, 41(1): E50-E54.
- [33] CHOY W J, MOBBS R J, 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, 105: 1013-1032.
- [34] KIM D, LIM J, SHIM K, et al. Sacral reconstruction with a 3D-printed implant after hemisacrectomy in a patient with sacral osteosarcoma: 1-year follow-up result[J]. Yonsei Med J, 2017, 58(2): 453.
- [35] WEI R, GUO W, JI T, et al. One-step reconstruction with a 3D-printed, custom-made prosthesis after total en bloc sacrectomy: a technical note[J]. Eur Spine J, 2017, 26(7): 1902-1909.

(编辑:陈丽霞)