

doi: 10.3978/j.issn.2095-6959.2018.11.035

View this article at: <http://dx.doi.org/10.3978/j.issn.2095-6959.2018.11.035>

## 3D 打印技术在脊柱外科的应用进展

徐震超 综述 陈刚 审校

(湘潭市中心医院脊柱外科, 湖南 湘潭 411100)

**[摘要]** 3D打印技术目前在医学领域应用比较广泛,其所具有的个性化、小批量和高精度等优势,正好迎合了精准医疗“量体裁衣,度身定做”的要求。此项技术在脊柱外科有较为广泛的应用,比如个体化模型、手术导板、假体内置物和很有应用前景的生物打印等。

**[关键词]** 3D打印; 脊柱外科; 精准医疗; 个体化

## Application of 3D printing in spinal surgery

XU Zhenchao, CHEN Gang

(Department of Spine Surgery, Xiangtan Central Hospital, Xiangtan Hunan 411100, China)

**Abstract** 3D printing technology is widely used in medical field. It has the advantages of individualization, small batch and high precision and meeting the requirements of precision medical “tailoring and tailoring”. This technique has a wide range of applications in spinal surgery, such as individual models, surgical guides, implants, and bioprinting with promising applications.

**Keywords** 3D printing; spinal surgery; precision medical; individualization

3D打印技术作为新兴的技术领域,是目前全球最尖端的技术之一,为医学领域的飞速发展带来了一次技术革新。该技术通过提取数据重建计算机三维模型逐层堆积打印实物,能打印出任何形状的个体化实物,且打印出的个体化实物可以提供理想的强度和性能而满足应用需求。

治疗个体化及精准化是脊柱外科未来发展的重要方向。作为医学数字化技术的集中体现,以3D打印技术为核心的高精度手术方案设计和植入假体制作,将脊柱外科带入了个体化、精准化、快速化的新时代。应用3D打印技术实现个体化模型、手术导板、假体内置物对于脊柱外科疑难病例的治疗、高难度手术的实现有极大的帮助,

而生物打印有极为广阔的前景和用途,但真正实现3D打印生物医用材料在临床上的应用还存在很大的挑战,是目前研究的热点。3D打印技术的应用,使脊柱外科得到了高速发展。

### 1 3D打印技术简介

3D打印技术是一种快速成型技术,通过计算机建模生成的三维数据信息,运用粉末状金属或塑料等可粘合材料,通过逐层打印的方式快速、精准地来构造出模型实体<sup>[1]</sup>。近年来该技术在各个领域快速崛起,已经广泛应用于医疗、航空航天、材料、电子等诸多领域,具有极大的研究价

收稿日期 (Date of reception): 2018-07-31

通信作者 (Corresponding author): 陈刚, Email: 3289405626@qq.com

值和广泛的应用前景, 被认为是可以“引发全球制造业巨大变革”的重要技术<sup>[2]</sup>。

## 2 3D打印技术在脊柱外科应用

脊柱的解剖结构十分复杂, 而且脊髓包绕在椎管内, 手术过程中如果出现失误, 极有可能导致患者瘫痪甚至死亡, 所以脊柱手术对于外科医师的技术是个巨大的挑战, 不允许出现丝毫误差。而且, 以前由于内置材料有限或术前难以全方位了解脊柱手术部位与毗邻大血管、重要器官的三维空间位置等, 使得很多脊柱手术难以进行或手术风险极大, 甚至有“手术禁区”之称<sup>[3-5]</sup>。近年来, 随着3D打印技术的飞速发展, 医疗模型甚至个体化内置物如人工椎体、peek材料等开始应用于脊柱手术, 对实现脊柱外科疾病治疗的个体化和精细化过程中发挥着极其重要的作用, 使得脊柱外科获得高速发展<sup>[6]</sup>。

### 2.1 个体化模型

由于每个病例的临床特征各不相同, 在传统脊柱外科手术过程中, 医生主要依据患者的X线、CT及MRI图像来进行手术规划。这需要脊柱外科医师有一定的立体空间的想象力, 将术前影像学的这些二维平面图像转化为三维立体图像。但脊柱病灶侵蚀椎体或附件, 使正常的解剖结构遭到破坏, 在二维平面上不能直观病灶区域, 术者难以把握病灶周围情况, 造成手术耗时较长、术中出血量多等, 这些都可能使术后并发症的发生率增高。与虚拟现实手术设计相比, 3D打印技术能直接、精准地将手术区域部位的三维物理模型打印出来, 使术者能够一目了然地看清病灶形状及与周围组织间的关系, 对疾病做出更加全面及精确的诊断。通过3D打印模型, 术者可以进行实物模拟操作, 对各种手术方式进行验证, 从而为患者量身设计最佳个体化治疗方案。这不但提高了手术精度、缩短了手术时间, 还使得一些以前不能开展的手术变为可能。Pacione等<sup>[7]</sup>通过应用3D打印模型, 对上颈椎畸形并颅底凹陷症患者病变区域的骨性畸形、脊髓受压情况及椎动脉走向进行了全面的评估, 通过实物模拟操作, 制定最佳的手术方案, 术后患者恢复良好。3D打印技术对于制定手术策略、设计置钉位置和置钉角度、降低椎动脉和脊髓损伤的发生率很有帮助, 能提高手术成功率及安全性且对医患沟通有很好的促进作用; 这与尹一恒等<sup>[8]</sup>将3D打印模型应用于10例

颅底凹陷症并寰枢椎脱位患者所取得满意的临床疗效相似。Xiao等<sup>[4]</sup>通过3D打印技术指导治疗5例颈椎原发性恶性肿瘤全脊椎切除、360°重建, 术后无脑血管并发症和伤口感染, 随访期间未发现局部复发或内固定松动、断裂; 术前3D打印模型能够更好地解剖肿瘤和颈椎之间的关系, 并有助于规划手术过程。王琪等<sup>[9]</sup>对22例脊柱肿瘤患者术前行CT扫描, 收集相关数据进行3D模拟重建, 使用3D打印技术制造出与实体1:1比例的病灶区域脊柱模型, 制定手术方案、模拟手术操作和预处理内置物, 术中精准、完整地切除了病灶区域, 术后随访提示疼痛症状及神经功能障碍均较术前好转, 且缩短了手术时间、减少术中出血, 创伤小、并发症少。李宝杰等<sup>[10]</sup>综述表明: 对于多种脊柱手术, 术前利用3D打印模型进行术前评估规划及手术模拟, 能使患者明显受益。但目前应用3D打印模型也存在费用高、数据采集对影像学设备要求高等缺点。

### 2.2 个体化导板

椎弓根螺钉置入技术广泛应用于各种脊柱手术, 徒手置钉仍然是最常见的置入技术。对于先天性脊柱侧凸、上颈椎畸形的患者, 椎体形态不规则, 且大部分伴有发育、旋转畸形, 徒手置钉难度大、风险高, 存在因置钉失误而引起脊髓、血管损伤, 甚至导致致命的并发症<sup>[11-12]</sup>。有学者<sup>[13]</sup>研究发现, 徒手置入椎弓根螺钉错位发生率为20%~30%, 发生严重的血管、神经损伤的并发症约占2%。如何降低置钉失误, 提高安全性与成功率, 越来越引起脊柱外科医师的重视。利用3D打印技术, 打印脊柱模型及导航模板, 帮助术者在手术前清楚地了解置钉部位的三维解剖情况, 能够让医师很容易地进行解剖曲面完全吻合的、精准化的手术, 大大增加置钉的安全性, 有助于更好指导手术的进行。Radermacher等<sup>[14]</sup>在1998年首次将3D打印导板技术应用于腰椎椎弓根螺钉置入。目前关于个体化脊柱螺钉导向模板的研究较为深入, 已开始逐步应用于脊柱翻修、矫形、融合术式以及上颈椎等高风险手术中。Sugawara等<sup>[15]</sup>对12例寰枢椎不稳定的手术患者应用3D打印导板辅助置入寰椎侧块钉及枢椎椎弓根螺钉, 左右螺钉均成功置入且未穿透骨皮质, 术后通过复查影像学发现与术前计划的置钉路线偏差仅为(0.70±0.42) mm。Lu等<sup>[16]</sup>使用双侧型钻孔导板对16例脊柱侧凸的患者置入椎弓根螺钉168枚, 仅有11枚穿透骨皮质, 且均<2 mm, 所有患者均获得满意

的矫正率。Ma等<sup>[17]</sup>将20具尸体随机分为徒手置钉组和导板置钉组,所有标本行三维CT扫描,并生成三维重建模型,每组于T<sub>1</sub>~T<sub>12</sub>各置入椎弓根螺钉240枚,最后发现徒手置钉组有156枚完全在椎弓根内,58枚穿破骨皮质 $\leq 2$  mm,16枚穿破骨皮质 $> 2$  mm且 $\leq 4$  mm,10枚穿破骨皮质 $> 4$  mm或完全偏出;导板置钉组中224枚完全在椎弓根内,16枚穿破骨皮质 $< 2$  mm。两种方法胸椎椎弓根螺钉置入的准确率和风险发生率差异有统计学意义( $P < 0.05$ ),导航置钉比徒手置钉具有更高的准确率和更低的风险发生率。马晨光等<sup>[18]</sup>Meta分析结果显示:3D打印技术可减少骨科手术时间,降低术中出血量,提高植钉准确率或成功率(为传统常规技术的2.10倍),3D打印技术骨科临床应用的短期效应总体较好。

### 2.3 个体化内置物

应用3D打印技术,定制个体化内置物,是目前研究的重点。脊柱解剖结构十分复杂,对内固定材料的精细度要求高,但现有的脊柱内固定材料如椎弓根螺钉、椎间融合器、钛网等均是统一生产,内固定材料的不同型号及规格差距较大,难以满足不同患者的需求。目前对于个体化内置物在脊柱外科的应用尚未查阅到大样本的对照研究,仅见于个案报道。要将3D打印个体化内置物大规模应用于患者体内,还需要进一步的临床试验与研究。北京大学第三医院<sup>[19]</sup>报道了1名患有C2尤文氏瘤的12岁男性患者行肿瘤病灶全切除术,应用3D打印技术精准制作个体化钛合金材质枢椎置入物,并成功进行了枢椎置换术,植入物的显微结构被优化以提高生物力学稳定性及增强骨愈合,术后上颈椎功能得到保留,随访1年未见肿瘤复发。杨泽雨等<sup>[20]</sup>应用新型3D打印多孔钛人工椎体在猪脊柱模型进行椎体置换术并比较术前与术后的生物力学相关指标,发现新型3D打印人工椎体在猪脊柱模型椎体置换后,即刻可获得良好的生物力学稳定性能,为3D打印技术制作的个体化人工椎体在全椎体切除置换术中的应用提供了实验依据。Spetzger等<sup>[21]</sup>应用患者的CT数据,绘制患者颈椎3D模型,通过3D打印技术制作个体化钛合金椎间融合器,并将其应用于颈椎前路融合手术。因椎间融合器的接触面是根据术前的个体化解剖数据打印而成,其与相邻椎体的上下终板的贴合性较传统量产椎间融合器更好,术后随访提示椎体间稳定性满意,椎间融合器脱位和下沉的

发生率明显降低,并且不需要再进行额外的内固定。个体化内置物主要优势包括:1)可以满足内置物多样化、个性化要求,假体与原解剖形态一致,较传统量产内置物更能重塑脊柱的外观与功能,且对活动度影响小;2)3D打印技术联合生物组织工程可直接打印出具有生物活性且解剖结构完全与人体匹配的组织器官;3)假体置入物与多孔技术相结合,使宿主与假体置入物之间存在以生物形式相结合,即骨性结合,大大增加了内置物的稳定性<sup>[22-24]</sup>。

### 2.4 个体化生物打印

3D生物打印是在数字三维模型驱动下,按照增材制造原理定位装配生物材料或细胞单元,制造医疗器械、组织工程支架和组织器官等<sup>[25]</sup>。这是生物医学与材料学相融合的交叉学科,在3D打印技术中属于最前沿的研究领域,近年来取得高速发展,目前已成功打印出较小比例的人类耳朵软骨组织、肝单元等。在脊柱外科,由于具有可选择材料的多样性,3D打印技术可以制作各种骨组织工程支架,满足患者个体化定制的要求,其基本内容包括生物材料支架和细胞,生物材料支架良好的机械强度不仅可以重塑脊柱的稳定性,而且还可以使细胞在特定的孔隙率、交联的三维支架上增殖、分化。生物材料支架的降解产物还有促进细胞黏附、生长和增殖的作用,其降解速度与成骨的速度相匹配,最后完全修复骨组织缺损,达到治疗的目的<sup>[26-30]</sup>。Zhao等<sup>[31]</sup>应用3D打印技术,以左旋聚乳酸粉末和左氧氟沙星及妥布霉素为原料,成功制备出多药控释型载药人工骨,既能单独使用,也可结合钛网使用。Rosenzweig等<sup>[32]</sup>报道利用3D打印技术制作丙烯腈丁二烯苯乙烯(acrylonitrile butadiene Styrene copolymers, ABS)和聚乳酸(poly(lactic acid), PLA)生物支架,将关节软骨细胞和髓核细胞在ABS和PLA支架上培养3周,发现这两种细胞增殖、分化良好,并在支架上产生足够量的蛋白聚糖和II型胶原,这对于治疗椎间盘退行性疾病有极大的促进作用。罗文峰等<sup>[33]</sup>综述表明:通过3D打印设备将生物相容性细胞、支架材料、生长因子、信号分子等在计算机指令下层层打印,形成有生理功能的活体器官,达到修复或替代的目的,在生物医学领域有着极其广泛的用途和前景。目前3D生物打印技术的应用仅见于细胞实验和动物实验,还有很大的研究探索空间。



### 3 结语

脊柱的解剖结构、生物力学特点复杂,与脊髓神经、脏器、血管等重要结构相毗邻,手术难度高、风险大,几乎所有术后患者需要外固定支具的进一步保护。3D打印技术可以根据不同患者不同类型的伤势进行定制,做到每位患者得到最适合自己的治疗方案。而且对于刚接触脊柱外科的医师来说,要掌握复杂的三维解剖结构及各种神经的走行分布,抽象的知识难以记忆与理解。随着3D打印技术在临床上的应用和发展,解剖模型、支具定制、术前建模、钉道导板、脊柱内置物等在脊柱外科逐步开展,为脊柱外科教学、脊柱疾病诊治、医患沟通、术前规划、手术模拟操作、新颖手术器械及内置物发掘、预测评估手术效果等提供了新的方法。应用3D打印技术不仅能提高手术成功率,简化操作过程,提高手术精确性,还能减少并发症,加快患者康复速度,具有精确性、安全性、可重复性的特点。有研究<sup>[34]</sup>报道:目前计算机辅助设计结合导航模板应用于3D打印假体植入已逐步开始应用于临床,相信随着3D打印技术的进一步发展,在不久的将来一定能实现脊柱模型、导航导板、个性化内置物在脊柱外科常规使用。

但目前3D打印在临床上也有其局限性:1)总体费用较高,耗时较长;2)3D打印模型或假体依赖于影像学数据的采集,要求影像资料质量高且存在数据易缺失,影响打印的精确性<sup>[35]</sup>;3)3D打印材料要求高,内置物材料需要有良好的生物相容性及安全性,要能够符合脊柱生物力学特点。4)个性化内置物短期效果满意,但缺乏长期的随访结果。3D打印技术在临床的应用虽有很好的发展前景,但也还有许多问题值得探索、研究。

3D打印技术在脊柱外科基础研究中主要集中在骨组织工程研究,虽然目前此项技术研究处于起步阶段,但随着研究的深入,此领域极有可能产生极重要的科研成果,精准复制组织细胞用于人体组织的修复、重建及再生,在脊柱外科疾病的治疗上将颠覆传统的方式。3D打印技术与精准医疗理念相吻合,随着技术的不断深入发展,3D带技术未来在脊柱外科领域将进一步深入,产生质的飞跃。

### 参考文献

1. Rengier F, Mehndiratta A, von Tengg-Kobligk H, et al. 3D printing based on imaging data: review of medical applications[J]. *Int J Comput*

- Assist Radiol Surg, 2010, 5(4): 335-341.
2. Arai K, Iwanaga S, Toda H, et al. Three-dimensional inkjet biofabrication based on designed images[J]. *Biofabrication*, 2011, 3(3): 034113.
3. 陈昱霖, 王文军. 3D打印个性化导板在脊柱置钉中的应用进展[J]. *脊柱外科杂志*, 2016, 14(6): 376-380.  
CHEN Yulin, WANG Wenjun. Research progress in three dimensional printing guide template for spinal screws placement[J]. *Journal of Spinal Surgery*, 2016, 14(6): 376-380.
4. Xiao JR, Huang WD, Yang XH, 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.
5. Yang M, Li C, Li Y, et al. Application of 3D rapid prototyping technology in posterior corrective surgery for lenke 1 adolescent idiopathic scoliosis patients[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2015, 94(8): e582.
6. Yang J, Cai H, Lv J, et al. In vivo study of a self-stabilizing artificial vertebral body fabricated by electron beam melting[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2014, 39(8): E486-E492.
7. 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.
8. 尹一恒, 余新光, 佟怀宇, 等. 3D打印技术在颅底凹陷合并寰枢椎脱位手术中的应用[J]. *中华医学杂志*, 2015, 95(37): 3004-3007.  
YIN Yiheng, YU Xinguang, TONG Huaiyu, et al. Exploratory study of 3D printing technique in the treatment of basilar invagination and atlantoaxial dislocation[J]. *National Medical Journal of China*, 2015, 95(37): 3004-3007.
9. 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.  
WANG Qi, LIU Jun, WANG Ya'nan, et al. Three dimensional printing guide in application of surgery for spinal tumor[J]. *Medical Journal of Chinese People's Liberation Army*, 2016, 28(11): 16-19.
10. 李宝杰, 段丽萍, 李晓光. 3D打印技术在脊柱外科中的应用现状[J]. *中国矫形外科杂志*, 2017, 25(15): 1405-1408.  
LI Baojie, DUAN Liping, LI Xiaoguang. Application of three-dimensional printing technique in spine surgery[J]. *Orthopedic Journal of China*, 2017, 25(15): 1405-1408.
11. Hicks JM, Singla A, Shen FH, et al. Complications of pedicle screw fixation in scoliosis surgery: a systematic review[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2010, 35(11): E465-E470.
12. Zhu F, Sun X, Qiao J, et al. Misplacement pattern of pedicle screws in pediatric patients with spinal deformity: a computed tomography study[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2014, 27(8): 431-415.
13. Upendra BN, Meena D, Chowdhury B, et al. Outcome-based classification for assessment of thoracic pedicular screw placement[J]. *Spine*

- (Phila Pa 1976), 2008, 33(4): 384-390.
14. Radermacher K, Portheine F, Anton M, et al. Computer assisted orthopaedic surgery with image based individual templates[J]. Clin Orthop Relat Res, 1998(354): 28-38.
  15. Sugawara T, Higashiyama N, Kaneyama S, et al. Accurate and simple screw insertion procedure with patient-specific screw guide templates for posterior C1-C2 fixation[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2017, 42(6): E340-E346.
  16. Lu S, Zhang Y Z, Wang Z, et al. Accuracy and efficacy of thoracic pedicle screws in scoliosis with patient-specific drill template[J]. Med Biol Eng Comput, 2012, 50(7): 751-758.
  17. Ma T, Xu YQ, Cheng YB, et al. A novel computer-assisted drill guide template for thoracic pedicle screw placement: a cadaveric study[J]. Arch Orthop Trauma Surg, 2012, 132(1): 65-72.
  18. 马晨光, 纪颖, 薛迪. 3D打印技术骨科临床应用效应系统性综述[J]. 中国医院管理, 2017, 37(5): 35-38.  
MA Chenguang, JI Ying, XUE Di. Systematic review of the effect of clinical application of three-dimensional printing technology in orthopedics[J]. Chinese Hospital Management, 2017, 37(5): 35-38.
  19. 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 (Phila Pa 1976), 2016, 41(1): E50-E54.
  20. 杨泽雨, 杨欣建, 陈扬, 等. 新型3D打印多孔钛人工椎体在猪脊柱模型置换前后的生物力学测试研究[J]. 生物骨科材料与临床研究, 2016, 13(1): 7-9.  
YANG Zeyu, YANG Xinjian, CHEN Yang, et al. Biomechanical test research before and after the replacement of the novel 3D printing porous titanium artificial vertebral body in porcine models[J]. Orthopaedic Biomechanics Materials and Clinical Study, 2016, 13(1): 7-9.
  21. Spetzger U, Frasca M, Kasca MU, et al. Accuranc and implantation of an individualized cervical fusion titanium cage using patientspecific data[J]. Eur Spine J, 2016, 25(7): 1-8.
  22. Dai KR, Yan MN, Zhu ZA, et al. Computer-aided custom-made hemipelvic prosthesis used in extensive pelvic lesions[J]. J Arthroplasty, 2007, 22(7): 981-986.
  23. Hollander DA, von Walter M, Wirtz T, et al. Structural, mechanical and in vitro characterization of individually structured Ti-6Al-4V produced by direct laser forufing[J]. Biomaterials, 2006, 27(7): 955-963.
  24. Fedorovich NE, Alblas J, Hennink WE, et al. Organ printing: the future of bone regeneration?[J]. Trends Biotechnol, 2011, 29(12): 601-606.
  25. 张小翠, 陈鹏. 3D生物打印技术及其在组织工程中的应用[J]. 临床与病理杂志, 2017, 37(7): 1496-1499.  
ZHANG Xiaocui, CHEN Peng. 3D bioprinting technology and its application in tissue engineering[J]. Journal of Clinical and Pathological Research, 2017, 37(7): 1496-1499.
  26. Yao Q, Wei B, Guo Y, et al. Design, construction and mechanical testing of digital 3D anatomical data-based PCL-HA bone tissue engineering scaffold[J]. J Mater Sci Mater Med, 2015, 26(1): 5360.
  27. Lee JW, Cho DW. 3D printing technology over a drug delivery for tissue engineering[J]. Curr Pharm Des, 2015, 21(12): 1606-1617.
  28. Jung JW, Lee H, Hong JM, et al. A new method of fabricating a blend scaffold using an indirect three-dimensional printing technique[J]. Biofabrication, 2015, 7(4): 045003.
  29. Hourd P, Medcalf N, Segal J, et al. A 3D bioprinting exemplar of the consequences of the regulatory requirements on customized processes[J]. Regen Med, 2015, 10(7): 863-883.
  30. Wang C, Xue Y, Lin K, et al. The enhancement of bone regeneration by a combination of osteoconductivity and osteostimulation using  $\beta$ -CaSiO<sub>3</sub>/ $\beta$ -Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> composite bioceramics[J]. Acta Biomater, 2012, 8(1): 350-360.
  31. Zhao Y, Li Y, Mao S, et al. The influence of printing parameters on cell survival rate and printability in microextrusion-based 3D cell printing technology[J]. Biofabrication, 2015, 7(4): 045002.
  32. Rosenzweig D, Carell E, Steffen T, et al. 3D-printed ABS and PLA scaffolds for cartilage and nucleus pulposus tissue regeneration[J]. Int J Molecular Sci, 2015, 16(7): 15118-15135.
  33. 罗文峰, 杨雪香, 敖宁建. 生物医用材料的3D打印技术与发展[J]. 材料导报, 2016, 30(13): 81-86.  
LUO Wenfeng, YANG Xuexiang, AO Ningjian. A review of three dimensional printing technologies for biomaterial applications[J]. Materials Review, 2016, 30(13): 81-86.
  34. 丁焕文, 苗秋菊, 刘辉亮, 等. CAD结合3D打印导航模板辅助TKA术前设计和临床应用[J]. 中国骨科临床与基础研究杂志, 2017, 9(5): 261-268.  
DING Huanwen, MIAO Qiuju, LIU Huiliang, et al. Preoperative design and clinical application of TKA assisted by CAD combined with 3D printing navigation templates[J]. Chinese Journal of Clinical and Basic Orthopaedic Research, 2017, 9(5): 261-268.
  35. Ogden KM, Aslan C, Ordway N, et al. Factors affecting dimensional accuracy of 3-D printed anatomical structures derived from CT data[J]. J Digit Imaging, 2015, 28(6): 654-663.

本文引用: 徐震超, 陈刚. 3D打印技术在脊柱外科的应用进展[J]. 临床与病理杂志, 2018, 38(11): 2513-2517. doi: 10.3978/j.issn.2095-6959.2018.11.035

Cite this article as: XU Zhenchao, CHEN Gang. Application of 3D printing in spinal surgery[J]. Journal of Clinical and Pathological Research, 2018, 38(11): 2513-2517. doi: 10.3978/j.issn.2095-6959.2018.11.035