

可动型人工椎体的研究进展

李家良¹, 闻志靖¹, 贺西京¹, 魏馨雨²

(1. 西安交通大学第二附属医院骨二科, 陕西 西安 710004; 2. 西安交通大学第二附属医院耳鼻咽喉科, 陕西 西安 710004)

【摘要】 目前使用人工椎体植入物在治疗脊柱肿瘤、感染、骨折等疾病已经取得了较好的疗效。然而, 融合型人工椎体会导致邻近椎间关节退变, 丧失原有的生理曲度及活动度。可动型人工椎体可以一定程度恢复脊柱正常的生理运动, 减少脊柱生物力学改变, 以减少并发症的发生。可动型人工椎体的设计是在获得可靠稳定性的基础上增加可动装置, 其原理大可分为球窝关节和弹性形变, 但可动型人工椎体的整体设计还需进一步完善。传统机械加工方法难以加工复杂的假体, 其生产的假体与病灶契合率低, 而新兴的 3D 打印技术可以实现假体个性化改进, 但其速率慢, 成本高等情况有待改善。可动型人工椎体制作的材料大体可分为金属、陶瓷、生物材料、高分子材料等。金属材料以钛合金为主流, 应用广泛, 但其弹性模量与人骨还有差距, 与骨融合尚不理想; 陶瓷材料种类丰富, 但存在耐磨性差, 易碎等特点; 生物材料包括自体骨、异体骨等, 其来源有限, 操作复杂; 高分子材料和生物可降解材料种类丰富, 理想性能优异, 但还需进一步研究其性质与应用。可动型人工椎体仍需提升和发展, 临床实验数据仍不足, 远期疗效还有待进一步观察研究, 本文对可动型人工椎体的发展、优点、设计、加工、材料等方面展开综述, 为可动型人工椎体的优化设计、加工处理与临床应用等提供有益参考。

【关键词】 可动型人工椎体; 颈椎; 综述文献

中图分类号: R681.5

DOI: 10.3969/j.issn.1003-0034.2019.07.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Advances on the study of movable artificial vertebral body LI Jia-liang, WEN Zhi-jing, HE Xi-jing*, and WEI Xin-yu.

*The Second Department of Orthopaedics, the Second Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710004, Shaanxi, China

ABSTRACT At present, artificial vertebral implants have proven to be effective in the treatment of spinal tumors, infections, fractures and other diseases. However, the fusion artificial vertebral body can cause adjacent intervertebral joint degeneration and loss of original physiological curvature and activity. The movable artificial vertebral body can, to some extent, restore the normal physiological movement and reduce biomechanical changes of the spine, reducing the occurrence of complication. The design of movable artificial vertebral body is to equip movable device when the basis of reliable stability is obtained. According to its principle it can be divided into ball socket joint or elastic deformation. However the overall design of movable artificial vertebral body needs further improvement. Traditional mechanical processing methods are difficult to process complex prostheses and the agreement rate between traditional produced prostheses and lesions was low. While the emerging 3D printing technology can achieve individualized improvement of prosthesis, its slow rate and high cost need to be improved. The materials of movable artificial vertebral body includes metal, ceramics, biomaterials, high polymer materials and so on. Titanium alloy is the main material in metal materials, which is widely used, but its modulus of elasticity is still far from that of human bone and it lacks ideal bone fusion. Ceramic materials are rich in variety but fragile and poor in wear resistance. Biomaterials include autogenous bone, allogeneic bone, etc., with limited source and complicated operation. There are many kinds of polymer and biodegradable materials which obtain excellent and ideal properties. But their properties and applications need to be further studied. The movable artificial vertebral body still needs to be promoted and developed. The clinical experimental data is still insufficient, and long-term curative effect needs to be further observed and studied. This paper reviews the development, advantages, design, processing and materials of movable artificial vertebral bodies and provides useful reference for optimization design, processing and clinical application of movable artificial vertebral bodies.

KEYWORDS Movable artificial vertebral body; Spine; Review literature

通讯作者: 贺西京 E-mail: xijing_h@vip.tom.com

Corresponding author: HE Xi-jing E-mail: xijing_h@vip.tom.com

脊柱发生肿瘤、感染、骨折-脱位、畸形以及退行性变等疾病时会严重影响脊柱的稳定性, 导致脊柱畸形、脊髓损伤, 产生疼痛, 影响正常生理功能, 甚至

造成瘫痪,严重威胁人类健康。使用脊柱外科植入物治疗脊柱疾病已有很长的历史,已有很多报道人工椎体植入物在治疗脊柱疾病时的应用,并已经取得了较好的疗效。目前临床常使用融合型人工椎体重建脊柱稳定性,然而融合型人工椎体有一系列固有的问题,因此对可动型人工椎体的研究逐渐被人们所重视。可动型人工椎体的特点是在重建脊柱稳定性的基础上,保留脊柱原有的活动度,减少脊柱力学的改变。因此,对可动型人工椎体植入物进行更加深入的研究,对治疗脊柱疾病有重大的价值及意义。

1 可动型人工椎体的发展历史

脊柱植入物经过长时间的发展形成了多种分类及分支,其性质可以分为生物性替代和非生物性替代两类,例如:自体骨、异体骨替代物,骨水泥类植入物,人工椎体植入物等。而人工椎体植入物又可分为融合型人工椎体植入物和可动型人工椎体植入物。

1960 年 Bailey 等^[1]报道了 1 例颈椎椎体肿瘤病例,对患者行颈椎椎体肿瘤切除术后,以自体髂骨植骨重建脊柱稳定性并取得了一定成功,自此开启了人们对椎体替代方法的研究与探索。这种以自体骨或异体骨替代物重建脊柱稳定性的方法一旦达到融合后其长期稳定性强,但是,这种骨替代物不能提高术后脊柱的即刻稳定性,而且也有可能发生不融合的情况。在脊柱肿瘤治疗中,这种骨替代物也限制了放疗的使用。1967 年 Scoville 等^[2]报道应用甲基丙烯酸树脂作为椎体植入物治疗 1 例淋巴瘤的患者。1972 年 Kelly 等^[3]报道应用甲基丙烯酸树脂作为固定方法治疗环枢椎脱位。此后人们对骨水泥型椎体替代物进行了广泛的研究和发展。骨水泥型椎体替代物的优点在于可以提供术后即可稳定性、抗压强度强、可以与抗生素等混合使用控制感染。但其缺点也明显,例如长期稳定性不足、感染、需要辅助容器和固定等。1969 年,Hamdi^[4]报道用人工椎体替代切除椎体,治疗浆细胞瘤和腺癌转移各 1 例。自此之后,人们对人工椎体开始进行广泛的研究,使人工椎体取得了较大的发展。融合型人工椎体植入物稳定性强,是目前常用的临床方法,例如下颈椎 3D 打印钛笼^[5]、Winged adjustable replacement system^[6]等,但是融合型人工椎体植入物存在使得邻近椎间盘发生退变等并发症。因此,为了在良好的稳定性基础上,尽可能恢复脊柱正常的生理活动度,减少其生物力学的改变,人们逐渐开始研究可动型人工椎体植入物,其可动原理大体可分为球窝关节与假体弹性形变两大类。例如 artificial cervical joint complex^[7]、artificial disc and vertebra system^[8]、一种仿生型液压式可活动人工椎体^[9]等均是以求球窝关节为基础,保持

植入后椎体向各个方向的运动;而框架式非融合技术人工椎体^[10]、一种弹性人工椎体^[11]等是通过使用不同的材料产生弹性形变,从而保留一部分活动度。可动型人工椎体可以恢复一定程度的正常生理活动度,并减少融合型人工椎体的一些并发症,但其自身也可能会发生可动关节面的磨损,产生炎症、松动等问题。目前对可动假体的评价标准尚不统一,疗效观察随访时间尚不足,因此还需要进一步研究其性质和疗效。

2 可动型人工椎体的优点

目前临床常用融合型人工椎体植入物。融合型人工椎体植入物可分为支撑固定型、可调固定型、自固定型 3 种。融合型人工椎体植入物可以恢复脊柱稳定性,即刻稳定性强,部分可以调节高度以做到适应。但融合型人工椎体植入物仍有共同缺陷。Phillips 等^[12]研究免腰椎融合内固定模型时发现,融合术后 3 个月,融合部邻近节段椎间盘的环状板层胶原束的平行排列结构紊乱并逐渐发展至失去了板层结构的特征,最终椎间盘的结构被紊乱的纤维组织所替代,并可见纤维环的撕裂、椎间隙变窄、终板硬化和骨赘形成。另外,生物力学研究显示,椎体融合造成相应节段椎体活动度降低和力学的改变,导致邻近椎间活动代偿增加,应力重分布,负荷增加,加速了椎间盘的退变^[13-14]。为了恢复脊柱的生理功能并减少椎体融合带来的不良反应,可动型人工椎体是未来研究的重点方向。可动型人工椎体的优点在于其生理活动度及生理曲度的恢复,减少了脊柱生物力学的改变。一定程度恢复正常的生理活动度及生理曲度,一方面维护了正常的脊柱生理功能,使患者术后在屈曲、伸展、旋转时不受植入物的限制而丧失相应的功能;另一方面恢复正常的脊柱生物力学,可以减少力学改变造成的邻近椎间关节退变,从而减少术后的并发症。

可动型人工椎体已展开研究和应用。例如,寰枢椎疾病可导致头颈痛,四肢运动障碍,甚至高位截瘫威胁生命,临床常用齿突切除术或融合固定术治疗,但是会导致寰枢椎不稳和活动丧失^[15]。因此本课题组研制了仿生人工寰齿关节,并对尸体解剖学和生物力学进行研究,发现仿生人工寰齿关节形态符合寰枢椎解剖,匹配性好,可以维持稳定性,还能保留各方向运动^[16-18]。Kato 等^[19]也针对寰枢椎不稳设计了一种新型可动假体 motion preservation device (MPD)。Dong 等^[8]设计了 artificial disc and vertebra system (ADVS),是一种可动型人工颈椎植入物。为了检测其与正常颈椎和融合型椎体植入物的稳定性和活动度的差别,收集了 18 具尸体的颈椎标本 (C₂-

T₁)并测量其活动度(range of motion, ROM)作为正常对照组(完整椎体组)。然后将 18 个标本分为两组,即融合组和非融合组,每组 9 个标本。融合组在 C₅ 椎体进行融合术,非融合组在相应的 C₅ 椎体行 ADVS 假体植入,然后检测标本三维活动度和稳定性,分别以 ROM 和稳定性指数(stability index range of motion, SI-ROM)来表示。结果显示在 C₃-C₇ 节段,非融合组各方向的 ROM 与正常完整颈椎组相比,差异无统计学意义($P>0.05$);而融合组在 C₃-C₇ 节段,屈伸、轴向旋转的 ROM 与正常完整颈椎组比较有明显下降($P<0.05$)。在 C₃-C₄ 节段,非融合组和融合组中轴向旋转的 ROM 差异有统计学意义($P<0.05$)。在 C₄-C₆ 节段,融合组相比正常对照组和非融合组的 ROM 在各方向均有明显的下降($P<0.001$)。正常对照组和非融合组在 C₆-C₇ 节段的 ROM 差异无统计学意义,而非融合组和融合组在后伸和轴向旋转方向上差异有统计学意义。在 C₃-C₇ 节段,非融合组与正常对照组相比,其 SI-ROM 在屈曲、后伸方面较好,而在侧弯和轴向旋转不足,而融合组各方向均下降。其结果表明非融合植入物具有稳定性,且一定程度恢复了脊柱原有的生理活动度,但是也提出了一些问题,例如可动关节面的磨损问题和旋转中心可能偏移等。在对山羊模型进行实验时,结果也发现非融合假体的植入保留了相应节段的 ROM,并减少了上方相邻节段的 ROM,可能会减少邻近节段退变的发生风险^[20]。还有很多学者也进行了可动假体的研究,Qin 等^[21]研发了一种可动型人工椎体—an artificial cervical vertebra and intervertebral complex (ACVC),并说明了其具有稳定性且恢复了相应的生理活动度。可动型人工椎体可以减少融合型椎体的并发症,但目前可动假体研究的数据相比融合假体较少,研究尚不充分,有待进一步研究和观察。

3 可动型人工椎体的设计制造

3.1 可动型人工椎体的设计

椎体次全切导致脊柱前柱连续性破坏,失去支撑和缓冲功能,同时会造成脊柱不稳产生损伤。人工椎体的根本目的是为了重建脊柱稳定性,其设计是否合理有很大的影响。可动型人工椎体的设计灵感是在重建脊柱稳定性的基础上,尽可能恢复脊柱原有的生理功能,并减少对脊柱力学的改变。其设计上应该注意以下几方面:(1)保证术后即可稳定性。(2)保证长期稳定性和融合率。(3)恢复脊柱生理曲度。(4)恢复脊柱生理活动度。(5)有良好的生物相容性。(6)手术操作容易实现等。

可动型人工椎体的稳定装置类似于自固定型人工椎体,拥有良好的自稳定性。而其可动原理大体可

分为球窝关节和假体弹性形变两大类。球窝关节型可动装置是将假体端面设计成球窝关节,以保留前屈、后伸、侧弯、旋转等活动;弹性形变型主要是使用不同材料或结构使假体获得弹性形变能力,保留一定的活动度^[22]。假体的整体设计还需注意端面与上下椎体接触面应增加稳定性、减少相对摩擦运动;其椎体部分的内部设计应保证假体的稳定性和强度,防止塌陷破坏,并且其结构应促进周边骨细胞的长入以提升融合率。目前对可动人工椎体的设计还需完善。在假体设计时,使用多种模型方法,有益于完善假体各方面性能检测,也利于假体的设计优化。例如数学模型、有限元模型等应用发展,可以得到许多实体试验中无法得到的重要信息,更加直观、简便。例如刘磊等^[23]对非融合人工椎体的疲劳试验进行了有限元仿真分析;Goel 等^[24]利用有限元方法和尸体研究方法分析了 anatomic facet replacement system (AFRS)重建腰椎力学的问题。

3.2 可动型人工椎体的加工

目前大多数人工椎体的加工方式主要包括机械加工和 3D 打印加工等。传统的机械加工方式具有精度高、可批量化生产、材料选择广泛等优点,但是也存在复杂假体难以加工,产品大小、形状难以与术中切除病灶契合等缺陷。但随着 3D 打印技术的发展,个性化定制逐渐成为了假体加工制造的一种思想。3D 打印技术在脊柱外科的使用,可以根据不同患者的不同情况提供植入的假体,使人工椎体更接近患者自身椎体水平,更符合自身力学特性,且可以减少术中裁剪,缩短手术时间,减少术中出血,从而提升手术的安全性。夏晓龙等^[25]利用动物模型研究了 3D 打印在个性化人工椎体植入的可行性。本课题组使用 3D 打印技术个体化制作了穹窿式钛笼^[5],该钛笼更加符合患者椎体情况、契合度更高,其端面的改进和曲度的改进,进一步重建了脊柱原有的生理曲度,并有效降低了假体沉降率。使用 3D 打印技术,可以更加精准的加工可动人工椎体结构,以增加假体的稳定性,改善孔隙结构,提升融合效果等。然而 3D 打印技术所使用的材料有限,制造时间较长,制作成本较高,还需要进一步的研究和发展。

3.3 可动型人工椎体的材料

理想的人工椎体材料应当拥有良好的生物相容性,拥有与人骨相近的弹性模量,拥有良好的力学性能,具有良好的耐腐蚀性、耐磨性、无细胞毒性等。目前使用的材料大体可分为金属、陶瓷、生物材料、高分子材料、复合材料等。最初使用的假体为金属不锈钢,其弹性模量远大于人骨,会产生应力遮挡。当骨应力低于植入物时,骨长期处于应力较低的水平,骨

组织会因为得不到足够的力学刺激,而逐渐发生吸收,从而发生骨质疏松等症状,容易再次发生骨折。不锈钢合金中含有镍、铬、钴等生物毒性元素,可能会对人体造成危害。目前钛合金因具有低弹性模量、良好的耐磨性、生物相容性好等特点,获得了广泛的应用。但钛合金的弹性模量与人骨仍有一定的差别,存在与周围骨组织不融合的情况,在术后影像检查时也有一定的影响。有报道称^[26]镍钛记忆合金具有超弹性,能分散应力,无细胞毒性作用,生物力学性能也得到了验证。也有报道^[27]使用多孔金属钽材料作为骨科植入物,其生物相容性很好,骨整合好,但是其相对稀少,制造昂贵,未广泛使用。陶瓷材料在骨科中也有广泛的应用,例如羟基磷灰石(hydroxylapatite, HA)、磁性生物陶瓷、多晶氧化铝陶瓷等。其中羟基磷灰石与大多动物骨组织的主要无机成分相同或相近,其植入人体后可以分离出钙、磷元素,以供组织利用生长,拥有良好的相容性。但其强度低、易碎、容易疲劳损坏。因此有许多学者开展了对 HA 材料改进的研究。邵荣学等^[28]利用羟基磷灰石/二氧化锆多孔支架材料修复比格犬椎体缺损,发现其多孔支架材料既可以诱导骨长入材料孔隙,促进骨愈合生长,又提供了有效的机械强度,提升了断裂韧性。Itoh 等^[29]利用羟基磷灰石/胶原蛋白混合材料制成可吸收的人工椎体并吸附人工合成骨形成蛋白 2 以促进骨生长,并能有效防止内植物塌陷。有学者^[30]研究了纳米羟基磷灰石/聚酰胺 66 材料的生物相容性及力学性能,发现其具有良好的成骨活性,可以降解,力学性能优异,强度、韧性较好,其弹性模量与人骨相近,可以减少应力遮挡,无细胞毒副作用,但是也存在愈合不佳、耐磨性较差等问题。娄朝晖等^[31]开展了磁性生物陶瓷的研制,利用磁性生物陶瓷在外磁场作用下可富集磁性物质的性能,以实现靶向杀伤肿瘤细胞或者病原微生物。目前也有报道丝素蛋白复合羟基磷灰石的研究^[32-35],发现其结构优异,具有良好的生物相容性,可降解等优点,具有良好的发展空间。高分子材料如聚乙烯、聚醚醚酮、聚醚酮等,无明显生物毒性,稳定性好,无应力遮挡,不影响影像学检查。高分子材料拥有良好的前景,但是并不完美,如聚乙烯磨损产生的颗粒可能造成溶骨松脱、聚醚醚酮等材料强度不足,高分子材料还需要进一步研究和完善。生物可降解材料包括天然高分子材料和人工合成高分子材料,例如壳聚糖、脂肪族聚酯、聚乙交酯-丙交酯等。天然可降解材料具有良好的生物相容性,但其力学强度差,骨诱导力差。将生物可降解材料复合成骨因子或混合无机成分,可提升材料强度,提高骨诱导力,促进骨细胞增殖、分化。

也有报道聚乳酸-羟基乙酸共聚物 (PLGA)+Mg 材料的使用^[36],PLGA 生物相容性好,降解产物为水和二氧化碳,Mg 具有一定成骨作用,PLGA+Mg 材料的弹性模量与人体骨骼更加接近,显著降低了对骨骼的应力遮挡效应;在降解过程中周围组织 pH 值基本正常,不影响骨骼再生。生物材料包括自体骨、异体骨等,具有良好骨传导性和骨生成作用,是理想的材料,但是其来源有限,手术复杂,并发症多,而异体骨则可能存在免疫排斥反应、韧性低、加工复杂等不利因素。材料表面改性等研究也推动着骨科植入物材料的发展。有研究发现^[37]植入物表面聚烯丙基胺涂层拥有良好的抗菌性,对金黄色葡萄球菌的抗菌率为 99.68%,抗菌耐久性能为 93.74%。其他材料表面喷涂 HA 也会提升骨融合的效果。材料表面孔隙率等物理结构的改进,可增加骨组织长入的可能性。人工椎体材料种类繁多,尚无一种性能较完美的材料使用,对材料的研发和改进优化还需进一步发展。

4 展望

人工椎体已经广泛应用于脊柱疾病当中并取得了一定效果。可动型假体恢复了一定的生理活动度并减少了生物力学的改变,但在其关节面上长期摩擦会造成磨损,产生材料碎屑,引起周围炎症,组织坏死,使假体松脱、位移,而部分可动假体可能存在重心偏移,造成损伤。理想的可动型人工椎体应该具有良好的即刻稳定性,其长期稳定性亦应良好;能最大限度地恢复脊柱原有的生理活动度而不改变力学性能;材料应既要有良好的生物相容性,促进骨组织的生长与融合,又应有较好的抗疲劳性能和强度;且其设计也应当方便手术操作。可动假体的设计可以在前人的基础上加以改进:端面上完善个性化设计、利用软件进行定制、在上下椎体接触面设计 L 型结构防止滑脱等。植入物材料需要提升稳定性,改善材料的弹性模量与人体骨相近,且其自身强度满足要求不易被损坏,增加其耐磨性、耐腐蚀性,并提升其生物相容性,以促进骨组织愈合,消除其生物毒性等不利作用。目前常见以复合材料、表面处理等方式改进植入物材料。3D 打印技术是近些年发展较好的加工技术之一,完善 3D 打印技术,可以完善更全面的假体设计、进一步提升对复杂结构假体的加工,扩大植入物材料选择的范围,提升生产速率。有限元模型、数学模型等非生物模型的建立,可以提高假体属性检验的全面性、精确性和便捷性,可以联合生物模型共同为假体的优化设计和检测带来进一步的发展。可动型人工椎体植入物因其自身特点已经逐步成为目前研究的热点,假体设计的成熟、加工方式的提升和材料学研究的进展等,都促进其在脊柱外科

应用中的发展。但是目前对于可动型人工椎体的性能研究、设计改进和基础实验数据等尚且不足,其长期的临床效果还有待进一步的实验和观察。

参考文献

- [1] Bailey RW, Badgley CE. Stabilization of the cervical spine by anterior fusion[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1960, 42: 565-594.
- [2] Scoville WB, Palmer AH, Samra K, et al. The use of acrylic plastic for vertebral replacement or fixation in metastatic disease of the spine. Technical note[J]. *J Neurosurg*, 1967, 27(3): 274-249.
- [3] Kelly DJ, Alexander EJ, Davis CJ, et al. Acrylic fixation of atlantoaxial dislocations. Technical note[J]. *J Neurosurg*, 1972, 36(3): 366-371.
- [4] Hamdi FA. Prosthesis for an excised lumbar vertebra: a preliminary report[J]. *Can Med Assoc J*, 1969, 100(12): 576-580.
- [5] 贺西京, 卢腾, 董军, 等. 一种下颈椎 3D 打印钛笼[P]. 中国, CN204931903U, 2016-01-06.
HE XJ, LU T, DONG J, et al. A 3D printed titanium mesh cage for lower cervical vertebrae[P]. *China* CN204931903U, 2016-01-06. Chinese.
- [6] 孙俊凯, 刘竞龙, 黄剑侠. 带翼可调节置换系统在下颈椎骨折脱位中的应用[J]. *中国组织工程研究*, 2013, 17(22): 4025-4033.
SUN JK, LIU JL, HUANG JH. Winged adjustable replacement system for the treatment of lower cervical spine fracture dislocation[J]. *Zhongguo Zu Zhi Gong Cheng Yan Jiu*, 2013, 17(22): 4025-4033. Chinese.
- [7] YU J, LIU LT, ZHAO JN. Design and preliminary biomechanical analysis of artificial cervical joint complex[J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2013, 133(6): 735-743.
- [8] Dong J, Lu M, Lu T, et al. Artificial disc and vertebra system: a novel motion preservation device for cervical spinal disease after vertebral corpectomy[J]. *Clinics*, 2015, 70(7): 493-499.
- [9] 刘小勇. 一种仿生型液压式可活动人工椎体[P]. 中国, CN103006356A, 2013-04-03.
LIU XY. A Bionic hydraulic movable artificial vertebral body[P]. *China*, CN103006356A, 2013-04-03. Chinese.
- [10] 王永清. 框架式非融合技术人工椎体[P]. 中国, CN104958125A, 2015-10-08.
WANG YQ. Frame non fusion technology of artificial vertebral body[P]. *China*, CN104958125A, 2015-10-08. Chinese.
- [11] 房亚峰, 欧阳均, 吴卫东, 等. 一种弹性人工椎体[P]. 中国, CN203988504U, 2014-12-10.
FANG YF, OUYANG J, WU WD, et al. A flexible artificial vertebral body[P]. *China*, CN203988504U, 2014-12-10. Chinese.
- [12] Phillips FM, Reuben J, Wetzel ft. Intervertebral disc degeneration adjacent to a lumbar fusion. An experimental rabbit model[J]. *J Bone Joint Surg Br*, 2002, 84(2): 289-294.
- [13] Colle KO, Butler JB, Reyes PM, et al. Biomechanical evaluation of a metal-on-metal cervical intervertebral disc prosthesis[J]. *Spine J*, 2013, 13(11): 1640-1649.
- [14] Matsumoto M, Nojiri K, Chiba K, et al. Open-door laminoplasty for cervical myelopathy resulting from adjacent-segment disease in patients with previous anterior cervical decompression and fusion[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2006, 31(12): 1332-1337.
- [15] Tubbs RS, Demerdash A, Rizk E, et al. Complications of transoral and transnasal odontoidectomy: a comprehensive review[J]. *Childs Nerv Syst*, 2016, 32(1): 55-59.
- [16] 臧全金, 李浩鹏, 贺西京, 等. 仿生人工寰齿关节的研制与解剖学研究[J]. *生物骨科材料与临床研究*, 2017, 14(3): 1-4.
ZANG QJ, LI HP, HE XJ, et al. Design of a bionic artificial atlanto-odontoid joint and its anatomic study[J]. *Sheng Wu Gu Ke Cai Liao Yu Lin Chuang Yan Jiu*, 2017, 14(3): 1-4. Chinese.
- [17] 蔡璇, 王杰, 李浩鹏, 等. 寰枢椎前路可动固定系统的研制及生物力学研究[J]. *山西医科大学学报*, 2018, 49(4): 422-425.
CAI X, WANG J, LI HP, et al. Biomechanical evaluation of a novel motion-preserving atlanto-odontoid joint system: an in vitro human cadaveric study[J]. *Shan Xi Yi Ke Da Xue Xue Bao*, 2018, 49(4): 422-425. Chinese.
- [18] Cai X, He XJ, Li HP, et al. Total atlanto-odontoid joint arthroplasty system: a novel motion preservation device for atlantoaxial instability after odontoidectomy[J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2013, 38(8): E451-E457.
- [19] Kato K, Yokoyama T, Ono A, et al. Novel motion preservation device for atlantoaxial instability[J]. *J Spinal Disord Tech*, 2013, 26(3): E107-E111.
- [20] Dong J, Lu M, Liang B, et al. Anterior cervical corpectomy non-fusion model produced by a novel implant[J]. *Med Sci Monit*, 2016, 22: 1131-1145.
- [21] Qin J, Zhao C, Wang D, et al. An in vivo comparison study in goats for a novel motion-preserving cervical joint system[J]. *PLoS One*, 2017, 12(6): e01787756.
- [22] 刘俭涛, 张峰, 高正超, 等. 人工椎体的发展与应用[J]. *中国骨伤*, 2017, 30(12): 1157-1164.
LIU JT, ZHANG F, GAO ZC, et al. Development and application of artificial vertebral body [J]. *Zhongguo Gu Shang/China J Orthop Trauma*, 2017, 30(12): 1157-1164. Chinese with abstract in English.
- [23] 刘磊, 王永清, 董黎敏, 等. 非融合人工椎体疲劳实验与有限元仿真[J]. *天津理工大学学报*, 2017, 33(3): 16-19.
LIU L, WANG YQ, DONG LM, et al. Fatigue experiment and finite element simulation of non-fusion artificial vertebral body[J]. *Tian Jin Li Gong Da Xue Xue Bao*, 2017, 33(3): 16-19. Chinese.
- [24] Goel VK, Mehta A, Jangra J, et al. Anatomic facet replacement system (AFRS) restoration of lumbar segment mechanics to intact: a finite element study and in vitro cadaver investigation[J]. *SAS J*, 2007, 1(1): 46-54.
- [25] 夏晓龙, 陈扬, 邱奕雁, 等. 3D 打印技术应用于脊柱个性化椎体定制的实验研究[J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2016, 31(3): 247-250.
XIA XL, CHEN Y, QIU YY, et al. Experimental study on application of 3D printing technology to print personalized vertebral body [J]. *Zhongguo Gu Yu Guan Jie Sun Shang Za Zhi*, 2016, 31(3): 247-250. Chinese.
- [26] 刘晖, 练克俭, 廖丽君, 等. 镍钛开放式记忆合金人工椎体的研制和生物力学分析[J]. *中国修复重建外科杂志*, 2010, 24(10): 1180-1184.
LIU H, LIAN KJ, LIAO LJ, et al. Design and biomechanical analysis of nickel-titanium open shape memory alloy artificial vertebral body[J]. *Zhongguo Xiu Fu Chong Jian Wai Ke Za Zhi*, 2010, 24(10): 1180-1184. Chinese.
- [27] 刘永庆, 李琪佳, 崔逸爽, 等. 多孔金属骨科内植物的研究进展[J]. *中国老年学杂志*, 2017, 37(12): 3080-3083.

- LIU YQ, LI QJ, CUI YS, et al. Advances in research on porous metal orthopedic plants [J]. Zhongguo Lao Nian Xue Za Zhi, 2017, 37 (12): 3080-3083. Chinese.
- [28] 邵荣学, 全仁夫, 张亮, 等. 梯度复合 HA/ZrO₂ 多孔支架材料在松质骨缺损应用的实验 [J]. 中国比较医学杂志, 2015, 25 (11): 46-51.
- SHAO RX, QUAN RF, ZHANG L, et al. In vivo experiments of porous gradient bio-composites with HA/ZrO₂ in repair of the lumbar vertebra defect [J]. Zhongguo Bi Jiao Yi Xue Za Zhi, 2015, 25 (11): 46-51. Chinese.
- [29] Itoh S, Kikuchi M, Koyama Y, et al. Development of an artificial vertebral body using a novel biomaterial, hydroxyapatite/collagen composite [J]. Biomaterials, 2002, 23 (19): 919-926.
- [30] 温从游, 孟纯阳, 蒋电明. 纳米羟基磷灰石/聚酰胺 66 复合材料的研究及应用 [J]. 中国组织工程研究, 2014, 18 (3): 464-469.
- WEN CY, MENG CY, JIANG DM. Research and application of nano-hydroxyapatite/polyamide 66 biocomposites [J]. Zhongguo Zu Zhi Gong Cheng Yan Jiu, 2014, 18 (3): 464-469. Chinese.
- [31] 娄朝晖, 陈安民, 吴华, 等. 磁性生物陶瓷人工椎体靶向治疗椎骨肿瘤的可行性研究与大动物试验 [J]. 中华物理医学与康复杂志, 2004, 26 (6): 11-15.
- LOU ZH, CHEN AM, WU H, et al. Feasibility of the targeting therapy as applied in the sheep after vertebra replacement with artificial magnetic bioceramic vertebral body [J]. Zhonghua Wu Li Yi Xue Yu Kang Fu Za Zhi, 2004, 26 (6): 11-15. Chinese.
- [32] 陈晓敏, 马霄, 邵南齐, 等. 负载重组人骨形态发生蛋白 2 的纳米羟基磷灰石/丝素蛋白复合材料重建脊柱稳定性 [J]. 中国组织工程研究, 2017, 21 (18): 2802-2807.
- CHEN XM, MA X, SHAO NQ, et al. Nano-hydroxyapatite/silk fibroin composite materials loaded with recombinant human bone morphogenetic protein 2 used for spinal fusion [J]. Zhongguo Zu Zhi Gong Cheng Yan Jiu, 2017, 21 (18): 2802-2807. Chinese.
- [33] 蓝旭, 许建中, 刘雪梅, 等. 丝素蛋白/羟基磷灰石复合材料细胞相容性的研究 [J]. 实用骨科杂志, 2013, 19 (3): 226-229.
- LAN X, XU JZ, LIU XM, et al. The study of cellular compatibility of silk fibroin/hydroxyapatite composite biomaterials [J]. Shi Yong Gu Ke Za Zhi, 2013, 19 (3): 226-229. Chinese.
- [34] 范纯泉, 叶晓健. 丝素蛋白纳米羟基磷灰石复合材料的生物安全性 [J]. 中国组织工程研究, 2016, 20 (38): 5650-5656.
- FAN QQ, YE XJ. Biological safety of silk fibroin/nano-hydroxyapatite composites [J]. Zhongguo Zu Zhi Gong Cheng Yan Jiu, 2016, 20 (38): 5650-5656. Chinese.
- [35] 牛林, 邹蕊, 石福乔, 等. 丝素蛋白-羟基磷灰石类骨质复合生物材料的生物相容性 [J]. 西安交通大学学报 (医学版), 2011, 32 (5): 628-631.
- NIU L, ZOU R, SHI FQ, et al. Biocompatibility of silk fibroin-hydroxyapatite osteoid composite biomaterials [J]. Xi An Jiao Tong Da Xue Xue Bao (Yi Xue Ban), 2011, 32 (5): 628-631. Chinese.
- [36] 陈伟, 张瑞鹏, 邵佳申, 等. 新型生物可降解 PLGA-Mg 材料的制备与初步研究 [J]. 河北医科大学学报, 2016, 37 (12): 1466-1469.
- CHEN W, ZHANG RP, SHAO JK, et al. Preparation and preliminary study of a novel biodegradable PLGA-Mg material [J]. He Bei Yi Ke Da Xue Xue Bao, 2016, 37 (12): 1466-1469. Chinese.
- [37] 董庸皓, 王美, 刘子豪, 等. 骨科植入物表面聚烯丙基胺涂层的抗菌性研究 [J]. 中华实验外科杂志, 2016, 33 (2): 466-468.
- DONG YH, WANG M, LIU ZH, et al. Antimicrobial effect of poly allyamine coating in the surface of orthopedic implants [J]. Zhonghua Shi Yan Wai Ke Za Zhi, 2016, 33 (2): 466-468. Chinese.

(收稿日期: 2018-12-15 本文编辑: 王宏)