

生物力学实验在脊柱内固定发展中的应用进展

任恩惠^{1,2}, 杨亮^{1,2}, 杨风光^{1,2}, 汪静^{1,2}, 康学文¹

1. 兰州大学第二医院骨科, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学, 甘肃 兰州 730000

【摘要】生物力学实验在脊柱内固定中有着重要的意义。随着脊柱内固定系统的发展,生物力学实验早已应用于内固定及其使用方式的评价。本文对生物力学在脊柱内固定器械产生、发展和优化等过程中的应用进行综述,并与已经淘汰的内固定器械的生物力学性能进行比较,从而讨论生物力学实验的作用。生物力学实验对脊柱手术内固定器械的发展有着重要的作用,并为其临床使用提供指导,推动了整个脊柱外科的发展。目前,生物力学实验与有限元分析结合评价脊柱内固定器械是一个重要的趋势,通过将仿真结果与生物力学实验结合,将更加有效的评价脊柱内固定器械的使用。

【关键词】脊柱手术;内固定;生物力学;综述

【中图分类号】R318.01

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2019)03-0364-05

Progress on application of biomechanical experiment in the development of spinal internal fixation

REN Enhui^{1,2}, YANG Liang^{1,2}, YANG Fengguang^{1,2}, WANG Jing^{1,2}, KANG Xuewen¹

1. Department of Orthopaedics, Lanzhou University Second Hospital, Lanzhou 730000, China; 2. Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: Biomechanical experiment is of great importance in spinal internal fixation. With the development of spinal internal fixation system, biomechanical experiment has been applied into the evaluation of internal fixation and its application. Herein the applications of biomechanics in the production, development and optimization of internal fixation devices that are used frequently in clinic were reviewed. The biomechanical properties of the internal fixation devices that had been eliminated were compared with those of the devices which were most commonly used at present to discuss the role of biomechanical experiments in the development of spinal internal fixation. Biomechanical experiments play a critical role in the development of spinal internal fixation devices, provide guidance for the clinical use of spinal internal fixation devices and promote the development of the spine surgery. Nowadays, using biomechanical experiments combined with finite element analysis to evaluate spinal internal fixation devices is an important trend. By combining the simulation results with biomechanical experiments, spinal internal fixation devices can be more effectively evaluated.

Keywords: spine surgery; internal fixation; biomechanics; review

前言

脊柱疾病手术治疗的记载早已有之,但是由于对脊柱疾病认识的局限和手术器械技术的限制,脊柱疾病的手术治疗长期进展缓慢,直到上世纪80年代,随着CT、核磁、生物力学理论等广泛地应用于脊

柱外科,脊柱的手术器械取得了飞速的发展,各种新型的内固定技术不断地应用于临床。目前生物力学理论在内固定发展中的应用主要包括生物力学实验和计算机有限元方法。生物力学实验通过在牛、羊、猪和人的椎体标本进行生物力学评价,通过内固定系统的强度实验、疲劳实验和稳定性实验,得到内固定的三维六自由度运动的生物力学数据,从而判断其是否适用于临床。生物力学实验在脊柱手术内固定系统的更新换代过程中有着巨大的作用,如钢丝、椎板夹等早期的内固定器械的淘汰,椎弓根螺钉的脱颖而出,目前椎弓根螺钉系统成为了脊柱内固定系统的主力,钛等材料在内固定器械中的应用使其更加完善。目前,生物力学实验在脊柱内固定器械的评价中是一种无可替代的方法。

【收稿日期】2018-12-09

【基金项目】国家自然科学基金(81371230);兰州大学第二医院内博士科研基金(ynbskyjj2015-1-01)

【作者简介】任恩惠,硕士研究生,研究方向:脊柱矫形, E-mail: Rench17@lzu.edu.cn

【通信作者】康学文,博士,主任医师,教授,研究方向:脊柱矫形, E-mail: ery_kangxw@lzu.edu.cn

1 颈椎内固定中的应用

颈椎前路手术比胸腰椎前路容易暴露脊柱,且术后对前路组织器官影响较小,从而能够广泛的应用于临床。目前,前路内固定主要包括钢板和螺钉内固定系统。钢板通过直接固定椎体来维持颈椎稳定性,从解剖上更符合椎体稳定的需要,可明显提高颈椎的稳定性。后路内固定主要有以椎弓根螺钉为主的螺钉系统,贯穿三柱,能够维持三维矫正的稳定效果。

1.1 颈椎前路内固定

1.1.1 前路齿状突螺钉固定 自从1988年Pentelényi^[1]等首次报道了用螺钉固定来治疗齿状突骨折,这种内固定方式逐渐的被临床医生接受。后来,Doherty等^[2]通过生物力学证明这种方法提供约未骨折脊椎一半的稳定性。这种方法也逐渐成了齿状突骨折的主要治疗方法,尤其Ⅱ型齿状突骨折。Sasso等^[3]通过生物力学实验验证,单螺钉和双螺钉在生物力学稳定性上无明显差异,但是双螺钉在扩展加载的刚度增加。后经临床验证单双螺钉使用成功率没有明显的差异^[4]。之后,随着内固定器械行业的发展,人们对螺钉按照临床的需要进行了一定的改造,生物力学离体实验用于评价这些螺钉及其使用方法的生物力学性能。例如:于晓巍等^[5]对比脊状螺钉、双螺纹螺钉及双螺钉的生物力学性能,从而得出脊状螺钉在抗旋转及抗疲劳等能力上优于其他类型的螺钉。为了避免内固定取出的二次手术和金属螺骨重塑的限制,随着材料学的发展,人们发明了可吸收的齿状突螺钉。Ames等^[6]通过在尸体标本上比较可吸收螺钉和钛螺钉的刚度和极限强度,发现钛螺钉明显优于可吸收螺钉,之后通过对可吸收螺钉进行了一系列的改造,经Nourbakhsh等^[7]证明生物可吸收拉力螺钉(5 mm)与齿状突骨折中单个钛拉力螺钉(4 mm)具有相同的弯曲和旋转刚度。提示这种技术可以应用于临床。

虽然齿状突螺钉治疗齿状突骨折是一种有效的方法,但是齿状突钢板固定可以提供更强的固定效果。生物力学实验证明齿状突钢板固定术对Ⅱ型齿状突骨折的生物力学稳定性明显高于齿状突螺钉固定技术^[8]。提示齿状突钢板可以作为齿状突骨折治疗的补充。胡勇等^[9]证明齿状突钢板治疗Hangman型骨折,齿状突骨折和C₂₋₃椎间盘损伤时具有良好的生物力学性能,是一种安全有效的手术方法。

综上所述,生物力学实验对齿状突螺钉的使用方法的优化有着不可替代的作用,使其在齿状突骨折患者中更加安全有效的发挥作用。

1.1.2 前路经寰枢椎关节螺钉固定 前路经寰枢椎关节螺钉内固定术弥补了以往钢丝法、椎板夹和后路螺钉

固定技术等局限。陈坚等^[10]设计了前路经寰枢椎关节螺钉固定。沙勇等^[11]在人体标本上进行了前路、后路经寰枢椎螺钉疲劳实验的对比,表明稳定性无明显差异。后来我国学者应用生物力学有限元分析进行完善其生物力学检测^[12]。近年来有病例报导在后路寰枢椎融合失败的情况下,前路经寰枢椎关节固定可能适用^[13]。

1.1.3 钢板内固定 自20世纪60年代第一块颈椎钢板问世以来,各种钢板相继出现。1975年,Herrmann^[14]首先描述了AO钢板在颈椎骨折中的应用。生物力学广泛应用于各种钢板的检测。自钢板应用于临床以来,前路钢板内固定和后路椎弓根螺钉内固定生物力学性能的比较是当时的一个热点。1989年,Coe等^[15]通过在人尸体上测试颈椎前后路内固定的生物力学实验,初步肯定了钢板内固定和后路椎弓根螺钉内固定系统相当的生物力学稳定性。20世纪90年代以来,AO钢板越来越受到临床的好评,但是对于AO钢板的体外力学性能没有明确的报道,Smith等^[16]通过在5个人颈椎进行了屈曲和扭转的无损伤检测,得出钢板屈曲稳定性较高,但旋转稳定性低。跟AO钢板一样,生物力学实验广泛的应用于Caspar钢板和Steffe钢板等钢板的评价中。

随着螺钉钢板系统的发展,双皮质螺钉已经广泛的应用于临床,但是其穿过椎体,可能导致脊髓损伤等严重并发症。为了解决这些问题,人们将目光投向单皮质螺钉的研究。Pitzen等^[17]通过生物力学证明,虽然双皮质螺钉具有多级稳定性,但是单层螺钉固定可以应用于大部分颈椎前路融合术中。其后随着膨胀螺钉的应用^[18],使得单皮质螺钉的固定作用更加稳定。但是由于稳定性的原因,对于骨质疏松、椎体切除术和严重的椎体损伤等情况双皮质螺钉仍然是首选。

生物力学实验在指导钢板使用过程中有着重要的作用。随着钢板在临床上的不断使用,在椎体切除植骨融合等情况下时,钢板需要提供更高的稳定性,所以人们提出了前路钢板螺钉交叉置钉的方式。蔡凤^[19]通过在标本上进行生物力学实验发现,交叉装置能提供较大的拔出力而疲劳强度无明显差异。生物力学实验也可评价不同情况下钢板使用的效果,以便确定是否需要额外的内固定,如Oberkircher等^[20]通过生物力学实验证明:小关节的损伤影响了内固定的稳定性,一侧或两侧小关节中的骨组织在临床上损伤,则前路钢板内固定联合植骨可能无法提供足够的稳定性,可能需要额外的后稳定。为了解决骨质疏松导致椎体塌陷和螺钉脱出的问题,前路钢板自锁系统^[21]和聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)增强螺钉等技术应用而生。生物力学实验不仅使钢板在临床上的使用更加合理,也在不断地扩大其适用范围。

1.1.4 前路椎弓根螺钉内固定 前路钢板内固定手术被认为是处理下颈椎三柱损伤的首选,但其强度有限,常需辅以后路固定。对于许多无需后路减压和复位的病人,后路手术仅仅是为了后路内固定,这样就造成了不必要的手术损伤。Koller等^[22]于2008年提出的前路椎弓根螺钉固定,有较强的稳定性。吴海昊等^[23]通过生物力学验证其稳定性优于前路钢板内固定,可作为前路钢板内固定的一个补充,其也通过前路椎弓根螺钉3种传统固定方式对三柱损伤的稳定性进行比较,确定了此种方法的稳定性,通过后路减压和复位的患者无需后路也能获得可靠的稳定性。

1.2 颈椎后路内固定

传统的颈椎后路内固定器械如钢丝和椎板夹,由于生物力学性能和较低的融合率而逐渐被淘汰。椎弓根螺钉颈椎对于三柱不稳定的情况较其他内固定更有优势,广泛的应用于临床^[24]。目前为止,后路螺钉种类繁多,主要有颈椎侧块螺钉、颈椎椎弓根螺钉、颈椎经关节突螺钉和枢椎椎板螺钉。

颈椎后路内固定系统主要为螺钉固定系统。自Roy-Camille等^[25]用了颈椎侧块螺钉钢板系统后,先后出现了椎弓根螺钉、关节突螺钉和经椎板螺钉等固定系统。在这些螺钉产生到临床使用的过程中,人们对这几种螺钉进行了大量的生物力学离体实验,通过将内固定系统植入椎体标本测得生物力学数据,来评价其临床适用性。20世纪90年代,侧块螺钉和椎弓根螺钉广泛的应用于临床,Jones等^[26]证明椎弓根螺钉比侧块螺钉稳定性强,之后生物力学实验验证了这一结论^[27]。虽然椎弓根螺钉的稳定性强是大家公认的,但是由于其解剖要求高,血管神经并发症严重等,侧块螺钉在临床上应用一直比较广泛,经关节螺钉也有不足之处,如较其他螺钉多固定一个颈椎节段。这几种螺钉各有优缺点,在临床上既可以互补使用,也可以组合使用。

2 胸椎腰椎内固定

胸腰椎需要支撑整个身体,受力大,所以要求内固定系统的固定强度要高。胸腰椎前路内固定系统可以维持脊柱前柱和中柱的稳定性,从而为脊柱融合提供一个良好的环境。脊柱后路的固定相当于张力带的作用,其必须有前中柱的稳定才能发挥其作用,前路内固定可以为其创造良好的固定条件。但是由于前路手术损伤大,并发症较多,再加上生物力学实验和临床经验证明,后路固定可以满足大多数手术需要,所以前路内固定在临床上应用较少。

2.1 后路内固定系统

上世纪60年代,胸腰椎后路内固定首先由Harrington提出,但其只能纠正冠状面的畸形,对矢状面和水平面

作用很小;20世纪70年代,墨西哥Luque提出了“脊柱节段性固定”的理念,从而产生了Luque器械,其作用与Harrington相反,所以1984年,Wisconsin等结合这两种器械形成Wisconsin系统;20世纪80年代,以CD系统和椎弓根螺钉为代表的三维内固定系统相继提出。1989年,Ashman等^[28]通过5个需要椎弓根螺钉固定的内固定器械椎次全切除模型中测试,椎弓根螺钉固定后路内固定稳定性良好。以CD系统为基础,器械商和脊柱外科医生根据临床上遇到的问题和以往内固定器械的不足,相继设计出了TSH系统、CDH系统、LSOLA系统、USS系统。Moss Miami系统及中华长城系统等。这些椎弓根螺钉固定系统通过生物力学验证其稳定性优于传统缆绳固定系统^[29],并成为后路内固定系统的主角。

椎弓根螺钉固定系统广泛应用于临床以后,各种问题接踵而至。为了解决椎弓根螺钉和螺杆配置对于内固定稳定性影响的问题,Dick等^[30]通过生物力学实验得出:在轴向测试中,使用额外的螺钉刚度平均增加了160%;在弯曲测试中,六螺丝结构的硬度比四螺丝结构高84%;在扭转测试中,六螺钉结构比四螺钉结构硬度高38%。Mohamad等^[31]在人尸体上进行了生物力学实验,双螺杆结构的失效载荷明显高于单螺杆结构,而螺杆直径的增加也会引起固定强度的显著变化。Tsai等^[32]通过在脊柱标本上进行了不同直径螺钉固定的生物力学实验,证明螺钉的直径也会影响固定的稳定性。为了完善椎弓根螺钉的使用,减少手术并发症的发生,大量生物力学实验测试了椎弓根螺钉进钉点、进钉面、深度和长度在不同椎体上对稳定性的影响,从而指导临床安全地使用椎弓根螺钉。

生物力学实验也在帮助外科医生挑战椎弓根螺钉使用的禁忌症。最典型的就是椎弓根螺钉系统应用于骨质疏松患者的生物力学实验。长期以来,骨质疏松患者由于骨质原因,脊柱的椎弓根螺钉固定器不牢固,易松动。生物力学实验证明了用聚甲基丙烯酸甲酯骨水泥增强椎弓根螺钉技术可以增强骨质疏松患者内固定的固定强度^[33-34]。随着骨水泥在增强椎根弓螺钉固定系统中使用越来越广泛,其后的生物力学实验证明了不同骨水泥的使用量以及不同螺钉的使用对内固定稳定效果等,从而使椎弓根螺钉对骨质疏松患者更加安全^[35-49]。虽然长期以来PMMA增强椎弓根螺钉被认为是骨质疏松内固定的金标准,但是新型的方法通过生物力学实验验证有挑战此方法的趋势,Derincek等^[40]报道后凸椎椎弓根螺钉矫形术较PMMA增强椎弓根螺钉有更高的拉拔强度,似乎是一种更有效的方法。但是这些技术的优势并不明显,并且PMMA增强椎弓根螺钉能够满足骨质疏松患者的内固定需要,所以一直以来并没有取代PMMA增强椎弓根螺钉固定。

在脊柱后路手术中,椎弓根螺钉使用所带来并发症被有效地控制至关重要。在尸体上的生物力学实验证明椎弓根螺钉置入的位置与邻近节段的僵硬有关^[41],椎弓根螺钉位置确定的选择可降低其并发症的发生。但是关于椎弓根螺钉导致邻近节段僵硬的机制仍然不清楚。为了阐明这个问题的原因,Kyaw等^[42]通过在猪脊柱上进行生物力学实验,证明邻近节段的病变(ASD)是在脊柱融合手术后出现的现象,是用于补偿由于椎弓根螺钉固定过度融合导致的活动范围的丢失,因此在生理范围内可能会对相邻节段施加较大的扭矩,并可能逐渐导致退行性椎间盘或相邻节段中的滑脱进展。Tetsutaro等^[43]的实验也验证了这种并发症的机制。为了解决椎弓根螺钉所带来的不良并发症,半刚性装置和椎弓根螺钉动态稳定装置等相继提出,生物力学实验证明了这些新型装置的生物力学性能^[44-46]。这些实验虽然肯定了动态装置的生物力学稳定性,但是目前仍不能确定这种特定的补充仪器是否可以解决邻近节段疾病的问题。

2.2 前路内固定系统

胸腰椎前路内固定器械较后路的内固定器械少,首先由Dwyer介绍,于上世纪70年代由Hall和Zieke改造,在侧弯凸侧放置棒,用螺纹棒代替钢缆,进行加压和去旋转以矫正畸形,之后,各种钉板和钉棒技术相继问世,目前前路内固定器械主要分为:Kaneda为代表的钉棒系统和以Z-plate为代表的钉板系统。

随着内固定系统的飞速发展,各种前路内固定系统应用于临床,为了比较各个前路内固定系统的优势,生物力学实验无疑是一种最佳的工具。An等^[47]在小牛脊柱标本中进行了Kaneda装置,Z形板等4种前路装置在屈曲,伸展和侧向弯曲方向上的生物力学实验,从而证明了Kaneda装置的稳定性最好。与其他内固定系统相似,生物力学实验也广泛的应用于前路装置使用和开发的评价中。

随着前路内固定系统和后路椎弓根螺钉内固定系统的发展,这两类装置的生物力学比较曾一度是内固定生物力学研究的热点。Johnson等^[48]在人的尸体上证明了ALIF手术后,前路钢板内固定和椎弓根螺钉棒可提供基本相当的生物力学稳定性。Tzermiadianos等^[49]通过在人体标本上进行生物力学实验得出:前路钢板在屈曲和伸展方向稳定性高,而后路椎弓根螺钉在侧弯和旋转时稳定性高。Kallemeier等^[50]的实验得出了相似的结论。生物力学实验得出的结果有差异,这主要是由于标本的选取、生物力学实验仪器、评价指标等因素引起的。但是这些实验已经将前路钢板内固定和后路椎弓根螺钉内固定的特点明确的展现出来了。

前路内固定虽然种类多,但是目前很少应用于临床,主要原因如下:(1)前路需要经过胸腔、腹腔,解剖

结构比较的复杂;(2)只有在椎体肿瘤和严重的椎体损伤等情况下,前路内固定系统才必须使用,而此类病例相对较少见;(3)生物力学实验证明对于大多数疾病前路和后路装置,虽然生物力学有区别,但是通过临床证明其效果相似^[54]。(4)后路椎弓根螺钉固定能够满足大多数内固定的需要。

总之,生物力学实验早已成为脊柱内固定系统必不可少的评价指标,其在内固定中的开发和使用的作用无可厚非。随着计算机技术的发展,有限元分析技术越来越成熟,生物力学应力分析可以结合有限元模型使用,从而探讨内固定的稳定机制并指导其在临床的应用。

【参考文献】

- [1] PENTELÉNYI T, SZARVAS I, BODROGI L. Screw fixation of odontoid fractures: preliminary report[J]. Injury, 1988, 19(3): 139-142.
- [2] DOHERTY B J, HEGGENESS M H, ESSES S I. A biomechanical study of odontoid fractures and fracture fixation[J]. Spine, 1993, 18(2): 178-184.
- [3] SASSO R, DOHERTY B J, CRAWFORD M J, et al. Biomechanics of odontoid fracture fixation. Comparison of the one- and two-screw technique[J]. Spine, 1993, 18(14): 1950-1953.
- [4] JENKINS J D, CORIC D, BRANCH C L. A clinical comparison of one- and two-screw odontoid fixation[J]. J Neurosurg, 1998, 89(3): 366-370.
- [5] 于晓巍, 张峰, 侍宏, 等. 齿状突Ⅱ型骨折前路内固定椎状钛螺钉的研制及生物力学研究[J]. 中国矫形外科杂志, 2002, 10(10): 992-995.
- [6] YU X W, ZHANG F, SHI H, et al. Biomechanical study on a long-finned compressive screw for interfixation of type II odontoid fractures[J]. Orthopedic Journal of China, 2002, 10(10): 992-995.
- [7] AMES C P, CRAWFORD N R, CHAMBERLAIN R H, et al. Biomechanical evaluation of a bioresorbable odontoid screw[J]. J Neurosurg Spine, 2005, 2(2): 182-187.
- [8] NOURBAKHSI A, PATIL S, VANNEMREDDY P, et al. The use of bioabsorbable screws to fix type II odontoid fractures: a biomechanical study[J]. J Neurosurg Spine, 2011, 15(4): 361-366.
- [9] PLATZER P, EIPELDAUER S, LEITGEB J, et al. Biomechanical comparison of odontoid plate fixation versus odontoid screw fixation[J]. J Spinal Disord Tech, 2011, 24(3): 164-169.
- [10] 胡勇, 董伟鑫, 孙肖阳, 等. 齿状突螺钉钢板内固定系统的生物力学研究[J]. 中华外科杂志, 2016, 54(3): 212-216.
- [11] HU Y, DONG W X, SUN X Y, et al. A biomechanical evaluation of odontoid screw plate fixation system[J]. Chinese Journal of Surgery, 2016, 54(3): 212-216.
- [12] 陈坚, 刘浩. 前路经寰枢关节螺钉内固定术治疗创伤性寰-枢椎不稳的前期研究[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 1999(2): 81-85.
- [13] CHEN J, LIU H. A preliminary study of anterior C1-2 transarticular screw for traumatic instability of C1-2 joint[J]. Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 1999(2): 81-85.
- [14] 沙勇. 前路经寰枢椎关节螺钉内固定术的生物力学评价及其临床意义[C]//中国修复重建外科论坛论文汇编, 2005: 82-85.
- [15] SHA Y. Biomechanical evaluation and clinical significance of the anterior approach via atlantoaxial joint screw fixation[C]//China Reconstructive Surgery Forum Paper Compilation, 2005: 82-85.
- [16] 刘志超, 蔡贤华, 黄卫兵, 等. 前路经寰枢关节螺钉内固定生物力学性能的有限元分析[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2010, 20(11): 881-884.
- [17] LIU Z C, CAI X H, HUANG W B, et al. Biomechanical evaluation of anterior transarticular screws on C1-2, a three-dimensional finite element analysis[J]. Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2010, 20(11): 881-884.
- [18] LVOV I, GRIN A, KAYKOV A, et al. Anterior transarticular C1-C2 fixation with contralateral screw insertion: a report of two cases and technical note[J]. Eur Spine J, 2018, 27(Suppl 3): 347-352.
- [19] HERRMANN H D. Metal plate fixation after anterior fusion of

- unstable fracture dislocations of the cervical spine[J]. Acta Neurochir (Wien), 1975, 32(1-2): 101-111.
- [15] COE J D, WARDEN K E, SUTTERLIN C E, et al. Biomechanical evaluation of cervical spinal stabilization methods in a human cadaveric model[J]. Spine (Phila Pa 1976), 1989, 14(10): 1122-1131.
- [16] SMITH S A, LINDSEY R W, DOHERTY B J, et al. Cervical spine locking plate: *in vitro* biomechanical testing[J]. Eur Spine J, 1993, 1(4): 222-225.
- [17] PITZEN T, WILKE H J, CASPAR W, et al. Evaluation of a new monocortical screw for anterior cervical fusion and plating by a combined biomechanical and clinical study[J]. Eur Spine J, 1999, 8(5): 382-387.
- [18] RICHTER M, WILKE H J, KLUGER P, et al. Biomechanical evaluation of a newly developed monocortical expansion screw for use in anterior internal fixation of the cervical spine. *In vitro* comparison with two established internal fixation systems[J]. Spine (Phila Pa 1976), 1999, 24(3): 207-212.
- [19] 蔡风, 廖琦, 唐强, 等. 颈椎前路钢板螺钉系统交叉置钉与平行置钉的生物力学研究[J]. 中华创伤骨科杂志, 2015, 17(3): 223-226.
- [20] CAI F, LIAO Q, TANG Q, et al. Biomechanical study of parallel *versus* cross placement of anterior cervical plate screws[J]. Chinese Journal of Orthopaedic Trauma 2015, 17(3): 223-226.
- [21] OBERKIRCHER L, BORN S, STRUEWER J, et al. Biomechanical evaluation of the impact of various facet joint lesions on the primary stability of anterior plate fixation in cervical dislocation injuries: a cadaver study: laboratory investigation[J]. J Neurosurg Spine, 2014, 21(4): 634-639.
- [22] LAO L, LI Q, ZHONG G, et al. Biomechanical study of a novel self-locking plate system for anterior cervical fixation[J]. J Orthop Surg Res, 2014, 9(1): 120.
- [23] KOLLER H, HEMPFING A, ACOSTA F, et al. Cervical anterior transpedicular screw fixation. Part I: study on morphological feasibility, indications, and technical prerequisites[J]. Eur Spine J, 2008, 17(4): 523-538.
- [24] 吴海昊, 汤涛, 鹿清江, 等. 下颈椎前路椎弓根螺钉内固定在三柱损伤模型中初始稳定性的生物力学研究[J]. 中国骨伤, 2018, 31(1): 74-78.
- [25] WU H H, TANG T, PANG Q J, et al. Biomechanical study of the stability of subaxial cervical anterior transpedicular screw fixation for three-column injury [J]. China Journal of Orthopaedics and Traumatology, 2018, 31(1): 74-78.
- [26] KOTANI Y, CUNNINGHAM B W, ABUMI K, et al. Biomechanical analysis of cervical stabilization systems. An assessment of transpedicular screw fixation in the cervical spine[J]. Spine (Phila Pa 1976), 1994, 19(22): 2529-2539.
- [27] ROY-CAMILLE R. Internal fixation of the unstable cervical spine by a posterior osteosynthesis with plates and screws[M]. The Cervical Spine, 1989.
- [28] JONES E L, HELLER J G, SILCOX D H, et al. Cervical pedicle screws *versus* lateral mass screws. Anatomic feasibility and biomechanical comparison[J]. Spine (Phila Pa 1976), 1997, 22(9): 977.
- [29] ITO Z, HIGASHINO K, KATO S, et al. Pedicle screws can be 4 times stronger than lateral mass screws for insertion in the midcervical spine[J]. J Spinal Disord Tech, 2014, 27(2): 80-85.
- [30] ASHMAN R B, GALPIN R D, CORIN J D, et al. Biomechanical analysis of pedicle screw instrumentation systems in a corpectomy mode[J]. Spine (Phila Pa 1976), 1989, 14(12): 1398-1405.
- [31] ERICKSON M A, OLIVER T, BALDINI T, et al. Biomechanical assessment of conventional unit rod fixation *versus* a unit rod pedicle screw construct: a human cadaver study[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2004, 29(12): 1314-1319.
- [32] DICK J C, JONES M P, ZDEBLICK T A, et al. A biomechanical comparison evaluating the use of intermediate screws and cross-linkage in lumbar pedicle fixation[J]. J Spinal Disord, 1994, 7(5): 402-407.
- [33] MOHAMAD F, OKA R, MAHAR A, et al. Biomechanical comparison of the screw-bone interface: optimization of 1 and 2 screw constructs by varying screw diameter[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2006, 31(16): E535.
- [34] TSAI K J, MURAKAMI H, HORTON W C, et al. Pedicle screw fixation strength: a biomechanical comparison between 4.5-mm and 5.5-mm diameter screws in osteoporotic upper thoracic vertebrae[J]. J Surg Orthop Adv, 2009, 18(1): 23-27.
- [35] FAN S, LIU S, DENG Y. An *in vitro* biomechanical evaluation of effect of augmentation pedicle screw fixation with polymethylmethacrylate on osteoporotic spine stability [J]. Chinese Journal of Reparative & Reconstructive Surgery, 2004, 18(18): 168-170.
- [36] FRANKEL B M, DAGOSTINO S, WANG C. A biomechanical cadaveric analysis of polymethylmethacrylate-augmented pedicle screw fixation[J]. J Neurosurg Spine, 2007, 7(1): 47-53.
- [37] PARÉ P E, CHAPPUIS J L, RAMPERSAUD R, et al. Biomechanical evaluation of a novel fenestrated pedicle screw augmented with bone cement in osteoporotic spines[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2011, 36(18): 1210-1214.
- [38] PISHNAMAZ M, LANGE H, HERREN C, et al. The quantity of bone cement influences the anchorage of augmented pedicle screws in the osteoporotic spine: a biomechanical human cadaveric study[J]. Clin Biomech, 2018, 52: 14-19.
- [39] WAN S, LEI W, WU Z, et al. Biomechanical and histological evaluation of an expandable pedicle screw in osteoporotic spine in sheep[J]. Eur Spine J, 2010, 19(12): 2122-2129.
- [40] MANON J, HUSSAIN M M, HARRIS J, et al. Biomechanical investigation of a novel revision device in an osteoporotic model: pullout strength of pedicle screw anchor *versus* larger screw diameter[J]. Clin Spine Surg, 2017, 30(6): 265-271.
- [41] HIGASHINO K, KIM J H, HORTON W C, et al. A biomechanical study of two different pedicle screw methods for fixation in osteoporotic and nonosteoporotic vertebrae[J]. J Surg Orthop Adv, 2012, 21(4): 198-203.
- [42] DERİNÇEK A, TÜRKER M, CINAR M, et al. Revision of the failed pedicle screw in osteoporotic lumbar spine: biomechanical comparison of kyphoplasty *versus* transpedicular polymethylmethacrylate augmentation[J]. Eklem Hastalik Cerrahisi, 2012, 23(2): 106.
- [43] ANDERSON A L, MCIFF T E, ASHER M A, et al. The effect of posterior thoracic spine anatomical structures on motion segment flexion stiffness[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2009, 34(5): 441-446.
- [44] KYAW T A, WANG Z, SAKAKIBARA T, et al. Biomechanical effects of pedicle screw fixation on adjacent segments[J]. Eur J Orthop Surg Traumatol, 2014, 24(Suppl 1): S283-S287.
- [45] TETSUTARO M, TOSHIHIKO S, TAKAMASA Y, et al. Biomechanical problems related to pedicle screw system[J]. Turk Neurosurg, 2019, 29(1): 53-58.
- [46] XU H Z, WANG X Y, CHI Y L, et al. Biomechanical evaluation of a dynamic pedicle screw fixation device[J]. Clin Biomech, 2006, 21(4): 330-336.
- [47] CHAMOLI U, DIWAN A D, TSAFNAT N. Pedicle screw-based posterior dynamic stabilizers for degenerative spine: *in vitro* biomechanical testing and clinical outcomes[J]. J Biomed Mater Res A, 2013, 102(9): 3324-3340.
- [48] REICHL M, KUENY R A, DANYALI R, et al. Biomechanical effects of a dynamic topping off instrumentation in a long rigid pedicle screw construct[J]. Clin Spine Surg, 2017, 30(4): E440-E447.
- [49] AN H S, LIM T H, YOU J W, et al. Biomechanical evaluation of anterior thoracolumbar spinal instrumentation[J]. Spine (Phila Pa 1976), 1995, 25(18): 1979-1983.
- [50] JOHNSON W M, NICHOLS T A, JETHWANI D, et al. *In vitro* biomechanical comparison of an anterior and anterolateral lumbar plate with posterior fixation following single-level anterior lumbar interbody fusion[J]. J Neurosurg Spine, 2007, 7(3): 332-335.
- [51] TZERMIADIANOS M N, MEKHAIL A, VORONOV L I, et al. Enhancing the stability of anterior lumbar interbody fusion: a biomechanical comparison of anterior plate *versus* posterior transpedicular instrumentation[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2008, 33(2): E38-E43.
- [52] KALLEMEIER P M, BEAUBIEN B P, BUTTERMANN G R, et al. *In vitro* analysis of anterior and posterior fixation in an experimental unstable burst fracture model[J]. J Spinal Disord Tech, 2008, 21(3): 216-224.

(编辑:薛泽玲)