

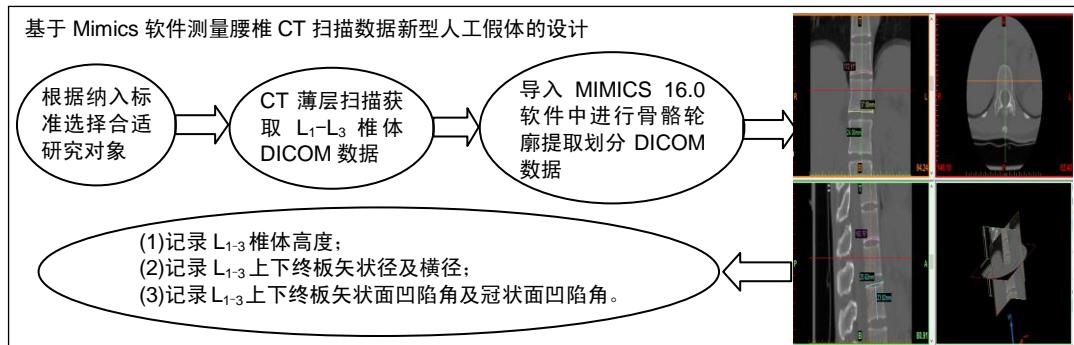
• 研究原著 •

基于Mimics测量CT扫描数据二段可调式新型纳米羟基磷灰石/聚酰胺66复合材料人工假体的设计

陈广辉¹, 成立², 王健³, 黄权¹, 白广建⁴, 尹萌辰⁵, 魏海峰¹, 杨诚¹, 肖建如¹, 刘铁龙¹ (¹上海长征医院骨肿瘤科, 上海市 200003; ²慈溪市人民医院骨科, 浙江省慈溪市 315300; ³上海浦东新区人民医院骨科, 上海市 200000; ⁴泰山医学院, 山东省泰安市 271016; ⁵上海市龙华医院骨科, 上海市 200000)

DOI:10.3969/j.issn.2095-4344.0942 ORCID: 0000-0002-3119-2784(陈广辉)

文章快速阅读:



陈广辉,男,1988年生,山东省滨州市人,汉族,2017年泰山医学院毕业,硕士,医师。

通讯作者:刘铁龙,博士,副主任医师。上海长征医院骨肿瘤科,上海市200003

中图分类号:R318

文献标识码:A

稿件接受: 2018-04-03



文题释义:

椎体终板:是椎体在生长发育过程中,椎体上下面的骨骼板骨化停止后形成骨板,呈轻度凹陷,即为骨性终板。椎体终板构成了椎间盘的上下边界,位于椎体中心的松质骨和椎间盘之间。

软骨终板:椎体终板的中央仍为一薄层透明软骨覆盖,并终生存在,即为软骨终板,上下软骨终板与髓核和纤维环连接共同构成椎间盘。

摘要

背景:目前临床常用的脊柱修复重建假体由于其具有材质刚度较大且与相邻终板接触面积太小等缺点,易产生应力遮挡,导致术后骨折不愈合及局部骨质吸收等问题的发生。随着固定时间的不断延长,内固定易出现疲劳性断裂,导致内固定失败。

目的:利用Mimics软件测量腰椎的CT扫描数据设计二段可调式新型人工假体。

方法:选取60例中青年男性住院患者腰椎CT扫描数据,导入Mimics软件中进行骨骼轮廓提取划分,分别测量记录L₁₋₃椎体高度及上下终板横径、矢状径、矢状面凹陷角及冠状面凹陷角等指标,依照所测数据设计高度可调且两端接触面与相邻椎体终板相贴合的新型人工假体。

结果与结论:①利用Mimics软件精确划分提取了所有病例资料的L₁₋₃椎体数据。经过测量分析,L₁₋₃椎体高度,上下终板矢状径及矢状面凹陷角差异无显著性意义,L₁₋₃椎体上终板横径均小于同椎体下终板($P < 0.05$),冠状面凹陷角差异明显($P < 0.05$);②根据所测椎体高度及终板矢状径、矢状面凹陷角等数据结果设计出高度可调新型人工假体。该假体以纳米羟基磷灰石/聚酰胺66复合材料为基础,由顶盖和底座两部分相互嵌套组成,术中可通过底座侧孔注入骨水泥实现假体高度调节。该假体两端接触面与相邻终板紧密贴合、足够的接触面积能有效减少应力集中,促进假体与终板的骨质愈合;③结果说明,试验利用Mimics软件测量腰椎的CT扫描数据设计二段可调式新型人工假体设计合理,操作方便。

关键词:

椎体高度;终板形态学;解剖学;CT扫描;纳米羟基磷灰石/聚酰胺66复合材料;生物材料;人工假体;Mimics;矢状径;终板横径;组织工程

主题词:

组织工程;生物相容性材料;腰椎

基金资助:

国家自然科学基金面上项目(51573207);宁波市自然科学基金(2016A610006)

缩略语:

纳米羟基磷灰石/聚酰胺66: nano-hydroxyapatite/polyamide 66, n-HA/PA66

Chen Guang-hui, Master, Physician, Department of Oncology, Changzheng Hospital, Second Military Medical University of PLA, Shanghai 200003, China

Corresponding author:
Liu Tie-long, M.D., Associate chief physician, Department of Oncology, Changzheng Hospital, Second Military Medical University of PLA, Shanghai 200003, China

Design of a novel two-segment adjustable nano-hydroxyapatite/polyamide 66 artificial prosthesis based on Mimics measurements of CT scan data

Chen Guang-hui¹, Cheng Li², Wang Jian³, Huang Quan¹, Bai Guang-jian⁴, Yin Meng-chen⁵, Wei Hai-feng¹, Yang Cheng¹, Xiao Jian-ru¹,

Liu Tie-long¹ (¹Department of Oncology, Changzheng Hospital, Second Military Medical University of PLA, Shanghai 200003, China;

²Department of Orthopedics, Cixi People's Hospital, Cixi 315300, Zhejiang Province, China; ³Department of Orthopedics, People's Hospital of Shanghai Pudong District, Shanghai 200000, China; ⁴Taishan Medical University, Tai'an 271016, Shandong Province, China; ⁵Department of Orthopedics, Longhua Hospital, Shanghai 200000, China)

Abstract

BACKGROUND: Previous studies have shown that commonly used prostheses for spinal repair are prone to have stress shielding effects (nonunion and local bone resorption) due to their limited high elastic modulus and limited contact areas, which can lead to the failure of internal fixation over time.

OBJECTIVE: To design a novel two-segment adjustable artificial vertebral body through the measurement of CT scan data of the vertebral body using Mimics software.

METHODS: Sixty young and middle-aged male patients with lumbar CT scan data were included. Mimics software was used to extract the skeleton contour of L₁₋₃ vertebrae and to measure the vertebral body height and the transverse diameter of the upper and lower end plates, sagittal diameter, sagittal and coronal concave angles. Based on the measured data, a new type of artificial vertebral body adjustably and anatomically fitting the vertebral endplate was designed.

RESULTS AND CONCLUSION: There was no significant difference in the L₁₋₃ height and sagittal diameter of the upper and lower endplates, and sagittal concave angle among all the cases. The transverse diameter of the upper endplate was significantly less than that of the lower endplate in the same vertebra ($P < 0.05$). A significant difference in the sagittal concave angle was also found ($P < 0.05$). Based on the measured vertebral height, sagittal diameter of the endplate and sagittal concave angle, a novel artificial vertebral body with adjustable height was designed. The new product made of nano-hydroxyapatite/polyamide 66 was composed of a top cover and a base. The height of the designed vertebral body could be controlled by bone cement injection via the side hole on the base. And it could be tightly integrated with the upper and lower endplates of the adjacent vertebral body, which is beneficial to promote the osseointegration. In conclusion, the two-segment adjustable artificial vertebral body has the advantages of reasonable design and convenient operation.

Subject headings: Tissue Engineering; Biocompatible Materials; Lumbar Vertebrae

Funding: the National Natural Science Foundation of China, No. 51573207; Ningbo Natural Science Foundation, No. 2016A610006

0 引言 Introduction

在脊柱外科领域, 大量脊柱肿瘤、畸形、退变的手术患者需要大段骨修复材料重建其稳定性。但由于脊柱解剖结构复杂, 脊髓和神经根等重要结构的存在, 手术操作空间相对狭小, 大块骨修复材料植入时非常困难, 过度牵拉刺激常造成脊髓、神经根的损伤, 导致严重并发症的发生^[1-3]。

目前临床常用长节段修复材料主要包括钛网、人工椎体以及定制假体等^[4-5], 但由于其与椎体终板接触面积较小, 材质刚度与人体皮质骨相差较大等问题, 术后易出现应力集中或遮挡效应, 最终导致局部骨质吸收溶解, 内固定失败^[6-9]。为解决上述问题, 需设计出一种能符合临床需要的假体。Lowe等^[10]通过对椎体终板的生物力学研究发现终板的中央部仅有薄层皮质骨不能够提供足够的应力支撑, 而在终板周围, 尤其是后外侧靠近椎弓根的部位皮质骨较厚, 能承受较大的压力。Semra等^[11]通过对腰椎间盘退变与终板形态学变化的研究发现, 椎体终板形态随着年龄的增长与椎间盘退变程度的改变而改变。因此为了设计出符合椎体终板解剖结构的理想假体, 充分了解目标椎体终板的形态学特征显得尤为重要。尽管国内外已有大量文献报道对椎体及终板形态学研究的结果, 但据试验所知, 目前临幊上常用的假体很少能真正实现椎体终板的解剖贴合。另一方面, 现在常用的假体材质大多为钛合金或PEEK材料, 其弹性模量与人体皮质骨相差较大, 植入后容易产生应力遮挡效应, 进而影响骨质愈合。Chen等^[7]通过对300

例用钛网重建颈椎稳定性的患者资料研究发现钛网沉降率高达19.0%, 并且此不良反应与临床预后紧密相关。尽管可调式人工椎体的应用在重建椎体高度及矫正畸形方面有一定的优势, 但据Graillon等^[12]报道, 仍有35%的患者在术后发生不同程度钛网下沉, 目前常用的钛合金式可调式人工椎体并不能很好的解决应力遮挡及假体沉降的问题。纳米羟基磷灰石/聚酰胺66(nano-hydroxyapatite/polyamide 66, n-HA/PA66)复合材料作为一种合成材料, 具有良好的组织相容性及成骨活性, 现已被广泛应用于临床修复骨缺损, 并且已取得了满意的临床效果^[13-14]。但目前临床常用的产品多为不同规格空心柱状结构, 高度无法调节, 给术中假体的植入带来了不便。

目前临幊中尚缺少一种既能方便术中植入又能与相邻终板充分贴合且材料性质与人体皮质骨相似的人工假体。试验为解决上述问题, 利用Mimics软件测量了60例中青年男性患者腰椎CT薄层扫描数据, 通过计算并测量L₁₋₃椎体高度及上下终板相关参数, 以n-HA/PA66为基础设计出复合人体腰椎终板解剖结构的新型可调式人工假体, 以期满足临幊需要。

1 对象和方法 Subjects and methods

1.1 设计 影像学试验。

1.2 时间及地点 于2015年4月至2017年3在上海长征医院骨科研究所完成。

1.3 对象 选取2015年4月至2017年3月在上海长征医院

骨科住院中青年男性患者60例，从影像科调取相关腰椎CT扫描数据并以DICOM格式存储备用。数据的应用及试验方案获得医院伦理委员会批准。患者本人及家属对试验研究具有知情同意权。

纳入标准: ①中青年男性；②腰椎CT资料完整。

排除标准: ①病变累及L₁₋₃椎体及附件；②腰椎严重退变畸形如侧弯、后凸畸形、腰椎骨赘形成等，影响数据测量；③严重骨质疏松患者。

1.4 方法

1.4.1 图像获取 选取的研究对象均曾在上海长征医院放射科行脊柱CT薄层扫描(PHILIPS Brilliance 64排多层次螺旋CT)，经过查阅资料确认该检查是由经验丰富放射科技师辅助完成。操作条件设置：除病椎以外需包括L₁₋₃椎体，在骨窗中观察脊柱椎体形态及附属结构完整。所有数据均以DICOM格式保存输出并导入Mimics 16.0软件(Materialise's interactive medical image control system)中进行L₁₋₃椎体数据测量采集。

1.4.2 椎体数据测量 利用MIMICS软件多窗视图功能，调整视图于正中矢状面及特定冠状面，然后利用软件Measurements模块工具分别测量一下指标：①椎体中央高度(H_{U-D})：椎体正中矢状面及冠状面交汇点垂直高度H_{U-D}；②椎体终板前后缘最大距离记为矢状径S_{A-P}；③终板横径(S_{L-R})：椎体终板左右缘最大距离记为终板横径S_{L-R}；④在正中矢状位确定上下终板最凹点记为Cm，同时也为特定冠状面最凹点；⑤终板凹陷角的定义为最凹点与终板边缘连线所成钝角(图1)。其中矢状面凹陷角为SCA(Sagittal concave angle)，冠状面凹陷角CCA(Coronal concave angle)。为了减少记录数据的误差，所有测量数据由2名脊柱外科医师分别测量取平均值，如两者之间测量误差超过0.5°则视为数据不准确，不予纳入统计。

1.4.3 可调式人工假体的设计 根据测量L₁₋₃椎体高度设计相互嵌套高度可调的二段式人工假体，使假体在充分嵌合状态下方便植入，植入后通过骨水泥的注入调节假体高度使之与相邻终板紧密贴合，达到撑开重建的目的。假体两端与邻近终板接触面的弧度则根据相邻终板凹陷角进行优化设计，使之尽可能符合上下终板的解剖学特点，达到最大面积接触。n-HA/PA66是一种新型纳米仿生复合材料，由于其良好组织相容性和骨整合能力被广泛地应用于临床骨科修复重建领域。该材料弹性模量与人类皮质骨类似，植入后不易产生应力遮挡效应，因而可以作为一种理想的假体制作材料。

1.5 主要观察指标 L₁₋₃椎体高度、终板矢状径、终板横径、椎体矢状面凹陷角及冠状面凹陷角变化。

1.6 统计学分析 计量资料均采用 $\bar{x}\pm s$ 表示。用SPSS 17.0软件进行数据分析，两组间数据资料的比较采用t检验，多组间差异比较采用单因素方差分析。 $P < 0.05$ 为差异具有显著性意义。

2 结果 Results

2.1 受试者数量分析 最终纳入60例患者资料，无脱失值。

2.2 受试者一般资料 共纳入60例中青年男性患者L₁₋₃椎体CT资料，其中腰椎外伤骨折6例，腰椎管内肿瘤12例，腰椎转移瘤9例，腰椎管狭窄3例，腰椎间盘突出25例，骶骨肿瘤5例，年龄24-45岁，平均35岁。

2.3 受试者椎体高度、终板矢状径及横径的差异 不同年龄及疾病诊断患者间，L₁₋₃椎体高度H_{U-D}及上下终板矢状径之间差异无显著性意义，椎体上下终板横径差异明显($P < 0.05$ ；表1)。

2.4 受试者椎体矢状面凹陷角及冠状面凹陷角变化 在60例研究资料中，L₁₋₃椎体上下终板矢状面凹陷角差异无显著性意义，冠状面凹陷角差异相对较大，且上终板凹陷角均大于下终板，上下终板间差异有显著性意义($P < 0.05$ ；表2)。

2.5 二段可调式新型人工假体的设计 根据以上测量数据，L₁₋₃椎体高度差异无显著性意义，平均高度约为23 mm，基于此试验采用内嵌式高度可调设计构建二段可调式新型人工假体。该假体由底座和顶盖2个组件构成，在底座一侧留有骨水泥注入通道，方便术中通过骨水泥侧方注入的方式实现假体撑开。由于椎体切除后重建需要，试验需同时将相邻椎间盘一并切除，因此试验将椎体相邻上下椎间盘高度一并计算内，在设计单节段腰椎椎体切除重建假体时根据试验测量结果，设定其高度可调范围为28-37 mm。另根据L₁₋₃椎体上下终板形态学测量结果，设计假体两端接触面直径为22 mm，略小于终板最小矢状径，接触面弧度参考矢状面凹陷角采用163°，如图2所示。

3 讨论 Discussion

自1911年Hibbs等首次提出脊柱融合重建脊柱稳定性概念以来，椎间融合器的设计实现了由自体髂骨到金属融合器再到人工复合材料椎间融合器的快速发展。随着人们对椎体解剖结构的不断认识，椎体终板的组织及形态学研究为椎间融合的设计发展带来了新的思路^[10, 15-18]。据文献报道脊柱前柱承载了至少80%的轴向压力^[19]，而大部分压力的承载是由终板提供，完全去除终板后，椎体的抗压能力将下降约39%^[10]。Clokey等^[20]研究证实，人工假体的横截面积是影响其抗压能力的重要指标之一，假体与终板接触面应至少大于终板面积的30%才能提供较理想的生物力学效果。由于椎体终板在脊柱重建过程中有着如此重要的作用，因此试验在设计人工假体时需要对椎体终板几何形态进行充分的研究。

为了设计出符合脊柱解剖特征的人工假体，国内外多名学者对椎体终板形态学及力学性能进行了研究。Yue等^[21]通过3D扫描仪测量了76例中年男性腰椎影像学资料共计591个椎体终板，研究发现相邻终板存在明显形态学差异，

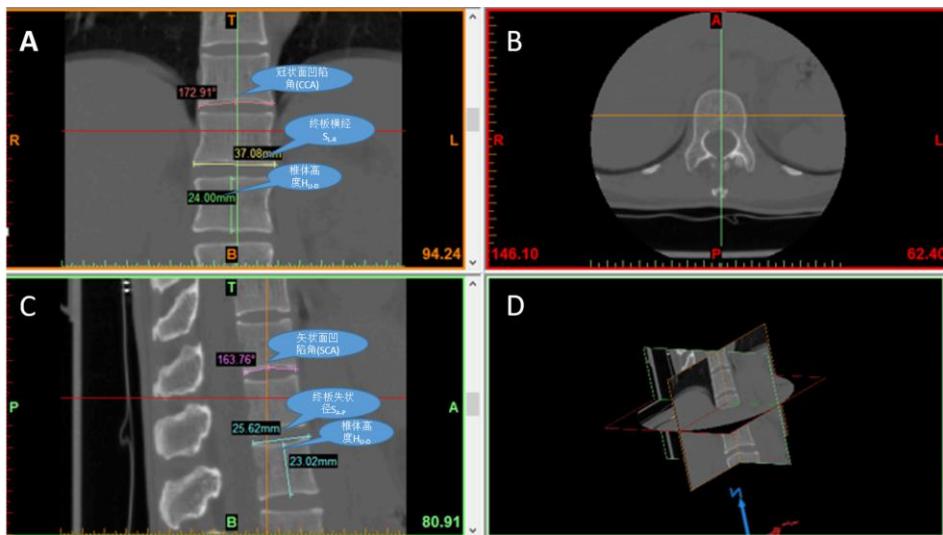


图 1 Mimics 多窗视图窗口数据测量

Figure 1 Mimics Multi window view for data measurement

图注: 图 A-D 分别为冠状位、横断面、矢状位及三维视图窗图像。

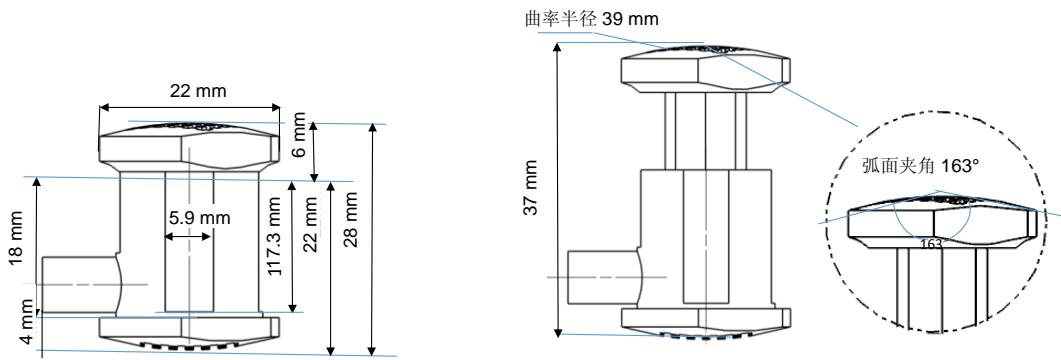


图 2 二段可调式新型人工假体设计图

Figure 2 Design chart of the two-segmental adjustable artificial vertebral body

表 1 L₁₋₃ 椎体高度及终板矢状径、横径比较 (x±s, mm)

Table 1 Comparison of the height, sagittal diameter and transverse diameter of the endplate of L₁₋₃ vertebral bodies

腰椎	椎体高度	终板矢状径	终板横径
L ₁ 上	23.03±2.19	24.5±2.8	35.6±4.0
L ₁ 下		24.5±3.1	37.8±3.8
L ₂ 上	22.89±2.23	24.8±2.7	36.6±3.7
L ₂ 下		25.0±2.9	39.1±4.0
L ₃ 上	22.81±2.17	25.0±3.0	37.1±3.6
L ₃ 下		25.6±2.9	40.3±3.8

表注: 椎体上下终板横径差异明显($P < 0.05$)。

表 2 L₁₋₃ 椎体矢状面凹陷角(SCA)及冠状面凹陷角(CCA)比较 (x±s, °)

Table 2 Comparison of sagittal and coronal concave angles of L₁₋₃ vertebral bodies

腰椎	矢状面凹陷角	冠状面凹陷角
L ₁ 上	163.5±3.8	176.0±3.3
L ₁ 下	162.4±3.9	174.2±3.6
L ₂ 上	163.4±4.1	175.4±4.1
L ₂ 下	162.7±4.0	173.4±3.8
L ₃ 上	163.7±4.2	174.8±3.9
L ₃ 下	162.3±4.1	171.9±3.5

表注: 冠状面凹陷角差异相对较大, 且上终板凹陷角均大于下终板($P < 0.05$)。

且同一椎体上终板凹陷角大于下终板。L_{1/2}至L_{4/5}终板矢状径整体变化不大, 而横径则呈逐步增大趋势。Semra等^[11]利用MRI对150例腰椎退变患者终板形态学测量分析发现终板形态与腰椎退变程度呈明显相关性。椎体终板随着年龄的增加、腰椎退变程度的加重逐渐变平, 矢状面凹陷角逐渐变大。同一椎间盘相邻上终板矢状角小于下终板, 且腰椎退变与终板矢状径无明显相关。有研究对新加坡华人经胸腰椎解剖学测量发现椎体高度、终板面积自T₁至L₄呈逐步增加趋势^[18]。

试验首次利用了医学图像处理软件Mimics对60例中

青年男性患者腰椎椎体及其终板进行了形态学测量^[22], 测量结果与文献报道基本一致。试验发现L₁、L₃椎体平均高度分别为(23.03±2.19) mm及(22.81±2.17) mm, 两者没有统计学差异。L₁₋₃同一椎体上下终板失状径差异较小, 横径呈现上终板小于下终板且L₁至L₃递增趋势明显。因此试验在设计椎体时以差异相对变化不大的指标为参考如椎体失状径及椎体平均高度等, 使设计出的椎体满足大部分患者的需要。另据Awwad等^[1]报道, 椎体的下终板与相应神经根的距离为假体植入时通过的最窄距离, 而这个距离自L₁的(2.36±0.26) cm至L₃的(2.45±0.29) cm呈递增趋势。综合

以上测得试验数据及临床实际应用考虑，试验采用假体两端接触面最大直径22 mm的设计，不仅满足横截面大面积接触的需要又避免了因直径过大而带来的植入困难问题。由于L₁₋₃椎体终板矢状面凹陷角平均约为163°，且上下终板面间差异较小，而冠状面凹陷角个体化差异明显。因此作者在设计人工假体上下接触面时采用了弧度为163°的设计，以期实现假体与终板曲面紧密贴合的目的。

由于近年来外科手术技术不断进步发展，很多复杂手术方式选择由以前的前路或前后联合入路转变为一期后路手术^[2, 23-27]。但由于脊柱解剖结构复杂，脊髓、神经根等重要结构的存在，长节段修复假体的植入问题仍是临床医生面临的难题。在脊柱肿瘤切除重建、骨折或畸形矫形手术过程中，为了使钛网或人工椎体植入方便^[5, 28]，常会对脊髓神经过度牵拉甚至造成不必要的牺牲，从而导致术后严重并发症的发生^[1, 29-31]。

可调式人工椎体的出现很好的解决了假体植入困难的问题，但由于受制作材料所限，术后假体下沉，局部骨质吸收等问题时有发生。因此，为了减少人工假体植入过程中对脊髓神经根的牵拉刺激，试验以n-HA/PA66复合材料为基础，采用相互嵌套的方式设计出新型人工假体。根据文献报道及测量椎体高度等数据，试验设计假体在未撑开状态下高度仅为28 mm方便术中植入，植入后可根据需要在体内通过侧方骨水泥通道注入骨水泥的方式调节假体高度以适应椎体切除后重建高度的需要。通过骨水泥注入的方式调节假体高度具有操作方便，节省费用等优点。

另据文献报道，n-HA/PA66复合材料有着良好的生物相容性及骨整合能力^[13-14, 32-34]。Caroli等^[35]研究证实相对于金属钛笼和其他惰性材料而言，n-HA/PA66产品表现出更高的融合效率和更低的塌陷率，是一种较为理想的修复重建材料。有研究通过5年的随访发现以该材料为基础的纳米管状骨具有类似人类皮质骨的支撑强度，不仅满足支撑重建的需要，而且骨融合率高达98%^[14]。因其弹性模量与人皮质骨类似，因而不易产生应力遮挡，有利于促进骨融合，因此试验拟采用与以往文献报道的同样的纳米多孔n-HA/PA66材料为基础制作此假体，利用其良好的生物力学性能及骨界面整合能力，促进假体与终板的骨质愈合，维持脊柱稳定。

试验不足之处在于为方便阐述、简化计算，所选研究对象均为中青年男性且主要研究节段集中在L₁₋₃椎体，因而依所测椎体数据设计的人工假体是否能通用于女性患者或脊柱其他节段以及其力学评价等方面问题尚有待进一步的试验研究。另一方面，由于椎体终板形态受腰椎退变、年龄等诸多因素影响，因此假体接触面直径及弧度的设计是否合理需进一步试验验证。

综上所述，基于MIMICS测量CT扫描数据二段可调式新型人工假体设计合理操作方便，能够减少术中假体植入时相关并发症的发生。假体两端163°弧面设计能够实现与

相邻终板面的解剖贴合，减少应力集中，分散应力，促进接触面骨整合，维持脊柱稳定性。该新型人工假体是一种值得临床推广应用的新型植介入器械。

致谢：感谢上海长征医院骨科研究所及影像科、上海市浦东新区人民医院、慈溪市人民医院及上海龙华医院提供的技术支持。

作者贡献：试验设计为陈广辉和刘铁龙及成立。试验实施为王健、陈广辉、尹萌辰及黄权。试验评估为肖建如、刘铁龙及魏海峰。资料收集为陈广辉、尹萌辰及成立。

经费支持：试验受“国家自然科学基金面上项目(51573207)”及“宁波市自然科学基金(2016A610006)”的经费资助。所有作者声明，经费支持没有影响文章观点和对研究数据客观结果的统计分析及其报道。

利益冲突：文章全部作者声明在课题研究和文章撰写过程，不存在利益冲突。

伦理问题：试验方案已经上海长征医院伦理委员会讨论批准，患者和相关家属知情同意，并签署知情同意书。临床试验研究的实施符合《赫尔辛基宣言》和医院对人体研究的相关伦理要求。文章的撰写与编辑修改后文章遵守了《观察性临床研究报告指南》(STROBE指南)。参与实验的患病个体及其家属为自愿参加，所有受试者均对实验过程完全知情同意，在充分了解试验方案的前提下签署“知情同意书”。

文章查重：文章出版前已经过CNKI反剽窃文献检测系统进行3次查重。

文章外审：文章经国内小同行外审专家双盲外审，符合本刊发稿宗旨。

作者声明：第一作者对研究和文章出现的不端行为承担责任。文章中涉及的原始图片、数据(包括计算机数据库)记录及样本已按照有关规定保存、分享和销毁，可接受核查。

文章版权：文章出版前杂志已与全体作者授权人签署了版权相关协议。

开放获取声明：这是一篇开放获取文章，根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享3.0”条款，在合理引用的情况下，允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展，同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献，并为之建立索引，用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

4 参考文献 References

- [1] Awwad W, Bourget-Murray J, Zeiad N, et al. Analysis of the spinal nerve roots in relation to the adjacent vertebral bodies with respect to a posterolateral vertebral body replacement procedure. J Craniovertebr Junction Spine. 2017;8(1):50-57.
- [2] Suzuki T, Abe E, Miyakoshi N, et al. Posterior-approach vertebral replacement with rectangular parallelepiped cages (PAVREC) for the treatment of osteoporotic vertebral collapse with neurological deficits. J Spinal Disord Tech. 2013;26(5):E170-E176.
- [3] Ropper AE, Ropper AH. Acute spinal cord compression. N Engl J Med. 2017;376(14):1358-1369.
- [4] Lau D, Song Y, Guan Z, et al. Radiological outcomes of static vs expandable titanium cages after corpectomy: a retrospective cohort analysis of subsidence. Neurosurgery. 2013;72(4):529-539.
- [5] Holland CM, Bass DI, Gary MF, et al. Thoracic lateral extracavitary corpectomy for anterior column reconstruction with expandable and static titanium cages: clinical outcomes and surgical considerations in a consecutive case series. Clin Neurol Neurosurg. 2015;129:37-43.
- [6] Yang X, Chen Q, Liu L, et al. Comparison of anterior cervical fusion by titanium mesh cage versus nano-hydroxyapatite/polyamide cage following single-level corpectomy. Int Orthop. 2013;37(12):2421-2427.

- [7] Chen Y, Chen D, Guo Y, et al. Subsidence of titanium mesh cage: a study based on 300 cases. *J Spinal Disord Tech.* 2008; 21(7):489-492.
- [8] Zhang H, Zeng K, Yin X, et al. Debridement, internal fixation, and reconstruction using titanium mesh for the surgical treatment of thoracic and lumbar spinal tuberculosis via a posterior-only approach: a 4-year follow-up of 28 patients. *J Orthop Surg Res.* 2015;10:150.
- [9] Wu J, Luo D, Ye X, et al. Anatomy-related risk factors for the subsidence of titanium mesh cage in cervical reconstruction after one-level corpectomy. *Int J Clin Exp Med.* 2015;8(5): 7405-7411.
- [10] Lowe TG, Hashim S, Wilson LA, et al. A biomechanical study of regional endplate strength and cage morphology as it relates to structural interbody support. *Spine (Phila Pa 1976).* 2004;29(21):2389-2394.
- [11] Duran S, Cavusoglu M, Hatipoglu HG, et al. Association between measures of vertebral endplate morphology and lumbar intervertebral disc degeneration. *Can Assoc Radiol J.* 2017;68(2):210-216.
- [12] Graillon T, Rakotozanany P, Blondel B, et al. Circumferential management of unstable thoracolumbar fractures using an anterior expandable cage, as an alternative to an iliac crest graft, combined with a posterior screw fixation: results of a series of 85 patients. *Neurosurg Focus.* 2014;37(1):E10.
- [13] Xiong Y, Ren C, Zhang B, et al. Analyzing the behavior of a porous nano-hydroxyapatite/polyamide 66 (n-HA/PA66) composite for healing of bone defects. *Int J Nanomedicine.* 2014;9:485-494.
- [14] Zhang Y, Deng X, Jiang D, et al. Long-term results of anterior cervical corpectomy and fusion with nano-hydroxyapatite/polyamide 66 strut for cervical spondylotic myelopathy. *Sci Rep.* 2016;6:26751.
- [15] Kotani Y, Abumi K, Shikinami Y, et al. Artificial intervertebral disc replacement using bioactive three-dimensional fabric: design, development, and preliminary animal study. *Spine (Phila Pa 1976).* 2002;27(9):929-935; discussion 935-936.
- [16] Grant JP, Oxland TR, Dvorak MF. Mapping the structural properties of the lumbosacral vertebral endplates. *Spine (Phila Pa 1976).* 2001;26(8):889-896.
- [17] Aharinejad S, Bertagnoli R, Wicke K, et al. Morphometric analysis of vertebrae and intervertebral discs as a basis of disc replacement. *Am J Anat.* 1990;189(1):69-76.
- [18] Tan SH, Teo EC, Chua HC. Quantitative three-dimensional anatomy of cervical, thoracic and lumbar vertebrae of Chinese Singaporeans. *Eur Spine J.* 2004;13(2):137-146.
- [19] Reinhold M, Schmoelz W, Canto F, et al. A new distractable implant for vertebral body replacement: biomechanical testing of four implants for the thoracolumbar spine. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2009;129(10):1375-1382.
- [20] Closkey RF, Parsons JR, Lee CK, et al. Mechanics of interbody spinal fusion. Analysis of critical bone graft area. *Spine (Phila Pa 1976)* 1993;18(8):1011-1015.
- [21] Wang Y, Battié MC, Videman T. A morphological study of lumbar vertebral endplates: radiographic, visual and digital measurements. *Eur Spine J* 2012;21(11):2316-2323.
- [22] 王娇,刘洋,张晓玲,等.Mimics软件在医学图像三维重建中的应用 [J].医疗卫生装备, 2015,36(2):115-118.
- [23] Hofstetter CP, Chou D, Newman CB, et al. Posterior approach for thoracolumbar corpectomies with expandable cage placement and circumferential arthrodesis: a multicenter case series of 67 patients. *J Neurosurg Spine.* 2011;14(3):388-397.
- [24] Skovrlj B, Guzman JZ, Caridi J, et al. Posterior-Only Circumferential Decompression and Reconstruction in the Surgical Management of Lumbar Vertebral Osteomyelitis. *Global Spine J* 2016;6(1):e35-e40.
- [25] Jandial R, Kelly B, Chen MY. Posterior-only approach for lumbar vertebral column resection and expandable cage reconstruction for spinal metastases. *J Neurosurg Spine.* 2013;19(1):27-33.
- [26] Wang S, Zhang J, Qiu G, et al. Posterior-only hemivertebra resection with anterior structural reconstruction with a titanium mesh cage and short segmental fusion for the treatment of congenital scoliosis: the indications and preliminary results. *Spine (Phila Pa 1976).* 2017;42(22):1687-1692.
- [27] Sasani M, Ozer AF. Single-stage posterior corpectomy and expandable cage placement for treatment of thoracic or lumbar burst fractures. *Spine (Phila Pa 1976).* 2009;34(1): E33-E40.
- [28] Lee JH, Oh HS, Choi JG. Comparison of the Posterior Vertebral Column Resection With the Expandable Cage Versus the Nonexpandable Cage in Thoracolumbar Angular Kyphosis. *Clin Spine Surg.* 2017;30(4):E398-E406.
- [29] Fang T, Dong J, Zhou X, et al. Comparison of mini-open anterior corpectomy and posterior total en bloc spondylectomy for solitary metastases of the thoracolumbar spine. *J Neurosurg Spine.* 2012;17(4):271-279.
- [30] Abe E, Sato K, Tazawa H, et al. Total spondylectomy for primary tumor of the thoracolumbar spine. *Spinal Cord.* 2000;38(3):146-152.
- [31] Crocker M, James G, Ibrahim A, et al. Posterior approach vertebrectomy in the thoracolumbar spine with expandable cage reconstruction: indications and techniques based on eight cases. *Br J Neurosurg.* 2008;22(2):235-240.
- [32] Wang L, Song Y, Pei F, et al. Application of nano-hydroxyapatite/polyamide 66 cage in reconstruction of spinal stability after resection of spinal tumor. *Zhongguo Xiu Fu Chong Jian Wai Ke Za Zhi.* 2011;25(8):941-945.
- [33] Abd EH, Helmy Y, El-Kholly B, et al. In vivo animal histomorphometric study for evaluating biocompatibility and osteointegration of nano-hydroxyapatite as biomaterials in tissue engineering. *J Egypt Natl Canc Inst.* 2010;22(4): 241-250.
- [34] Xu Q, Lu H, Zhang J, et al. Tissue engineering scaffold material of porous nanohydroxyapatite/polyamide 66. *Int J Nanomedicine.* 2010;5:331-335.
- [35] Caroli E, Orlando ER, D'Andrea G, et al. Anterior cervical fusion with interbody titanium cage containing surgical bone site graft: our institution's experience in 103 consecutive cases of degenerative spondylosis. *J Spinal Disord Tech.* 2007;20(3):216-220.