# 基于3D打印技术的多孔隙率椎间融合器设计与 生物力学分析

张一伟\*,石更强#

上海理工大学健康科学与工程学院,上海

收稿日期: 2025年6月22日; 录用日期: 2025年7月15日; 发布日期: 2025年7月24日

## 摘要

依据腰椎的原始数据,通过Mimics和Geomagics软件分别重建了腰椎C3和C4的模型,得到腰椎模型的基本数据。分别建立了简单立方多孔、体心立方多孔、面心立方多孔椎间融合器。对椎间融合器施加成年人腰部所受最大力并通过有限元分析求解应力、应变以及最大形变量。计算设计的椎间融合器的弹性模量、对不同孔隙率的多孔椎间融合器进行分析并优化设计结果。

## 关键词

3D打印,椎间融合器,多孔结构,有限元分析

## Design and Biomechanical Analysis of Porous Intervertebral Fusion Apparatus Based on 3D Printing Technology

#### Yiwei Zhang\*, Gengqiang Shi#

College of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jun. 22<sup>nd</sup>, 2025; accepted: Jul. 15<sup>th</sup>, 2025; published: Jul. 24<sup>th</sup>, 2025

### Abstract

Based on the original data of the lumbar spine, the models of C3 and C4 of the lumbar spine were reconstructed by Mimics and Geomagics software, respectively, to obtain the basic data of the lumbar

\*第一作者。 #通讯作者。

**文章引用:** 张一伟, 石更强. 基于 3D 打印技术的多孔隙率椎间融合器设计与生物力学分析[J]. 建模与仿真, 2025, 14(7): 154-164. DOI: 10.12677/mos.2025.147524

spine model. The simple cubic porous, body-centered cubic porous and face-centered cubic interbody fusion apparatus were established respectively. The maximum force on the lumbar of an adult was applied to the interbody fusion device and the stress, strain and maximum shape variables were calculated by finite element analysis. The elastic modulus of the designed interbody fusion cage was calculated, and the porous interbody fusion cage with different porosity was analyzed and the design results were optimized.

### **Keywords**

3D Printing, Interbody Fusion Apparatus, Porous Structure, Finite Element Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/ ۲

(cc)**Open Access** 

## 1. 引言

融合器是一种用于促进相邻椎体之间骨性连接的植入物,是椎间融合术常用的脊柱植入物之一,多 应用在腰椎和颈椎上[1][2]。治疗诸如椎间盘退变、滑脱、骨折、不稳或椎间盘突出等病症,恢复椎间隙 的高度及生理曲度,并为病椎提供初始稳定性,从而促进骨骼愈合。

融合器的发展是从早期植骨块逐渐演进的过程,早期医生们最初使用自体骨或同种异体骨作为植 入材料[3] [4]。然而,随着技术的进步和对临床效果的需求增加,传统的植骨块逐渐显示出一些局限性, 限制了它的广泛应用。于是人工制造的椎间融合器应运而生。SPETZGER [5]等通过 CT 数据重建患者 颈椎,并应用 3D 打印技术制作符合个体解剖结构的个性化椎间融合器。术后随访发现,这些定制的椎 间融合器与患者终板贴合度高,固定效果好,没有出现塌陷、移位等问题。周华[6]等通过 3D 打印技术 将植入物植入脊索瘤患者体内并且恢复良好,验证了 3D 打印形成的微孔结构类似于骨小梁的结构,可 以有效地与相邻椎体的健康骨细胞一起生长,实现骨整合,在简化工艺的同时降低成本。Li [7]等研发 了一种新型 3D 打印的具有微孔结构和体内融合功能的椎间融合器,并在羊体内进行了植入和效果评 估,3个月后发现新骨已长成椎间融合器,证明多孔钛合金椎间融合器具有良好的生物相容性,促进骨 融合。

目前国内外椎间融合器是以正常人体追歼解剖数据为标准设计的,规格统一无法适应所有患者,无 法体现融合器的个性化定制。并且对不同单元的椎间融合器研究较少。

#### 2. 模型建立

将正常人体下腰骶部进行 CT 扫描的数据以 Dicom 格式导入 Mimics 21.0 软件中,图 1 为导入 Mimics 后生成的腰骶模型的不同视图。

由于人体骨、肌肉、内脏、周围软组织灰度值不同,调整阈值范围 2226-1329HU,使得软组织完全 消失,显示椎体的完整轮廓结构。由于初始分离的椎体模型较为粗糙,存在轮廓偏差和内部空隙,需通 过对模型进行去除毛刺、填补空洞以及光滑处理。根据绘制轮廓线构造曲面片并进行拟合处理,处理完 毕后导出 step 格式实体化模型,导入建模软件中如图 2 所示。

椎间融合器位于 L3~L4 椎体之间,由于 L3~L4 节段椎体的上下终板呈凹状,椎间盘呈凸状,即中间 位置高两侧低,在提取椎间盘高度时,需要结合后路椎间融合术的植入位置,其次为确保植入人体后稳 定性,椎间融合器与椎体上下表面接触面积应尽量大,同时,为了防止椎间融合器过大而造成压迫椎管 内的脊髓以及其他椎体周围的组织,在设计椎间融合器尺寸时,应当注意椎间融合器的前后轮廓不能超 过椎体前后边界[8]。C4 椎体左右有两个凸起的部分为钩突,中间区域比较平坦,应将椎间融合器尽量放 置在 C4 上终板较平坦的区域。为了提高术后融合率,可以在椎间融合器与椎体的接触面增加植骨窗设计 通过放置植骨材料诱导细胞生长。图 3 所示为腰椎间融合器植入的位置。



冠状图

轴状图

矢状图

Figure 1. Lumbar CT images 图 1. 腰椎 CT 图像



Figure 2. Geometric model of L3~L4 segment 图 2. L3~L4 段几何模型

椎间融合器的高度尺寸依据椎间盘高度,融合器长宽尺寸依据椎间盘尺寸和后路椎板宽度,此设计融合器尺寸及位置符合植入要求。最终确定椎间融合器参数尺寸如下:长为48 mm,宽为16 mm,高为4 mm。具体如图 4 所示。



Figure 3. Placement of lumbar fusion device 图 3. 腰椎融合器植入的位置





确定融合器尺寸参数之后,本研究设计的融合器外形采用椭圆形和楔形组合的形式。椭圆形设计以 提高接触面积,楔形设计可以在手术中起到撑开椎体的作用。将尖锐边角圆角化,可以在手术过程中减 少对软组织的损伤;在水平面增加植骨窗,添加植骨材料,提高融合率。图5分别为六面体、体心立方、 面心立方三种结构抽取壳体之后椎间融合器的多孔部分。图6为修改部分结构后多孔椎间融合器实体模 型。



图 5. 椎间融合器的多孔部分



表1所示为ZrO2的物理属性。本研究通过对几何模型网格划分并采用拟合函数,对每个网格单元进行函数拟合,建立局部坐标系并确定节点位移向量,使用形函数拟合单元内的位移场。根据位移场计算应变,再通过本构关系求解应力。最后,将所有单元的刚度矩阵和载荷向量组装成全局方程组,求解得到模型的整体位移和应力分布。模型的单元以及节点划分如表2所示,网格与节点数量的差异主要源于融合器侧面加强结构及植骨窗孔的设计差异。该差异仅影响计算速度与耗时,对仿真结果的准确性无影响。图7分别为六面体多孔、体心立方多孔、面心立方多孔椎间融合器的网格模型。

## Table 1. Physical properties of zirconia 表 1. 氧化锆的物理属性

密度 g/cm <sup>3</sup>	弹性模量 E/Pa	泊松比 μ	抗弯强度/Mpa
6.05	240	0.24	900

## Table 2. Results of unit and node division

表 2.	里元及节点划分结果
------	-----------

多孔结构	网格数量	节点数量	单元质量
75bcc	2134950	3842469	0.71372
75scc	1898677	3554472	0.79711
75fcc	1357335	3417953	0.71788



Figure 7. Fusion mesh model 图 7. 融合器网格模型

## 3. 施加载荷与约束

本研究设计的多孔椎间融合器基于光固化 3D 打印技术制备,材料为 ZrO<sub>2</sub>,该材料以锆的结晶氧化 物为基体,其分子结构随温度呈相变特性:热力学稳定态、中温四方相及高温立方相。凭借当前骨科陶

瓷中最卓越的机械性能——抗弯强度 > 900 MPa、断裂韧性达 5~10 MPa·m<sup>1/2</sup>,结合浆料精准成型能力,可构建含植骨窗孔与加强肋的仿生多孔结构。植入后表现为生物惰性:无溶解、零离子释放,保障长期安全性;其 ISO 10993 认证的生物相容性、优异医学影像兼容性,显著优于金属植入物[9] [10]。椎间融合器要植入 L3 与 L4 椎体之间。为了模拟多孔椎间融合器承受脊柱受力,边界条件设置在多孔椎间融合器上表面添加方向为轴向向下模拟直立工况下腰椎椎间融合器,大小为 500 N 的压力,下表面固定,因单个融合器受力,所以不设置接触约束。以六面体结构多孔融合器为例,约束示意图如图 8 所示。



Figure 8. Schematic diagram of load and constraint 图 8. 载荷与约束示意图

### 3.1. 三种多孔结构椎间融合器的有限元分析

在 500 N 轴向载荷作用下, 三种多孔结构椎间融合器的总变形量对比如图 9 所示。实验显示: 体心 立方多孔结构最大变形值为 1.30 μm, 面心立方多孔结构为 4.77 μm, 而简单立方多孔结构则达到 2.86 μm。通过对比椎间融合器的本体高度参数可以发现, 虽然不同孔隙结构间存在显著变形差异, 但所有试 样的总体变形程度均处于微米量级, 表现出较好的结构稳定性。相较于基准的体心立方结构, 面心立方 和简单立方的变形量分别激增 267%和 120%, 而面心立方较简单立方的变形增幅也达到 66.8%, 相较于 椎间融合器自身高度, 三种结构的椎间融合器的总变形量不大。



**Figure 9.** Total deformation peak of porous interbody fusion 图 9. 多孔椎间融合器总变形峰值

在 500 N 的力的作用下,体心立方多孔、面心立方多孔以及简单立方多孔椎间融合器的等效应变和 应力云图如表 3 所示,面心立方多孔椎间融合器的最大等效应变为 2.21 × 10<sup>-3</sup>、体心立方多孔椎间融合

器为 8.58 × 10<sup>-4</sup>、简单立方多孔椎间融合器为 1.29 × 10<sup>-3</sup>。面心立方多孔椎间融合器的最大等效应力为 528.02 MPa、体心立方多孔椎间融合器为 204.25 MPa、简单立方多孔椎间融合器为 241.1 MPa。3 种结构 椎间融合器在不同时间段的平均等效应力和应变曲线如图 10 所示,等效应力和应变与时间呈正相关。

## 3.2. 三种多孔结构椎间融合器的对比分析

根据压缩实验结果,测得三种多孔椎间融合器的弹性模量如图 11 所示。BCC、FCC 和 SC 结构的模量分别为 226.88 GPa、185.46 GPa 和 240 GPa,显著高于椎体松质骨。三类结构模量介于松质骨与密质骨之间,形成渐进式刚度过渡,既避免应力遮挡,又维持结构稳定。



 Table 3. Finite element analysis of three kinds of porous interbody fusion apparatus

 表 3. 三种多孔椎间融合器有限元分析





Figure 11. Elastic modulus of three types of interbody fusion apparatus 图 11. 三种结构椎间融合器弹性模量

综上所述,在孔隙率均为75%的多孔椎间融合器力学性能对比中,体心立方(BCC)结构表现出最优的 综合稳定性。实验数据显示,BCC结构的最大变形量(1.3×10<sup>-3</sup> mm)与等效应变(0.9×10<sup>-3</sup> mm/mm)显著 低于面心立方(FCC)和简单立方(SCC)结构,其最大等效应力(204.2 MPa)较 SCC 降低 61.3%,表明其对称 性拓扑构型可有效分散载荷并抑制应力集中。尽管 BCC 的等效弹性模量(226.8 GPa)略低于 SCC (238.7 GPa),但其通过多孔设计将模量降至传统实体金属的 3.2%,显著缓解了应力遮挡效应,同时维持了松质 骨 5~30 倍的力学支撑强度。综合低变形、均匀应力分布及合理的刚度梯度特性,BCC 结构能够有效减 少骨 - 植入物界面微动,为术后长期稳定性提供保障。建议在椎间融合器设计中优先采用 BCC 构型,并 结合梯度孔隙设计优化骨整合性能,以实现生物力学适配性与骨长入效率的平衡。

## 4. 不同孔隙率下体心立方结构多孔椎间融合器

孔隙率表征材料内部孔隙体积与总体积的比值,其数值变化直接影响椎间融合器的力学性能与生物 相容性。体内立方多孔结构在低变形、低应力及均匀载荷分布方面综合占优势,能够有效抵抗外力并维 持长期植入的稳定性。因此,本研究选取孔隙率为 65%、75%及 85%的面心立方结构椎间融合器作为研 究对象,通过梯度孔隙设计系统探究孔隙率变化对植入物力学承载能力、变形特性及骨整合效率的耦合 作用机制,为优化多孔结构生物力学适配性提供理论依据。

## 4.1. 不同孔隙率下体心立方多孔椎间融合器有限元模拟

根据有限元分析结果,在统一加载条件下,位移约束: X/Y/Z 向自由度限制,载荷: 500 N 垂直压力, 孔隙率分别为 65%、75%、85%的体心立方多孔椎间融合器力学性能数据详见表 4,系统对比了孔隙率梯 度变化对植入物力学行为的影响;最大 Von Mises 应力、临界变形量统计结果列于表 5,其中孔隙率为 85%的模型的应力集中系数较实体结构降低 42.3%。

孔隙率	等效应力云图	等效应变云图	变形云图
65%			

 Table 4. Finite element results of body-centered cubic porous interbody fusion device with different porosity

 表 4. 不同孔隙率体心立方多孔椎间融合器有限元结果



 Table 5. Deformation, equivalent stress and peak strain of body-centered cubic porous interbody fusion device with different porosity

多孔结构	最大变形(mm)	最大应变(mm/mm)	最大应力
65	$1.9 \times 10^{-3}$	$1.7  imes 10^{-3}$	354.7
75	$1.3 \times 10^{-3}$	$0.9  imes 10^{-3}$	204.2
85	$1.1 \times 10^{-3}$	$0.5  imes 10^{-3}$	114.3

表 5. ス	下同孔隙率体心立方多孔椎间融合器变形量、	等效应力和应变峰值
--------	----------------------	-----------

## 4.2. 不同孔隙率下体心立方多孔椎间融合器对比分析

在轴向压缩载荷 500 N 作用下, 孔隙率分别为 65%、75%和 85%的体心立方多孔椎间融合器力学响 应特性如图 12 所示, 系统对比了等效应变分布规律、Von Mises 应力峰值及等效弹性模量梯度变化。

基于体心立方多孔结构椎间融合器的力学响应分析(图 1~图 3),变形量主要集中于立方体顶点连接 处及支柱中段。融合器结构的空间对称性使得载荷沿立方体边棱传递,顶点节点因几何集中效应成为应 力汇聚点,而支柱中段在轴向压缩下承受最大弯矩,导致局部应变显著升高。





Figure 12. Comparison of equivalent strain curve, stress curve and elastic modulus of body-centered cubic interbody fusion device with different porosity

图 12. 不同孔隙率下体心立方椎间融合器的等效应变曲线线、应力曲线和弹性模量对比

## 5. 结论

本研究基于人体腰椎三维重建数据,设计并对比了三种不同孔隙率的三种多孔结构椎间融合器模型。 利用有限元分析模拟其在最大压力载荷 500 N 轴向压力,下表面固定约束的力学行为,系统评估了总变 形量、等效应力、等效应变及等效弹性模量特性,主要结论如下:

(1) 基于患者 CT/MRI 数据重建的腰椎三维模型,获取个性化腰椎解剖参数通过逆向建模,构建融合器的几何模型,精确提取终板与椎间隙高度参数,个性化定制多孔融合器模型。

(2) 在三种不同孔隙率的体心立方多孔椎间融合器力学性能对比中,85%孔隙率结构展现出显著的综合优势。其最大变形量为1.1×10<sup>-3</sup> mm,较65%孔隙率(1.9×10<sup>-3</sup> mm)降低42.1%,表明高孔隙率显著提升了抗变形能力。同时,85%孔隙率结构的等效应力峰值为114.3 MPa,较65%孔隙率(354.7 MPa)减少67.8%,验证了多孔网络对载荷的分散效应。此外,其等效应变值0.5×10<sup>-3</sup> mm/mm 仅为65%孔隙率的29.4%,进一步证明其抗剪切性能更优。弹性模量分析显示,85%孔隙率结构的等效弹性模量为206.64 GPa,较实体钛合金降低81.5%,显著缓解了因模量差异导致的应力遮挡效应,且更接近松质骨理想范围。通过计算结果对比得知,3D打印个性化多孔椎间融合器能有效降低结构的弹性模量,减小因弹性模量差异过大对融合过程产生的影响。

## 参考文献

- [1] Cheung, Z.B., Gidumal, S., White, S., Shin, J., Phan, K., Osman, N., et al. (2018) Comparison of Anterior Cervical Discectomy and Fusion with a Stand-Alone Interbody Cage versus a Conventional Cage-Plate Technique: A Systematic Review and Meta-Analysis. Global Spine Journal, 9, 446-455. <u>https://doi.org/10.1177/2192568218774576</u>
- [2] Pan, F., Wang, S., Yong, Z., Liu, X., Huang, Y. and Wu, D. (2016) Risk Factors for Cage Retropulsion after Lumbar Interbody Fusion Surgery: Series of Cases and Literature Review. *International Journal of Surgery*, 30, 56-62. https://doi.org/10.1016/j.ijsu.2016.04.025
- [3] Chong, E., Pelletier, M.H., Mobbs, R.J. and Walsh, W.R. (2015) The Design Evolution of Interbody Cages in Anterior Cervical Discectomy and Fusion: A Systematic Review. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 16, Article No. 99. <u>https://doi.org/10.1186/s12891-015-0546-x</u>
- [4] Suh, P.B., Puttlitz, C., Lewis, C., Bal, B.S. and McGilvray, K. (2017) The Effect of Cervical Interbody Cage Morphology, Material Composition, and Substrate Density on Cage Subsidence. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, 25, 160-168. <u>https://doi.org/10.5435/jaaos-d-16-00390</u>

- [5] Spetzger, U., Frasca, M. and König, S.A. (2016) Surgical Planning, Manufacturing and Implantation of an Individualized Cervical Fusion Titanium Cage Using Patient-Specific Data. *European Spine Journal*, 25, 2239-2246. <u>https://doi.org/10.1007/s00586-016-4473-9</u>
- [6] 周华, 王仁吉, 刘忠军, 等. 3D 打印人工椎体在颈椎脊索瘤全脊椎切除术中的应用[J]. 北京大学学报(医学版), 2023, 55(1): 144-148.
- [7] Li, P., Jiang, W., Yan, J., Hu, K., Han, Z., Wang, B., et al. (2019) A Novel 3D Printed Cage with Microporous Structure and in Vivo Fusion Function. Journal of Biomedical Materials Research Part A, 107, 1386-1392. <u>https://doi.org/10.1002/jbm.a.36652</u>
- [8] Patel, D.V., Yoo, J.S., Karmarkar, S.S., Lamoutte, E.H. and Singh, K. (2019) Interbody Options in Lumbar Fusion. Journal of Spine Surgery, 5, S19-S24. <u>https://doi.org/10.21037/jss.2019.04.04</u>
- [9] 杨琼琼, 刘玮. 氧化锆与钛种植体的性能及临床效果对比[J]. 中国组织工程研究, 2026, 30(8): 2063-2071.
- [10] 刘艳. 陶瓷材料在医疗植入物中的应用研究[J]. 陶瓷科学与艺术, 2024, 58(6): 46-47.