

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.280

引用格式:张勇,李旭燕,李萌雅,等.正畸牙模的轻量化设计[J].重庆大学学报,2026,49(2):116-122.



# 正畸牙模的轻量化设计

张勇,李旭燕,李萌雅,刘飞

(黄河科技学院工学部,郑州 450063)

**摘要:**对正畸牙模进行轻量化设计,是降低隐形正畸成本的重要途径。以实际牙模为研究对象,采用有限元方法,将压膜工艺等效为牙模外表面的法向载荷,采用相同变形量时正畸牙模的减重效果作为轻量化设计评价指标,对空心、蜂窝、正方体 3 种轻量化结构填充牙模进行变形仿真分析;最后,更换实际牙模,对分析结果进行验证。研究结果认为:在正畸牙模减重效果方面,蜂窝结构最优、正方体结构次之、空心结构最差。

**关键词:**隐形正畸;3D 打印;牙模;有限元分析;轻量化设计

中图分类号:TQ325.7

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2026)02-116-07

## Lightweight design of orthodontic dental casts

ZHANG Yong, LI Xuyan, LI Mengya, LIU Fei

(Faculty of Engineering, Huanghe Science & Technology University, Zhengzhou 450063, P. R. China)

**Abstract:** Lightweight design of orthodontic dental casts is critical for reducing the cost of invisible orthodontic treatments. In this study, deformation characteristics of actual dental casts were analyzed using the finite element method, and three structural infill strategies (hollow, honeycomb, and cube) were applied for weight reduction. Film lamination was simplified as a normal load applied to the outer surface, and the overall deformation response was used to evaluate lightweight performance. Finally, a newly fabricated dental cast was used to verify the simulation results. The findings indicate that the honeycomb infill structure provides the optimal lightweight effect for orthodontic dental casts, followed by cubic and hollow structures.

**Keywords:** invisible orthodontics; 3D printing; dental cast; finite element analysis; lightweight design

隐形正畸,具有美观、舒适和易用的特点,是近些年快速发展的一种新型齿科正畸技术<sup>[1-2]</sup>。其通用制作流程为:通过光固化 3D 打印技术得到牙模,再采用压膜工艺将高分子膜片压制为隐形矫治器<sup>[3-4]</sup>。由于正畸牙模所用光敏树脂成本较高,因此,对其进行轻量化设计具有显著的市场价值。

收稿日期:2023-11-16 网络出版日期:2024-09-14

基金项目:河南省高等教育教学改革研究与实践项目(学位与研究生教育)(2021SJGLX069Y);河南省研究生教育改革与质量提升工程项目(YJS2022JD50)。

Supported by Academic Degrees & Graduate Education Reform Project of Henan Province (2021SJGLX069Y), and Postgraduate Education Reform and Quality Improvement Project of Henan Province (YJS2022JD50).

作者简介:张勇(1979—),男,讲师,博士,硕士生导师,主要从事齿科 3D 打印材料及工艺研究,(E-mail)c14518@163.com。

在轻量化研究方面,张炎等<sup>[5]</sup>对宏观拓扑优化和介观点阵填充的牙模进行了仿真分析,但是其轻量化设计仅针对基托,并未涉及牙列;在压膜工艺部分,将其等效为垂直向下的压强载荷,并未考虑牙冠侧面的法向压力;且仿真牙模没有采用实际牙模,而是选用了简化牙模。笔者以实际牙模为研究对象,在牙冠与牙托法向受力情况下,对介观点阵填充牙模进行变形分析,以期得到正畸牙模轻量化结构的最优解,为降低隐形正畸成本提供技术支撑。

1 数字化牙模与轻量化结构

在张炎等<sup>[5]</sup>和萧宁等<sup>[6]</sup>的研究中,采用简化的牙颌参考模型来代替实际牙模,两者的外形结构存在较大差异;此外,其轻量化设计仅针对基托部分,并未涉及牙列,而在实际的设计过程中,牙模是作为整体进行轻量化处理的,不会对牙列与基托进行区分,即牙列部分同样进行轻量化设计。因此,其轻量化仿真结果的准确性亦会受到影响。针对上述问题,采用实际牙模作为研究对象(见图 1)。

在轻量化结构中,以刘登科等<sup>[7]</sup>和 Wettergreen 等<sup>[8]</sup>的研究成果为基础,结合 3D 打印牙模工艺实际,选择空心、蜂窝、正方体等 3 种轻量化结构对牙模进行填充。其中,正方体结构的空间尺寸为 3 mm×3 mm×3 mm,截面为方形杆状,尺寸为 0.6 mm×0.6 mm;蜂窝结构为直蜂窝,直径为 8 mm,壁厚为 1 mm。2 种结构的示意图如图 2 所示。

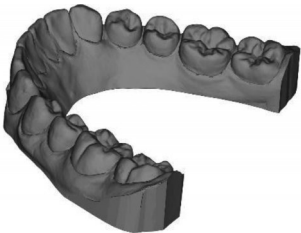


图 1 实际牙模  
Fig. 1 Actual dental cast

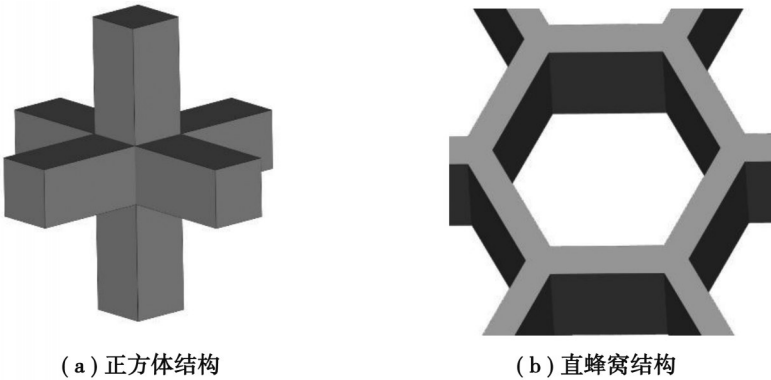


图 2 点阵结构示意图  
Fig. 2 Lattice structures

2 有限元分析模型

2.1 光敏树脂参数

光敏树脂是制作正畸牙模的物质基础,其性能参数对正畸牙模的轻量化设计至关重要<sup>[9-10]</sup>。力学性能愈好,则同等变形条件下,牙模所用的光敏树脂愈少,轻量化设计空间愈大;反之,则轻量化设计空间愈小。鉴于这里仅研究正畸牙模的轻量化结构,并不涉及光敏树脂对轻量化结构参数的影响,选取固定型号的 3D 打印用光敏树脂,即光敏树脂参数取定值。

为了与张炎等<sup>[5]</sup>研究结果对比,选择与其研究方案相同型号的光敏树脂,即湖南中琅新材料科技有限公司的 ZR680 型光敏树脂。性能参数为:白色,25 °C 时密度为 1.10 g/cm<sup>3</sup>,黏度为 450 mPa·s,固化深度为 0.16 mm,临界曝光量为 8.5 mJ/cm<sup>2</sup>,弹性模量为 2 050 MPa、泊松比为 0.45、最大拉伸强度为 45 MPa。

2.2 载荷与边界条件

隐形矫治器借助真空压膜机通过正压压膜获得,具体流程为:加热膜片使其软化;将软化膜片置于正畸牙模上方;抽取真空,使软化膜片上方形成正压;在正压作用下,膜片紧密附着在牙模表面;待膜片冷却后,将其与牙模分离;最后,通过剪裁修形,获得隐形矫治器<sup>[11]</sup>。其中,真空压膜机的压强一般为 4.2~4.6 MPa。

在进行轻量化牙模仿真分析时,将上述正压压膜工况等效为:牙模底部与工作平台接触的平面,设置为

固定支撑;牙列及基托外表面,沿表面法线方向施加压强载荷,施压参数为由 0 线性增加至 4.4 MPa。

2.3 评价指标设置

隐形矫治器的精度,是正畸患者佩戴舒适与否的关键<sup>[12-13]</sup>。对于通过正压压膜工艺制备的隐形矫治器而言,其精度取决于正畸牙模,因此,将正畸牙模精度作为轻量化仿真研究的评价依据。

选取正畸牙模的总体变形量作为轻量化设计的评价指标。在实际应用中,隐形矫治器的误差允许范围为±0.1 mm。因此,正畸牙模的总体变形上限设置为 0.1 mm,即正畸牙模的最大变形量不得超过 0.1 mm。

这里并未将等效应力作为评价指标,因为正畸牙模为面片模型,表面非连续,存在较多尖角,易出现异常数值,则该数值并不具有实际物理意义;此外,在张炎等<sup>[5]</sup>的研究中,等效应力与总体变形呈现强烈的正相关关系。因此,仅采用衡量结构刚度的总体变形量作为正畸牙模轻量化设计的评价指标。

3 仿真结果分析

3.1 镂空厚度对空心牙模变形的影响

对实心牙模进行镂空处理,即可得到空心牙模。由于空心牙模的 3D 打印工艺和清洗、二次光固化等后处理工艺简单方便<sup>[14]</sup>,因此成为齿科行业较为常见的轻量化处理方式。空心牙模的轻量化设计参数为镂空厚度,厚度愈薄,则牙模愈轻,变形愈大;厚度愈厚,则牙模愈重,变形愈小。

设计了镂空厚度分别为 2.0、2.1、2.2、2.3、2.4 mm 的空心牙模,采用相同的仿真参数设置,进行有限元分析,结果如表 1 所示。其中,1 号实心牙模为基准牙模。

表 1 镂空厚度对空心牙模变形的影响  
Table 1 The effect of hollow thickness on the deformation of hollow dental casts

编号	镂空厚度/mm	体积/mm <sup>3</sup>	减重/%	最大变形量/mm
1		9 520.5	0.0	0.01
2	2.0	5 673.9	40.4	0.13
3	2.1	5 880.6	38.2	0.11
4	2.2	6 081.8	36.1	0.09
5	2.3	6 275.5	34.1	0.08
6	2.4	6 464.1	32.1	0.06

从表 1 中可以看出,随着镂空厚度的增加,空心牙模的最大变形量逐渐降低,从 0.13 mm 降到了 0.06 mm。可见,镂空厚度愈大,抗变形能力亦愈大,但减重效果也就愈差。镂空厚度为 2.4 mm 的牙模,仅减重 32.1%。当镂空厚度为 2.2 mm 时,最大变形量为 0.09 mm,小于正畸牙模变形上限 0.1 mm,满足使用要求,减重 36.1%,为空心牙模中的最优结构。

图 3 为实心牙模与镂空厚度为 2.2 mm 空心牙模的总体变形图。从图 3 中可以看出,实心牙模的变形主

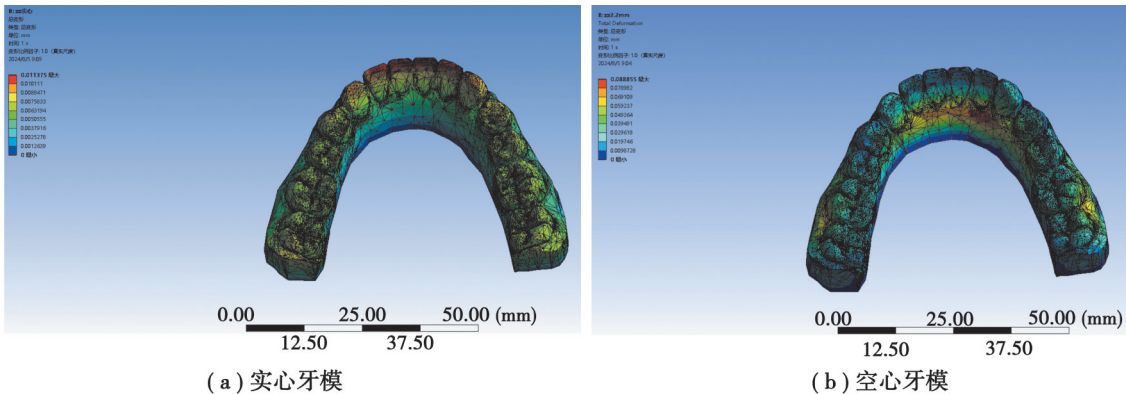


图 3 实心牙模与空心牙模(镂空厚度为 2.2 mm)的总体变形图  
Fig. 3 Overall deformation of solid and hollow dental casts (hollow thickness is 2.2 mm)

要位于咀嚼面,最大变形位置位于前牙切缘处;空心牙模的变形主要位于牙列与牙托交界处,最大变形位置位于前牙内侧的牙列、牙托交界处,两者之间差异较大。

3.2 镂空厚度对蜂窝结构牙模变形的影响

蜂窝结构是一种典型的二维点阵结构,具有优异的力学承载能力<sup>[15-16]</sup>,是 3D 打印轻量化设计中的常用结构。采用固定的蜂窝结构参数:直蜂窝,直径 8 mm,壁厚 1 mm,仅研究镂空厚度对蜂窝结构牙模的变形影响。

设计了镂空厚度分别为 1.3、1.4、1.5、1.6、1.7 mm 的蜂窝结构牙模,采用相同的仿真参数设置,进行有限元分析,结果如表 2 所示。其中,1 号实心牙模为基准牙模。

从表 2 中可以看出,镂空厚度对蜂窝结构牙模变形的影响与空心牙模相似,呈现反比关系,随着镂空厚度由 1.3 mm 增加至 1.7 mm,最大变形量由 0.11 mm 降至 0.06 mm。此外,减重效果随着镂空厚度的增加,亦呈现下降趋势,镂空厚度为 1.7 mm 时,减重 36.7%。当镂空厚度为 1.4 mm 时,最大变形量为 0.09 mm,小于正畸牙模变形上限 0.1 mm,满足使用要求,减重值为 42.5%,为蜂窝结构牙模中的最优结构。

表 2 镂空厚度对蜂窝结构牙模变形的影响  
Table 2 The effect of hollow thickness on the deformation of dental casts filled by honeycomb structure

编号	镂空厚度/mm	体积/mm <sup>3</sup>	减重/%	最大变形量/mm
1		9 520.5	0.0	0.01
2	1.3	5 277.8	44.6	0.11
3	1.4	5 472.8	42.5	0.09
4	1.5	5 662.9	40.5	0.08
5	1.6	5 844.4	38.6	0.07
6	1.7	6 026.6	36.7	0.06

图 4 为蜂窝结构牙模(镂空厚度为 1.4 mm)及其总体变形图。从总体变形图中可以看出,蜂窝结构牙模的变形同样主要位于牙列与牙托交界处,与空心牙模类似;其最大变形位置位于后牙外侧的牙列、牙托交界处,与实心牙模差异较大。

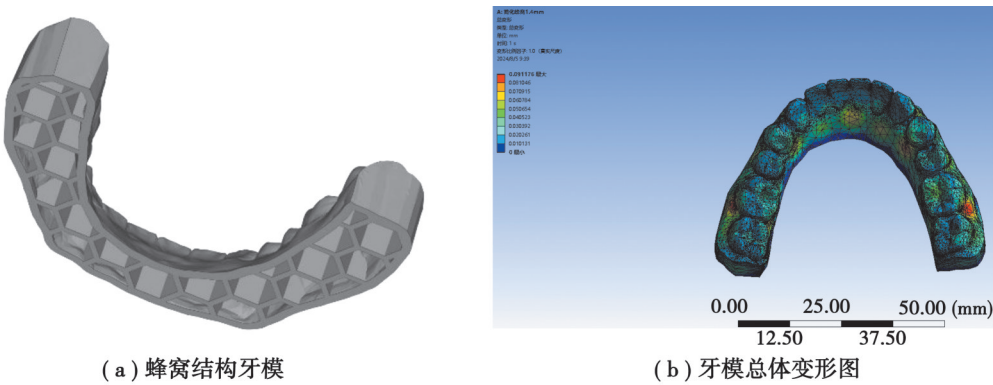


图 4 蜂窝结构牙模(镂空厚度为 1.4 mm)及其总体变形图  
Fig. 4 Dental cast filled by honeycomb structure (hollow thickness is 1.4 mm) and its overall deformation

3.3 镂空厚度对正方体结构牙模变形的影响

正方体结构是一种典型的三维点阵结构,采用固定的正方体结构参数:空间尺寸 3 mm×3 mm×3 mm,截面为方形杆状,尺寸为 0.6 mm×0.6 mm,仅研究镂空厚度对正方体结构牙模变形的影响。



设计了镂空厚度分别为 1.8、1.9、2.0、2.1、2.2 mm 的正方体结构牙模,采用相同的仿真参数设置,进行有限元分析,结果如表 3 所示。其中,1 号实心牙模为基准牙模。

表 3  镂空厚度对正方体结构牙模变形的影响				
Table 3  The effect of hollow thickness on the deformation of dental casts filled by cubic structure				
编号	镂空厚度/mm	体积/mm <sup>3</sup>	减重/%	最大变形量/mm
1		9 520.5	0.0	0.01
2	1.8	5 643.4	40.7	0.11
3	1.9	5 839.0	38.7	0.09
4	2.0	6 023.9	36.7	0.08
5	2.1	6 213.5	34.7	0.07
6	2.2	6 394.2	32.8	0.06

从表 3 中可以看出,镂空厚度对正方体结构牙模变形的影响与前 2 种轻量化结构牙模相似,呈现反比关系,随着镂空厚度由 1.8 mm 增加至 2.2 mm,最大变形量由 0.11 mm 降至 0.06 mm。此外,减重效果随着镂空厚度的增加,同样呈现下降趋势,镂空厚度为 2.2 mm 时,减重 32.8%。其中,当镂空厚度为 1.9 mm 时,最大变形量为 0.09 mm,小于正畸牙模变形上限 0.1 mm,满足使用要求,减重值为 38.7%,为正方体结构牙模中的最优结构。

图 5 为正方体结构牙模(镂空厚度为 1.9 mm)及其总体变形图。从总体变形图中可以看出,正方体结构牙模的变形位置与前两种轻量化结构类似,主要位于牙列与牙托交界处;其最大变形位置位于前牙内侧的牙列、牙托交界处,与空心牙模类似。

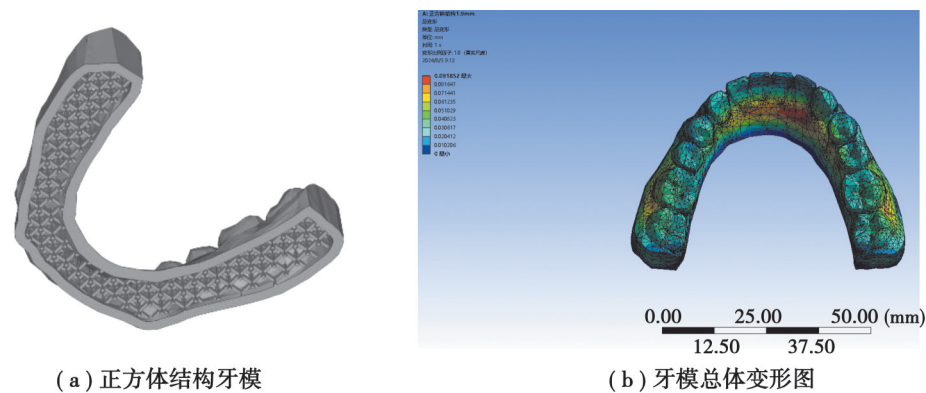


图 5  正方体结构牙模(镂空厚度为 1.9 mm)及其总体变形图  
Fig. 5  Dental casts filled by cubic structure (hollow thickness is 1.9 mm) and its overall deformation

3.4  3 种轻量化结构的对比

在满足隐形正畸牙模变形要求的前提下,对 3 种轻量化结构进行对比分析。在牙模最大变形量相同的前提下,对比 3 种轻量化结构的减重效果,减重量愈大,减重效果愈优。图 6 为 3 种轻量化结构在最大变形量分别为 0.09、0.08、0.06 mm 时的减重对比图。

从图 6 中可以看出,在 3 组最大变形量数据中,蜂窝结构的减重效果最佳,且优势较为明显;正方体结构次之,空心结构最差,但两者之间差异较小。当最大变形量为 0.09 mm 时,3 种轻量化结构的减重效果均达到最优:蜂窝结构牙模的减重为 42.5%,领先正方体牙模的 38.7% 和空心牙模的 36.1%。

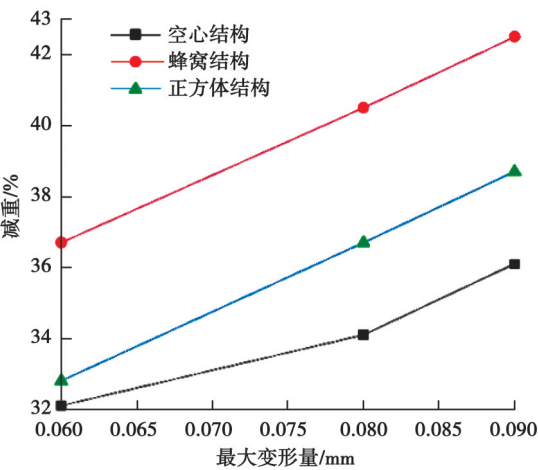


图 6 3 种轻量化结构减重效果对比

Fig. 6 Weight reduction effects of three lightweight structures

综上所述,在正畸牙模轻量化设计方面,蜂窝结构最优、正方体结构次之、空心结构最差。

4 仿真结果验证

为了验证仿真结果的普适性,重新选择正畸牙模,按照前述最佳结构参数进行轻量化设计,再采用相同设置进行有限元仿真,并将结果与前述结论进行对比验证。

选用的牙模如图 7 所示,分别设计出镂空厚度为 2.2 mm 的空心结构牙模、镂空厚度为 1.5 mm 的蜂窝结构牙模、镂空厚度为 2.0 mm 的正方体结构牙模,采用与前面相同的仿真参数进行有限元分析,结果如表 4 所示。

从表 4 中可以看出,3 种轻量化结构填充牙模的最大变形量相同,但是在减重效果方面,蜂窝结构牙模最为明显,领先另外 2 种结构约 4.9%;正方体结构牙模小幅领先空心结构牙模,这与前面分析结果是一致的。

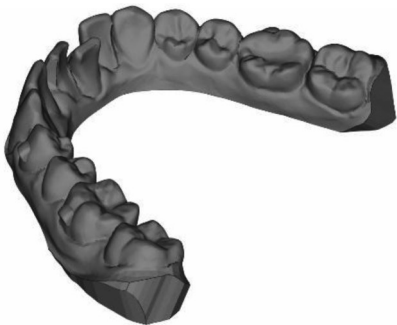


图 7 验证用正畸牙模

Fig.7 Orthodontic dental cast for validation

表 4 轻量化结构仿真结果验证

Table 4 Simulation result validation of lightweight structures

编号	轻量化结构	镂空厚度/mm	体积/mm <sup>3</sup>	减重/%	最大变形量/mm
1	实心		7 149.9	0	0.01
2	空心结构	2.2	4 929.1	31.1	0.06
3	蜂窝结构	1.5	4 536.3	36.6	0.06
4	正方体结构	2.0	4 885.2	31.7	0.06

综上所述,仿真分析能够验证前面所述结论的正确性,即在正畸牙模轻量化设计方面:蜂窝结构最优、正方体结构次之、空心结构最差。

5 结 论

以实际牙模为研究对象,采用有限元方法,对空心、蜂窝、正方体 3 种轻量化结构填充牙模的总体变形,进行了仿真分析。可得到如下结论:

- 1)在减重效果方面,蜂窝结构最优,正方体结构次之,空心结构最差;
- 2)镂空厚度与正畸牙模的最大变形量成反比关系。

## 参考文献

- [1] Yildiz O, Yagci A, Hashimli N. Effect of applying intermittent force with and without vibration on orthodontic tooth movement[J]. *Journal of Orofacial Orthopedics*, 2024, 85(S2): S127-S136.
- [2] 石中玉. 隐形正畸用膜片制备及性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2023.  
Shi Z Y. Preparation and properties of invisible orthodontic dental sheets[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2023. (in Chinese)
- [3] Park J H. Clear aligner therapy in contemporary orthodontics[J]. *AJO-DO Clinical Companion*, 2022, 2(6): 511.
- [4] 叶年嵩, 房兵. 数字化正畸发展现状[J]. *实用口腔医学杂志*, 2022, 38(61): 707-712.  
Ye N S, Fang B. The state of art of digital orthodontics[J]. *Journal of Practical Stomatology*, 2022, 38(61): 707-712. (in Chinese)
- [5] 张焱, 刘红忠, 周宏志, 等. 无托槽隐形正畸矫治器牙模轻量化[J]. *重庆大学学报*, 2022, 46(2): 1-10.  
Zhang Y, Liu H Z, Zhou H Z, et al. Lightweight design of dental casts for invisible orthodontic appliances without brackets[J]. *Journal of Chongqing University*, 2022, 46(2): 1-10. (in Chinese)
- [6] 萧宁, 孙玉春, 赵一娇, 等. 口腔用光固化三维打印精度评价方法的建立及应用效果[J]. *北京大学学报*, 2019, 51(1): 120-130.  
Xiao N, Sun Y C, Zhao Y J, et al. A method to evaluate the trueness of reconstructed dental models made with photo-curing 3D printing technologies[J]. *Journal of Peking University*, 2019, 51(1): 120-130. (in Chinese)
- [7] 刘登科, 张焱, 宗学文, 等. 微波热处理对无托槽隐形正畸矫治器的力学性能影响[J]. *塑料工业*, 2021, 49(3): 64-68.  
Liu D K, Zhang Y, Zong X W, et al. Effect of microwave heat treatment on the mechanical properties of invisible orthodontic appliances without brackets[J]. *China Plastics Industry*, 2021, 49(3): 64-68. (in Chinese)
- [8] Wettergreen M A, Bucklen B S, Starly B, et al. Creation of a unit block library of architectures for use in assembled scaffold engineering[J]. *Computer-Aided Design*, 2005, 37(11): 1141-1149.
- [9] Pereira A B N, Almeida R C, Marassi C, et al. Do low-cost 3-dimensional printers produce suitable dental models? [J]. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 2022, 161(6): 858-865.
- [10] 许嘉宁, 金作林, 刘佳. 3D打印在口腔正畸领域的应用进展[J]. *口腔医学*, 2023, 43(10): 925-929.  
Xu J N, Jin Z L, Liu J. Application progress of 3D printing in orthodontics[J]. *Stomatology*, 2023, 43(10): 925-929. (in Chinese)
- [11] Naeem O A, Bencharit S, Yang I H, et al. Comparison of 3-dimensional printing technologies on the precision, trueness, and accuracy of printed retainers[J]. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 2022, 161(4): 582-591.
- [12] 张可鹏. 无托槽隐形矫治器近中移动上颌磨牙的三维有限元研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.  
Zhang K P. Three-dimensional finite element analysis of maxillary molar mesial movement by clear aligners[D]. Changchun: Jilin University, 2023. (in Chinese)
- [13] 张焱, 刘红忠, 周宏志, 等. 基于3D打印的无托槽隐形正畸矫治器矫治力研究[J]. *湖南理工学院学报*, 2022, 35(2): 1-6, 30.  
Zhang Y, Liu H Z, Zhou H Z, et al. Orthodontic force of invisible orthodontic appliance without bracket based on 3D printing[J]. *Journal of Hunan Institute of Science and Technology*, 2022, 35(2): 1-6, 30. (in Chinese)
- [14] Kessler A, Hickel R, Reymus M. 3D printing in dentistry-state of the art[J]. *Operative Dentistry*, 2020, 45(1): 30-40.
- [15] Zhu G H, Li S F, Sun G Y, et al. On design of graded honeycomb filler and tubal wall thickness for multiple load cases[J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 109: 377-389.
- [16] Zhang J X, Yuan H, Li J F, et al. Dynamic response of multilayer curved aluminum honeycomb sandwich beams under low-velocity impact[J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 177: 109446.

(编辑 郑洁)