

3D 打印矫正鞋垫晶格支撑结构的有限元分析

张帆, 黄晨, 崔梓盈, 肖学良*

(江南大学 纺织科学与工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要:矫正鞋垫可通过3D打印技术定制,而支撑鞋垫的拓扑晶格结构可利用有限元分析来探索优化。基于面心立方(FCC)、体心立方(BCC)这2种常规晶格支撑结构建立结构模型,分析寻找最优拓扑结构,并深化构造FCC和BCC复合结构模型,研究结构因子及晶格轮廓对矫正支撑性能的影响。模拟结果显示,相同受力条件下,FCC晶格结构支撑强力较高,同等变形下的抗压力较大;对于由FCC和BCC组成的复合结构,其有限元分析的参数值随着FCC结构在复合模型中所占比例的降低而增加,且FCC占比每减小25%,应力增大约1.03倍。模拟结果证明,FCC结构在支撑矫正鞋垫时具有理论和实用的一致性,能形成良好的足底压力分布。

关键词:3D打印;晶格结构;矫正鞋垫;有限元分析;足底压力

中图分类号:TB 383;TP 391.73 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2024)02-0115-06

Finite Element Analysis of the Lattice Support Structures of 3D Printed Orthotic Insoles

ZHANG Fan, HUANG Chen, CUI Ziyang, XIAO Xueliang*

(College of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: 3D printing technology can customize the orthotic insole, while the topological lattice structure supporting the insole can be explored for optimization using finite element analysis. A structural model was established based on two conventional lattice support structures, face-centered cubic (FCC) and body-centered cubic (BCC). This paper analyzed and searched for the optimal topology, deepened the construction of the composite structural model of FCC and BCC, and studied the effects of structural factors and lattice profiles on the corrective support performance. Simulation results show that under the same stress conditions, the FCC lattice structure has the higher support strength and the larger compressive force under the same deformation. For the composite structure composed of FCC and BCC, the values of the finite element analysis parameters increase with the decrease of the proportion of the FCC structure in the composite model, and the value of the stress increases by about 1.03 times for each 25% decrease of the FCC proportion. The simulation results prove that the FCC structure has theoretical and practical consistency in supporting the orthotic insole and can form a good plantar pressure distribution.

Key words: 3D printing, lattice structure, orthotic insoles, finite element analysis, plantar pressure

收稿日期:2023-11-08; 修订日期 2024-01-02。

基金项目:国家先进功能纤维创新中心应急攻关项目(2022-RW0307)。

作者简介:张帆(1998—),男,硕士研究生。

*通信作者:肖学良(1984—),男,教授,博士生导师。主要研究方向为高性能纤维及其纺纱交织工艺。

Email: xiao_xueliang@jiangnan.edu.cn

千里之行,始于足下,足部在维持人体平衡、维系生命活动中起着至关重要的作用。然而现实生活中,各种足部疾病层出不穷,严重影响着人们的生活质量。3D 打印矫正鞋垫是根据足部生物力学特征设计的,为足部疾病患者提供保护、支撑并改善其活动能力的辅助性器具,可置于鞋内与足部密切融合。其通过调整足底与外界接触的面积、角度等改变足部生物力学结构及特征,分散足底压力,改善人体生物力学轴线,提高关节稳定性,解决人体由于外界因素、下肢生物力学异常及代偿等引起的关节及人体姿势异常问题^[1-2]。鞋垫的生物力学性能是评价鞋子舒适性和功能性的有力指标,可以通过设计适当的拓扑结构来调节^[3]。多孔晶格结构通常被认为是理想的拓扑结构,它不仅密度低、比强度高、透气性好,而且具有缓冲和减震功能。因此,越来越多的鞋类制造商选择用合适的晶格拓扑结构替换鞋垫的特定部位,以改善顾客的穿着体验。

有限元分析是一种通过数学建模和计算来模拟复杂结构和系统力学行为的技术,无需制作真实的物理模型。通过有限元分析,可以轻松调整模型的参数和条件,进行多次仿真实验,以优化设计。将有限元分析运用到足部生物力学研究中,通过建立足部有限元模型,探究足部结构间的应力、应变情况,以助于足部疾病的矫正、运动损伤的成因探究和康复、康复机械的制造以及特殊功能鞋的研制和开发^[4-5]。文中针对面心立方(faced-centered cubic, FCC)、体心立方(body-centered cubic, BCC)这 2 种常见的晶格单元模型结构进行有限元分析,以探求合适的鞋垫拓扑支撑结构,并将较优的拓扑结构应用于矫正鞋垫的设计中。

1 晶格结构

1.1 晶格结构在矫正鞋垫中的应用

晶格结构应用在矫正鞋垫中可以实现足部的有效矫正和支撑。晶格结构对材料的物理特性有重要影响,不同的晶格结构具有不同的物理性质和机械特性^[6]。一些 FCC 或 BCC 结构的金属材料(如钛合金和镍钛记忆合金)因其优秀的强度和弹力特性,在矫正鞋垫中被广泛应用。这些晶格结构的金属材料具有高度可控的变形能力和稳定性,能有效实现脚部矫正和支撑功能^[7],其优势包括以下 4 个方面。

1) 晶格结构可以根据患者足部的解剖结构进

行个性化设计。通过调整晶格单元的大小、形状和分布,可以使矫正鞋垫精确地支撑和稳定足部,保证足部处于正确的姿势和对齐状态,从而改善脚部畸形、纠正步态异常、减轻足部疼痛。

2) 晶格结构具有良好的缓冲和吸震能力。晶格单元之间的空隙可以吸收冲击力,这种缓冲和吸震功能有助于减轻步行时对关节和骨骼的负荷,降低运动伤害的风险。

3) 晶格结构可以通过调整其设计和材料特性重新分配足底压力,减少某些区域压力过度的情况,从而减轻疼痛和不适感,有益于足底疾病(如跖磨损、拇指外翻等)的改善。

4) 晶格结构具有良好的透气性和湿气调节能力。晶格单元之间的开放空间可以促进空气流通,保持足部的干爽和舒适,从而防止足部细菌和真菌的滋生,减少异味,预防感染。

总体而言,将晶格结构应用于矫正鞋垫具有诸多优势,可以为足部健康提供新的解决方案^[8]。然而,3D 打印矫正鞋垫在使用一段时间后,其材料或拓扑结构会因长期受压而磨损,鞋垫的支撑力下降,导致鞋垫形状不再适合脚型,鞋垫的矫正效果下降,舒适度降低。因此,必须选择最佳的晶格结构,以满足设计要求和应用需求。

1.2 晶格结构相关参数

晶格结构的设计至关重要,通过结构设计可以满足鞋类不同性能或功能需求。晶格属于一种三维有序多孔结构,当在空间中按照特定规律组合时,可以承载一定的外力,实现特定功能^[9]。晶格结构根据其空间对称性,可分为 FCC 和 BCC。图 1 为 2 种晶格结构示意图^[10]。FCC 和 BCC 晶格结构具有不同的参数和结构特点,这些特点决定了其性能和适用性的差异。FCC 和 BCC 晶格结构差异主要包括:

1) 结构基础。FCC 结构中的原子或离子位于立方体的 8 个顶点和 6 个面心处,而 BCC 结构中的原子或离子位于立方体的 8 个顶点和 1 个体心处。

2) 有效填充率。有效填充率是指在晶格中实际被占据的体积与整个晶格体积的比。在 FCC 晶格中,每个晶胞包含 4 个等效的原子或离子,因此其有效填充率为 0.74;而在 BCC 晶格中,每个晶胞包含 2 个等效的原子或离子,其有效填充率为 0.68。FCC 结构的原子填充率高于 BCC 结构,表明 FCC 结构更加紧密^[11]。

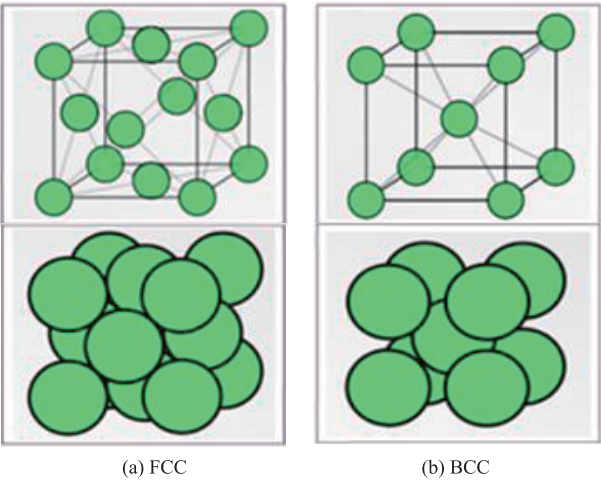


图 1 2 种晶格结构示意图

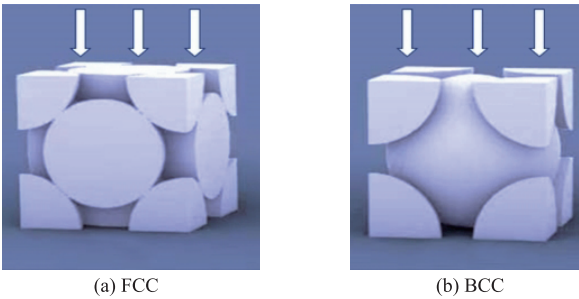
Fig.1 Structure diagrams of two types of lattices

2 数值模拟

2.1 模型建立

2.1.1 单元晶格结构有限元分析 使用 Rhino - 7 建模软件创建 FCC 和 BCC 单元晶格结构(横截面正方形边长为 5 mm),材料属性设置为钛合金。钛合金具有轻量化、生物相容性好、耐磨损等特点,这些特性使之成为制造矫正鞋垫的理想材料。

对 FCC 和 BCC 晶格结构的外表面施加压力(1,2,3,4,5 kPa),并进行有限元分析,以获得应力、位移和应变等相关模拟参数及其之间的关系。2 种单元晶格结构模型及施加外力方向如图 2 所示。在有限元分析中,应力过大可能导致材料的疲劳和寿命缩短。在实际应用中,鞋垫通常需要长期承受外部作用力和内部应力,如果应力一直较小,鞋垫的材料寿命会更长,性能更加可靠,故应力最小时对应的晶格结构即为所求的最优支撑结构。



注:箭头为施加外力方向。

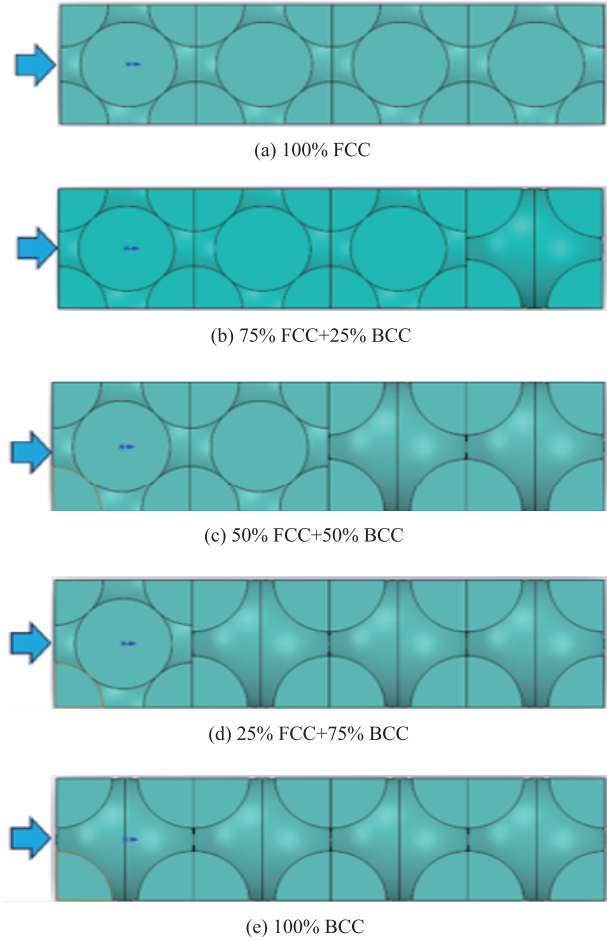
图 2 2 种单元晶格结构模型

Fig.2 Two types of unit lattice structure models

2.1.2 复合晶格结构有限元分析 针对形状相似的 FCC 和 BCC 晶体结构,构造横截面边长为 5 mm

的 5 种复合晶格结构,分别为:①100% FCC 结构;②75% FCC + 25% BCC 复合结构;③50% FCC + 50% BCC 复合结构;④25% FCC + 75% BCC 复合结构;⑤100% BCC 结构(见图 3)。设置材料属性为钛合金,探究 FCC 所占比例对有限元分析结果带来的影响。

2.1.3 有效性验证 基于单元晶格和复合晶格支撑结构的模拟分析,得出最优支撑结构,使用该最佳拓扑结构进行矫正鞋垫的设计制作,探究其在改变足底压力分布方面的可行性,并与理论预测结果进行对比^[12]。



注:箭头为施加外力方向。

图 3 由 FCC 和 BCC 组成的复合晶格结构

Fig.3 Composite lattice structures consisting of FCC, BCC

2.2 分析软件

SolidWorks Simulation 是 SolidWorks 套件中的有限元分析工具,用于评估零件和装配体的结构性能和行为。它能够分析静态、动态、线性和非线性结构,可评估零件在不同工作载荷下的应力、应变、位移和因子安全系数等。此外,SolidWorks Simulation 还具有模态分析、热分析、流体-结构耦合分析、

优化、后处理等功能,能帮助用户进行全面的设计评估和优化。SolidWorks Simulation 中的材料库十分丰富,用户可从中选择合适的材料属性进行分析,并定义各种边界条件和加载情况,以模拟真实工作环境下的应力情况。

3 结果与讨论

3.1 模拟结果

2 种晶格结构在不同外界压强下的有限元分析

结果见表 1。由表 1 可以看出,不论是 FCC 还是 BCC 结构,随着外部压强增大,其应力、位移和应变均增加。此外,在相同压强条件下,FCC 晶格结构的应力、位移和应变均小于 BCC 晶格结构,表明 FCC 受外力的影响较小,显示出更稳定的特性,以及更强的抗压能力。

5 种复合晶格结构的有限元分析结果见表 2。随着 FCC 所占比例的减小,复合晶格结构的应力、位移和应变参数均变大,且在同等压强下, FCC 所占比例每减少 25%,应力相应地增大约 1.03 倍。

表 1 2 种晶格结构的有限元分析结果
Tab.1 Finite element analysis results of two lattice structures

晶格结构	有限元参数	施加压力/kPa				
		1	2	3	4	5
FCC	应力/(N/m ²)	26.930	53.890	80.790	107.900	134.600
	位移/nm	3.313	6.628	9.939	13.250	16.580
	应变	0.021	0.043	0.064	0.085	0.107
BCC	应力/(N/m ²)	46.960	93.950	140.900	187.800	234.900
	位移/nm	10.240	20.470	30.730	41.980	53.190
	应变	0.024	0.049	0.073	0.098	0.142

表 2 5 种复合晶格结构的有限元分析结果
Tab.2 Finite element analysis results of five composite lattice structures

复合晶格 结构组成	有限元参数	施加压力/kPa				
		1	2	3	4	5
100% FCC	应力/(N/m ²)	3.847	7.693	11.540	15.390	19.230
	位移/nm	1.966	3.994	5.992	7.989	9.987
	应变	0.026	0.052	0.079	0.105	0.131
75% FCC + 25% BCC	应力/(N/m ²)	3.980	7.960	11.940	15.920	19.900
	位移/nm	1.997	3.995	5.993	7.990	9.988
	应变	0.027	0.054	0.081	0.109	0.136
50% FCC + 50% BCC	应力/(N/m ²)	4.099	8.190	12.020	16.030	20.040
	位移/nm	1.999	3.996	5.994	7.991	9.989
	应变	0.028	0.055	0.083	0.110	0.138
25% FCC + 75% BCC	应力/(N/m ²)	4.134	8.428	12.400	16.540	20.670
	位移/nm	2.000	3.997	5.995	7.994	9.992
	应变	0.029	0.057	0.086	0.114	0.143
100% BCC	应力/(N/m ²)	4.258	8.714	13.500	18.000	22.500
	位移/nm	2.299	4.599	6.898	9.197	11.500
	应变	0.031	0.063	0.094	0.125	0.157

运用 3D 打印技术,选择 FCC 晶格结构制作矫正鞋垫,结果如图 4 所示。

图 4 中,晶格聚集体(鞋垫)的外形很好地贴合了足底形状,同时也对足底压力进行了重新分配。

人体足底压力动态模拟结果显示,连续晶格形成的鞋垫结构对足底有良好的支撑作用,其压力云图的局部应力较小,验证了实验的可行性及与理论的一致性。

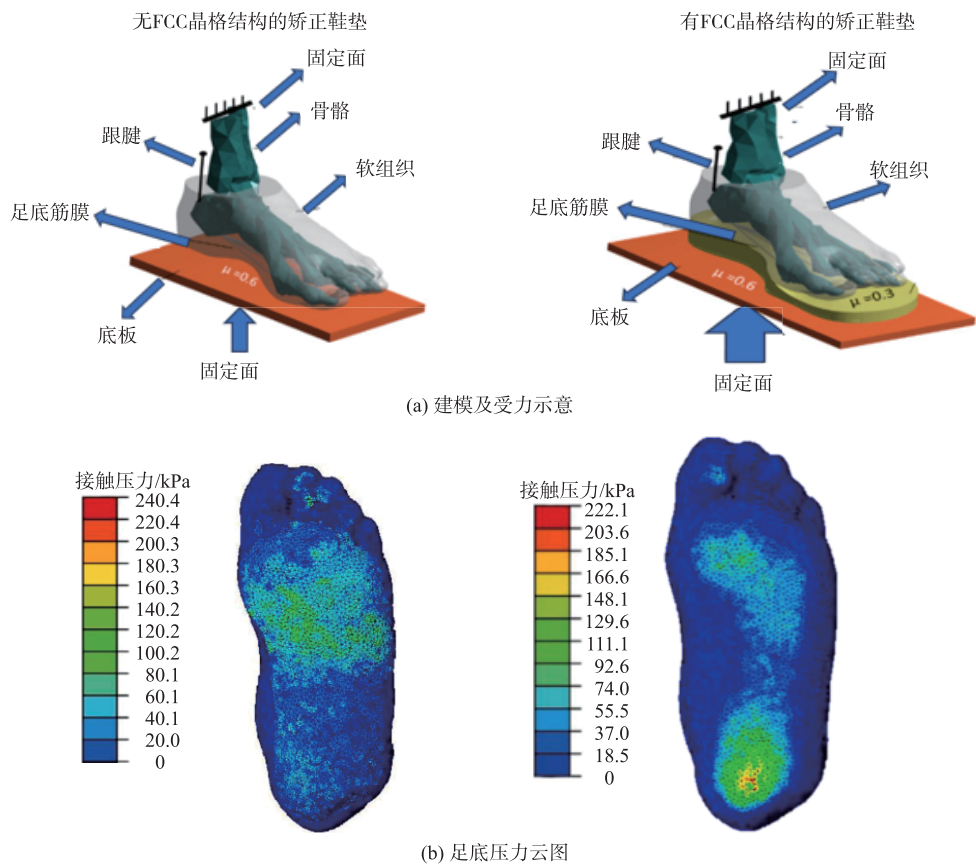


图 4 晶格结构在矫正鞋垫中的应用

Fig. 4 Applications of lattice structures in orthotic insole

3.2 实验原理分析

延展性是材料的一种机械特性,表示材料在受到使之产生断裂的力之前发生形变的能力。延展性越高,承受较大外力而抵抗形变的能力就越强。因此,当延展性足够高时,在相同的外力作用下,可观察到较小的形变。延展性与滑移系统的强度呈正相关。滑移平面和滑移方向的组合称为滑移系统,如果滑移面和滑移方向越多(即晶格结构具有越多的滑移系统),则材料延展性越高。不同类型的晶格结构具有不同数量的滑移系统^[13],BCC 滑移系数目虽然最多,但其滑移系不能同时启动,通常延展性不如 FCC 结构好。

晶格的紧凑程度直接影响滑移系统的活性,进而影响材料的可塑性和变形性。图 5 为 FCC 和 BCC 2 种晶格结构的紧凑程度及对滑移系统的影响示意。由图 5 可以看出,FCC 结构具有更高的紧凑程度,更容易激活滑移系统,因此表现出较好的可塑性;而 BCC 结构紧凑程度较低,滑移阻力较高,因而可塑性较低。在有限元分析中,滑移系统的强弱直接影响了结构的应力分布。由于 FCC 结构的滑移系统更强大,可以承受较大的外力,避免了应力

集中,因此其在有限元分析中的应力值较小。综上,以 FCC 晶格作为鞋垫的支撑结构有利于提升鞋垫穿着舒适度,也可以为足底提供良好的支撑。

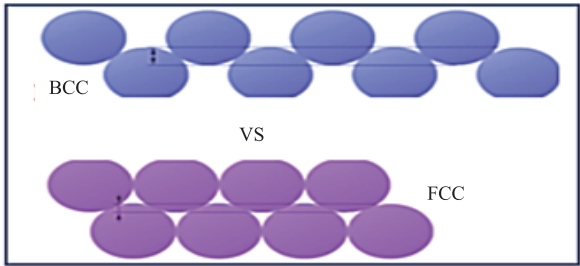


图 5 2 种晶格结构的紧凑程度及对滑移系统的影响示意

Fig. 5 Compactness of the two lattice structures and the effect on the slip system

4 结 语

- 1)文中通过有限元分析,模拟支撑结构的受力情况。结果表明,FCC 晶格结构对应着较小的应力参数,即在相同大小的外力作用下,FCC 结构的变化较小,是最适合用作矫正鞋垫的拓扑结构。
- 2)利用 FCC 和 BCC 复合晶格结构进行有限元

建模,模拟结果显示,复合晶格结构的应力、位移和应变随着 FCC 结构所占比例的降低而增加。

3)晶格结构的延展性取决于其滑移系统,而 FCC 结构的滑移系统强于 BCC 结构,这也是其在有限元分析中显示出较小应力的根本原因。

4)基于 FCC 网格支撑结构,利用 3D 打印技术制作了矫正鞋垫,有效地分配了足底压力。有限元分析结合 3D 打印技术可有效模拟晶格结构的机械性能,为优化拓扑支撑结构提供了有效方法。

参考文献:

[1] DARYABOR A, KOBAYASHI T, SAEEDI H, et al. Effect of 3D printed insoles for people with flatfeet: a systematic review [J]. Assistive Technology, 2023, 35 (2): 169-179.

[2] 赵碎浪,祁子芮,曹中华,等. 3D 打印支撑鞋垫对扁平足足底压力分布的影响 [J]. 皮革科学与工程,2022,32 (3): 85-89.

ZHAO Suilang, QI Zirui, CAO Zhonghua, et al. Effect of 3D printed arch-support insoles on plantar pressure distribution in flat feet [J]. Leather Science and Engineering, 2022,32(3):85-89. (in Chinese)

[3] DAVIA-ARACIL M, HINOJO-PÉREZ J J, JIMENO-MORENILLA A, et al. 3D printing of functional anatomical insoles [J]. Computers in Industry, 2018, 95: 38-53.

[4] SONG Y, SHAO E Z, BÍRÓ I, et al. Finite element modelling for footwear design and evaluation: a systematic scoping review [J]. Heliyon, 2022, 8(10): e10940.

[5] 彭飘林,丁绍兰,叶豪,等. 鞋底-鞋垫减震性能材料测试有限元仿真分析 [J]. 皮革科学与工程,2023,33 (3): 73-78,98.

PENG Piaolin, DING Shaolan, YE Hao, et al. Finite element simulation analysis of material testing for shock-

absorbing performance of sole-insole [J]. Leather Science and Engineering,2023,33(3):73-78,98. (in Chinese)

[6] YIN H F, ZHANG W Z, ZHU L C, et al. Review on lattice structures for energy absorption properties [J]. Composite Structures, 2023, 304: 116397.

[7] BAI L, YI C Y, CHEN X H, et al. Effective design of the graded strut of BCC lattice structure for improving mechanical properties [J]. Materials, 2019, 12 (13): 2192.

[8] ZHANG M, ZHAO C, LI G X, et al. Mechanical properties of the composite lattice structure with variable density and multi-configuration [J]. Composite Structures, 2023, 304: 116405.

[9] DONG L. Mechanical responses of Ti-6Al-4V truss lattices having a combined simple-cubic and body-centered-cubic (SC-BCC) topology [J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 116: 106852.

[10] ZHAO M, ZHANG D Z, LI Z H, et al. Design, mechanical properties, and optimization of BCC lattice structures with taper struts [J]. Composite Structures, 2022, 295: 115830.

[11] LIU Y B, DONG Z C, GE J R, et al. Stiffness design of a multilayer arbitrary BCC lattice structure with face sheets [J]. Composite Structures, 2019, 230: 111485.

[12] 高敏,张一帆,洪成雨,等. 柔性传感器在足底压力测量系统中的应用 [J]. 服装学报, 2018, 3 (4): 301-307.

GAO Min, ZHANG Yifan, HONG Chengyu, et al. Application of flexible sensors in the plantar pressure measurement system [J]. Journal of Clothing Research, 2018, 3(4): 301-307. (in Chinese)

[13] NIBUR K A, BAHR D F. Identifying slip systems around indentations in FCC metals [J]. Scripta Materialia, 2003, 49(11): 1055-1060.

(责任编辑:沈天琦)