



含有特种纤维夹层的乒乓球拍底板动特性与机制

阴甜甜 郝莉菱 赵莘量 付志强 刘持栋 何山

Dynamic characteristics and mechanisms of table tennis blades with the inclusion of special fiber laminates

YIN Tiantian, HAO Liling, ZHAO Xinliang, FU Zhiqiang, LIU Chidong, HE Shan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230703.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

反应器长径比对化学气相沉积SiC沉积动力学的影响

Effect of reactor length diameter ratio on chemical vapor deposition SiC deposition kinetics

复合材料学报. 2021, 38(4): 1200–1209 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201011.002>

原位气相生长法制备碳纳米管/Al₂O₃陶瓷复合材料

Fabrication of carbon nanotubes/Al₂O₃ ceramic composites by in-situ chemical vapor deposition growth method

复合材料学报. 2018, 35(1): 150–157 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170406.001>

碳纳米管改性泡沫镍/环氧树脂复合材料阻尼性能

Damping property of Ni foam/epoxy resin composites modified with carbon nanotubes

复合材料学报. 2017, 34(6): 1325–1333 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160919.001>

薄层化碳布缝合碳/碳复合材料制备与性能

Preparation and properties of spreading carbon cloth stitched C/C composites

复合材料学报. 2021, 38(4): 1210–1222 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200713.005>

SiC纤维表面(BN-SiC)_n复合涂层的制备及单丝拉伸性能

Preparation of (BN-SiC)_n composite coatings on SiC fibers and tensile properties of monofilament

复合材料学报. 2019, 36(8): 1873–1878 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181025.003>

CF-CNTs多尺度增强体的制备及CF-CNTs/环氧树脂复合材料力学性能

Preparation of CF-CNTs multi-scale reinforcement and mechanical properties of CF-CNTs/epoxy composites

复合材料学报. 2017, 34(11): 2428–2436 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170112.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

含有特种纤维夹层的乒乓球拍底板动特性与机制



分享本文

阴甜甜¹, 郝莉菱², 赵莘量¹, 付志强³, 刘持栋^{*3}, 何山⁴

(1. 西北工业大学 体育部, 西安 710072; 2. 西北大学 体育教研部, 西安 710069; 3. 西北工业大学 材料学院, 西安 710072;

4. 西安依山源体育用品有限公司, 西安 710065)

摘要: 采用化学气相工艺技术, 在碳纤维布表面原位生成具有特殊性能的微观涂层, 进而将这种纤维布引入到乒乓球拍底板的夹层结构中, 实现了底板动特性的调节。采用有限元仿真技术和非接触式模态测试技术, 对引入特种纤维夹层的乒乓球拍底板开展了模态分析和测试。对应不同的纤维夹层, 底板的一阶和二阶固有频率分别可以在 115~127 Hz 范围内和 179~198 Hz 范围内调节。揭示了特种纤维夹层对底板动特性的影响, 证明了有限元仿真技术和非接触式模态测试技术在底板动特性研究中的可行性, 为更科学、更全面地设计乒乓球拍底板提供了新的思路。

关键词: 乒乓球拍底板; 特种纤维夹层; 化学气相工艺; 动力学性能; 非接触模态测试

中图分类号: TB332; TS952.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2024)03-1626-07

Dynamic characteristics and mechanisms of table tennis blades with the inclusion of special fiber laminates

YIN Tiantian¹, HAO Liling², ZHAO Xinliang¹, FU Zhiqiang³, LIU Chidong^{*3}, HE Shan⁴

(1. Department of Physical Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Department of Physical Education and Research, Northwest University, Xi'an 710069, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 4. Xi'an Yishanyuan Sports Equipment CO., LTD., Xi'an 710065, China)

Abstract: Several series of special fiber laminates with different performance were designed and fabricated by chemical vapor deposition method. The dynamic responses of table tennis blades were found adjustable with the inclusion of different fiber laminates. The dynamic characteristics and mechanisms of the blades were analyzed and measured by finite element method (FEM) and non-contact mode measurement method. The first and second order frequencies of the blades can be adjusted in the range of 115-127 Hz, and 179-198 Hz, respectively, which cover the performances of most popular market products. The FEM and non-contact mode measurement method are both proved to be feasible on designing and studying the characteristics of table tennis blades.

Keywords: table tennis blades; special fiber laminate; chemical vapor deposition; dynamic characteristics; non-contact mode measurement

乒乓球运动是一种能够锻炼人体敏捷性、反应能力、耐力等的运动。长期以来一直是我国最为普及的运动项目之一。乒乓球拍是乒乓球运动的核心器材, 一般由底板、胶皮和海绵构成, 其

中底板是球拍的重要组成部分^[1]。常规的底板结构为若干层木片单板, 通过胶接工艺制作而成, 所用木片的层数、材质和厚度决定了底板的综合性能, 例如, 球速、旋转、控制、重量和厚度等

收稿日期: 2023-05-17; 修回日期: 2023-06-15; 录用日期: 2023-06-21; 网络首发时间: 2023-07-04 09:41:28

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230703.002>

基金项目: 国家自然科学基金 (52172100)

Natural Science Foundation of China (52172100)

通信作者: 刘持栋, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为陶瓷基复合材料与工程应用技术 E-mail: liuchidong@nwpu.edu.cn

引用格式: 阴甜甜, 郝莉菱, 赵莘量, 等. 含有特种纤维夹层的乒乓球拍底板动特性与机制 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(3): 1626-1632.

YIN Tiantian, HAO Liling, ZHAO Xinliang, et al. Dynamic characteristics and mechanisms of table tennis blades with the inclusion of special fiber laminates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(3): 1626-1632(in Chinese).

参数^[2-3]。

2000 年 10 月国际乒联启用直径 40 mm 的乒乓球 (直径范围 39.5~40.5 mm) 代替直径 38 mm 的乒乓球; 2014 年 7 月国际乒联启用了“40+”塑料乒乓球 (直径范围 40.0~40.6 mm)。乒乓球直径的增加, 造成同样技术水平下击出的乒乓球球速和旋转显著降低。随着乒乓球直径的增大和乒乓球运动技术水平的发展, 纯木制底板的弹性局限性逐渐凸显, 已经不能满足击球速度更快、旋转更强的新需求。为此, 在底板的多层木片结构间加入弹性模量更高的纤维夹层, 已成为乒乓球拍底板技术发展的新趋势^[4-6]。

当前非纯木质底板主要使用了碳纤维、芳基纤维、芳/碳混编纤维和玻璃纤维 4 种非木质材料^[5-6]。然而, 由于碳纤维的模量远高于天然木材, 因此具有单纯碳纤维夹层的底板持球时间较短, 控球能力较弱。为了改进上述不足, 目前市面常见纤维夹层采用了碳纤维束和有机纤维束 (例如, 芳基纤维等) 混合编织的技术方案, 如日本蝴蝶公司出品的“VISCARIA”等。这种方案在纤维束编织单元的维度调整了纤维夹层细观刚度性能, 实现了底板木材层和纤维夹层在不同发力特征下击球手感的柔和过渡, 因此受到了广大专业和业余乒乓球运动员喜爱。近年来, 随着乒乓球运动领域的发展, 乒乓球拍使用者对球拍性能要求也趋于多样化。因此, 需要根据乒乓球拍使用者的力量、速度、技战术等开发性能更多样化的底板。

从结构动力学特性的角度分析, 底板性能与其固有频率密切相关^[7-14]。一般地, 固有频率越高, 底板手感越“硬”, 出球速度越快; 反之, 底板手感越“软”, 持球时间越长。本文采用了几种特种纤维夹层, 设计并制备了乒乓球拍底板, 并利用有限元仿真和实验手段测试了底板的动特性, 为更全面深入地分析研究和开发新型乒乓球拍底板性能提供参考。

1 实验材料及方法

1.1 底板结构

本研究所选用的底板均为常规横板板面的七层结构, 如图 1 所示, 其中面材为厚度 0.4 mm 的寇头木, 力材为厚度 0.9 mm 的阿尤斯木, 芯材为厚度 3.2 mm 的阿尤斯木, 最终拍面主体厚度为 6.02~6.06 mm; 纤维夹层的主体为 3 K 丝束的聚丙烯腈基碳纤维 0°/90°平纹编织布; 纤维夹层对称

置于底板两侧的面材和力材之间, 其经向与底板手柄轴线呈 0°夹角。底板结构各层之间采用环氧树脂进行粘接。

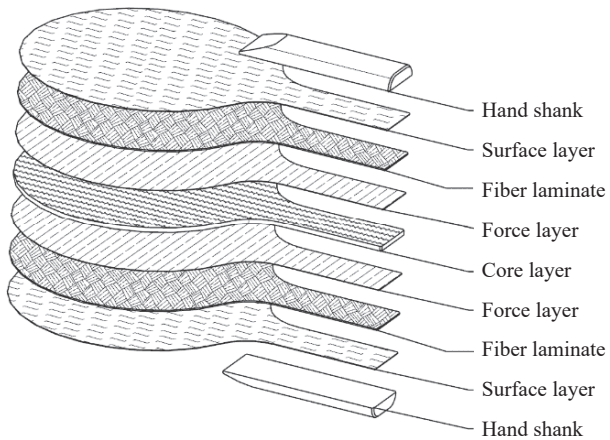


图 1 乒乓球拍底板结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of a table tennis blade

本研究所涉及的乒乓球拍底板编号及其采用的特种纤维夹层参数如表 1 所示。需要说明的是, 为了简化研究对象, 所有实验分析内容均只针对乒乓球拍底板本身, 不涉及胶皮和海绵。

表 1 乒乓球拍底板编号及特种纤维夹层结构参数

Table 1 Fiber lamination parameters of blade samples

Sample	Fiber coating	Thickness of fiber lamination/mm
S0	None	0.18-0.19
S1	Low texture carbon	0.18-0.20
S2	High texture carbon	0.19-0.22
S3	Nitrogen ceramic	0.20-0.22

1.2 特种纤维夹层的设计与制备

将不同材质的纤维束混合编织, 可以在编织单元的维度实现纤维夹层细观刚度性能的调整^[15-20]。基于常规碳纤维层结构, 提出了通过在纤维单丝和纤维束表面原位制备其他材质的过渡涂层, 达到在微观和宏观尺度调整纤维夹层刚度的目的。

本研究采用的纤维表面涂层材料有以下 3 种: 低织构碳、高织构碳和氮化物陶瓷。将这些与碳纤维不同材质的材料原位附着在碳纤维丝表面, 可以实现其力学性能 (例如: 模量和硬度等) 的调节。在涂层的制备方法上, 主要采用化学气相工艺技术, 将纤维布放入化学气相反应炉内, 通过调节反应气体的比例、流量和反应温度等工艺参数, 实现涂层材料厚度、微观组织结构的调整。图 2 是在碳纤维表面原位制备的低织构碳和氮化

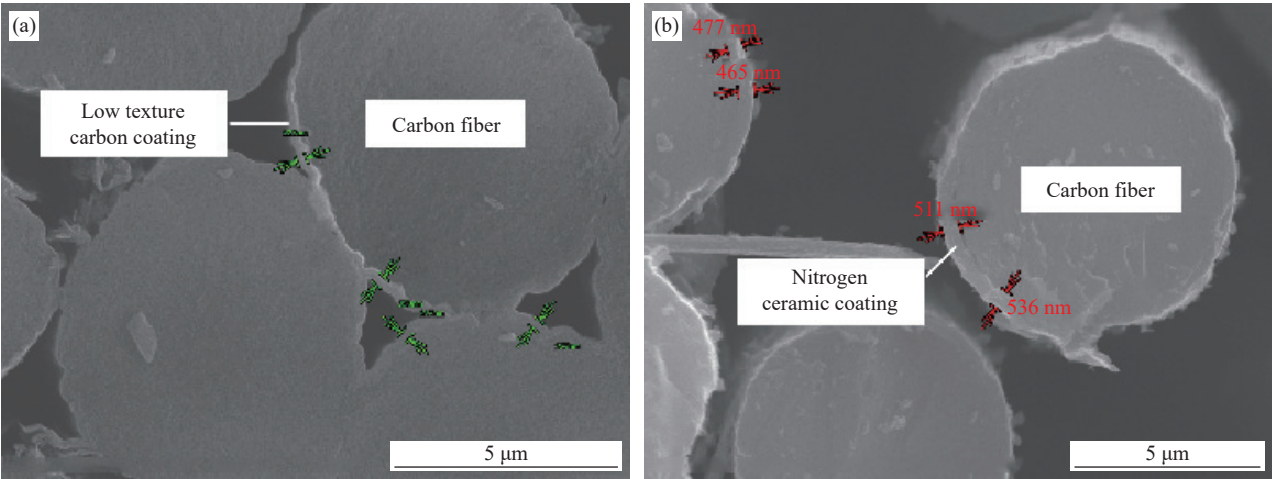


图2 纤维表面涂层微观形貌: (a) 低织构碳涂层; (b) 氮化物涂层

Fig. 2 Micromorphology of the coatings on carbon fibers: (a) Low texture carbon coating; (b) Nitrogen ceramic coating

物陶瓷涂层微观形貌。可见，涂层与纤维结合良好，无明显的厚度不均、夹杂和结合不良等现象，可以保证纤维与涂层间良好的连续传力效果。

1.3 有限元仿真分析

采用有限元仿真方法开展了底板结构约束模态分析。约束部位为底板手柄的等值截面段，以模拟击球时的抓握状态。分析求解软件为 Abaqus；底板的有限元模型全部采用六面体或楔形五面体单元，共计 144 533 个节点和 135 500 个单元 (图 3)；模型中的各层结构分别划分网格，通过共节点的方式连接为一个整体。仿真分析所用材料的基本性能如表 2 所列。



图3 乒乓球拍底板的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of a table tennis blade

表 2 底板有限元分析所用材料性能

Table 2 Material parameters of blades for finite element analysis

Materials	Density/(g·cm ⁻³)	Elastic modulus/GPa			Poisson's ratio			Shear modulus/GPa		
		E ₁	E ₂	E ₃	ν ₁₂	ν ₁₃	ν ₂₃	G ₁₂	G ₁₃	G ₂₃
Koto	0.59	1.12	0.67	1.17	0.33	0.39	0.23	0.71	0.89	0.23
Ayous	0.224	6.27	0.13	0.29	0.39	0.23	0.36	0.20	0.31	0.03
Fiber in S0	1.69	107	107	20	0.33	0.33	0.33	25	25	5
Fiber in S1	1.58	92	92	14	0.31	0.31	0.28	23	23	4
Fiber in S2	1.55	85	107	12	0.30	0.30	0.25	18	18	3
Fiber in S3	1.67	97	97	18	0.23	0.23	0.21	21	21	4

1.4 模态测试

将底板手柄固支安装于刚性工装上，模拟实际使用时的抓握边界条件。为了测量底板的结构频响函数，并得到底板各阶次模态，必须要对底板输入激励，常用的激励方式有力锤激励和激振器激励。为了防止底板结构在输入激励时受到损伤，采取了力锤敲击底板手柄的方式产生输入信号。

在底板振动响应的获取方面，采用了德国 Polytec 公司 PSV-400 型全场扫描激光测振仪 (图 4)，其利用激光多普勒原理，采用波长为 633 nm 的激光实现底板表面的动特性的非接触测量。测试前需要首先进行测点网格划分，根据底板外形，自拍面边缘向中间等间距偏置布设测点网格，相邻测点间距不大于 20 mm，可满足后处理时提取底

板模态的要求。利用该手段进行模态测试，无需在底板上布置加速度传感器，避免了额外质量对测试结果的影响，可准确、便捷地得到底板的固有频率数据，并能够同步输出相应模态的彩色云图。



图4 非接触式模态测试设备

Fig. 4 Non-contact mode measurement equipment

为了进行同类对比，除表1所列的样本外，还测试了蝴蝶公司生产的VISCARIA、林高远ALC (Lin Gaoyuan ALC) 型号底板，以及斯蒂卡公司生产的纳米OC (Offensive Wood NCT) 和赛博6 (Cyber Shape Carbon) 型号底板。

2 结果与分析

通过有限元仿真分析可得，底板的一阶模态形式为沿拍面法向的悬臂摆动，二阶模态形式为沿手柄轴向的扭转，三阶模态形式为沿拍面所在平面的环向扭摆，其模态示意图如图5所示。采用模态测试方法获得的底板模态云图如图6所示，通过对比可见，底板的一阶和二阶模态形式与有限元仿真分析数据吻合良好。考虑到三阶和更高阶模态在实际击球时难以激发，且影响底板性能的主要是一阶模态和二阶模态，仅对一阶和二阶模态结果进行讨论分析。图7~图9分别给出了实

验测得的VISCARIA底板、林高远ALC型号底板和赛博6型号底板的一阶与二阶模态形式。

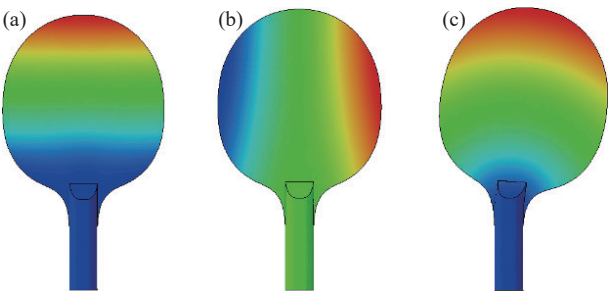


图5 通过有限元仿真得到的底板典型模态图：(a)一阶模态；(b)二阶模态；(c)三阶模态

Fig. 5 Typical vibration modes of a blade acquired by finite element method: (a) First order mode; (b) Second order mode; (c) Third order mode

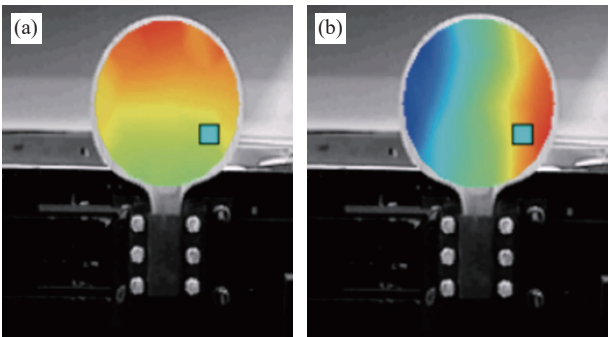


图6 实验测得的S1底板一阶和二阶模态：(a)一阶模态；(b)二阶模态

Fig. 6 First and second order modes of S1 blade acquired by non-contact mode measurement: (a) First order mode; (b) Second order mode

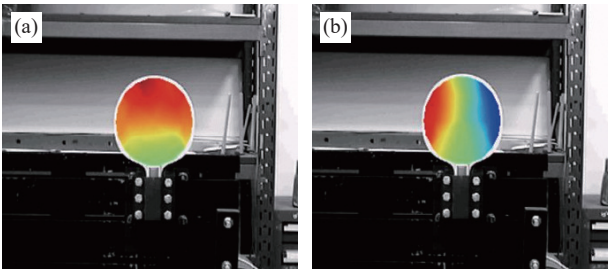


图7 实验测得的VISCARIA底板一阶和二阶模态：(a)一阶模态；(b)二阶模态

Fig. 7 First and second order modes of the VISCARIA blade acquired by non-contact mode measurement: (a) First order mode; (b) Second order mode

表3列出了8支底板的一阶和二阶频率数据表，并对有限元分析计算值和实测值进行了对比。通过对比发现，不论是一阶频率还是二阶频率，计算值均高于实测值。其影响因素可能有两项：第一，计算时采用的是刚性固支边界，而在实际实验时，受工装的接触面、夹持预紧等因素的影响，难以实现理想的刚性固支条件，使测试

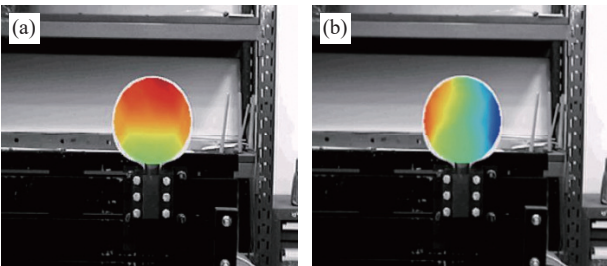


图 8 实验测得的林高远 ALC 型号底板一阶和二阶模态: (a) 一阶模态; (b) 二阶模态

Fig. 8 First and second order modes of the Lin Gaoyuan ALC blade acquired by non-contact mode measurement: (a) First order mode; (b) Second order mode

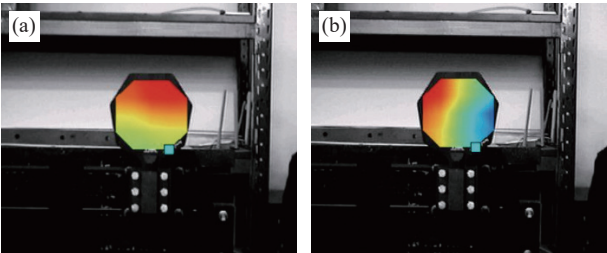


图 9 实验测得的赛博 6 型号底板一阶和二阶模态: (a) 一阶模态; (b) 二阶模态

Fig. 9 First and second order modes of the Cyber Shape Carbon blade acquired by non-contact mode measurement: (a) First order mode; (b) Second order mode

系统的刚性下降，导致实测频率低于理论值；第二，底板有限元模型采用的是理想模型，且各结构层之间采用了共节点处理，而实际结构在各层之间采用的是树脂胶粘接，且工艺实施过程中会导致一定的纤维层松弛，这些因素也会导致实际结构的刚度低于理论分析值。

S0 采用的是无处理的碳纤维布夹层，由于碳纤维的模量显著高于木材，因此纤维布的引入大幅提升了底板的整体刚度。通过专业队员试打反馈也验证了该底板出球速度快、难以控制的宏观性能。通过对比 S0~S3 的一阶和二阶频率，发现对碳纤维布进行不同的表面微观涂层处理后，可以在相当宽的范围内实现对底板刚度的调整。

图 10 给出了 S1、S2 和 S3 底板所用纤维夹层表面涂层的微观形貌。S1 所用的低织构碳呈现出层状波纹堆叠的特征，其具有较低的晶化程度；S2 所用的高织构碳呈现出更为规则的层状结构，晶化程度较高。根据寇钢^[21]的研究结论得知，通过高温热处理得到高织构热解碳包覆的碳纤维材料，其内应力在热处理环节得到了消除；且通过微米压痕法测得的高织构热解碳微观硬度，相比低织构热解碳降低 27%~58%。其次，由于高织构碳的层间结合能力低，与纤维的结合程度更弱，在受到外部载荷，尤其是剪切载荷时，更容易发生涂层与纤维之间界面的微观滑移。第三，高织构热解碳包覆的碳纤维复合材料模量，相比低织构热解碳包覆的复合材料低 24.5%^[22]，将其置于木材和碳纤维之间能够起到更加显著的刚度缓冲效果。因此，综合以上 3 种影响因素，在具有上述特种纤维夹层结构的底板受到法向和切向击球载荷时，高织构碳可以起到更明显的弱化碳纤维夹层刚度的效果，有利于底板在击球时获得更长的持球时间，从而可以对乒乓球造成更多的旋转。

表 3 不同底板的一阶和二阶频率
Table 3 First and second order frequency of various blades

No.	Sample	First-order frequency/Hz		Second-order frequency/Hz	
		Calculation	Experiment	Calculation	Experiment
1	S0	129.1	127.3	195.2	187.0
2	S1	123.0	121.7	188.0	179.8
3	S2	118.3	115.5	185.3	179.1
4	S3	125.4	123.3	205.6	198.0
5	VISCARIA	—	123.8	—	183.3
6	Lin Gaoyuan ALC	—	122.1	—	179.7
7	Offensive Wood NCT	—	104.8	—	182.0
8	Cyber Shape Carbon	—	112.8	—	179.5

S3 底板采用了氮化物陶瓷作为纤维表面涂层材料，其微观形貌具有典型的低织构特征，与碳纤维的结合力更强，受到外部载荷时相比低织构碳更容易传递至纤维主体；加之所制备的氮化物是一种陶瓷材料，其弹性模量显著高于低织构碳。

因此将氮化物陶瓷包覆于碳纤维表面，可显著提升纤维夹层的宏观刚度和底板硬度，导致底板在击球时的持球时间更短，但可以提升乒乓球的出球速度。通过专业队员的试打反馈也验证了 S1、S2 和 S3 底板的宏观击球手感，从出球速度角度

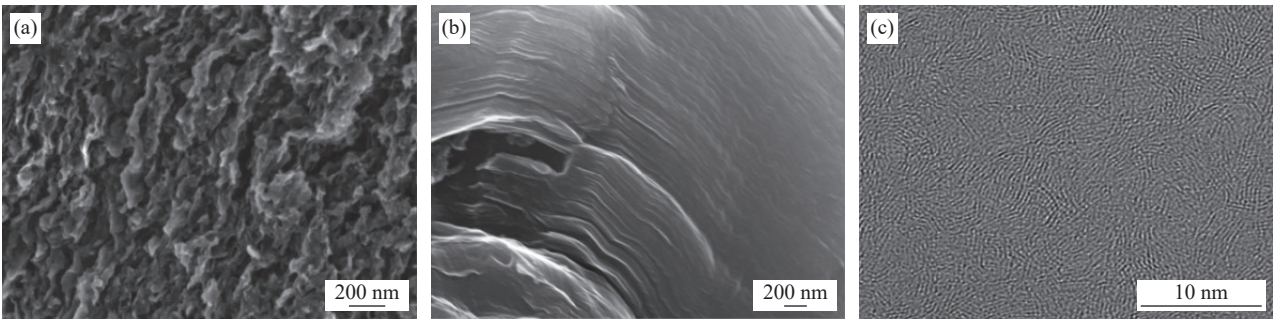


图 10 S1 (a)、S2 (b) 和 S3 (c) 底板所用纤维表面涂层的微观形貌

Fig. 10 Microstructure morphologies of the coatings on the fibers in sample: (a) S1; (b) S2; (c) S3

排序： $S3>S1>S2$ 。

综合以上分析可知，可以通过在纤维表面包覆微观涂层的手段，实现木材层和纤维夹层之间的刚度过渡。针对不同材质的微观涂层材料，其模量越高、织构越低，得到的纤维夹层刚度越大，底板固有频率越高，出球速度越快。最后，通过S0~S3与市面型号底板的数据对比可见，引入特种纤维夹层的乒乓球拍底板的动特性基本可以覆盖现有非纯木结构的底板性能。通过进一步调整纤维夹层微观涂层的材质、微观织构和涂层厚度等参数，能够获得一系列具有特色性能的底板产品。

3 结论

(1) 采用化学气相工艺技术，在碳纤维布表面原位生成具有特殊织构的异种材料微观涂层，获得特种纤维夹层，将特种纤维夹层作为乒乓球拍底板的夹层结构，实现了底板动特性的调节。引入不同特种纤维夹层的乒乓球拍底板，其动特性基本可以覆盖市面现有非纯木结构的底板性能。

(2) 采用有限元仿真技术和非接触式模态测试技术，完成了底板动特性的分析和测试，阐述了特种纤维夹层对底板动特性的影响，证明了两种方法在底板性能研究中的可行性，为更科学、更全面地设计乒乓球拍底板提供了新的思路。

致谢：感谢西安依山源体育用品有限公司为本研究提供了底板结构设计思路，感谢西北工业大学乒乓球队为本研究提供了详细的试打报告和改进意见。

参考文献：

[1] 胡海涛, 李荣芝. 论乒乓球拍的形制[J]. 中国学校体育, 2016, 3(2): 23-26.
HU Haitao, LI Rongzhi. Research on the shape of table tennis rackets[J]. China School Physical Education, 2016, 3(2): 23-26(in Chinese).

[2] 高娟娟. 乒乓球拍底板与击球技术分析[J]. 当代体育科技, 2016, 6(16): 151-152.
GAO Juanjuan. Table tennis racquet backplane and technical analysis[J]. Contemporary Sports Technology, 2016, 6(16): 151-152(in Chinese).
[3] 孙瑞, 李春, 任杰, 等. 乒乓球底板结构对底板性能影响研究[J]. 天津体育学院学报, 2016, 31(6): 519-523.
SUN Rui, LI Chun, REN Jie, et al. The effect of table tennis racket paddle fiber layer on racket performance[J]. Journal of TUS, 2016, 31(6): 519-523(in Chinese).
[4] 刘娜. 碳纤维复合材料乒乓球拍性能优劣分析[J]. 合成纤维, 2021, 50(8): 49-52.
LIU Na. Analysis of the advantages and disadvantages of the performance of carbon fiber composite table tennis racket[J]. Synthetic Fibers, 2021, 50(8): 49-52(in Chinese).
[5] 孙晋媛. 复合材料用作乒乓球拍底板的动力学特性研究[J]. 合成材料老化与应用, 2020, 49(6): 121-123.
SUN Jinyuan. Research on the dynamic characteristics of composite used as the base plate of table tennis racket[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2020, 49(6): 121-123(in Chinese).
[6] 宋潇. 乒乓球拍用碳纤维板的制备与力学性能研究[J]. 合成材料老化与应用, 2019, 48(5): 64-66.
SONG Xiao. Study on preparation and mechanical properties of carbon fiber board for table tennis racket[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2019, 48(5): 64-66(in Chinese).
[7] 吉丽, 陈国文. 碳纤维乒乓球拍底板材料的力学性能分析[J]. 合成材料老化与应用, 2019, 48(5): 87-90.
JI Li, CHEN Guowen. Mechanical property analysis of carbon fiber baseboard material for table tennis racket[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2019, 48(5): 87-90(in Chinese).
[8] LIONEL M, MARC P, NICOLAS H. Vibrations of table tennis racket composite wood blades: Modeling and experiments[J]. Procedia Engineering, 2012, 34(4): 694-699.
[9] LIONEL M, FLORIAN G, MARC P, et al. Vibro-acoustic of

- table tennis rackets at ball impact: Influence of the blade plywood composition[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 34(4): 604-609.
- [10] SAHAR S, TABRIZI S P, VAJIEH J. Data acquired by a single object sensor for the detection and quality evaluation of table tennis forehand strokes[J]. *Data in Brief*, 2020, 33: 1-9.
- [11] DENG J C, WEI X, ZHOU H Y, et al. Inspiration from table tennis racket: Preparation of rubber-wood-bamboo laminated composite (RWBLC) and its response characteristics to cyclic perpendicular compressive load[J]. *Composite Structures*, 2020, 241: 1-12.
- [12] RINALDI R G, MANIN L, BONNARD C, et al. Non linearity of the ball/rubber impact in table tennis: Experiments and modeling[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 147: 348-353.
- [13] LIONEL M, MARC P, CYRIL B, et al. Vibro-acoustic of table tennis rackets. Influence of the plywood design parameters. Experimental and sensory analyses[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 72: 374-379.
- [14] 李江, 李春, 谢用民. 复合材料乒乓球拍击球特性研究[J]. *当代体育科技*, 2020, 10(15): 243-248.
- LI Jiang, LI Chun, XIE Yongmin. Research on the collision characteristics of table tennis rackets based on composite material[J]. *Contemporary Sports Technology*, 2020, 10(15): 243-248(in Chinese).
- [15] 张平, 桂良进, 范子杰. 三向编织玻璃/环氧复合材料刚度性能[J]. *复合材料学报*, 2008, 25(2): 31-34.
- ZHANG Ping, GUI Liangjin, FAN Zijie. Stiffness properties of triaxially braided glass/epoxy composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008, 25(2): 31-34(in Chinese).
- [16] 贾宝惠, 张刚, 蔺越国, 等. 湿热环境下含分层平面编织玻璃纤维/环氧树脂基复合材料层合板振动特性[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(4): 892-904.
- JIA Baohui, ZHANG Gang, LIN Yueguo, et al. Vibration characteristic of delaminated plain woven fabric glass fiber/epoxy composite laminate under hygrothermal environment[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(4): 892-904(in Chinese).
- [17] XU S J, HE S, LI J Y, et al. A progressive damage model for quasi-static tension of 2D woven composites and FEM implementation[J]. *Composite Structures*, 2023, 320: 117168.
- [18] AYRANCI C, CAREY J. 2D braided composites: A review for stiffness critical applications[J]. *Composite Structures*, 2008, 85(1): 43-58.
- [19] SHOKRIEH M M, MAZLOOMI M S. An analytical method for calculating stiffness of two-dimensional tri-axial braided composites[J]. *Composite Structures*, 2010, 92(12): 2901-2905.
- [20] ZAKO M, UETSUJI Y, KURASHIKI T. Finite element analysis of damaged woven fabric composite materials[J]. *Composites Science and Technology*, 2003, 63(3-4): 507-516.
- [21] 寇钢. 碳纳米管增强热解碳基复合材料的微观结构和性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2019.
- KOU Gang. Microstructure and properties of pyrocarbon matrix composites strengthened by carbon nanotubes[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019(in Chinese).
- [22] LI W, LI H J, WANG J, et al. Preparation and mechanical properties of carbon/carbon composites with high textured pyrolytic carbon matrix[J]. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, 23: 2129-2134.