北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

毛竹结构与应用场景对竹牙刷毛束拉力的影响

郝兆锋 张文福 张建 胡鸣 王洪艳 赵莹 袁少飞 任文庭

Moso bamboo structure and application scenarios affect tuft removal force in bamboo toothbrushes

Hao Zhaofeng, Zhang Wenfu, Zhang Jian, Hu Ming, Wang Hongyan, Zhao Ying, Yuan Shaofei, Ren Wenting

引用本文:
郝兆锋, 张文福, 张建, 胡鸣, 王洪艳, 赵莹, 袁少飞, 任文庭. 毛竹结构与应用场景对竹牙刷毛束拉力的影响[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(1):197–207. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250235
Hao Zhaofeng, Zhang Wenfu, Zhang Jian, Hu Ming, Wang Hongyan, Zhao Ying, Yuan Shaofei, Ren Wenting. Moso bamboo structure and application scenarios affect tuft removal force in bamboo toothbrushes[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(1):197–207. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250235

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250235

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

竹青层增强竹材耐候性的作用机制
Mechanism of green outer layer in enhancing weathering resistance of bamboo
北京林业大学学报, 2025, 47(9): 153–161. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250153

毛竹材径向篾抗拉和抗弯性能研究
Tensile and bending properties of radial slivers of Moso bamboo
北京林业大学学报, 2022, 44(3): 140–147. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210333

毛竹径向梯度结构对吸湿的影响Ⅱ：吸湿湿胀行为
Influence of radial gradient structure on moisture absorption of *Phyllostachys edulis* Ⅱ: moisture absorption–swelling behavior
北京林业大学学报, 2025, 47(11): 167–174. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250204

毛竹径向梯度结构对吸湿的影响Ⅰ：静态与动态吸湿性
Influence of radial gradient structure on moisture absorption of *Phyllostachys edulis* Ⅰ: static and dynamic hygroscopicity
北京林业大学学报, 2025, 47(11): 159–166. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250203

植物酸改性增强竹塑复合材料界面性能
Plant–derived acid modification to enhance interfacial properties of bamboo–plastic composites
北京林业大学学报, 2025, 47(10): 149–159. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250190

竹材非对称性弯曲行为对弯曲构件性能的影响
Influence of asymmetric bending behavior of bamboo on performance of curved components
北京林业大学学报, 2025, 47(4): 168–176. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240360

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250235

毛竹结构与应用场景对竹牙刷毛束拉力的影响

郝兆锋[1,2]　张文福[2]　张　建[2]　胡　鸣[3]　王洪艳[2]　赵　莹[2]　袁少飞[2]　任文庭[2]
（1. 浙江农林大学化学与材料工程学院，浙江 杭州 311300；2. 浙江省林业科学研究院，浙江 杭州 310023；
3. 安吉鸣竹竹业科技有限公司，浙江 湖州 313399）

摘要:【目的】竹材因其各向异性，在相同工艺条件下加工的竹牙刷质量存在差异。本研究旨在探讨不同密度竹材加工的竹牙刷及其在不同应用场景下的毛束拉力性能规律，以提高竹牙刷质量的可控性。**【方法】**将原竹加工为竹牙刷，在加工过程中统计规格竹条的密度(ρ)，并按密度对竹牙刷分类。对比测试塑料牙刷与不同密度竹牙刷的毛束拉力性能，选取相同密度区间的竹牙刷，通过不同温度水浴处理与吸水−干燥循环处理模拟不同的应用场景，测试竹牙刷在使用过程中的耐久性。另外，通过测试相同密度区间下竹牙刷的竹青/竹黄面以及刷头不同孔位的毛束拉力性能，探讨竹牙刷最佳加工工艺条件。利用超景深显微镜、扫描电镜(SEM)和显微 CT 设备观察并分析竹牙刷植毛孔的微观形貌结构。**【结果】**(1)不同密度竹材制成的竹牙刷在毛束拉力性能上存在显著差异，毛束拉力随竹材密度增加而显著提高。密度大于 0.70 g/cm^3 的竹牙刷毛束拉力均满足国标 15 N 的要求，密度大于 0.75 g/cm^3 的竹牙刷在毛束拉力性能上优于塑料牙刷。(2)0.75 ≤ ρ < 0.80 竹牙刷的耐久性测试结果显示：常温水浴处理的竹牙刷毛束拉力稳定在 15.42 ~ 16.69 N 之间；即使在 6 天吸水−干燥循环处理后，拉力下降至 15.6 N，仍符合国标要求。(3)竹青面植毛牙刷的毛束拉力均值为 19.55 N，高于竹黄面的 17.89 N。刷头外圈孔位的毛束拉力均值(18.21 N)高于刷头整体毛束拉力性能(17.81 N)，内圈孔位(17.23 N)低于刷头整体毛束拉力性能。结合内圈与外圈孔位的毛束拉力值的方差分析(p < 0.05)，表明边缘孔位表现出更优的毛束拉力性能。(4)植毛孔形貌结构结果显示，竹材天然结构为嵌入孔内的金属片提供了良好的接触界面。**【结论】**较高密度竹材制备的竹牙刷具备更优的毛束拉力性能，同时在日常使用条件下其毛束拉力性能表现稳定，可替代市场上的一般塑料牙刷，展现出良好的应用潜力。根据不同孔位及植毛面对毛束拉力的差异化影响，在实际生产中可采取差异化设计策略优化孔位分布和植毛部位，从而提升竹牙刷的可靠性与耐久性。

关键词：以竹代塑；毛竹牙刷；毛束拉力；竹材密度−力学关联；各向异性微结构；吸湿−干燥循环耐久性；竹青/竹黄植毛面；植毛孔形貌

中图分类号：TS959.2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2026)01−0197−11

引文格式：郝兆锋，张文福，张建，等. 毛竹结构与应用场景对竹牙刷毛束拉力的影响［J］. 北京林业大学学报，2026，48(1)：197−207. Hao Zhaofeng, Zhang Wenfu, Zhang Jian, et al. Moso bamboo structure and application scenarios affect tuft removal force in bamboo toothbrushes［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(1): 197−207.

Moso bamboo structure and application scenarios affect tuft removal force in bamboo toothbrushes

Hao Zhaofeng[1,2]　Zhang Wenfu[2]　Zhang Jian[2]　Hu Ming[3]　Wang Hongyan[2]　Zhao Ying[2]
Yuan Shaofei[2]　Ren Wenting[2]
(1. College of Chemistry and Materials Engineering, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China;
2. Zhejiang Academy of Forestry, Hangzhou 310023, Zhejiang, China;
3. Anji Mingzhu Bamboo Industry Technology Co., Ltd, Huzhou 313399, Zhejiang, China)

收稿日期: 2025−06−23　**修回日期:** 2026−01−11

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD2202100)。

第一作者: 郝兆锋。主要研究方向：林业机械装备。Email：17865277841@163.com　地址：311300 浙江省杭州市临安区武肃街 666 号浙江农林大学化学与材料工程学院。

责任作者: 张建，研究员。主要研究方向：竹木资源利用和林业机械装备。Email:zhjianzj@126.com　地址：310023 浙江省杭州市西湖区留和路 399 号浙江省林业科学研究院。

本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

Abstract: [**Objective**] Due to the anisotropic nature of bamboo, bamboo toothbrushes processed under identical conditions often exhibit quality variations. This study investigates the tuft removal force performance of toothbrushes made from bamboo with different densities and used in various application scenarios, aiming to enhance the controllability of bamboo toothbrush quality. [**Method**] Raw bamboo was processed into toothbrushes, and the density (ρ) of each bamboo strip was recorded during manufacturing to classify the resulting toothbrushes. The tuft removal force of plastic toothbrushes and bamboo toothbrushes with varying densities was compared. Bamboo toothbrushes within the same density range were subjected to water bath treatments at different temperatures and wetting-drying cycles to simulate real-world usage conditions and evaluate durability. Additionally, tuft removal force was analyzed with respect to bamboo-green (outer) and bamboo-yellow (inner) surfaces and different hole positions on the brush head to determine optimal processing conditions. Micro-morphological characteristics of the tufting holes were examined using a digital super-depth microscope, scanning electron microscopy (SEM), and micro-computed tomography (micro-CT). [**Result**] (1) Significant differences in tuft removal force were observed among bamboo toothbrushes made from bamboo of different densities, with removal force increasing significantly as bamboo density increased. Toothbrushes made from bamboo with density > 0.70 g/cm^3 all met the national standard requirement of 15 N, while those with density > 0.75 g/cm^3 outperformed conventional plastic toothbrushes in tuft removal force. (2) Durability tests on toothbrushes with $0.75 \leqslant \rho < 0.80$ showed that tuft removal force remained stable between 15.42 and 16.69 N after room-temperature water treatment. Even after six-day cycling tests of wetting and drying, the removal force decreased only to 15.6 N, still meeting the national standard. (3) Toothbrushes with tufts implanted on the bamboo-green surface exhibited a mean removal force of 19.55 N, higher than the 17.89 N observed on the bamboo-yellow surface. The average removal force at outer-ring hole positions (18.21 N) exceeded the overall brush head average (17.81 N), while inner-ring hole positions (17.23 N) performed below average. Variance analysis confirmed significantly superior tuft retention at peripheral hole positions ($p < 0.05$). (4) Microstructural analysis revealed that the natural structure of bamboo provides an excellent interfacial contact for the embedded metal bristle-holding plates. [**Conclusion**] Bamboo toothbrushes fabricated from higher-density bamboo exhibit superior and stable tuft pulling force under daily use conditions, meeting and exceeding the performance of conventional plastic toothbrushes, thus demonstrating strong application potential. Given the differential effects of hole position and implantation surface on tuft retention, manufacturers can adopt differentiated design strategies—optimizing hole layout and selecting high-performance surfaces—to enhance the reliability and durability of bamboo toothbrushes.

Key words: bamboo as a substitute for plastic; moso-bamboo toothbrush; tuft removal force; density-mechanical property correlation; anisotropic microstructure; wetting-drying cycling durability; bamboo-green (outer) vs. bamboo-yellow (inner) tufting side; implant-hole topography

塑料制品是工业化高度发展的产物，广泛应用于各行各业，极大地方便了人类生活。然而，塑料垃圾的累积对生态环境造成了深远影响。据预测，到2030 年，每年排入水生生态系统的塑料废弃物将增至 5 300 t[1]，而当前全球废弃塑料的回收率仅为9%[2]。为缓解日益严峻的塑料污染问题，竹制品因其可降解、低碳环保等特性[3−4]，逐步成为塑料制品的理想替代材料，“以竹代塑”政策应运而生。自2022 年 6 月中国政府与国际竹藤组织共同发起“以竹代塑”全球倡议以来，该政策得到了快速响应与持续推进。2023 年 10 月，中国国家发展改革委等四部委联合印发《加快“以竹代塑”发展三年行动计划》，同年 11 月召开的首届“以竹代塑”国际研讨会上发布了《“以竹代塑”全球行动计划（2023—2030）》。这些政策文件和国际合作机制为竹制品的技术创新与市场推广注入了强劲动力[5]。

随着“以竹代塑”政策的实施与公众环保意识的提升，市场对可持续产品的需求显著增长。竹牙刷作为该类产品的典型代表，其刷柄采用天然竹材，不仅减少了塑料使用，还因竹材的天然抑菌特性为消费者提供了更健康的口腔护理选择[6]。然而，当前市场上的竹牙刷产品质量参差不齐，特别是在毛束拉

力与使用耐久性方面，与传统塑料牙刷仍存在差距。竹牙刷制造的关键工艺在于通过金属片将毛束固定于预制的植毛孔中。金属片作为连接刷毛与刷柄的重要结构，其与竹基材的结合强度（即毛束拉力）直接影响牙刷的使用安全性与可靠性。依据国家标准 GB 39669—2020《牙刷口腔器具安全通用技术要求》，毛束拉力应不低于 15 N。当前所使用的金属片多为铝制材料，性能稳定，但由于竹材是一种天然材料，即使来源一致，其内部结构仍存在差异，例如维管束分布密度和组织排列结构等[7]。这种天然不均一性可能导致植毛孔与金属片之间的结合强度出现较大波动，进而引发毛束拉力不足或金属片脱落等问题，严重制约了竹牙刷整体品质的稳定性。

目前，关于竹材微观结构如何影响植入金属片结合强度的研究仍较为有限，缺乏系统的实验验证与理论分析。为此，本研究拟系统探讨竹材密度、部位差异（如竹青面/竹黄面）及实际应用场景等因素对毛束拉力性能的影响机制。同时引入超景深显微镜、扫描电子显微镜（SEM）与显微 CT 等手段，对竹材植毛孔的三维微观结构进行可视化分析。研究成果有望为竹牙刷的材料选用与植毛加工设计提供理论支撑，进一步推动“以竹代塑”产品的产业化发展与市场普及。

1　材料与方法

1.1　材　料

本研究所使用的竹材为 5 年生成熟毛竹（*Phyllostachys edulis*），购自安吉龙袍竹制品有限公司。原材料经过气干干燥处理，使含水率稳定在 10% ~ 12%。本研究中所用的一次性塑料牙刷采购自扬州欧诗奈泉酒店用品有限公司。

竹牙刷的刷毛采用聚对苯二甲酸丁二醇酯（PBT）磨尖丝，购自江苏省启东博文工程塑料有限公司。该材料具有良好的机械性能，其平均拉伸强度为 50 MPa，弹性模量为 1.5 GPa。磨尖丝的末端直径为 0.01 mm，非末端直径为 0.18 mm，总长度为 29 mm。

用于固定刷毛的金属片为铝质矩形片，由扬州雨跃金属制品厂生产。金属片尺寸为长 2 mm、宽 1.3 mm、厚 0.3 mm，平均抗拉强度为 200 MPa。在植毛加工过程中，金属片作用于磨尖丝的中部位置，并将其植入预先加工的孔内。金属片通过宽边与植毛孔壁紧密贴合，从而实现刷毛的稳固固定。

1.2　竹牙刷制备

毛竹经过锯切、剖分、粗刨、烘干、精刨及定段加工，制成规格为 183 mm × 17 mm × 5 mm 的竹条。按照图 1 所示流程，将规格竹条进一步加工为竹牙刷产品。具体步骤如下：首先，将规格竹条铣削成型为牙刷刷柄的形状；其次，对刷头部位进行打孔处理；最后，将毛束与金属片固定于预先加工的植毛孔中（图 2）。试验所用竹牙刷的尺寸参数如图 3 所示。

1.3　试验设计

1.3.1　不同竹材密度对竹牙刷毛束拉力的影响

为研究竹材密度对毛束拉力性能的影响，将试验用竹条按密度（ρ，g/cm^3）划分为 6 个区间：$\rho < 0.65$、$0.65 \leqslant \rho < 0.70$、$0.70 \leqslant \rho < 0.75$、$0.75 \leqslant \rho < 0.80$、$0.80 \leqslant \rho < 0.85$、$\rho \geqslant 0.85$，据此制备 6 类竹牙刷样

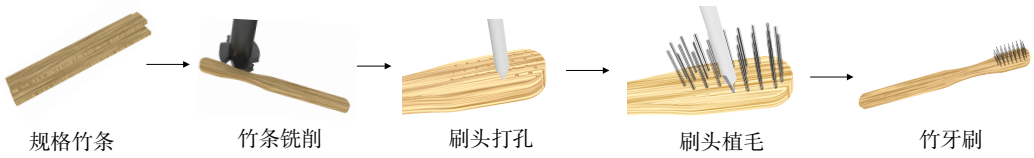


图 1　竹牙刷制备工艺流程图

Fig. 1　Schematic diagram illustrating the fabrication process of bamboo toothbrush

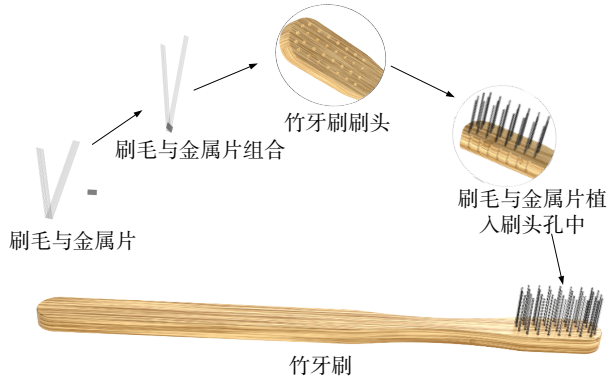


图 2　竹牙刷毛束植入示意图

Fig. 2　Schematic illustration of tuft implantation in bamboo toothbrush

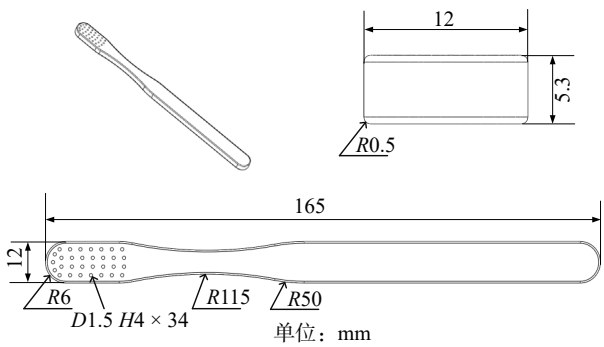


图 3　竹牙刷尺寸参数

Fig. 3　Dimensional specifications of bamboo toothbrush

品，分别标记为 A、B、C、D、E、F。每类样品随机选取 20 支竹牙刷，进行毛束拉力性能测试。为确保样品的一致性，所有竹牙刷均以竹黄面作为植毛面，且牙刷头部区域避免出现竹节，以排除对实验结果的干扰。同时，选取 20 支一次性塑料牙刷作为对照组进行试验。

1.3.2 不同应用场景对竹牙刷毛束拉力的影响

为模拟竹牙刷在不同实际使用场景下的性能变化，本研究以样品 C 为基础，设计了两种应用情境：连续水浴处理与吸水–干燥循环处理，分别对应单次长时间浸泡和多次反复使用过程中毛束拉力性能的衰减规律。在水浴处理实验中，将牙刷完全浸没于距水面 2 cm 的位置，分别设定水温为 35 ℃（模拟日常温水使用情形）和 100 ℃（模拟高温极端情形），以考察不同处理条件对毛束拉力性能的影响。每组设定下，在浸泡 10、20、30、40、50 和 60 min 后分别取样，每个时间点抽取 7 支牙刷样品进行毛束拉力测试，同时设置未处理样品作为对照组，用于比较处理前后的性能变化。在吸水–干燥循环实验中，竹牙刷首先在 70 ℃ 热水中浸泡 2 h，随后擦干表面水分，并在室温下垂直自然晾 22 h，完成一个完整的干湿交替循环。该过程共重复 6 个周期，每个周期结束后取样 7 支竹牙刷进行毛束拉力测试，并以未经处理的竹牙刷作为对照。

1.3.3 不同植毛位置对竹牙刷毛束拉力的影响

为进一步探讨竹材表面差异及植毛位置对毛束拉力性能的影响，本研究以样品 C 为基础，从两个层面展开分析：一是比较竹青面与竹黄面作为植毛表面对毛束拉力的影响；二是研究刷头不同孔位在同一植毛表面条件下的毛束拉力分布规律。在竹材表面差异研究部分，分别对竹黄面与竹青面进行植毛处理，每类随机选取 20 支竹牙刷样品测试其毛束拉力性能。在孔位研究方面，选取 20 支竹黄面植毛的样品，针对牙刷头部的 34 个植毛孔位逐一测试其毛束拉力性能。通过对各孔位毛束拉力的统计与对比，分析不同孔位对毛束拉力性能的影响。

1.4 性能测试

1.4.1 毛束拉力性能测试

毛束拉力性能测试依据 GB 39669—2020《牙刷及口腔器具安全通用技术要求》进行，测试示意图如图 4 所示。实验所用仪器为 WH-5000 型电子万能试验机，由上海精其仪器有限公司生产。

1.4.2 微观形貌结构观察

为深入了解竹牙刷刷头的内部结构特征及竹材对植入金属片的作用机理，本研究采用超景深显微镜、扫描电子显微镜（SEM）以及显微 CT 设备对样品 C 的微观形貌进行观察与分析。

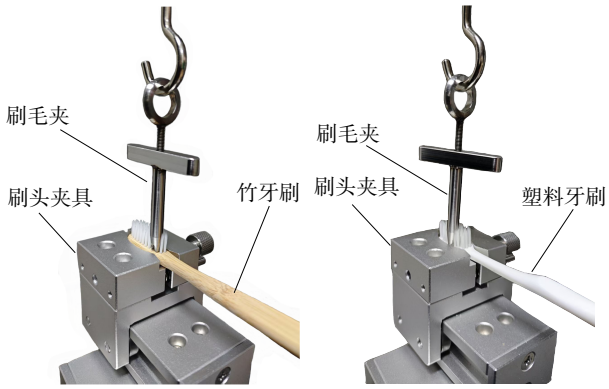


图 4 竹牙刷与塑料牙刷毛束拉力性能测试

Fig. 4 Tests of tuft removal force performance between bamboo and plastic toothbrushes

（1）采用 VHX-7000 型超景深显微镜对竹牙刷样品 C 的刷头部位进行观察。将样品制成 5 mm × 5 mm × 2 mm 的试样，试样包含竹牙刷刷头的植毛面及金属片与孔壁结合位置。利用超景深显微镜对试样进行多焦面叠加成像，获取高清晰度的三维形貌数据。

（2）采用 S-3400N 型扫描电子显微镜（SEM）对竹牙刷样品 C 测试毛束拉力后的刷头部位进行观察。将刷头制成 10 mm × 10 mm × 5 mm 的试样，并去除露出竹材表面的毛束。试样在真空环境中进行喷金处理，加速电压为 12.5 kV，工作距离为 10 mm，以捕捉孔壁结合界面与破坏界面的形貌细节。

（3）采用显微 CT 设备对竹牙刷样品 C 的刷头部位进行非破坏性断层扫描。抽取样品 C 并截取刷头部位，设备型号为 RV-M，由江西锐威科技有限公司生产。采用 WorX XWT-300-CT 射线源，扫描电压为 100 kV，扫描电流为 500 μA，扫描功率为 90 W，分辨率为 20 μm，主要观察植毛孔内部的结构特征。

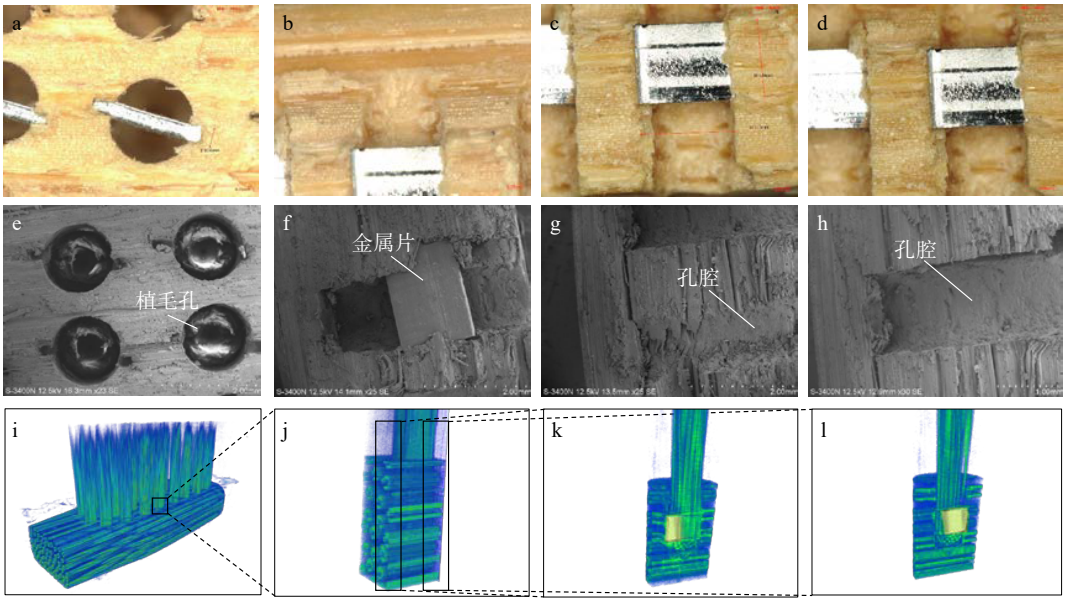
2 结果分析与讨论

2.1 植毛孔微观形貌结构与不同竹材密度的竹牙刷毛束拉力

为进一步明确竹牙刷植毛部位的微观形貌结构特征及其对毛束拉力性能的影响因素，本研究首先采用超景深显微镜、SEM 以及显微 CT 等多种高分辨率成像技术，对竹牙刷刷头区域植毛孔的内部结构进行了系统的观察与分析。同时，对塑料牙刷和不同密度等级竹材制成的竹牙刷毛束拉力进行了全面的实验研究。

2.1.1 植毛孔微观形貌结构

竹牙刷植毛区域的超景深显微图像（图 5a ~ d）显示：在植毛加工过程中，金属片的长边略大于植毛孔径，并与纤维方向成一定夹角，沿孔壁方向垂直插



a～d 为超景深拍摄图像，e～h 为 SEM 扫描图像，I～l 为显微 CT 设备扫描图像。

图 5　植毛孔微观形貌结构

Fig. 5　Micromorphology of implant-holes

入孔内，最终嵌置于孔腔中心位置。图 5b～d 清晰显示金属片嵌入并贴合于竹材中，表明植毛后金属片与竹材形成了较为稳固的物理结合关系。这种嵌合结构对提升毛束拉力性能具有重要意义。

竹牙刷植毛孔的 SEM 图像（图 5e～h）详细呈现了植毛孔位以及嵌入金属片与竹材接触界面的纤维组织和基本组织的破坏情况，揭示了金属片植入前后的微观结构特征及其与孔壁的界面关系。从图 5e 可见，金属片的长边略大于孔径，以形成对竹材的压入式嵌合。图 5f 显示金属片从孔口延伸至孔底部，植入深度约为 3 mm，孔腔壁面粗糙明显，存在竹纤维断面与微裂纹，表明植入过程中竹材经历了显著的机械应力作用。竹材内壁粗糙且存在纤维突起与纤维束残留，这种接触界面可有效增强摩擦系数，从而提升金属片的抗拉与阻止滑移能力。图 5g 与图 5h 展示了金属片被拔出后的孔壁情况，表明在金属片拉拔过程中，破坏形式主要表现为维管束与薄壁组织界面之间的分离和撕裂。

通过分析上述图像结果，嵌入金属片的周边主要由维管束和基本组织构成。经过渲染的显微 CT 扫描图像清晰展示了植毛孔中金属片、维管束与基本组织的位置关系（图 5i～l）。其中，蓝色和绿色分别代表竹材中的薄壁细胞基本组织与维管束结构，黄色部分代表嵌入孔中的金属片。图 5i 为刷头整体渲染结构图，图 5j 为单孔毛束及其固定竹材的整体渲染结构图，图 5k 和图 5l 分别为嵌入金属片左右两侧接触界面的情况。金属片嵌入方向与维管束纤维排列存在一定夹角，导致其宽边两侧所接触的界面有所不同。例如，嵌入金属片普遍存在一侧接触维管束（图 5k），而另一侧则嵌入于维管束之间的薄壁细胞组织中（图 5l）。在竹材结构中，维管束与薄壁细胞组织分别起到承受与传递载荷的作用[8]，这种接触界面差异会导致金属片在嵌入过程中形成非对称力学支撑状态。

综合图像分析结果可知，竹牙刷在植毛加工过程中，金属片通过“机械嵌合−组织包覆”机制与孔壁形成较强的结合力。竹材天然组织结构的密实性和分布特征，尤其是维管束的分布，对孔壁加固嵌入金属片起到了关键作用，为后续毛束拉力性能提供了微观结构基础。

2.1.2　不同竹材密度的竹牙刷毛束拉力

为探究不同密度竹材加工的竹牙刷与塑料牙刷在毛束拉力性能上的差异，对 A、B、C、D、E、F 六类竹牙刷及一次性塑料牙刷样品的毛束拉力数据进行了统计分析，并依据 GB 39669—2020《牙刷及口腔器具安全通用技术要求》绘制了毛束拉力性能的标准合格线（图 6）。

图 6a 显示，竹牙刷毛束拉力性能随竹材密度的增加而显著提高：当 $\rho < 0.65$ g/cm^3 时，毛束拉力为 12.63 N，而在 $\rho \geqslant 0.85$ g/cm^3 时提升至 27.27 N。此外，由图中可以看出，竹材 $\rho < 0.75$ g/cm^3 时所加工的竹牙刷的毛束拉力性能低于塑料牙刷，而大于该密度的竹材所加工的竹牙刷则高于塑料牙刷的毛束拉力性能。值得注意的是，毛束拉力的增长趋势并非线性，在低密度区间（$\rho < 0.70$ g/cm^3）内毛束拉力增幅相对较大，而在高密度区间（$\rho > 0.80$ g/cm^3）内增

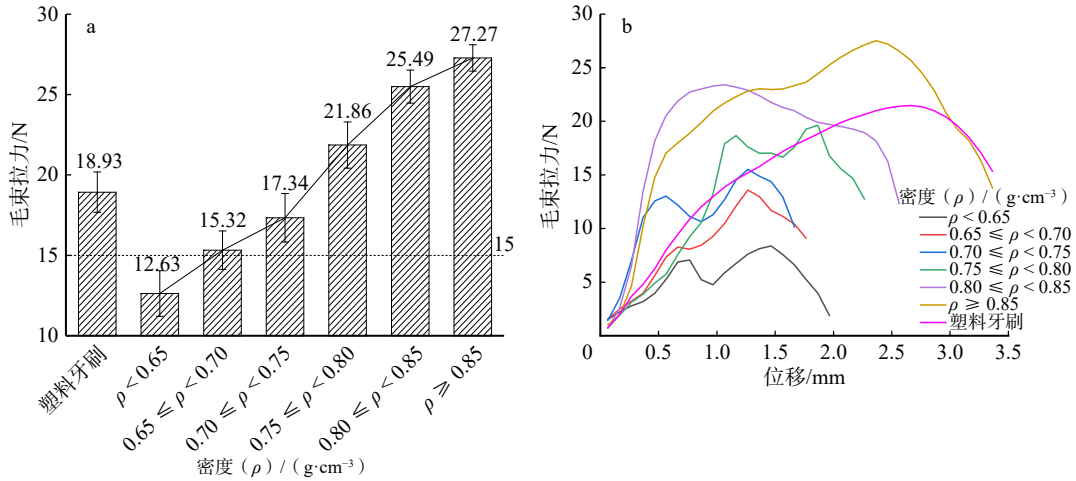


图 6 不同密度区间的竹牙刷毛束拉力性能(a)与测试破坏过程曲线(b)

Fig. 6 Tuft removal force performance of bamboo toothbrushes across different density ranges (a) and test failure process curves (b)

长幅度趋于减缓。这表明密度对毛束拉力性能的提升在低密度阶段更为显著。在竹材密度较低时，厚壁纤维细胞组织快速分化，维管束数量增加，其作为主要承载结构[9]，竹基材的力学强度显著提升，从而增强了植毛孔壁与固定金属片之间的结合力。而在密度较高时，组成维管束的厚壁纤维细胞组织分化程度趋于稳定[10]，整体结构变化不明显，因此毛束拉力性能的提升趋于稳定。

图 6b 展示了各密度区间竹牙刷样品以及塑料牙刷在毛束拉力测试过程中的位移–载荷曲线。塑料牙刷的拉伸曲线体现了无屈服韧性材料的特点，反映了塑料基材的稳定性和耐用性。而竹牙刷毛束拉力测试过程体现了竹材作为各向异性材料的固有特性，具体呈现了典型的“M”形走势，反映出毛束与孔壁之间的多阶段失效特征。由 2.1.1 中的植毛孔微观形貌结构可知，金属片在被拉拔过程中经过 2 个维管束位置，引起毛束拉力测试过程中的两个阶段。毛束拉力测试初期，随着载荷增加，金属片首先嵌入刷孔的第一道维管束结构并产生较高初始峰值，随着金属片结构的松动，载荷骤降；随着位移继续推进，金属片进入并夹紧固定在下一个维管束结构处，出现第二次力值上升并形成次峰，最终孔壁失去对金属片的约束，载荷迅速降低直至完全脱离。整个过程未出现毛束本体断裂的现象，说明毛束的破坏主要源于金属片与孔壁之间的失效，而非毛束本身的断裂。结合已有文献数据，单孔毛束载荷理论值可达 38 N[11−14]，而本试验所测最大值低于此极限值，故竹牙刷毛束拉力强度主要取决于固定金属片与孔壁的结合力。

在密度相对较低的样品 A、B、C 对应的拉力曲线中，第一个峰值随密度上升而增加，且第二个峰值的位移增量明显大于第一个峰值，体现出一定的塑性变形能力。这可能归因于竹材内部薄壁组织提供的韧性支撑[15]。在加工过程中，竹牙刷多以竹黄面作为植毛面，加工时固定金属片通常从维管束较稀疏的一侧推进至密集一侧，因此后者厚壁纤维组织比例更高[16]，拉伸过程体现出“屈服–抵抗–滑移”的力学特征。

对于 0.75 ≤ ρ < 0.80 的样品 D，其力–位移曲线表现出峰值右移，且曲线存在明显的锯齿状波动，说明破坏过程中载荷传递复杂，金属片与维管束结构之间发生多次滑移与卡滞，反映出维管束更高的致密度所带来的不稳定界面变化。

在密度相对较高的样品 E 与 F 拉伸曲线则展现出完全不同的破坏特征，拉伸曲线更加平滑，强度峰值更高，整体呈现出单峰趋势，未出现明显的阶段性载荷变化。这表明在密集的维管束结构中，金属片更牢固地被卡紧，直至破坏发生前，载荷分布更为均匀，过程缺乏明显的“阶段滑移”，具有一定的脆性破坏特征。

综上分析，竹材密度显著影响毛束拉力性能，密度越高，竹材结构越致密、维管束越完整，从而增强了金属片与孔壁之间的结合强度。结合牙刷标准 GB 39669—2020《牙刷及口腔器具安全通用技术要求》与本研究中的结果，确保竹牙刷产品质量，所选用竹材的气干密度应控制在不低于 0.70 g/cm^3。若要使竹牙刷与塑料牙刷具备同等毛束拉力性能，保持市场竞争力，其加工所用的竹材密度应不低于 0.75 g/cm^3。

2.2 不同应用场景对竹牙刷毛束拉力的影响

结合竹牙刷的实际应用场景，设计并实施了水浴处理试验，以模拟竹牙刷在单次使用与反复使用过程中毛束拉力的性能变化。通过该实验，系统评估了不同应用场景下竹牙刷的耐用性，并揭示了湿

热环境对毛束拉力性能的潜在影响。

2.2.1　单次使用过程中竹牙刷毛束拉力性能

为模拟竹牙刷在单次使用过程中的毛束拉力性能变化规律，选取接近人体体感温度的 35 ℃ 与 100 ℃ 进行水浴处理试验，并设置不同处理时间，考察其对竹牙刷毛束拉力性能的影响。达到预定的水浴处理时间后，立即进行毛束拉力性能测试。各处理组的毛束拉力性能结果见图 7a，破坏过程曲线见图 7b（35 ℃）与图 7c（100 ℃）。

从图 7a 可以看出，水浴处理会不同程度地削弱竹牙刷的毛束拉力性能。在 35 ℃ 下处理 10 min 后，毛束拉力下降了 5.42%；而在 100 ℃ 下处理 10 min，毛束拉力的下降幅度达到了 10.84%。此后，拉力下降趋势逐渐趋于平缓。在 35 ℃ 下，1 h 内毛束拉力仍维持在国家标准 15 N 以上；而在 100 ℃ 条件下，处理至 40 min 时，毛束拉力首次低于标准线，降幅为 3.73%。这表明较高温度的水浴处理对毛束拉力性能的影响更为显著，尤其是在处理时间较长时，更容易导致竹材结构的损伤。毛束拉力性能下降的根本原因在于竹材在水浴过程中吸水膨胀。水分子进入竹材的多孔结构，导致纤维之间发生相对滑移[17]，从而降低了纤维间的结合强度。这种“软化效应”削弱了孔壁对金属固定片的咬合作用，使得在拉拔过程中更容易发生脱离[18−19]。值得注意的是，在 35 ℃ 下处理至 50 min 及 1 h 时，毛束拉力反而出现了小幅回升。这可能是由于竹材结构在水浴过程中充分润胀，孔壁回缩增强了其对金属片的挤压力，从而提升了结合强度，使毛束拉力有所回升。

图 7b 与图 7c 揭示了水浴处理对拉伸破坏过程的影响。无论是 35 ℃ 还是 100 ℃，处理后的位移−载荷曲线均表现出强化阶段明显、屈服阶段极短的特征，呈现脆性断裂行为，峰值载荷低于对照组。由图 7b 与图 7c 可知，随着水浴处理时间的延长，两实验组中竹牙刷的毛束拉力测试过程中，毛束拉力力值的增速逐渐放缓。此外，在拉力曲线的上升阶段，35 ℃ 处理组的拉力上升斜率与对照组接近，表明低温水浴处理对竹材整体结构的初始刚度影响有限；而 100 ℃ 处理组的斜率显著减缓，表明高温显著降低了竹材对金属片拉拔的阻抗力。因此，高含水率的竹基材降低了毛束拉力测试过程中的拉伸模量。这主要是由于水分子渗入竹材的维管束结构，对导管和筛管等“增强体”产生软化作用[20]，使其在拉拔过程中失去支撑能力，而由薄壁细胞构成的“基体”本身强度较低，其断裂形式整体倾向于脆性破坏[21]。综上所述，在日常使用温度下，竹牙刷即便长时间浸泡，也不会引起毛束拉力性能的实质性破坏；而在

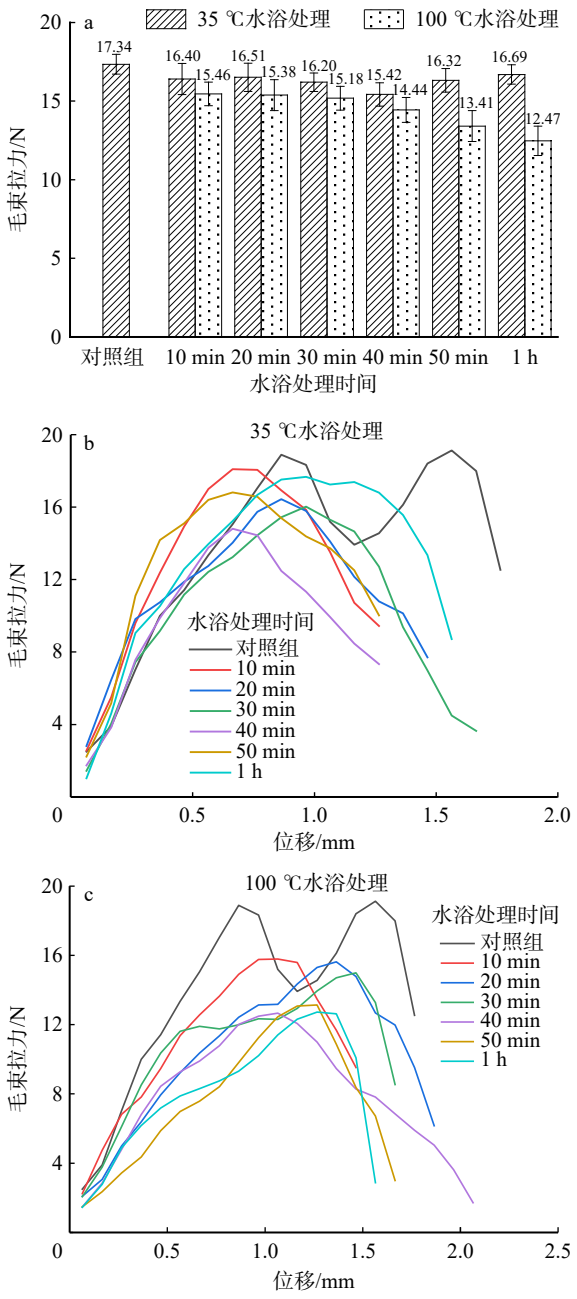


图 7　35 和 100 ℃ 温度下不同水浴处理时间的竹牙刷毛束拉力性能（a）与测试破坏过程曲线（b、c）

Fig. 7　Tuft removal force performance of bamboo toothbrushes at 35 and 100 ℃ for various water bath treatment times (a) and test failure process curves (b, c)

100 ℃ 沸水中，处理时间控制在 30 min 内，仍可保证毛束拉力性能满足 GB 39669—2020《牙刷口腔器具安全通用技术要求》的最低要求。因此，在实际使用中，用户可以通过短时间开水浸泡的方式实现除菌目的，既能满足卫生需求，也不影响竹牙刷的毛束拉力性能。这表明竹牙刷在单次使用场景下具备良好的结构安全性和使用可靠性。

2.2.2　反复使用过程中竹牙刷毛束拉力性能

为模拟竹牙刷在日常反复使用过程中的毛束拉力性能变化规律，本研究选用人体皮肤可接受的临

界最高温度 70 ℃ 的水浴条件进行吸水处理，并通过吸水−干燥循环处理模拟室温下竹牙刷的反复使用过程。图 8 展示了不同循环处理周期下竹牙刷毛束拉力性能的变化趋势（图 8a）及其对应的破坏过程曲线（图 8b）。

图 8a 显示，随着循环处理周期的延长，竹牙刷毛束的拉力值整体呈下降趋势。在第一个处理周期后，毛束拉力下降了 0.69%；随后在 2 ~ 6 次循环处理中，毛束拉力值缓慢下降。直至第六次循环处理后，毛束拉力值仍高于国家标准要求的 4% 以上，这表明竹牙刷在多次湿−干循环后仍具备良好的结构稳定性和毛束拉力性能。结合前述 2.2.1 节中 35 ℃ 水浴处理的拉力表现可进一步推断，竹牙刷在干燥阶段的毛束拉力性能有所回升，表现出一定的“可恢复性”。这是由于干燥过程促使竹材结构中多余水分挥发，降低了含水率，从而改善了其物理力学性能[22−23]，进而增强了竹材孔壁与固定金属片之间的结合强度。

从图 8b 中可以观察到，经过吸水−干燥处理的竹牙刷样品，其拉伸破坏曲线在形态上与 2.2.1 节中湿态测试下的拉力曲线较为相似，主要表现为短暂的屈服阶段与脆性断裂特征。然而，相比于完全湿态下的样品，干燥后样品的拉力峰值更高，这说明干燥过程对恢复部分结构强度具有显著作用。尽管竹材内部仍可能残留少量水分，但干燥环境下的孔隙收缩以及界面结合强度提升，在一定程度上缓解了吸水过程中所造成的竹材结构削弱。

综上所述，本试验通过临界水温条件下的湿−干循环处理，有效模拟并评估了竹牙刷在长期使用情境下的耐用性。结果表明，在反复使用条件下，竹牙刷的毛束拉力性能仍可满足一周内的日常使用需求。因此，在实际应用中，建议用户在每次使用后将竹牙刷置于干燥通风环境中，借助干燥过程维持其结构强度与使用性能，从而延长使用寿命并保持良好的卫生状态。

2.3 不同植毛位置对竹牙刷毛束拉力的影响

由于竹材具有各向异性特征，其在加工过程中不同表面的物理性能存在显著差异。为提升竹牙刷的毛束拉力性能，本研究探讨了竹青面和竹黄面两种植毛方式对毛束拉力性能的影响，同时进一步分析了同一刷头内不同孔位的植毛效果，以充分发挥竹材天然结构的优势，优化其在竹牙刷生产中的应用。

2.3.1 竹青/竹黄面植毛的竹牙刷毛束拉力

在本实验中，选取了 20 支竹牙刷样品 C 的竹青面植毛样品，测试其毛束拉力性能，并与 2.1.2 节中竹黄面植毛的竹牙刷样品 C 数据进行对比。由图 9a 可见，竹青面植毛样品的毛束拉力均值较竹黄面植毛样品提升了 9.28%。这一差异主要归因于竹材维管束在竹材中的分布规律：沿竹材壁厚方向，从竹青面至竹黄面，维管束数量逐渐减少[24]。由于维管束是竹材中承受载荷的主要结构[25]，在竹青面打孔植毛可获得更多数量和密度更高的维管束支撑，从而增强孔壁与金属片的结合强度，提升毛束与金属片被拉拔时的阻力。从图 9b 的拉伸破坏过程曲线可进一步佐证上述结论，竹青面植毛样品在加载过程中呈现出更明显的单一强化阶段，且曲线斜率整体高于竹黄面样品，表明其具有更高的拉伸模量[26]。这说明竹青面密集的维管束不仅提升了结构强度，也改善了植毛区域的力学性能，使得在拉拔过程中毛束不易脱落，表现出更优的抗破坏能力。综上所述，为充分发挥竹材结构与强度的优势，在竹牙刷的植毛加工工艺中，优选竹青面作为打孔植毛面，将有助于显著提升竹牙刷产品的整体质量与使用寿命。

2.3.2 刷面不同位置的竹牙刷毛束拉力

为深入研究刷头不同植毛孔位对竹牙刷毛束拉力性能的影响，本研究从 20 支竹牙刷中提取相同孔位的毛束拉力数据，并按位置划分共获得 34 组数据。

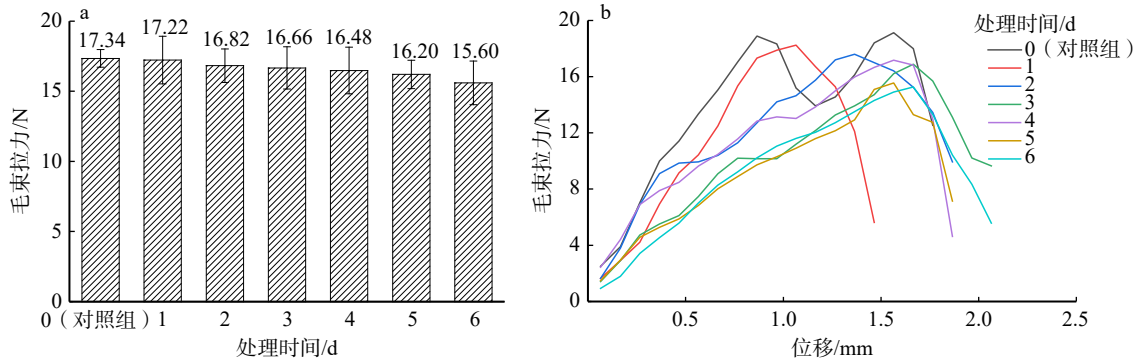


图 8 70 ℃ 吸水−干燥循环处理下竹牙刷毛束拉力性能变化趋势（a）与测试破坏过程曲线（b）

Fig. 8 Variation trend of tuft removal force performance of bamboo toothbrushes under 70 ℃ wetting-drying cycling (a) and test failure process curves (b)

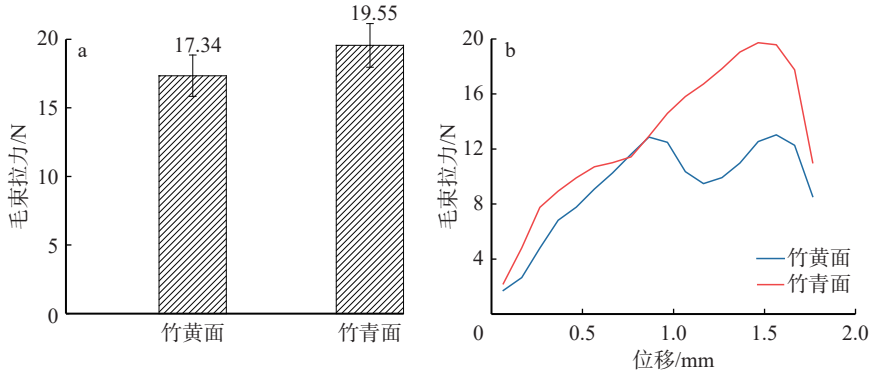


图 9　竹青面与竹黄面植毛的竹牙刷毛束拉力(a)与测试破坏过程曲线(b)

Fig. 9　Tuft removal force of bamboo toothbrushes with tufting on the outer (green) vs. inner (yellow) sides (a) and test failure process curves (b)

为减小异常值的影响，数据处理时剔除了每组中的最大值与最小值。在相同植毛工艺条件下，各孔位的毛束拉力均值分布如图 10 所示。整体来看，毛束拉力值在 15.37 ~ 20.25 N 之间波动，整体平均值为 17.81 N。由图中趋势可见，刷头边缘孔位的毛束拉力普遍高于中心内部位置，呈现出明显的空间差异性分布。其中，刷头边缘孔位的毛束拉力均值为 18.21 N，高于整体刷头平均毛束拉力性能；刷头内部孔位的毛束拉力均值为 17.23 N，低于整体刷头平均毛束拉力性能。为进一步判断该差异是否具有统计学意义，对刷头内圈与外圈孔位的毛束拉力值进行了方差分析(表 1)。结果表明，p 值小于 0.05，说明在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 条件下，内外圈孔位之间的毛束拉力差异具有统计显著性。这一结果表明，刷头边缘位置的结构强度显著优于内部位置，不同孔位间存在明显的相互影响机制。

造成这种差异的原因主要包括两个方面。首先，竹材的各向异性决定了其在干燥处理过程中不同位置的干缩速率存在差异。已有研究表明，竹条边缘区域的干缩速率通常高于内部区域[27]，进而导致该区域结构更加致密，毛束孔壁与金属片之间的结合力增强，从而提高了毛束拉力性能[28]。其次，在加工过程中，刷头边缘常作为与铣刀和固定装置接触的主要部位，其应力相对集中[29]，这种预应力效应可使孔壁结构局部强化，因此刷头边缘位置的结构强度大于内部位置。相对于内部位置，在边缘位置植毛时，毛束与金属片的拉拔阻力较大。值得注意的是，这种结构强度的空间分布不仅影响竹牙刷产品的初始力学性能，还具有实际应用意义。刷头边缘位置在储存、运输及使用过程中更容易受到外部机械冲击，因此其更高的结构强度有助于提升竹牙刷的整体抗损性，这一特点为更好地满足竹牙刷产品的功能性要求创造了条件。

综上所述，不同植毛孔位对毛束拉力性能存在显著影响，边缘孔位表现出更优的力学性能。在实际生产中，可结合这一规律，通过差异化设计策略优

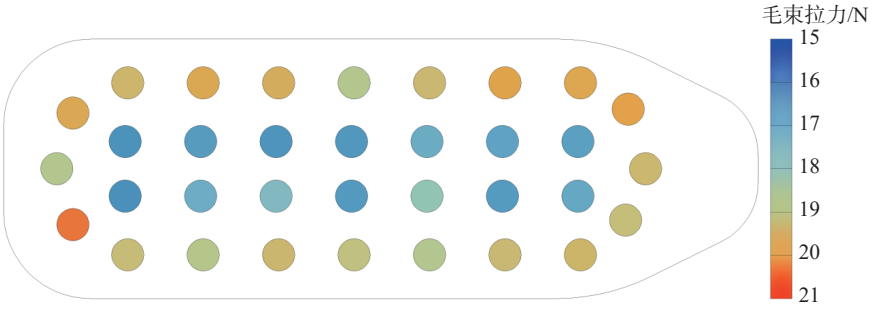


图 10　竹牙刷的刷面毛束拉力分布

Fig. 10　Distribution of tuft removal force on bamboo toothbrush surface

表 1　竹牙刷内外圈孔位毛束拉力方差分析

Tab. 1　ANOVA of tuft removal force for inner vs. outer ring hole positions in bamboo toothbrushes

因变量	误差来源	平方和	自由度	均方	F值	p值
毛束拉力	组间	7.86	1	7.86	8.05	< 0.05
	组内	31.23	30	0.98		
	总和	39.09	31			

化孔位分布与加工参数，以进一步提升竹牙刷的质量可靠性与使用耐久性。

3 结　　论

本研究围绕竹牙刷产品开展了系统性研究，利用高分辨率成像设备对竹牙刷植毛孔结构进行了微观形貌观察。通过对不同密度竹材、植毛表面加工的竹牙刷以及塑料牙刷进行毛束拉力性能测试，明确了竹材密度的选用范围及加工工艺。同时，模拟了实际应用场景中的竹牙刷毛束拉力性能，得出以下具体结论。

（1）通过超景深显微镜、SEM 和显微 CT 图像分析，发现嵌入金属片被固定在竹材的维管束和薄壁细胞两相组织中。这种独特的结合界面增强了金属片在孔腔内的嵌合与稳定性，从而有效提升了竹牙刷毛束的固定与连接性能。

（2）竹牙刷毛束拉力性能与所用竹材密度呈显著正相关。为满足 GB 39669—2020《牙刷及口腔器具安全通用技术要求》中毛束拉力不低于 15 N 的要求，建议选用密度不低于 0.70 g/cm^3 的竹材作为加工原料。为进一步提升竹牙刷的市场竞争力，对标塑料牙刷的毛束拉力性能，建议选用密度在 0.75 g/cm^3 以上的竹材。

（3）通过模拟实际应用场景中的竹牙刷毛束拉力性能测试发现，常温水使用对竹牙刷毛束拉力性能的影响较小。经过吸水−干燥循环实验验证，竹牙刷在短期内可反复使用。为确保更佳的使用效果，建议在使用前采用高温水预处理牙刷以去除可能的霉菌残留，使用后及时静置干燥，避免长时间置于潮湿环境中，从而延长其使用周期。

（4）研究发现，受竹材本身材性及加工过程影响，刷头边缘孔位的毛束拉力性能略高于内部孔位。这种分布特征有助于增强产品在储存和运输过程中的稳定性。此外，相较于竹黄面植毛，竹青面植毛工艺显著改善了毛束拉力性能。因此，为充分发挥竹材结构与强度的优势，建议在竹牙刷加工过程中优先选用竹青面进行打孔与植毛。

综上所述，竹材密度是决定竹基材与毛束连接组件结合性能的关键因素。竹材天然纤维结构及其各向异性特征，为嵌入式部件的固定提供了理想的微观结构基础。本研究所得成果可为其他“以竹代塑”产品中竹材与功能部件结合性能的优化提供理论依据和实践指导，具有较强的普适性。然而，本研究尚未涉及竹牙刷在长期使用过程中细菌滋生情况及口腔健康风险的评估，存在一定局限性。未来研究应进一步关注竹牙刷在反复使用条件下竹材腐蚀及抗菌性能的变化规律，明确其合理使用周期。展望未来，针对竹材与其他材料在实际应用场景中的连接与结合性能关系的研究，将有助于推动“以竹代塑”产品生产工艺的标准化，提升竹制品的整体市场竞争力，为建设资源节约型和环境友好型社会贡献力量。

参 考 文 献

[1] Borrelle S B, Ringma J, Law K L, et al. Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution [J]. Science, 2020, 369: 1515−1518.

[2] 李依然, 傅金和. 全球禁塑政策与竹产业发展机遇 [J]. 世界竹藤通讯, 2021, 19(4): 1−7.
Li Y R , Fu J H. Global plastic ban policy and development opportunities of bamboo industry [J]. World Bamboo and Rattan, 2021, 19(4): 1−7.

[3] Zhang Y H, Ma H X, Qi Y, et al. Study of the long-term degradation behavior of bamboo scrimber under natural weathering [J]. npj Materials Degradation, 2022, 6(1): 63.

[4] Yu H, He S, Zhang W, et al. Discoloration and degradation of bamboo under ultraviolet radiation [J]. International Journal of Polymer Science, 2021(1): 1−10.

[5] 林树燕, 张涵姣, 杨青, 等. “以竹代塑”发展优势与竹资源高效培育面临的挑战 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2025, 49(4): 1−11.
Lin S Y, Zhang H J, Yang Q, et al. The development advantages of “bamboo as a substitute for plastic” and the challenges faced in the efficient cultivation of bamboo resources [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2025, 49(4): 1−11.

[6] Castanet E, Li Q, Dumée L F, et al. Structure-property relationships of elementary bamboo fibers [J]. Cellulose, 2016, 23(6): 3521−3534.

[7] 于文吉, 江泽慧, 叶克林. 竹材特性研究及其进展 [J]. 世界林业研究, 2002(2): 50−55.
Yu W J, Jiang Z H, Ye K L. Characteristics research of bamboo and its development [J]. World Forestry Research, 2002(2): 50−55.

[8] 郝秀, 李澍农, 杨春梅, 等. 外力作用下竹材不同尺度的断裂行为及机制 [J]. 林业科学, 2023, 59(11): 118−123.
Hao X, Li S N, Yang C M, et al. Crack behavior and mechanism of gradient structure in bamboo under grain splitting and radial compression [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2023, 59(11): 118−123.

[9] 冼杏娟, 冼定国. 竹材的微观结构及其与力学性能的关系 [J]. 竹子研究汇刊, 1990(3): 10−23.
Xian X J, Xian D G. The relationship of microstructure and mechanical properties of bamboo [J]. Journal of Bamboo Research, 1990(3): 10−23.

[10] Dixon P G, Gibson L J. The structure and mechanics of moso bamboo material [J]. Journal of the Royal Society, Interface, 2014, 11(99): 20140321.

[11] 康成虎. 表面修饰凹凸棒土填充 pbt 基复合材料的力学性能 [J]. 材料导报, 2024, 38(18): 275−280.
Kang C H. Mechanical properties of pbt matrixed-composites filled with surface modified attapulgite [J]. Materials Reports, 2024, 38(18): 275−280.

[12] Nga P T H, Phuc T H, Quang N D, et al. Effect of glass fibre percentage on the tensile strength of PBT/glass fibre blends [J]. International Journal of Nanotechnology, 2024, 21(7−12): 584−594.

[13] Pande K, Chopra S, Deshmukh A D, et al. Cryogenic treatment: processing segment to tailor the interface and improve mechanical performance of impact modified PET/PBT blends [J]. Results in Materials, 2023, 20: 100451.

[14] Mane P, Keche A J, Chopra S, et al. Effect of polycarbonate (PC) content on the mechanical properties, morphology and transesterification mechanism of PBT/PC immiscible blends [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2024, 141(36): e55902.

[15] 王福利, 王献轲, 周佳硕, 等. 竹材薄壁组织拉伸性能及其变异规律的研究 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(11): 130−137.
Wang F L, Wang X K, Zhou J S, et al. Tensile properties and its variation pattern of bamboo parenchyma [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(11): 130−137.

[16] 李喆喆, 施江靖, 陈红, 等. 竹材非对称性弯曲行为对弯曲构件性能的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(4): 168−176.
Li Z Z, Shi J J, Chen H, et al. Influence of asymmetric bending behavior of bamboo on performance of curved components [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(4): 168−176.

[17] Zhao W J, Zhang J, Zhang W F, et al. Effect of bamboo unit morphology on the preparation of bamboo fibers by steam explosion [J]. Industrial Crops and Products, 2023, 202: 117066.

[18] 杨春梅, 李月茹, 田心池, 等. 密度和含水率对竹基纤维复合材料抗弯性能的影响 [J]. 木材科学与技术, 2023, 37(3): 44−50.
Yang C M, Li Y R, Tian X C, et al. Effects of density and moisture content on flexural properties of bamboobased fiber composites [J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2023, 37(3): 44−50.

[19] Wang H, Wang H K, Li W J, et al. Effects of moisture content on the mechanical properties of moso bamboo at the macroscopic and cellular levels [J]. BioResources, 2013, 8(4): 5475−5484.

[20] do Amaral L M, Molari L, Savastano H. Swelling and shrinking behaviour of bamboo and its application on a hygro-mechanical model [J]. Wood Science and Technology, 2025, 59(2): 36.

[21] Zhang X, Li J, Yu Z, et al. Compressive failure mechanism and buckling analysis of the graded hierarchical bamboo structure [J]. Journal of Materials Science, 2017, 52(12): 6999−7007.

[22] Lei J, Zhang J, Zhang W, et al. The effects of bamboo spoon raw material flexural properties on machining performance [J]. Journal of Natural Fibers, 2024, 21(1): 2393639.

[23] Chen G W, Luo H Y, Yang H Y, et al. Water effects on the deformation and fracture behaviors of the multi-scaled cellular fibrous bamboo [J]. Acta Biomaterialia, 2018, 65: 203−215.

[24] Shi J J, Li Z Z, Chen H, et al. Optimizing processing strategies for eco-friendly bamboo curved components: insights from bamboo internode and node differences [J]. Industrial Crops and Products, 2024, 216: 118823.

[25] 周爱萍, 黄东升, 车慎思, 等. 竹材维管束分布及其抗拉力学性能 [J]. 建筑材料学报, 2012, 15(5): 730−734.
Zhou A P, Huang D S, Che S S, et al. Distribution of vascular bundles of bamboo and its tensile mechanical performances [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(5): 730−734.

[26] 顾少华, 陈季荷, 张文福, 等. 梯度结构对竹束纤维复合材料界面失效的影响 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(8): 4065−4073.
Gu S H, Chen J H, Zhang W F, et al. Effect of gradient structure on the interface failure of bamboo bundle fiber composite material [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(8): 4065−4073.

[27] Liu R, Zhang S, Semple K, et al. Precise microcasting revealing the connectivity of bamboo pore network [J]. Industrial Crops and Products, 2021, 170: 113787.

[28] Low I M, Che Z Y, Latella B A. Mapping the structure, composition and mechanical properties of bamboo [J]. Journal of Materials Research, 2006, 21(8): 1969−1976.

[29] Deng L, Li P C, Chu C H, et al. Symplasmic phloem unloading and post-phloem transport during bamboo internode elongation [J]. Tree Physiology, 2020, 40(3): 391−412.

（责任编辑　吴　娟
责任编委　于志明）