

---

# 清华大学冯平法教授团队——多尺度研究超声振动切削Nomex蜂窝复合材料 MDPI Materials

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/39421.html>

*本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！*

**清华大学冯平法教授团队——多尺度研究超声振动切削Nomex蜂窝复合材料 MDPI Materials。** 论文标题：Multi-Scale Study on Ultrasonic Cutting of Nomex Honeycomb Composites of Disc Cutters

论文链接：<https://doi.org/10.3390/ma18153476>

期刊名：Materials

期刊主页：<https://www.mdpi.com/journal/materials>

## 文章导读

2025年7月，清华大学深圳国际研究生院冯平法教授、冯峰副教授课题组与中国航空工业成都飞机工业（集团）有限责任公司、深圳市青鼎装备有限公司，在Materials期刊在线发表了题为Multi-Scale Study on Ultrasonic Cutting of Nomex Honeycomb Composites of Disc Cutters的研究论文。针对Nomex蜂窝复合材料传统加工中极易出现的毛刺、撕裂与结构变形等难题，构建了纤维-孔格-表面多尺度分析框架，系统揭示了超声振动辅助圆盘刀切削在降低切削力、抑制孔格剪切变形、减少微观毛刺方面的协同机制。该项工作为航空蜂窝的高完整、低损伤加工提供了可复制的理论模型与工艺路线，同时对高精密复合材料型面加工具有重要工程指导意义。

## 研究过程与结果

作者在文中构建了一个多尺度分析框架，从微观、介观和宏观三个尺度深入研究了超声振动辅助切削对Nomex蜂窝复合材料加工性能的影响。在微观尺度上，研究发现超声振动能够减轻应力集中，从而缩短纤维长度，减少毛刺的形成。在介观尺度上，通过弹性屈曲和塑性屈服模型分析表明，超声振动降低了材料的剪切强度，并改变了变形模式。在宏观尺度上，作者对比了有无超声振动辅助切削时的切削行为，结果表明，超声振动引起的间歇接触效应显著降低了切削力。具体而言，在40  $\mu\text{m}$ 的振幅下，切削力相比无超声振动时降低了约29.7%，且平均预测误差低于8.6%。与传统加工方法相比，超声振动能够保持蜂窝结构原有的120°几何形状，并将毛刺长度减少36%。

为了验证多尺度分析框架的有效性，作者进行了系统的实验研究。实验平台基于五轴加工中心，

---

集成了专门用于蜂窝复合材料加工的超声功率系统。通过六轴测力仪采集切削力数据，并利用高分辨率激光位移传感器精确监测超声振动的振幅。实验中，作者设计了正交切削试验，分别在有无超声振动的条件下进行，以比较切削力、结构变形和毛刺长度的差异。实验结果表明，超声振动辅助切削在不同工艺参数组合下均能有效降低切削力，减少毛刺长度，并优化蜂窝结构的变形行为。

基于实验数据，作者进一步建立了多参数经验分析模型，综合考虑了切削深度、切削宽度、进给率、主轴转速、刀具半径和超声振幅等多个工艺变量及其相互作用，以更准确地预测切削力。该模型在不同超声和加工条件下具有更好的泛化能力，其预测误差范围在 $\pm 20\%$ 以内，平均误差为8.6%，验证了模型的准确性和实用性。

在介观尺度上，作者通过分析蜂窝单元的剪切变形来评估结构损伤程度。实验结果表明，超声振动能够减小蜂窝单元的变形角度，从而降低结构损伤。基于实验数据，作者提出了一个损伤面积预测模型，该模型考虑了进给率和超声振幅对损伤面积的影响，其预测误差小于10.5%。

在微观尺度上，作者统计分析了不同进给率和振幅下观察区域中毛刺的平均最大长度。结果表明，超声振动能够显著降低毛刺长度，最大降低幅度可达36.7%。基于实验数据，作者提出了一个毛刺长度预测模型，该模型考虑了进给率和超声振幅对毛刺长度的影响，其预测误差为5.6%。

综上所述，本研究通过多尺度分析框架和系统的实验研究，深入揭示了超声振动辅助切削对Nomex蜂窝复合材料加工性能的影响机制，并建立了相应的预测模型，为航空蜂窝材料的高精度加工提供了理论指导和实践参考。

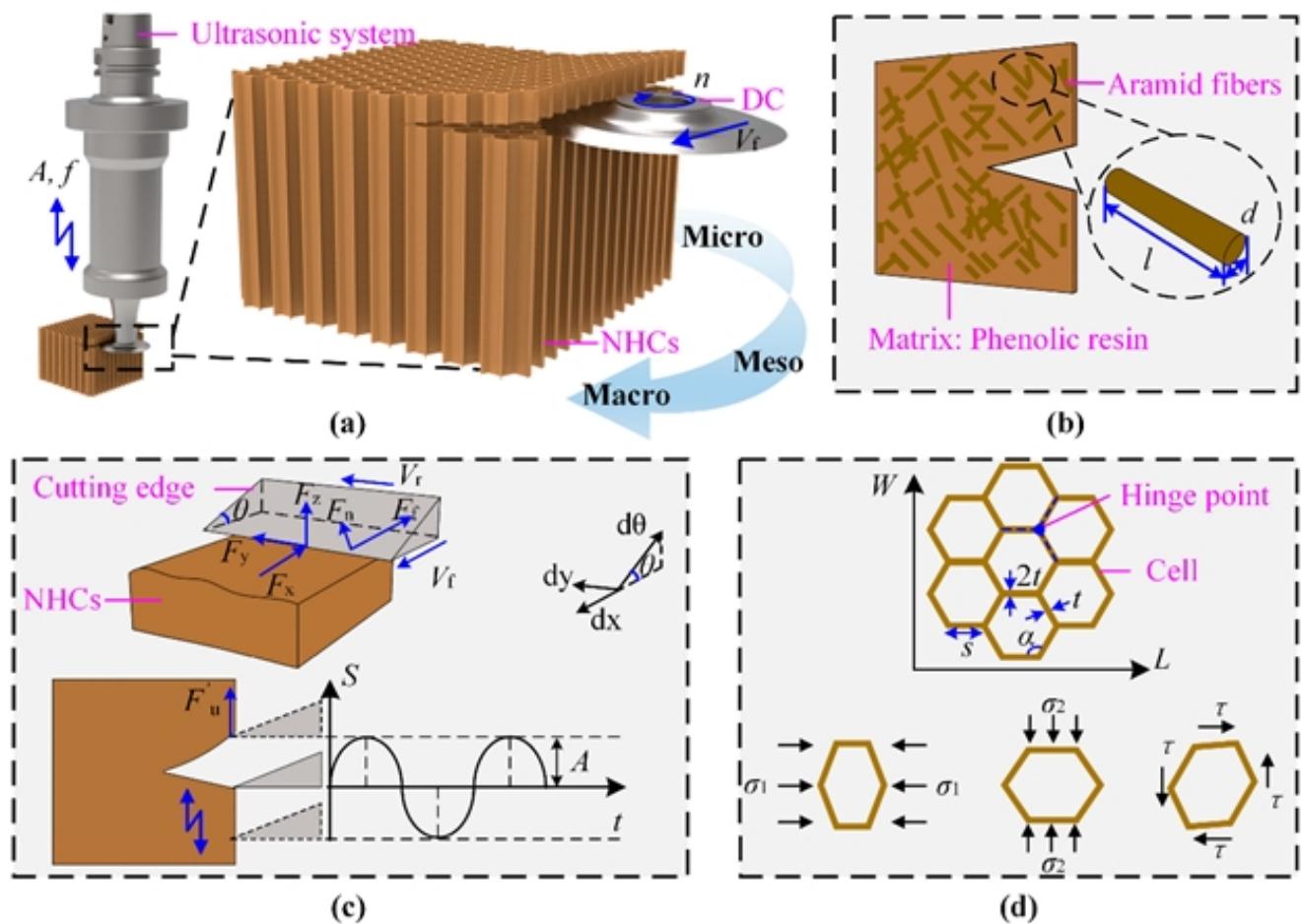


图1. Nomex蜂窝复合材料的多尺度分析：（a）超声振动辅助切削过程示意图；（b）微观尺度展示纤维-基体形态；（c）宏观尺度展示在超声振动下的力学分析和间歇切削行为；（d）介观尺度展示蜂窝孔格单元的变形。

## 研究总结

本文通过构建多尺度分析框架，对超声振动辅助切削Nomex蜂窝复合材料的加工行为进行了深入研究，系统探讨了超声振动在微观、介观和宏观三个尺度上的影响机制及其对加工质量的提升作用。研究表明，超声振动在宏观尺度上显著降低了切削力，最大降幅度可达29.7%（振幅为 $40\mu\text{m}$ 时），并通过间歇接触机制优化了切削过程中的力学响应，提高了加工效率和稳定性。在介观尺度上，超声振动改变了蜂窝单元的变形行为，降低了剪切强度，减小了结构损伤，通过分析蜂窝单元的变形角度，发现超声振动能够使蜂窝单元的变形角度减小，从而降低结构损伤。在微观尺度上，超声振动显著减少了毛刺的形成，最大毛刺长度降低了36.7%，通过统计分析不同工艺参数下的毛刺长度，发现超声振动能够有效减少纤维拔出和基体撕裂，从而降低毛刺长度。基于实验数据建立的多参数经验分析模型、损伤面积预测模型和毛刺长度预测模型，能够准确预测不同工艺参数下的切削力、损伤面积和毛刺长度，分别为8.6%、10.5%和5.6%的预测误差，为实际加工过程中的参数优化提供了有力的理论支持和实践参考。这些实验结果有力地支持了超声振动辅助切削在改善Nomex蜂窝复合材料加工质量方面的有效性，为纤维增强复合材料的高精度加工提供了重要的理论指导和实践参考，未来的研究可以进一步探索非线性模型或采用数据驱动的方法来提高预测模型的泛化能力，以更好地适应复杂耦合条件下的工艺参数优化，并将这些研究成果应用于实际工业生产中，如航空航天领域，将进一步推动超声振动辅助加工技术的发展和

---

应用。

## Materials 期刊介绍

主编：Maryam Tabrizian, McGill University, Canada

主要关注材料科学与工程研究相关各个领域的最新研究成果，包括但不限于高分子、纳米材料、能源材料、复合材料、碳材料、多孔材料、生物材料、建筑材料、陶瓷、金属等，以及材料物理化学、催化、腐蚀、光电应用、结构分析和表征、建模等。

2024 Impact Factor 3.2 (JCR Q2\*) 2024 CiteScore 6.4 (Scopus Q1\*) Time to First Decision 15.2 Days  
Acceptance to Publication 3.5 Days

\*JCR Q2 at PHYSICS, APPLIED and METALLURGY METALLURGICAL ENGINEERING Categories

\*Scopus Q1 at Condensed Matter Physics Category

来源：Materials

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发