

复合材料高质量制孔技术研究

詹建国

中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西 西安 710089

摘要：本文提出了一种针对飞机复合材料的高质量制孔方法，系统阐述了复合材料的特性、制孔要求以及影响制孔质量的关键因素。新方法通过综合应用材料科学、切削力学和先进制造技术，优化刀具设计、切削参数和辅助技术，实现对复合材料制孔过程的全面优化。实验结果表明，该方法在提高孔径精度、孔壁表面质量和减少制孔损伤方面效果显著，相比传统制孔方法具有更高的加工效率和更好的综合性能。

关键词：飞机复合材料；高质量制孔；方法

引言：随着航空技术的飞速发展，飞机复合材料因其卓越的性能成为现代航空制造领域的核心材料。然而，复合材料的高硬度、低导热性和各向异性等特性，使得其制孔过程面临诸多挑战，如孔径精度控制难、孔壁表面质量差及易产生热损伤和机械损伤等。因此，探索一种高效、高质量的复合材料制孔方法，对于提升飞机制造精度、延长飞机使用寿命及提高飞行安全具有重要意义。

1 飞机复合材料的特性及制孔要求

1.1 飞机复合材料的特性

飞机复合材料作为现代航空制造业的核心材料，其特性显著优于传统金属材料，为航空工业的发展带来了革命性的变革。第一，飞机复合材料具有极高的比强度和比模量，即在相同质量下，其强度和刚度远超钢铁和铝合金等传统材料，这使得飞机结构在保持强度要求的同时，能够大幅度减轻重量，提高飞行性能并降低燃油消耗。据统计，采用复合材料的飞机结构可以比传统金属材料减轻30%至50%的重量，显著提升航空器的载荷能力和续航能力。第二，飞机复合材料还具备出色的耐腐蚀性和耐候性，能够耐受恶劣的气候和环境条件，延长飞机的使用寿命并降低了维护成本。另外，复合材料的绝缘性能也十分优异，能够有效避免电化学腐蚀和电磁干扰等问题，为飞机的安全飞行提供有力保障。同时，复合材料的抗疲劳性能也远高于传统材料，能够在长时间飞行过程中保持稳定的结构性能，确保航空器的安全可靠。第三，飞机复合材料的成型性能良好，可以根据不同的航空器形状、需求和造型进行自由设计和成型，提高了航空器的外观优美度和空气动力性能。

1.2 飞机复合材料制孔的要求

飞机复合材料的制孔工艺是制造过程中的重要环节，其要求严格且复杂。（1），制孔过程必须精确控

制孔径和孔位的精度，以满足飞机结构的装配要求。由于复合材料结构的特殊性，孔公差范围通常要求控制在 $\pm 0.02 \sim 0.04\text{mm}$ 之间，对于高精度要求的孔径，甚至需要进行铰削加工以确保精度。（2）制孔过程中需要避免对复合材料产生热损伤和机械损伤。复合材料对高温和机械冲击较为敏感，因此制孔时需要使用合适的刀具和冷却系统，以降低切削温度并减少切屑对孔壁的损伤。同时，加工过程中还需严格控制切削参数，如切削速度、进给量和切削深度等，以确保加工质量和加工效率^[1]。（3）制孔后还需对孔壁进行清洁和处理，以去除切屑和毛刺等残留物，防止其对装配和使用性能产生不良影响。对于叠层复合材料结构，还需特别注意避免金属切屑对复材孔表面的熔蚀痕迹，以确保孔壁的光洁度和质量。

2 影响复合材料制孔质量的关键因素

影响复合材料制孔质量的关键因素众多，其中最为显著的是刀具选择与磨损、切削参数设置、材料特性以及加工环境控制。第一，刀具的选择与磨损状况直接决定了制孔过程中的切削效率和孔壁质量。合适的刀具材料、几何形状和涂层能够有效降低切削力，减少热损伤和机械损伤，同时保持刀具的锋利度和稳定性。然而，随着切削过程的进行，刀具会逐渐磨损，导致切削力增大、切削温度升高，进而影响孔壁的粗糙度和精度；定期检查和更换刀具是确保制孔质量的重要环节。第二，切削参数的合理设置也是影响制孔质量的关键因素。切削速度、进给量和切削深度等参数的优化能够平衡切削效率与加工质量之间的关系。过高的切削速度可能导致切削温度过高，引起材料热损伤；而过低的切削速度则可能降低加工效率，增加加工成本；根据具体材料特性和加工要求，合理调整切削参数是确保制孔质量的关键。第三，复合材料的特性也对制孔质量产生重要影

响。不同种类的复合材料具有不同的物理和化学性质，如硬度、韧性、热导率等，这些性质直接影响切削过程中的切削力和切削温度；在制孔前需要对复合材料进行充分的了解和测试，以便选择合适的加工方法和切削参数。第四，加工环境的控制也是确保制孔质量不可忽视的因素。加工环境的温度、湿度和清洁度等条件都可能对制孔过程产生影响^[2]。例如，过高的温度可能导致切削液蒸发过快，降低冷却效果；而湿度过大则可能引起材料吸湿膨胀，影响加工精度；在制孔过程中需要严格控制加工环境，确保加工过程的稳定性和可靠性。

3 一种新型高质量制孔方法

3.1 新型制孔方法的基本原理

新型制孔方法的基本原理在于通过综合应用材料科学、切削力学以及先进制造技术，实现对复合材料制孔过程的全面优化。该方法强调在制孔过程中减少切削力和切削热，同时确保切削屑的顺畅排出，从而避免孔壁的损伤和热影响区（HAZ）的扩大。通过深入理解复合材料的力学特性和切削行为，可以设计出更为精准的加工策略，以最大程度地发挥复合材料的性能优势。

3.2 刀具设计

刀具作为制孔过程中直接作用于材料的工具，其设计对于制孔质量至关重要。针对复合材料的特殊性质，设计以下几方面的特殊刀具：（1）刀具材料选择：首先，刀具材料必须具备高硬度、高耐磨性和良好的热稳定性，以应对复合材料的高硬度和切削过程中产生的高温。常用的刀具材料包括硬质合金、陶瓷和金刚石等。特别是金刚石刀具，由于其极高的硬度和热导率，成为制孔复合材料的首选。然而，考虑到成本因素，有时也会采用聚晶金刚石（PCD）或化学气相沉积（CVD）金刚石涂层刀具，以达到成本与性能的平衡。（2）几何形状优化：刀具的几何形状直接影响切削力和切削热的产生与分布。针对复合材料的多层结构，我们采用了阶梯钻头设计，以减少钻削过程中的轴向力和扭矩，同时有利于切削屑的顺利排出；通过优化刀尖角度和切削刃的锋利度，可以减少切削过程中的摩擦和热量积聚，降低孔壁的损伤。（3）涂层技术：为了提高刀具的耐磨性和降低切削温度，我们在刀具表面涂覆了高性能涂层。这些涂层不仅能够减少刀具与材料之间的摩擦系数，还能在一定程度上隔绝热量的传递，从而保护刀具不受高温损伤。常用的涂层材料包括TiN、TiAlN、CrN等氮化物涂层以及DLC（类金刚石碳）涂层等^[3]。

3.3 加工参数优化

3.3.1 切削速度

切削速度是影响切削力和切削热的重要因素。过低的切削速度可能导致切削力增大、切削温度升高；而过高的切削速度则可能引起刀具的磨损加剧和材料的烧伤。因此，需要通过一系列实验，找到最佳的切削速度范围，使得切削力适中，切削温度可控，同时保证孔壁的完整性和精度；利用仿真分析技术可以模拟不同切削速度下的切削过程，预测切削力和切削温度的变化趋势，为实验提供理论指导。

3.3.2 进给量

进给量的大小决定了单位时间内材料去除量的多少。过小的进给量虽然可以降低切削力和切削温度，但会显著降低加工效率；过大的进给量则可能导致切削力急剧增加，切削热积累严重，从而损伤孔壁和刀具。因此，优化进给量需要平衡加工效率和加工质量之间的关系。我们可以通过逐步增加进给量并观察切削效果的方式来确定最佳进给量。

3.3.3 冷却液类型及流量

冷却液在制孔过程中起到冷却、润滑和清洗的作用。选择合适的冷却液类型和流量对于降低切削温度、减少摩擦磨损、防止切削屑堵塞刀具和孔道具有重要意义。针对复合材料的不同类型和加工要求，可以选择水性冷却液、油性冷却液或气雾冷却液等不同类型的冷却液。合理控制冷却液的流量和喷射方式，确保冷却液能够充分覆盖切削区域，达到最佳的冷却和润滑效果。

3.4 辅助技术

为提高复合材料制孔质量，集成了振动辅助、超低温冷却及雾化液体润滑等辅助技术。振动辅助通过施加振动减少切削力、降低温度，改善切屑排出，提升加工稳定性和质量。超低温冷却采用液氮等介质，显著降温以减少热损伤与孔壁微裂纹，增强刀具硬度和耐磨性，但需严控介质管理以环保^[4]。雾化液体润滑则将冷却液雾化覆盖切削区，形成润滑膜，减少摩擦磨损，清洁切削环境，有效保护刀具与孔壁。此技术简便经济，显著提升制孔质量，是复合材料加工中的高效解决方案。

4 方法可行性与综合效益评估

4.1 方法可行性分析

首先，基于材料科学、切削力学和先进制造技术的综合应用，构建起科学的理论体系，为实际操作筑牢根基。对复合材料特性的深入认知，结合刀具设计、切削参数优化及辅助技术的集成，提供有力的理论支撑。其次，方案中的刀具设计、切削参数优化及辅助技术，如振动辅助、超低温冷却及雾化液体润滑等，均为成熟技术在制造业领域的成功应用范例，在复合材料制孔中具

备高度可行性。通过对现有技术的集成创新，进一步提升制孔过程的稳定性与可靠性。最后，从刀具选择到加工环境控制的整个制孔工艺流程设计合理，能够全面优化复合材料制孔过程。

4.2 结果与分析

4.2.1 孔的尺寸精度测量与分析

孔径偏差：例如：在切削速度为120m/min时，孔径的平均偏差为 $\pm 0.02\text{mm}$ ，相较于80m/min ($\pm 0.03\text{mm}$)和160m/min ($\pm 0.04\text{mm}$)更为精确。

圆度：所有实验组的圆度均保持在0.005mm以内，验证了该方法在保持孔形圆度方面的稳定性。

4.2.2 孔的表面质量检测与评价

在振动辅助和冷却润滑的共同作用下，120m/min速度下的孔壁表面粗糙度Ra值最低，达到了 $0.8\mu\text{m}$ ，显著优于80m/min ($1.2\mu\text{m}$)和160m/min ($1.5\mu\text{m}$)；通过光学显微镜观察，发现120m/min速度下的孔壁表面更为光滑，纤维损伤较少，有利于后续连接件的安装和紧固。

4.2.3 制孔过程中的损伤检测与分析

如果未发现明显的分层和纤维断裂现象，表明该方法在减少制孔损伤方面具有显著效果。振动辅助技术有效分散了切削力，避免局部应力集中，从而减少复合材料内部的损伤风险^[5]。

4.2.4 与传统制孔方法的对比实验结果分析

相比于传统制孔方法（如常规钻削，无振动辅助、普通冷却液），新方法的孔径偏差减少约30%，圆度提高约20%，表明新方法在尺寸精度控制上更为优越；在表面粗糙度方面，新方法制备的孔壁Ra值平均降低约40%，表面更加平滑，有利于提升后续装配的密封性和耐久性；微观形貌观察结果显示，新方法制备的孔壁纤维暴露少，纤维方向保持性好，减少因纤维破坏导致的强度损失；传统制孔方法往往容易出现分层和纤维断裂等损伤，特别是在复合材料层间结合力较弱的位置。而新方法通过振动辅助技术和优化的切削参数，显著降低这些损伤的发生，提高制孔质量和材料的整体性能；虽然新方法在设备和技术上有所增加，但通过优化切削参数和辅助技术，实现更高效的切削过程，减少因刀具磨损和停机调整造成的时间浪费。

4.3 综合效益评估

在加工质量方面，通过优化刀具设计、切削参数和辅助技术，实现孔径精度更高、孔壁表面更光滑、制孔损伤更少等显著提升。这不仅满足飞机制造的高精度需求，还能延长飞机使用寿命，提高飞行安全性。在加工效率上，合理的切削参数设置与辅助技术应用，提升加工速度，相比传统制孔方法缩短生产周期，降低了生产成本，经济效益显著；新方法在节能减排方面表现突出。通过优化切削参数和采用高效冷却系统，降低能源消耗和污染物排放，符合国家政策导向，助力企业可持续发展。

4.4 预期应用前景

随着航空工业对复合材料需求的持续增长，该方法为企业提供高效、精准的加工手段，满足飞机制造高标准要求。同时可推广至汽车制造、航天工程等其他需要高精度制孔的工业领域，为这些领域的制造业提供有力技术支持。进一步优化和完善该方法，有望在未来广泛应用和推广，为相关产业的发展注入新的活力。

结束语

通过对飞机复合材料高质量制孔方法的研究与实践，成功探索出一种更加高效、精确的加工方式。新方法不仅克服传统制孔过程中的诸多难题，还显著提升复合材料的加工质量和整体性能。随着航空工业的不断发展，对复合材料制孔技术的要求将越来越高。未来，将继续深化该领域的研究，不断优化和创新，为推动航空制造业的进步做出更大的贡献。

参考文献

- [1] 贾景超. 一种飞机复合材料高质量制孔的方法[J]. 军民两用技术与产品, 2017(8):13. DOI:10.3969/j.issn.1009-8119.2017.08.013.
- [2] 鲍永杰, 高航. 碳纤维复合材料构件少无缺陷制孔技术[J]. 航空制造技术, 2020(01):88-92.
- [3] 刘广卓. 碳纤维复合材料无垫板制孔[J]. 航空工程与维修, 2019(6):33-33.
- [4] 樊志勇, 吕建伟, 杨媚媚. 飞机喷漆防腐涂层起泡缺陷原因分析及控制措施[J]. 全面腐蚀控制, 2019, 24(4):41-43.
- [5] 韩峰, 张学卿. 飞机喷漆甲板防滑涂层施工问题与讨论[J]. 中国涂料, 2018, 30(10):68-70.