# CFRP/钛合金叠层结构制孔刀具磨损研究进展

李鹏南* 刘文杰 邱新义 宋梓贤 唐 依
湖南科技大学机电工程学院,湘潭,411201

**摘要**:碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)与钛合金组成的叠层结构在航空航天等领域应用广泛,但其制孔过程中因材料性能差异巨大而面临严峻的刀具磨损挑战,直接影响装配质量与加工成本。系统综述了CFRP/钛合金叠层结构制孔刀具磨损的研究进展,重点阐述了刀具在CFRP层和钛合金层中的磨损机理及其在叠层加工中的耦合作用,分析了刀具材料、刀具几何结构、切削参数等关键因素对刀具磨损的影响。探讨了刀具磨损对制孔质量的恶化效应,总结了通过冷却润滑技术、振动辅助钻削等工艺抑制磨损的策略。概述了基于多传感器融合与机器学习算法的刀具磨损状态监测技术。对未来研究方向(如新型刀具材料开发、智能刀具设计、复合工艺优化以及智能化磨损监测系统等)进行了展望,为实现CFRP/钛合金叠层结构的高质、高效、精密制孔提供了理论参考。

**关键词**:碳纤维增强树脂基复合材料;CFRP/钛合金叠层结构;制孔;刀具磨损
**中图分类号**:TG506
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.09.014 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

# Research Progress on Tool Wear in Hole-making of CFRP/Titanium Alloy Stacked Structures

LI Pengnan* LIU Wenjie QIU Xinyi SONG Zixian TANG Yi
School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan, 411201

**Abstract**: CFRP and titanium alloy stacked structures were widely used in aerospace and other fields. However, drilling these structures presents significant challenges due to severe tool wear caused by the substantial differences in material properties, directly impacting assembly quality and machining costs. Recent advances were systematically reviewed in research on tool wear during the drilling of CFRP/titanium alloy stacked structures. The review focused on elucidating the wear mechanisms of tools in both the CFRP and titanium alloy layers and their coupling effects during stacked machining. The analyses covered the influence of key factors such as tool material, tool geometry, and cutting parameters on tool wear. Additionally, the detrimental effects of tool wear on hole quality were discussed, and strategies for mitigating wear were summarized, including cooling and lubrication techniques and vibration-assisted drilling processes. The review also outlines tool wear monitoring technologies based on multi-sensor fusion and machine learning algorithms. Finally, future research directions were proposed, including the development of novel tool materials, intelligent tool design, optimization of composite machining processes, and intelligent wear monitoring systems. These efforts aim to provide theoretical guidance for achieving high-quality, efficient, and precision drilling of CFRP/titanium alloy stacked structures.

**Key words**: carbon fiber reinforced polymer(CFRP); CFRP/titanium alloy stacked structure; hole-making; tool wear

## 0 引言

碳纤维增强树脂基复合材料(carbon fiber reinforced polymer,CFRP)由纤维增强相和树脂基体复合而成,具有轻质高强、耐腐蚀以及良好的抗疲劳性等优异性能,是航空航天领域实现轻量化设计的重要材料,广泛应用于制造机翼、机身等关键部位。作为结构材料,CFRP与钛合金等金属材料组成叠层结构,减小了结构质量并提高了整体结构性能。为了满足极端环境下的服役状态,CFRP/钛合金叠层结构通过锁紧/高锁螺栓连接和抽芯铆接等方式组成装配件,因此叠层构件的制孔质量将会直接影响各个结构件之间的装配质量[1-3]。CFRP和钛合金均属于典型的难加工材料,且两种材料之间的性能差异较大,在CFRP/钛合金叠层结构制孔过程中,刀具面临着极其复杂且恶劣的切削环境,刀具磨损不可避免且极易产生磨粒、黏结甚至崩刃失效等现象,影响刀具使

**收稿日期**:2025-12-23
**基金项目**:国家自然科学基金(52275423)

用寿命和工件制孔质量，进而增加加工成本[4-6]。国内外学者从优化刀具材料、改进刀具结构、开发新型冷却润滑技术以及开发新型刀具等方面开展了研究，旨在抑制刀具磨损，有效提高制孔效率和制孔质量。

本文主要从CFRP/钛合金叠层结构制孔的刀具磨损机理、刀具磨损对制孔质量的影响、刀具磨损的影响因素、刀具磨损抑制技术以及刀具磨损监测技术等方面阐述CFRP/钛合金叠层结构制孔刀具磨损最新研究进展。重点探讨CFRP/钛合金叠层结构制孔的刀具磨损机理、刀具磨损的影响因素以及刀具磨损的抑制技术及效果，从刀具材料、刀具结构以及切削参数等方面对刀具磨损进行了分析。并对抑制刀具磨损，实现CFRP/钛合金叠层结构高质高效制孔进行展望。

## 1　刀具磨损特性

### 1.1　CFRP层刀具磨损机理

在CFRP层制孔时，碳纤维的脆性使得在切削过程中易发生断裂，断裂后的碳纤维如同磨粒般，不断刮擦刀具表面，发生磨粒磨损。同时，受切削热影响，树脂发生软化甚至熔融，黏结在刀具表面，加剧刀具磨损。此外，CFRP的各向异性使得不同方向上的纤维切削出现差异，易产生局部应力集中，导致刀具出现微崩刃[7]。黄文亮等[8]对CFRP进行钻削试验发现，钻头的横刃、主切削刃、后刀面等部位磨损程度存在差异，其中横刃和主切削刃的磨损最为严重。主要表现为严重的后刀面磨损和切削刃钝化，磨损机制以磨粒磨损为主[9-10]。钱宝伟等[11]通过研究发现，钻削CFRP时，切削刃钝化是直槽双顶角钻头横刃和主切削刃的主要磨损形式，并且主切削刃和后刀面会产生明显磨损带。ILIESCU等[12]指出，刀具磨损与纤维方向有关，90°纤维对切削刃的磨削作用最为剧烈。SU等[13]研究证实，切削刃钝化导致CFRP中纤维无法被有效切断，加剧对纤维的挤压和弯曲，增大切削力并加速刃口磨损，形成恶性循环。

当切削速度较高时，CFRP制孔刀具伴有切屑黏附导致的黏结磨损以及高温引起的化学磨损。切削高温易导致CFRP中树脂变性，熔化的树脂黏附在刀具表面，在后续切削中被流动的切屑带走。该过程可能导致刀具材料的微小颗粒被黏掉，或使涂层中的硬质颗粒因失去支撑而剥落。MAYUET等[14]对钻削CFRP后磨损的刀具进行能谱仪(EDS)元素分析后发现，在刀具磨损部位碳含量较高，黏结剂元素钴的含量较低，说明有化学黏结和扩散磨损发生，且在显微镜下观察，硬质合金刀具表面有树脂相的黏附。RAWAT等[10]在高转速下对CFRP钻削刀具磨损机理进行研究，对扫描电子显微镜(SEM)图像分析发现，横刃、主切削刃和副切削刃处均存在磨粒磨损(图1)，并对后刀面上某点处进行元素分析证实存在黏结磨损。但WANG等[15]和KARPAT等[16]认为在CFRP制孔中切削温度难以达到发生黏结和扩散等化学磨损的温度，化学形式磨损并非CFRP加工中主要的刀具磨损机制。宿友亮等[17]探究了切削CFRP中金刚石刀具的纳观磨损机理，金刚石刀具的纳观磨损主要由碳纤维的机械互锁与界面键共同作用所致，其中初期磨损以结构畸变、界面键成键和sp3碳结构向sp2碳结构转化为主，快速磨损则以原子团簇剥离和沿晶面开裂为主。

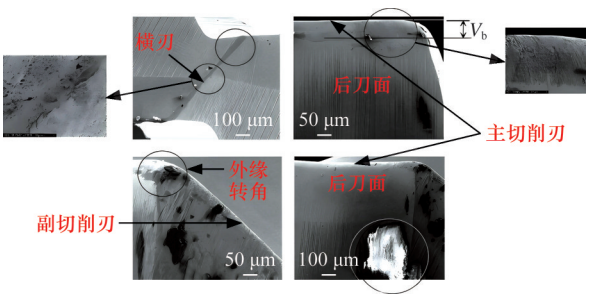



**图1　CFRP钻削后刀具磨损扫描电镜图[10]**

**Fig.1　Scanning electron microscope images of tool wear after drilling CFRP[10]**

### 1.2　钛合金层刀具磨损机理

当刀具钻入钛合金层时，磨损机制转变为以热-化学作用为主导，切削条件急剧恶化。钛合金导热性差，钻削加工又处于半封闭式加工环境中，大量的切削热聚集在切削变形区，易导致切削区高温[18]。在高温高压下，钛合金极易与刀具材料(尤其是Co黏结相)发生亲和作用，导致切屑焊合在刀具表面。黏着物在周期性切削力作用下被剥离，带走刀具材料，形成月牙洼磨损和黏附层。高温也会促使刀具中的WC、Co等元素向钛合金切屑中扩散，形成扩散磨损，造成刀具边缘弱化并快速失效[19-20]。HARTUNG等[21]使用硬质合金刀具钻削钛合金时，钻削区温度可达1000℃，高温会导致刀具材料硬度和强度等力学性能大幅度下降。当刀具与切屑接触区的温度达到800℃时，钛合金和WC/Co之间会发生元素扩散现象，导致刀具微观组织结构发生变化，且材料发生软化，接触区的材料硬度远低于其他区域，这会加剧刀具的黏结磨损[22]。RAHIM等[23]研究表明，钛合金钻削过程中的黏结磨损、扩散磨损以及塑性变形导致钻头的主要磨损形式为不均匀的后刀面磨损和微崩刃。FAN等[24]结合SEM和EDS分析发

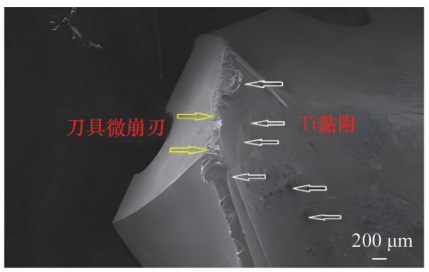
现，硬质合金刀具切削钛合金时，磨损以黏附、扩散、氧化为主，他们建立了不同阶段的磨损演化模型以清晰地反映刀具材料流失。

ALONSO PINILLOS等[25]进一步将硬质合金刀具钻削钛合金的刀具磨损描述为磨粒磨损、黏着磨损以及黏结相Co扩散磨损后碳化钨颗粒脱落的综合结果。XU等[26]在正交切削试验中清晰观察到聚晶金刚石(PCD)刀具在加工钛合金时前刀面出现大面积的凹坑磨损，并通过EDS分析检测到强烈的Ti元素信号，证实了钛合金材料在高温高压下与刀具表面发生黏结与材料转移。KIM等[27]对比研究了WC与PCD钻头，发现尽管PCD刀具耐磨性更优，但仍不可避免地发生黏着磨损。

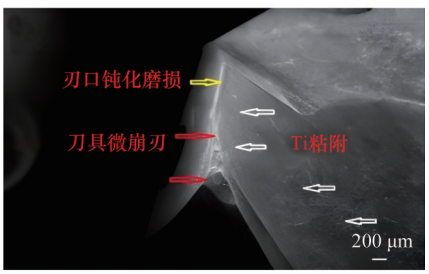
### 1.3 CFRP/钛合金叠层刀具磨损机理

CFRP/钛合金叠层制孔中的刀具磨损是一个动态变化的复杂过程，是机械、热、化学多重机制耦合的结果。CAO等[28]探究了CFRP/钛合金叠层钻削刀具磨损演变：磨损呈区域差异与多阶段特征，横刃附近因切削速度低，Ti黏附主导后刀面磨损，初期黏附层可抵御碳纤维磨粒磨损，后期高温下脱落致磨损恶化；刃口与刃缘先经碳纤维磨粒磨损，再进入Ti黏附-熔融基体黏附磨损，最终黏附层被碳纤维剥离，转为磨粒磨损主导。XU等[29]揭示了刀具磨损模式从黏附向磨粒转变，且磨损进程呈三阶段：初始黏结磨损主导、中间转变阶段及最终磨粒磨损主导。通过多项式拟合法量化后刀面磨损面积和磨损率，表明磨损率随材料去除量增加而下降。JIAO等[30]发现，钻削CFRP层刀具磨损以碳纤维磨粒磨损导致切削刃钝化为主；钻削钛合金层刀具则因高温引发黏着磨损甚至崩刃。叠层加工时，钻削CFRP阶段的碳纤维能清除Ti黏附物，但在叠层界面区域材料突变、应力与温度分布不均，易引发脆性断裂，显著缩短刀具寿命。

CFRP/钛合金叠层结构制孔刀具磨损机理并非两种材料磨损机制简单叠加，而是多种磨损机制的耦合。POUTORD等[31]采用硬质合金刀具对CFRP/钛合金叠层结构进行钻削试验，发现钻削温度过高时，钛合金会与刀具材料发生强烈的化学反应，并以积屑瘤的形式黏结在刀具表面，产生黏结磨损甚至崩刃，刀具后刀面和横刃是磨损最严重的部位，其中，主要磨损机理为磨粒磨损和黏结磨损。PARK等[32]采用超细晶粒硬质合金刀具对CFRP和CFRP/Ti叠层进行交替钻削，循环至刀具失效，对刀具磨损进行分析发现，钻削CFRP时，碳纤维的磨粒磨损主要作用于切削刃，致刃口圆化；CFRP/Ti叠层钻削中，Ti因高温化学活性增强，易黏附刃口形成积屑瘤，积屑瘤脱落时，加剧后刀面磨损，且高速下Ti黏附更严重。ALONSO PINILLOS等[25]对钛合金层和CFRP/钛合金分别进行钻削试验，发现CFRP层可刷除刀具上的部分Ti黏附(图2)。WANG等[33]发现钻削CFRP时，刀具主要磨损形式为刃口圆化；钻削Ti时，后刀面磨损严重甚至崩刃；钻削叠层时，CFRP层碳纤维刷除Ti黏附并平滑刃口，抑制单钻Ti时的崩刃，刀具寿命较单钻Ti提高了3倍。




(a)叠层钻削25孔后




(b)叠层钻削25孔并再次钻削CFRP后

**图2 刀具磨损形貌对比图[25]**

**Fig.2 Comparative morphology of tool wear [25]**

综上所述，钻头后刀面磨损、横刃磨损、前刀面磨损和刃带磨损是最常见的磨损类型[34]。CFRP钻削的刀具磨损机理主要表现为碳纤维硬质点导致的磨粒磨损；钛合金钻削的刀具磨损机理主要表现为高温引起的黏结磨损和扩散磨损；CFRP/钛合金叠层结构钻削刀具磨损是一个动态演化的过程，不同的磨损机制在切削过程中不断转换。刀具切削刃在CFRP层已经出现钝化和磨粒磨损的现象，刀具以恶劣的刃口状态进入钛合金层，导致切削力、切削温度急剧升高，加速刀具的黏着和扩散磨损，钛合金造成的刀具磨损也会反作用于CFRP，在退出CFRP层或加工下一个孔时，会对其造成更严重的挤压和撕裂[32]。

## 2 刀具磨损影响因素

### 2.1 刀具材料

#### 2.1.1 基体材料

高速钢、硬质合金和超硬材料(PCD、聚晶立方氮化硼(PCBN)等)等多种刀具材料被广泛应用[35]。高速钢和碳素钢是最早的刀具材料，在

CFRP的加工中刀具磨损量约为硬质合金刀具的2～3倍[7]。RAMULU等[36]分别使用高速钢(HSS)、含钴高速钢(HSS-Co)、硬质合金3种刀具对复合材料/钛合金叠层结构进行钻削试验，研究表明：HSS和HSS-Co刀具主要为后刀面和月牙洼磨损；硬质合金因热硬度高、耐磨性好，推力增长平缓；刀具磨损程度由重至轻依次为HSS、HSS-Co、硬质合金，且硬质合金的切削加工性更好。POUTORD等[31]和PARK等[37]使用硬质合金刀具对CFRP/钛合金叠层结构进行钻削试验表明，高温下钛合金易与刀具材料发生亲和作用，并以积屑瘤的形式黏结在刀具切削刃及后刀面上，导致黏结磨损甚至崩刃。WANG等[38]通过分析叠层结构钻削刀具磨损机理，建立了一种可以预测刀具崩刃失效的模型。

通过改变元素含量可改善硬质合金刀具的整体性能，添加TaC、NbC等碳化物可以细化晶粒，显著提高硬质合金刀具的综合性能[39]。Co元素的含量也会改变硬质合金的晶粒尺寸，研究发现：YG类硬质合金刀具比YT类更适合钛合金的加工[40]。JUGRESTAN等[41]采用3种几何形状相同但WC含量和晶粒度不同的硬质合金刀具对CFRP进行钻削试验，发现WC含量越高，刀具硬度越大；WC晶粒越小，切削刃越锋利，且晶粒越小刀具耐磨性更佳。ÇELIK等[42]采用不同成分SiAlON陶瓷刀具与WC-Co刀具钻削CFRP发现：WC-Co刀具因WC晶粒细、钴相增韧，磨损量仅为SiAlON刀具的1/2～1/3。PRISCO等[43]采用4种WC-Co钻头对CFRP/Ti叠层结构进行啄钻，钻头均以磨粒磨损和Ti黏附为主，类金刚石碳(DLC)涂层与超细晶粒钻头抗磨损、切削力增幅小，非涂层、细晶粒钻头负面影响更显著。

随着工件材料性能的不断提高以及大尺寸构件的大量应用，硬质合金刀具的性能已经无法满足加工需求，亟需性能更优的刀具材料。XU等[26]、KIM等[27]和PARK等[44]针对CFRP/钛合金叠层结构制孔刀具寿命短等问题，采用不同材料刀具对CFRP/Ti叠层结构进行钻削试验研究，结果表明，WC钻头的主要磨损形式为钛合金切削引起的黏结磨损和CFRP切削引起的磨粒磨损，且Ti黏附覆盖整个切削刃。PCD刀具的整体切削性能优于WC刀具，仅表现为轻微的Ti黏附和磨粒磨损，主要失效形式为微崩刃(图3所示为低速下WC和PCD刀具磨损对比)，并且PCD刀具能够有效地减少毛刺和分层等制孔缺陷。PCD刀具硬度高，耐磨性好，但抗冲击性和断裂韧性较差，高速切削时，切削刃边缘处易发生微崩刃[45]。

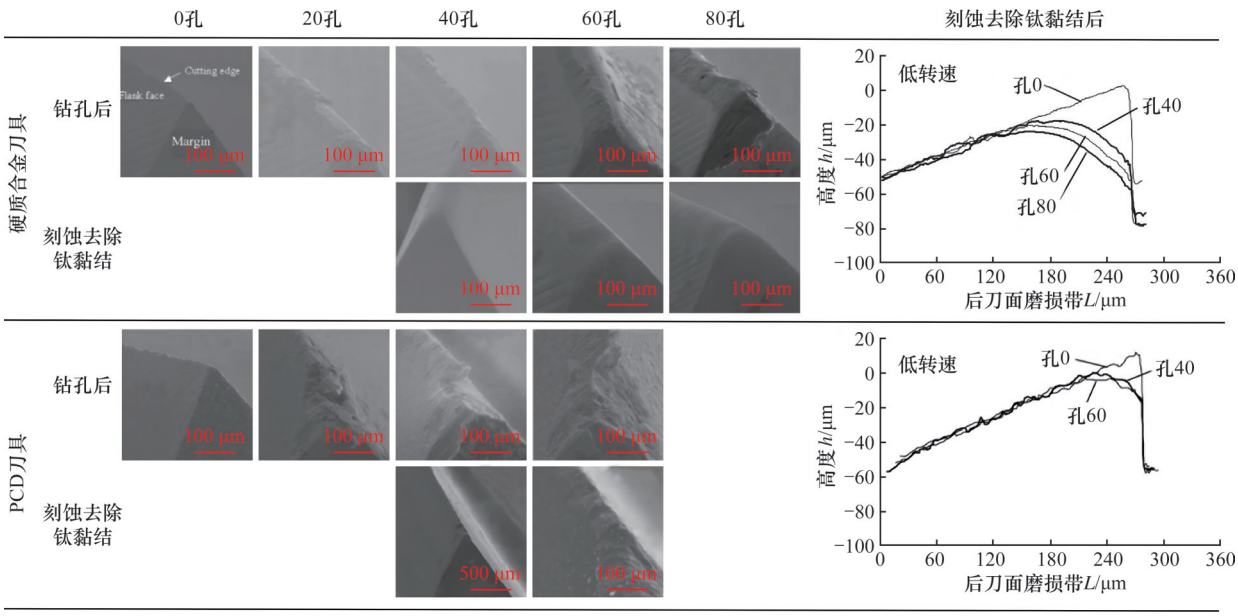



**图3　WC和PCD刀具钻削CFRP/Ti后磨损对比[44]**

**Fig.3　Comparison of wear between WC and PCD tools after drilling CFRP/Ti[44]**

### 2.1.2　涂层材料

刀具涂层通过提高刀具表面的硬度、耐磨性和抗腐蚀性等改善刀具性能，抑制刀具磨损。随着刀具涂层技术的不断发展，由最初的TiC、TiN朝着TiAlN、铝镁硼化物(BAM)等性能更优的材料多元化发展，还出现了抑制切屑黏结的软性润滑材料[46]。XU等[47]采用两种涂层刀具对CFRP/Ti叠层结构进行钻削试验，发现TiAlN涂层刀具比PCD涂层刀具钻削轴向力更低，且涂层断裂韧性更好，具有更好的抗崩刃失效能力。ISBILIR

等[48]研究发现AlTiN涂层具有一定的抗黏结作用，可减少叠层材料钻削中Ti屑黏附和后刀面磨损，并提高刀具的切削加工性能。PECAT等[49]发现涂层与无涂层刀具呈现相似磨损模式，但磨损程度差异显著，AlCrN和新硬碳(NHC)涂层刀具后刀面磨损量最小，但未对不同涂层的硬度与后刀面磨损量的关系进行研究。PARK等[37]发现低摩擦因数的BAM涂层可以有效地减轻钛黏结和后刀面磨损，且BAM涂层在高切削速度下磨损抑制效果更优。

PCD刀具的制作成本是化学气相沉积(CVD)金刚石涂层刀具的3～5倍，但金刚石涂层钻头的寿命可达PCD钻头的4.36倍[7]。CHEN等[50]研究了PCD与金刚石涂层刀具钻削CFRP/Ti叠层结构的刀具磨损，发现PCD刀具脆性大，以刃口断裂为主，86孔后失效；金刚石涂层刀具以涂层脱落为主，130孔后暴露基体，其推力和温度更低、Ti黏附少，更适配该叠层钻削。金刚石涂层刀具切削加工性能好、刀具寿命长，但在连续切削中，易发生涂层脱落现象[51-52]。MUGHAL[53]对比物理气相沉积(PVD)的DLC涂层、BAM涂层刀具与未涂层刀具的性能，发现DLC涂层刀具磨损最小、性能最优，BAM涂层刀具随涂层厚度增加磨损加剧，涂层可显著延长刀具寿命，但涂层厚度和结合强度对性能影响大。

在多种元素掺杂的涂层中，非金属元素Si的掺杂最为广泛，掺杂该元素可提高刀具涂层微结构的精度和切削性能，且采用Si层梯度设计能提高涂层与刀具基体材料之间的结合强度[54]。SAMSUDEENSADHAM等[55]对比了TiAlN与AlTiSiN涂层硬质合金钻头钻削CFRP/Ti叠层的磨损特性：TiAlN涂层刀具钻100孔以内时后刀面磨损低、推力更稳定，主要磨损机制为后期涂层脱落和崩刃；AlTiSiN涂层刀具钻80孔后磨损增速减缓、涂层附着力强，磨损机制以轻微积屑瘤和均匀磨粒磨损为主，得益于纳米复合结构的高温稳定性；二者分别适合长寿命与高表面质量场景，刀具磨损变化见图4。

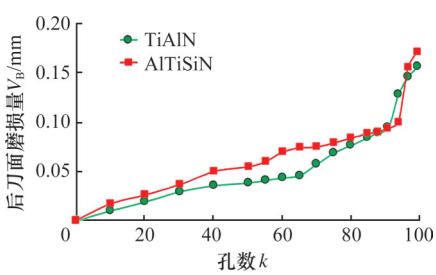



**图4 TiAlN和AlTiSiN涂层刀具后刀面磨损量[55]**

**Fig.4 Flank wear of TiAlN and AlTiSiN coated tools[55]**

此外，为了更好地发挥涂层材料各自的优势，采用不同涂层材料的组合实现刀具材料性能之间的互补。FUJIWARA等[56]分别采用TiAlN涂层、TiSiN涂层和TiAlCr/TiSi涂层硬质合金刀具对CFRP/Ti6Al4V叠层结构进行钻削试验，发现TiAlCr/TiSi涂层刀具的耐磨性好，能显著减少切屑附着，刀具寿命最长，但他们未探究涂层厚度对刀具磨损的影响。NGUYEN等[57]对3种涂层刀具钻削CFRP/Ti叠层的切削刃磨损轮廓进行表征(图5)并指出涂层厚度对刀具磨损的影响：DLC涂层虽摩擦因数低，但受工艺限制，涂层仅为1.7 μm厚，不到10孔涂层就脱落，无法有效抵抗Ti黏附；7.3 μm厚(AlCrSi/Ti)N涂层刀具最优，80孔内无明显崩刃，磨损以CFRP导致的刃口钝化和Ti导致的后刀面磨损为主，且较3 μm厚同涂层刀具磨损更慢，涂层厚度可提高刀具耐磨性与抗Ti黏附能力。

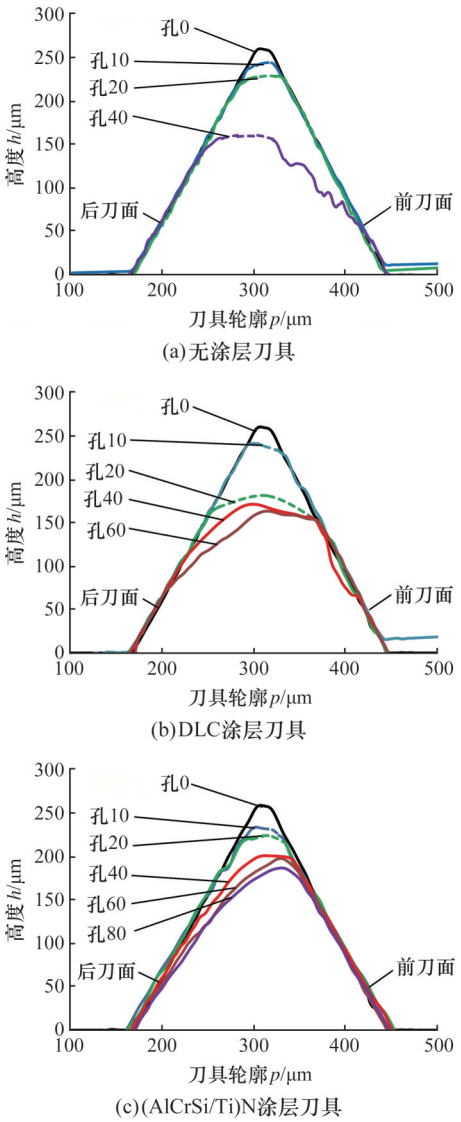



**图5 刀具磨损2D剖面图[57]**

**Fig.5 2D cross-sectional profiles of tool wear[57]**

综上所述，不同刀具材料表现出不同的磨损特性。硬质合金因其较高的耐磨性和热硬度而广泛用作刀具材料，但在钛合金加工中仍会发生黏结磨损。超硬材料如PCD刀具在性能上优于硬质合金，能够减少CFRP的毛刺和分层缺陷，但其抗冲击性较差，易发生微崩刃。涂层刀具则通过提高刀具表面的硬度和耐磨性等，有效减缓磨损。例如，TiAlN涂层刀具能够提供更好的抗崩刃与抗黏结性能。此外，合适的涂层厚度可以显著提高刀具的性能和寿命。

### 2.2　刀具结构

合理设计钻头的横刃、顶角、螺旋角等几何结构参数可改善刀具的切削性能，降低刀具磨损[58]。张云凯等[59]对钻头的横刃结构进行优化，显著降低了CFRP/钛合金叠层钻削时的轴向力和扭矩，并改善了排屑效果与应力分布，使钻头磨损更均匀，钻头使用寿命更长。SENTHILKUMAR等[60]对比了118°和130°顶角硬质合金钻头的加工性能，发现130°顶角钻头在耐磨性、切削力控制和切屑排出方面均优于118°顶角钻头。姚琦威等[61]通过研究发现，顶角越大轴向力越大，螺旋角增大钛合金层轴向力呈先降后升趋势，后角越小轴向力越大。XU等[62]研究了不同刀具几何参数（横刃长度、顶角和螺旋角）和刀具材料对CFRP/Ti叠层结构钻削刀具磨损的影响，结果表明长横刃会引发较大的推力，导致严重的挤压磨损；大顶角会削弱切削刃本身的锋利度，加剧磨蚀作用；大螺旋角则会改变切削力和热量的分布。

相比传统的麻花钻，异型钻头从“力、热、屑、质”四方面对刀具的几何结构进行精准设计。常用的异型钻头有匕首钻、双顶角钻、烛台钻、阶梯钻以及复合钻等，如图6所示[63]。其中，匕首钻因其螺旋角和顶角较小，排屑槽极易堵塞引起崩刃，不适合该叠层加工。双顶角结构具有较好的定心作用，可减小钻削过程中的径向颤振和偏转，降低外缘转角处的局部应力集中，延缓崩刃[64]。QIU等[65]使用不同结构的钻头对CFRP/Ti叠层进行钻削试验发现：烛台钻因外角尖端结构，钻削轴向力最低，排屑更优。阶梯钻为最典型的异形结构刀具，其结构特点是将钻头切削部分设计成多个不同直径的阶梯状刃带，对材料进行分段切削，减小轴向力。冷小龙等[66]和杨凯等[67]对比了阶梯钻与普通麻花钻钻削CFRP/TC4叠层结构的刀具磨损差异，阶梯钻的后刀面磨损量小，且磨损均匀，其中第二后刀面磨损最为严重；相比普通麻花钻，阶梯钻有效降低了钻削力和温度，寿命远高于普通麻花钻。ALONSO等[68]通过试验研究了齿

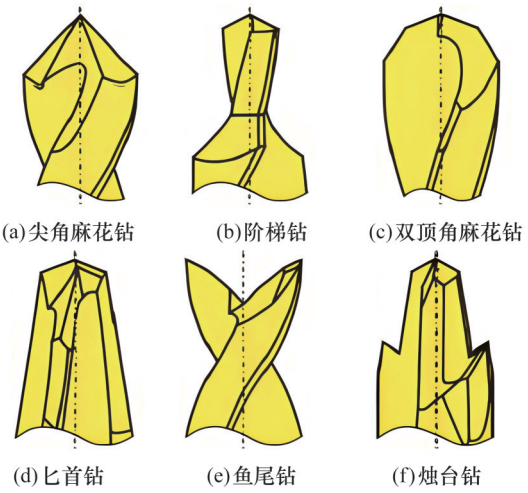



**图6　常用异形钻头[63]**

**Fig.6　Commonly used special-shaped drill bits[63]**

数与几何形状对阶梯钻切削性能的影响，结果表明，三齿阶梯式钻头磨损速率较慢，切削力与孔加工损伤较小；磨粒磨损主要发生在主切削刃，而钛黏结主要发生在钻头边缘和前刀面。WANG等[69]研究阶梯钻钻削Ti/CFRP叠层材料时的磨损特性，发现刀具磨损核心受碳纤维与钛黏附物的相互作用调控，且严重的前后刀面磨损会对刃口产生锐化效应，导致切削刃圆化先增后减。JIA等[70]基于阶梯钻头几何结构和Ti/CFRP叠层材料特性，建立了切削力预测模型和3种简化的钻削出口损伤模型。在此基础上，还设计了一种新型变步距阶梯钻头。

综上所述，优化横刃、顶角、螺旋角等刀具几何参数可改善刀具切削性能、降低刀具磨损，如减小顶角使受力更均匀，增大螺旋角可提高排屑能力。异形钻头通过分段切削、改善定心和排屑，有效降低钻削轴向力、减少热损伤及分层缺陷，延长刀具寿命。并且，刀具的几何参数优化比刀具材料成分对刀具磨损影响更为关键。

### 2.3　其他因素

切削参数通过改变切削区的力、热、摩擦状态及材料变形程度，直接影响刀具磨损速率、磨损形式和使用寿命。WEI等[71]、SENTHILKUMAR等[72]和王贤锋等[73]对CFRP/TC4叠层钻削中轴向力随主轴转速和进给速度的变化规律进行探究，轴向力与进给速度呈正相关，与转速呈负相关，进给速度相较于转速对轴向力的影响更为明显。王明海等[74]研究切削参数对CFRP/TC4叠层钻削温度的影响，并建立了温度与钻削参数之间的回归模型。WANG等[38]指出钻削温度严重影响刀具磨损，并对CFRP/TC4叠层钻削温度与刀具磨损之间的关系进行探究。ILIESCU等[12]

明确了工艺参数对CFRP钻削刀具磨损的影响规律：高转速下，刀具切削刃与碳纤维的相对滑动速度加快，单位时间内划擦次数增多，磨粒磨损速率提高；低进给时，刀具与工件接触时间延长，且切屑易在刃口滞留，加剧磨粒磨损。谢大叶等[75]探究了CFRP/Ti叠层振动钻削刀具磨损随不同工艺参数的变化规律。GAO等[76]指出变工艺参数（CFRP层高转速低进给、Ti层低转速低进给）能更好地匹配叠层结构的材料特性，并减缓刀具磨损。

此外，材料的叠层顺序以及纤维方向也会对刀具磨损产生影响。XU等[26]研究了PCD刀具切削CFRP/Ti叠层的磨损特性，发现刀具主要磨损形式为月牙洼磨损，还存在Ti黏附与微崩刃；CFRP纤维取向影响刀具磨损，$\theta=90°$时刀具月牙洼磨损宽度大于$\theta=0°$和$\theta=45°$，因不同取向致刀具-切屑接触长度不同。XU等[77]对不同叠层钻削序列进行钻削试验研究，结果表明在CFRP→Ti序列中，未涂层刀具因Ti黏附和碳纤维磨粒作用出现严重后刀面磨损和崩刃，金刚石涂层刀具因初期CFRP磨粒磨损导致涂层开裂并在Ti切削中加剧剥落；在Ti→CFRP序列中，碳纤维的“刷除效应”可减轻Ti黏附，两种刀具后刀面磨损明显降低。

## 3 刀具磨损对制孔质量的影响

刀具磨损是影响制孔质量的核心因素，刀具磨损通过改变切削力、切削温度和刀具几何形状恶化制孔质量。在CFRP/钛合金叠层结构制孔中，随着刀具磨损加剧，钻削力、扭矩及钻削温度升高，导致CFRP出入口处出现分层、撕裂和毛刺等缺陷，钛合金孔出口毛刺高度增大，且两者的孔径一致性和孔壁粗糙度变差。严重磨损还会降低孔径精度，甚至发生刀具崩断等[78]。常见的制孔缺陷如图7所示[4]。CAO等[28]对CFRP/钛合金叠层结构进行钻削试验发现，刀具磨损导致切削力波动、刀具振动，CFRP缺陷加重，孔的尺寸和圆柱度变差；刀具磨损导致界面温度升高，纤维脱黏，产生亚表面损伤。SAMSUDEENSADHAM等[55]和ALONSO等[68]发现，随着刀具磨损加剧，叠层材料的制孔缺陷加重，CFRP入口分层受刀具磨损和刀具边缘钛黏结的影响较大，Ti出口毛刺高度随孔数的增加而增加。WANG等[79]在纵扭超声振动辅助下进行了CFRP/Ti叠层结构钻削试验研究，随刀具磨损加剧，入口与界面损伤恶化，钻17～20孔的入口损伤因子和界面平均损伤因子较1～4孔分别增大11.5%、8.7%，低转速下入口以划痕为主，高转速下入口增加撕裂，界面损伤随刀具磨损从划痕转向分层和热损伤，且刀具磨损会增大CFRP的孔壁粗糙度。

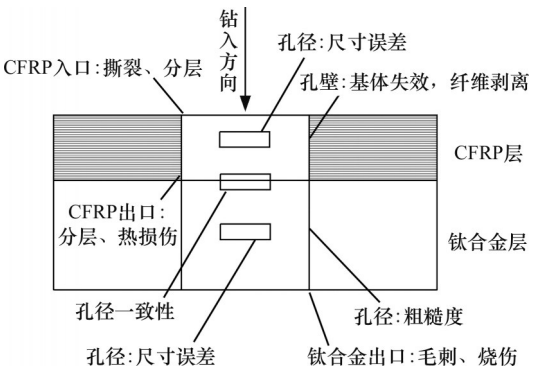



**图7 CFRP/钛合金叠层制孔缺陷[4]**

**Fig.7 Drilling defects in CFRP/Ti alloy stacks[4]**

PARK等[32]和WANG等[80]研究表明，刀具磨损对CFRP与CFRP/Ti叠层制孔精度影响显著，单独钻削CFRP时，刀具磨损较轻，孔径尺寸多偏小，孔轮廓较平整；叠层钻削时，刀具因Ti黏附、后刀面磨损加剧导致稳定性下降，CFRP孔尺寸偏大，孔轮廓波动大，且随钻孔数增加，CFRP孔径呈减小趋势，Ti孔径反而增大；高转速下，制孔精度受刀具磨损影响更显著。邹凡等[81]研究表明，CFRP孔径受钛合金切屑刮擦和温度升高影响，出口孔径大于入口，形成锥形孔；钛合金孔径先因刀具磨损而减小，后因轴向力增大、振动加剧而增大。且采用退刀冷却可减少钛切屑黏附对CFRP的损伤，改善了叠层制孔的孔径一致性。PRISCO等[43]发现，叠层制孔的孔径在孔入口和叠层界面处最大，孔径尺寸随刀具磨损加剧整体呈减小趋势，孔圆柱度随磨损先降后升。

刀具磨损是叠层制孔质量恶化的核心因素。随着后刀面磨损加剧，轴向力、扭矩和切削温度显著升高，导致CFRP出口分层、毛刺与撕裂缺陷加剧，钛合金孔出口毛刺高度同步增加。刀具磨损同时引发孔径精度下降、孔壁粗糙度恶化及圆柱度超差，严重时甚至导致刀具断裂。当磨损量超过临界值后，制孔缺陷呈加速增长趋势。采用耐磨涂层、优化切削参数以及退刀冷却等策略可有效延缓磨损，有利于维持制孔精度与一致性。

## 4 刀具磨损抑制技术

### 4.1 冷却润滑技术

传统的浇注式冷却能显著降低切削温度，减缓刀具磨损，但切削液的大量使用易引起严重的环境污染，增加切削液的回收成本。CFRP材料

具有吸湿性，切削液渗入CFRP层间，易导致复合材料构件整体力学性能下降。于是，一系列符合绿色加工要求且适配CFRP加工的新型冷却润滑技术应运而生。王福吉等[82]开展了干式切削、正向喷气和逆向吸气冷却条件下钻削CFRP的研究，发现逆向冷却比正向冷却刀具磨损抑制效果更显著。XIA等[83]研究发现，液氮低温冷却可显著延缓CFRP钻削过程中钻头切削刃圆化和外缘转角磨损，且进给率对刀具磨损的影响小于冷却方式。KUMAR MISHRA等[84]发现微织构刀具结合微量润滑(MQL)可降低钛合金的切削力及刀具磨损，通过毛细作用增强润滑液渗透，形成蒸汽膜改善散热，但纳米MQL中纳米颗粒易堵塞织构空间，削弱润滑效果。IQBAL等[85]在4种不同的工况下探究钛合金钻削刀具磨损特性，研究发现，节流式低温冷却适中的低温能有效传导并带走切削热，显著减缓刀具磨损，即使在较高切削速度下也能保持良好的刀具寿命。相比之下，MQL仅在低速时效果较好。

MQL技术是一种用极少量润滑油与压缩空气混合形成油雾，对切削区域进行精准润滑和冷却的技术[86]。XU等[87]研究表明，在CFRP/Ti6Al4V叠层材料钻削中，MQL通过冷却润滑有效抑制了刀具的切屑黏附和热损伤，但并未改变其刀具磨损机制[88]。XU等[47]和JI等[89]研究了不同冷却润滑工况下CFRP/Ti叠层结构钻削加工性能和刀具磨损特性，MQL能显著减少钛切屑引起的黏着磨损，但会增大钻削轴向力。此外，MQL条件下钻削扭矩整体呈下降趋势，叠层结构的制孔质量和制孔精度得到显著提高，钛合金层由原本的扩孔变成了缩孔。GUO等[90]探究了不同冷却策略钻削CFRP/Ti6Al4V叠层刀具磨损的影响，MQL中油气混合比对刀具磨损影响较小，仅高比例下会有略微减小；内部空气冷却因冷却不足，钛合金黏附明显，刀具磨损最严重；水基冷却液通过高效降温、减少钛合金黏附，刀具磨损率最低，且高压喷射可进一步减小后刀面最大磨损量$V_{Bmax}$，如图8所示。

由于MQL中冷却的介质有限，时常出现冷却不足的现象，于是，将微量润滑与低温冷却介质相结合，增强其在加工中的冷却润滑效果。WANG等[91]研究表明：低温冷却可有效降低CFRP/Ti叠层钻削推力，合理控制冷却温度与进给率，有助于钻削性能优化。RODRÍGUEZ等[92]发现低温冷却能够减小CFRP/Ti6Al4V叠层钻削的孔径偏差，提高刀具的完整性，减少黏着和烧伤现象，刀具寿命延长。孟祥军等[93]采用4种冷

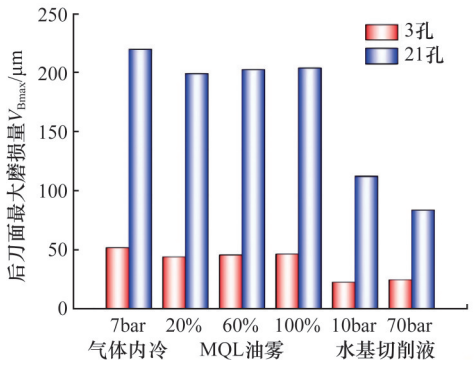



**图8　不同冷却策略下的$V_{Bmax}$[90]**

**Fig.8　$V_{Bmax}$ under different cooling strategies [90]**

却润滑方式进行钻削试验，结果表明，刀具主要磨损形式为黏结磨损和磨粒磨损。使用中心吹气时加工温度最高，液氮冷却时加工温度最低、轴向力最大，而使用水基冷却液时轴向力最小。水基冷却液对延长刀具寿命的效果最好，达到66个孔，而液氮冷却时最差，12个孔后失效。刀具磨损情况见图9和图10。此外，CHEN等[94]在有无低温冷风条件对CFRP/钛合金叠层结构开展了螺旋/倾斜行星铣削制孔试验，试验表明：低温冷风显著降低了铣削温度，减少刀具黏附磨损与刃口崩裂，减缓磨损速率。

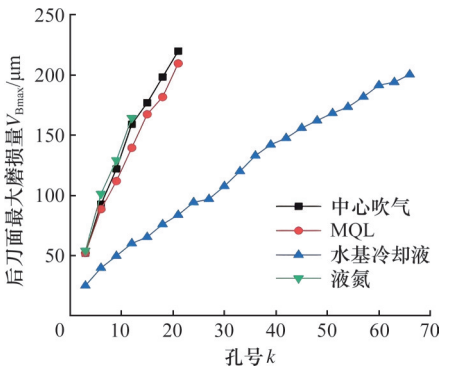



**图9　不同工况下$V_{Bmax}$随加工孔数的变化[93]**

**Fig.9　Variation of $V_{Bmax}$ with number of holes machined under different working conditions [93]**

### 4.2　振动制孔技术

振动钻削通过在传统钻削基础上给刀具或工件施加特定频率和振幅的可控振动，改变刀具与切屑、工件之间的接触状态，将原本连续的切削过程转化为“切削-分离”交替进行的间断过程。振动钻削按照振动性质不同，可分为自激振动和强迫振动，按照钻削时刀具振动频率的高低，分为低频振动钻削和超声振动钻削。刀具振动频率在200 Hz以下的为低频钻削，振动频率在16 kHz以上的为超声钻削[95]。

YANG等[96]通过运动学模型分析发现，低频振动钻削中合成切削速度角、有效前角、后角、未

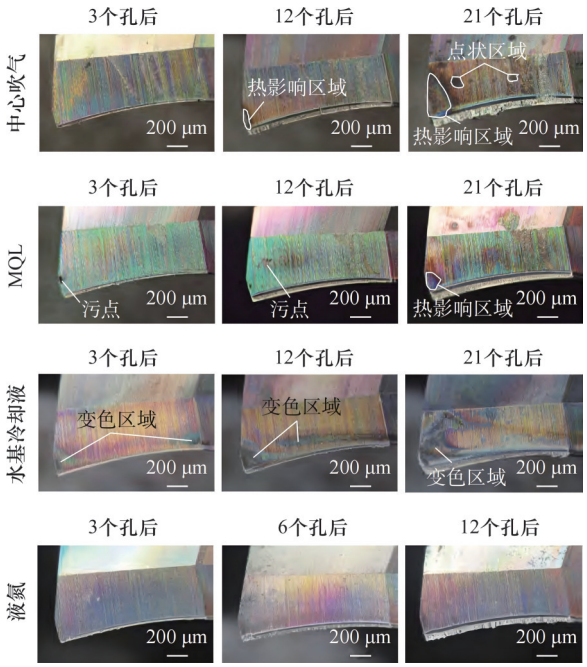



**图10 后刀面形貌[93]**

**Fig.10 Morphology of the flank face[93]**

变形切屑厚度及刀-工接触长度随切削位置变化，越靠近横刃变化越显著，并在低频振动下对CFRP/Ti叠层展开钻削试验。HUSSEIN等[97-98]和聂鹏等[99]在低频振动辅助钻削(LFVAD)和传统钻削(CD)工艺下对CFRP/钛合金叠层结构进行钻削试验研究，结果表明：LFVAD通过引入周期性轴向振动，将钛合金连续切屑变为分段状，优化排屑并降低切削温度，减少刀具上的切屑黏结，同时动态改变切削厚度与工作角度，降低平均轴向力和扭矩，减少刀具与工件的持续摩擦，延缓刀具磨损，与CD相比，LFVAD磨损分布更均匀，有效抑制切削刃快速钝化与崩刃，但未对振形进行优化。晏超仁[100]通过优化振形，减少刀具与工件接触路径，降低横刃耕犁力(频转比$\omega=3$时耕犁力最小)，降低主切削刃冲击载荷。PECAT等[49]进一步研究发现：LFVAD和CD下的刀具磨损形式相似，LFVAD使刀具寿命增幅超300%，使钛合金切削区温度降低约43%，抑制切削热引发的扩散磨损，但随着制孔数量的增加，降温效果减弱。LI等[101]在低频振动结合强制风冷工况下研究CFRP/Ti6Al4V叠层结构钻削刀具磨损，研究表明，LFVAD配合强制风冷促进了切屑排出，显著降低了切削温度和推力，减缓后刀面磨损速率，LFVAD结合强制风冷虽能减少钛黏附，但加剧了氧化磨损。并指出该工艺能延长刀具寿命，但需优化振动参数以平衡磨损机制。CHEN等[50]研究了MQL结合低频振动钻削CFRP/钛合金叠层的刀具磨损行为，MQL与LFVAD结合可通过间歇性切削和冷却润滑作用，降低刀具与工件的持续摩擦及切削温度，减轻钛合金对PCD刀具的黏附，金刚石涂层刀具钛黏附分布更少。

YING等[102]和ONAWUMI等[103]发现，相较于传统钻孔，超声辅助振动钻削可以显著降低轴向力，但降温效果并不显著。超声辅助钻削减少了钛合金在主切削刃和横刃区域的黏附现象，有效减轻了黏着磨损和磨粒磨损。LIU等[104]对比了传统钻削、超声辅助钻削(UAD)和超声啄钻(UPD)工艺下CFRP/Ti叠层材料钻削刀具磨损特性，发现CD刀具磨损最显著，前刀面有切屑黏附，主切削刃磨损严重，以圆化磨损为主；UPD减磨效果最优，刀具横刃磨损低于UAD，主切削刃完整性更好。此外，ZOU等[105]采用超声振动螺旋铣削与传统螺旋铣削对CFRP/Ti6Al4V叠层进行制孔试验探究其刀具磨损特性，研究表明，两种工艺下刀具磨损均以黏附磨损、扩散磨损和氧化磨损为主，超声振动螺旋铣削底部切削刃后刀面磨损比传统螺旋铣削低2.14%～19.28%。

综上所述，为抑制CFRP/钛合金叠层结构制孔刀具磨损，主要采用冷却润滑与振动制孔等辅助工艺。冷却润滑技术通过降低切削温度和摩擦来减缓磨损，其中低温冷却和MQL效果显著，能有效抑制黏着磨损和磨粒磨损，但需避免CFRP吸湿与润滑不足现象。振动制孔技术则通过将连续切削变为间断切削来改善排屑，降低切削力与温度，从而减少刀具黏附和崩刃，显著延长刀具寿命。将这两种技术复合应用，可进一步优化加工效果，这是提升叠层制孔质量与效率的关键途径，但还需寻求两者之间的平衡点。

## 5 刀具磨损状态监测

刀具磨损监测方法主要分为直接监测法与间接监测法两种。显微镜拍摄刀具磨损图像、SEM与EDS联用测量磨损部位的元素及激光扫描与轮廓测量等均属于直接监测法，易受到加工条件影响，且需要停机拆卸刀具，严重影响加工效率。

间接监测法是通过提取与刀具磨损相关的切削力、温度、振动、声音和电流等信号的隐含特征，利用机器学习或深度学习建立隐含特征与刀具磨损间的映射关系监测刀具磨损状态。江庆泉等[106]通过试验采集了CFRP/钛合金叠层钻削过程中的轴向力与声发射信号，经首尾截断、小波阈值去噪预处理，再提取时域、频域、小波包特征，用Pearson系数筛选19个强相关特征，最后建立卷积神经网络-长短时记忆(CNN-LSTM)模型，以

特征为输入、磨损标签为输出，识别准确率95.45%。LENG等[107]用统计、频谱、小波包分析法研究声发射(AE)信号与刀具磨损关系，他们用高速钢和硬质合金钻头进行试验，发现AE信号的均方根(RMS)值、功率谱及特定频段小波包能量与磨损相关，不同材料、切屑等会致信号突变，刀具跨材料加工时信号强度减、高频增，但其研究未解决刀具崩刃诊断等问题。谢松峰等[108]用Pearson系数降维，以遗传算法优化BP神经网络，建立磨损量预测与状态识别模型，研究表明，多信号融合监测效果最优，遗传算法-反向传播(GA-BP)神经网络模型识别正确率超90%。聂鹏等[109]针对CFRP/TC4叠层材料制孔刀具磨损严重的问题，提出scSE优化ResNet50的监测方法：先通过试验采集钻削力与温度信号，经连续小波变换转为小波尺度谱；搭建含scSE注意力机制的ResNet50模型，从空间和通道维度标定特征图权重，增强有用特征。试验以$V_B$值划分磨损阶段，用One-Hot编码标签，经训练后模型识别准确率达96.15%，且优于AlexNet等其他模型，有效提高了刀具磨损监测精度。

刀具磨损状态监测研究有助于实现CFRP/钛合金叠层结构钻削过程中刀具磨损的可视化，为钻削加工中合理更换刀具提供依据，避免因刀具过度磨损造成工件报废，促进该叠层结构的高质高效制孔。

## 6　结语

目前，CFRP/钛合金叠层结构凭借其优异的材料特性在航空航天领域广泛应用。该叠层结构的制孔过程中刀具面临着极为恶劣的切削环境，刀具磨损问题尤为突出，刀具磨损将直接影响叠层结构的制孔质量。本文从刀具磨损机理、刀具磨损的影响因素、刀具磨损对制孔质量的影响、刀具磨损抑制技术以及刀具磨损监测技术等五方面对CFRP/钛合金叠层结构制孔刀具磨损研究进行了系统的综述，并对抑制刀具磨损、实现CFRP/钛合金叠层结构高质高效制孔的未来研究方向进行展望：

1)刀具磨损机理的探究。目前对CFRP/钛合金叠层结构界面处力热耦合作用下刀具磨损的动态演化机制仍需细化，可结合分子动力学仿真与原位观测技术，从微观层面揭示刀具磨损的产生、发展以及刀具失效的全过程，明确不同加工阶段刀具磨损模式的临界条件和转换机制，并建立刀具磨损模型。

2)刀具材料与结构协同创新。当前针对刀具材料(基体、涂层)和刀具结构(横刃、顶角、异形结构)的优化多聚焦于单一维度，且取得一定成效。但仍需推进刀具材料、涂层与结构的协同创新，研发高性能的新型刀具及自适应智能刀具，以更好地适应复杂工况的加工。

3)刀具磨损抑制技术革新。冷却润滑(如微量润滑、低温冷却)与振动辅助(低频/超声)技术已在抑制刀具磨损方面展现出潜力，但其复合应用的协同机制与工艺窗口尚不明确。未来需开展多工艺参数耦合作用研究，建立“冷却-振动-刀具-工件”系统的能量与质量传递模型，明确工艺协同的优化区间，并开发新型环保介质(如纳米流体、超临界$CO_2$)与自适应供给系统，实现加工过程的精准控温与减摩。

4)刀具磨损监测与预测的智能化。现有监测方法多以离线或单一信号为主，难以满足实时、高精度的工程需求。未来应发展多传感器信息融合与数字孪生驱动的智能监测系统，结合深度学习等算法构建刀具磨损状态识别与剩余寿命预测模型，并与机床数控系统集成，实现加工参数的在线自适应调整与刀具更换的智能决策，最终形成“感知-预测-调控”一体化智能制造单元。

**参考文献：**


[1] 南成根，吴丹，马信国，等. 碳纤维复合材料/钛合金叠层钻孔质量研究[J]. 机械工程学报，2016，52(11)：177-185.
NAN Chenggen，WU Dan，MA Xinguo，et al. Study on the Drilling Quality of Carbon Fiber Reinforced Plastic and Titanium Stacks[J]. Journal of Mechanical Engineering，2016，52(11)：177-185.

[2] TANG Lingyan，LI Pengnan，YU Zhen，et al. New Drilling Method for Damage Reduction of CFRP/Ti Stacks Drilling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2021，115(1)：595-602.

[3] 刘书暖，宋晔，郭东林，等. CFRP/Ti叠层结构钻孔过渡域表面粗糙度演化机理[J]. 机械工程学报，2021，57(7)：224-233.
LIU Shunuan，SONG Ye，GUO Donglin，et al. Study on the Surface Roughness of Transitional Field in Drilling CFRP/Ti Stacks[J]. Journal of Mechanical Engineering，2021，57(7)：224-233.

[4] XU Jinyang，KOLESNYK V，LI Changping，et al. A Critical Review Addressing Conventional Twist Drilling Mechanisms and Quality of CFRP/Ti Stacks[J]. Journal of Materials Research and Technology，2023，24：6614-6651.

[5] JEBARATNAM J M. Application of Drill Bit Coatings for Fiber/Metal Stack Drilling in Aircraft Manufacturing：a Comprehensive Review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2025，136(7)：2987-3035.

[6] JEBARATNAM J M，HASSAN M H. Comprehensive Review of Drilling Strategies for CFRP/Ti Stacks in Air-

craft Manufacturing[J]. Machining Science and Technology, 2025, 29(3): 334-438.
[7] 宿友亮，孟志坚，郜雪楠，等. CFRP切削加工中刀具磨损研究进展[J]. 表面技术，2023，52(8)：27-48.
SU Youliang, MENG Zhijian, GAO Xuenan, et al. Research Progress of Tool Wear in Cutting of CFRP[J]. Surface Technology, 2023, 52(8): 27-48.
[8] 黄文亮，李鹏南，邱新义，等. 基于声发射CFRP加工刀具磨损及孔出口损伤研究[J]. 兵器材料科学与工程，2018，41(1)：51-56.
HUANG Wenliang, LI Pengnan, QIU Xinyi, et al. Tool Wear and Hole Exit Damage in Drilling CFRP Based on Acoustic Emission[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2018, 41(1): 51-56.
[9] LEE J H, GE J C, SONG J H. Study on Burr Formation and Tool Wear in Drilling CFRP and Its Hybrid Composites [J]. Applied Sciences, 2021, 11(1): 384.
[10] RAWAT S, ATTIA H. Wear Mechanisms and Tool Life Management of WC-Co Drills during Dry High Speed Drilling of Woven Carbon Fibre Composites[J]. Wear, 2009, 267(5/6/7/8): 1022-1030.
[11] 钱宝伟，刘巍，贾振元，等. 双顶角钻头钻削CFRP复合材料的刀具磨损机制[J]. 复合材料学报，2017，34(4)：521-529.
QIAN Baowei, LIU Wei, JIA Zhenyuan, et al. Wear Mechanism of Double Point Angle Drill Bit in Drilling CFRP Composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(4): 521-529.
[12] ILIESCU D, GEHIN D, GUTIERREZ M E, et al. Modeling and Tool Wear in Drilling of CFRP[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(2): 204-213.
[13] SU Youliang, JIA Zhenyuan, NIU Bin, et al. Size Effect of Depth of Cut on Chip Formation Mechanism in Machining of CFRP[J]. Composite Structures, 2017, 164: 316-327.
[14] MAYUET P, GALLO A, PORTAL A, et al. Damaged Area Based Study of the Break-IN and Break-OUT Defects in the Dry Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP)[J]. Procedia Engineering, 2013, 63: 743-751.
[15] WANG Xin, KWON P Y, STURTEVANT C, et al. Tool Wear of Coated Drills in Drilling CFRP[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2013, 15(1): 127-135.
[16] KARPAT Y, DEĞER B, BAHTIYAR O. Drilling Thick Fabric Woven CFRP Laminates with Double Point Angle Drills [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(10): 2117-2127.
[17] 宿友亮，文天皓，孟志坚，等. 切削CFRP中金刚石刀具的纳观磨损机理及磨损抑制研究[J]. 机械工程学报，2025，61(7)：181-197.
SU Youliang, WEN Tianhao, MENG Zhijian, et al. Wear Mechanism and Wear Suppression at the Nanoscale of Diamond Tools in Cutting CFRP[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(7): 181-197.
[18] 刘振旺，秦旭达，田利成，等. 碳纤维增强复合材料与钛合金钻孔技术研究进展[J]. 航空制造技术，2016，59(17)：71-76.
LIU Zhenwang, QIN Xuda, TIAN Licheng, et al. Research Progress of Drilling Technology of Carbon Fiber Reinforced Plastic(CFRP) and Titanium Alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(17): 71-76.
[19] LINDVALL R, LENRICK F, M'SAOUBI R, et al. Performance and Wear Mechanisms of Uncoated Cemented Carbide Cutting Tools in Ti6Al4V Machining[J]. Wear, 2021, 477: 203824.
[20] YOUNAS M, KHAN M, JAFFERY S H I, et al. Investigation of Tool Wear and Energy Consumption in Machining Ti6Al4V Alloy with Uncoated Tools[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 132(7): 3785-3799.
[21] HARTUNG P D, KRAMER B M, von TURKOVICH B F. Tool Wear in Titanium Machining[J]. CIRP Annals, 1982, 31(1): 75-80.
[22] DENG Jianxin, LI Yousheng, SONG Wenlong. Diffusion Wear in Dry Cutting of Ti-6Al-4V with WC/Co Carbide Tools[J]. Wear, 2008, 265(11/12): 1776-1783.
[23] RAHIM E A, SHARIF S. Investigation on Tool Life and Surface Integrity when Drilling Ti-6Al-4V and Ti-5Al-4V-Mo/Fe[J]. JSME International Journal Series C, 2006, 49(2): 340-345.
[24] FAN Yihang, HAO Zhaopeng, ZHENG Minli, et al. Wear Characteristics of Cemented Carbide Tool in Dry-machining Ti-6Al-4V[J]. Machining Science and Technology, 2016, 20(2): 249-261.
[25] ALONSO PINILLOS U, FERNÁNDEZ VIDAL S R, CALAMAZ M, et al. Wear Mechanisms and Wear Model of Carbide Tools during Dry Drilling of CFRP/TiAl6V4 Stacks[J]. Materials, 2019, 12(18): 2843.
[26] XU Jinyang, MANSORI M E L. Wear Characteristics of Polycrystalline Diamond Tools in Orthogonal Cutting of CFRP/Ti Stacks[J]. Wear, 2017, 376: 91-106.
[27] KIM D, BEAL A, KWON P. Effect of Tool Wear on Hole Quality in Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastic-Titanium Alloy Stacks Using Tungsten Carbide and Polycrystalline Diamond Tools [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2016, 138(3): 031006.
[28] CAO Sipeng, LI Yuan, ZHANG Kaifu, et al. Investigation of CFRP Damages Induced by the Interface High Temperature and Mixed Tool Wear Mechanism in Drilling of Thin-walled CFRP /Ti Stacks[J]. Composite Structures, 2023, 323: 117438.
[29] XU Jinyang, JI Min, CHEN Ming. On the Quantitative Analysis of Drill Edge Wear when Machining CFRP/Ti6Al4V Stacks [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(5): 1463-1472.
[30] JIAO Feng, LI Yuanxiao, NIU Ying, et al. A Review on the Drilling of CFRP/Ti Stacks: Machining Characteristics, Damage Mechanisms and Suppression Strategies at Stack Interface [J]. Composite Structures, 2023, 305: 116489.
[31] POUTORD A, ROSSI F, POULACHON G, et al. Local Approach of Wear in Drilling Ti6Al4V/CFRP for Stack Modelling[J]. Procedia CIRP, 2013, 8: 316-321.
[32] PARK K H, BEAL A, DAE-WOOK KIM D, et al. A Comparative Study of Carbide Tools in Drilling of CFRP and CFRP-ti Stacks[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2014, 136: 014501.
[33] WANG Xin, KWON P Y, STURTEVANT C, et al. Comparative Tool Wear Study Based on Drilling Experiments on CFRP/Ti Stack and Its Individual Layers [J]. Wear, 2014, 317(1/2): 265-276.
[34] HAN Ce, LUO Ming, ZHANG Dinghua, et al. Mechanistic Modelling of Worn Drill Cutting Forces with Drill Wear Effect Coefficients[J]. Procedia CIRP, 2019, 82: 2-7.
[35] 赵永锋，李鹏南，李树健，等. CFRP/钛合金叠层板钻孔刀具研究进展[J]. 工具技术，2021，55(2)：3-8.
ZHAO Yongfeng, LI Pengnan, LI Shujian, et al. Review on Research Status of Drilling Tool for CFRP/Titanium Alloy Laminated Structure[J]. Tool Engineering, 2021, 55

(2)：3-8.

[36] RAMULU M，BRANSON T，KIM D. A Study on the Drilling of Composite and Titanium Stacks[J]. Composite Structures，2001，54(1)：67-77.

[37] PARK K H，KWON P，KIM D. Wear Characteristic on BAM Coated Carbide Tool in Drilling of Composite/Titanium Stack[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing，2012，13(7)：1073-1076.

[38] WANG Ben，YIN Wendian，WANG Minghai，et al. Edge Chipping Mechanism and Failure Time Prediction on Carbide Cemented Tool during Drilling of CFRP/Ti Stack[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2017，91(9)：3015-3024.

[39] 何耿煌. 碳化物添加剂对硬质合金刀具综合性能的影响[J]. 稀有金属与硬质合金，2019，47(2)：87-92.
HE Genghuang. Influence of Carbide Additive on Comprehensive Properties of Cemented Carbide Cutting Tools[J]. Rare Metals and Cemented Carbides，2019，47(2)：87-92.

[40] KITAGAWA T，KUBO A，MAEKAWA K. Temperature and Wear of Cutting Tools in High-speed Machining of Inconel 718 and Ti-6Al-6V-2Sn[J]. Wear，1997，202(2)：142-148.

[41] JUGRESTAN C I，POPA M S，SATTEL S，et al. Tool Material，Tool Wear and Machined Hole Quality Evaluation at CFRP Drilling[C]//MATEC Web of Conferences. Lasi，2017，112：01015.

[42] ÇELIK A，LAZOGLU I，KARA A，et al. Wear on Si-AlON Ceramic Tools in Drilling of Aerospace Grade CFRP Composites[J]. Wear，2015，338/339：11-21.

[43] PRISCO U，IMPERO F，RUBINO F. Peck Drilling of CFRP/Titanium Stacks：Effect of Tool Wear on Hole Dimensional and Geometrical Accuracy[J]. Production Engineering，2019，13(5)：529-538.

[44] PARK K H，BEAL A，KIM D D，et al. Tool Wear in Drilling of Composite/Titanium Stacks Using Carbide and Polycrystalline Diamond Tools[J]. Wear，2011，271(11/12)：2826-2835.

[45] 徐锦泱. 碳纤维增强树脂基复合材料钻削缺陷研究进展[J]. 航空制造技术，2022，65(22)：24-33.
XU Jinyang. Research Advances in Drilling-induced Defects of Carbon Fiber Reinforced Polymers[J]. Aeronautical Manufacturing Technology，2022，65(22)：24-33.

[46] 赵鑫，鄢强，宋慧谨，等. 刀具涂层的研究进展[J]. 涂料工业，2023，53(8)：76-81.
ZHAO Xin，YAN Qiang，SONG Huijin，et al. Research Progress of Cutting Tool Coating[J]. Paint & Coatings Industry，2023，53(8)：76-81.

[47] XU Jinyang，JI Min，DAVIM J P，et al. Comparative Study of Minimum Quantity Lubrication and Dry Drilling of CFRP/Titanium Stacks Using TiAlN and Diamond Coated Drills[J]. Composite Structures，2020，234：111727.

[48] ISBILIR O，GHASSEMIEH E. Comparative Study of Tool Life and Hole Quality in Drilling of CFRP/Titanium Stack Using Coated Carbide Drill[J]. Machining Science and Technology，2013，17(3)：380-409.

[49] PECAT O，BRINKSMEIER E. Tool Wear Analyses in Low Frequency Vibration Assisted Drilling of CFRP/Ti6Al4V Stack Material[J]. Procedia CIRP，2014，14：142-147.

[50] CHEN Dexiong，LIN Hai，CHEN Yan，et al. Wear Behaviors of PCD and Diamond-coated Tools during Low-frequency Vibration-assisted Drilling CFRP/Ti Stacks[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2023，128(1)：595-609.

[51] LI Shipeng，QIN Xuda，JIN Yan，et al. A Comparative Study of Hole-making Performance by Coated and Uncoated WC/Co Cutters in Helical Milling of Ti/CFRP Stacks[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2018，94(5)：2645-2658.

[52] WANG Lijun，LIU Yan，CHEN Hui，et al. Modification Methods of Diamond Like Carbon Coating and the Performance in Machining Applications：a Review[J]. Coatings，2022，12(2)：224.

[53] MUGHAL B. Stack Drilling of CFRPT/TI Using Coated and Uncoated Tools[D]. Cranfield：Cranfield University，2018.

[54] 蔡飞，高营，蔡习军，等. 硬质合金刀具高能离子源增强多弧镀AlCrTiSiN梯度涂层制备及性能研究[J]. 机械工程学报，2019，55(19)：213-220.
CAI Fei，GAO Ying，CAI Xijun，et al. Study on Preparation and Properties of Gradient AlCrTiSiN Coated Cemented Carbide Tools Deposited by Ion Source Enhanced Multi-arc Ion Plating Technology[J]. Journal of Mechanical Engineering，2019，55(19)：213-220.

[55] SAMSUDEENSADHAM S，KRISHNARAJ V. Comparative Tool Wear Study on Drilling of CFRP/Ti Stacks Using TiAlN and AlTiSiN Coated Drill Bits[J]. Engineering Research Express，2025，7(3)：035550.

[56] FUJIWARA J，NAGAURA R，et al. Drilling of CFRP/Ti6Al4V Stack Board[J]. International Journal of Automation Technology，2013，7(4)：426-432.

[57] NGUYEN D，VOZNYUK V，ABDULLAH M SBIN，et al. Tool Wear of Superhard Ceramic Coated Tools in Drilling of CFRP/Ti Stacks[C]// ASME 2019 14th International Manufacturing Science and Engineering Conference. College Station，2019：V004T03A037.

[58] 王建肖，陈光军，赵理想，等. 切削加工刀具磨损及其预测建模技术研究进展[J]. 航空制造技术，2023，66(18)：98-109.
WANG Jianxiao，CHEN Guangjun，ZHAO Lixiang，et al. Research Progress of Tool Wear and Its Prediction Modeling Technology in Cutting Process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology，2023，66(18)：98-109.

[59] 张云凯，郑耀辉，高云峰，等. CFRP与钛合金叠层制孔钻头横刃结构优化[J]. 工具技术，2017，51(3)：76-79.
ZHANG Yunkai，ZHENG Yaohui，GAO Yunfeng，et al. Optimization of Drill Chisel Edge Structure on Carbon Fiber Reinforced Composite and Titanium Alloy Laminated Structure[J]. Tool Engineering，2017，51(3)：76-79.

[60] SENTHILKUMAR M，PRABUKARTHI A，KRISHNARAJ V. Study on Tool Wear and Chip Formation during Drilling Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)/Titanium Alloy (Ti6Al4V) Stacks[J]. Procedia Engineering，2013，64：582-592.

[61] 姚琦威，陈燕，杨浩骏，等. 钻头几何参数对低频振动钻削CFRP/钛合金叠层材料钻削轴向力及温度的影响[J]. 工具技术，2019，53(3)：28-32.
YAO Qiwei，CHEN Yan，YANG Haojun，et al. Effect of Drill Geometry Parameters on Axial Force and Drilling Temperature of Low Frequency Vibration Drilling CFRP/Titanium Alloy Stack Materials[J]. Tool Engineering，2019，53(3)：28-32.

[62] XU Jinyang，MANSORI MEL. Experimental Study on Drilling Mechanisms and Strategies of Hybrid CFRP/Ti Stacks[J]. Composite Structures，2016，157：461-482.

[63] JEBARATNAM J M，HASSAN M H. Process Enhancement and Performance Evaluation of Single-shot Drilling of CFRP/Aluminum Stacks：a Review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2024，135(7)：3015-3050.

[64] KUO C L, SOO S L, ASPINWALL D K, et al. Tool Wear and Hole Quality When Single-shot Drilling of Metallic-composite Stacks with Diamond-coated Tools[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2014, 228(10): 1314-1322.

[65] QIU Xinyi, YU Zhen, LI Changping, et al. Influence of Main Cutting Edge Structure on Hole Defects in CFRP/Titanium Alloy Stacks Drilling[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 69: 503-513.

[66] 冷小龙，李鹏南，邱新义，等. 阶梯钻钻削碳纤维复合材料-钛合金叠层板刀具磨损试验研究[J]. 宇航材料工艺，2018，48(2)：86-90.
LENG Xiaolong, LI Pengnan, QIU Xinyi, et al. Tool Wear of Step Drill Drilling CFRP/TC4 Stack[J]. Aerospace Materials & Technology, 2018, 48(2): 86-90.

[67] 杨凯，卢文壮，张吴晖. 阶梯钻头钻削CFRP/TC4钛合金叠层材料研究[J]. 工具技术，2018，52(8)：19-22.
YANG Kai, LU Wenzhuang, ZHANG Wuhui. Study on CFRP/TC4 Titanium Alloy Laminated Material with Step Drill Bit Drilling[J]. Tool Engineering, 2018, 52(8): 19-22.

[68] ALONSO U, CALAMAZ M, GIROT F, et al. Influence of Flute Number and Stepped Bit Geometry when Drilling CFRP/Ti6Al4V Stacks[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 39: 356-370.

[69] WANG Qi, WANG Fuji, ZHANG Chong, et al. Combined Effects of Various Materials on Tool Wear in Drilling of Ti/CFRP Stacks[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2020, 234(14): 2750-2759.

[70] JIA Zhenyuan, ZHANG Chong, WANG Fuji, et al. An Investigation of the Effects of Step Drill Geometry on Drilling Induced Delamination and Burr of Ti/CFRP Stacks[J]. Composite Structures, 2020, 235: 111786.

[71] WEI Yingying, AN Qinglong, MING Weiwei, et al. Effect of Drilling Parameters and Tool Geometry on Drilling Performance in Drilling Carbon Fiber-reinforced Plastic/Titanium Alloy Stacks[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(9): 1687814016670281.

[72] SENTHILKUMAR M, PRABUKARTHI A, KRISHNARAJ V. Multi-response Optimisation in Drilling of CFRP/Ti6Al4V Stacks: a Degree of Similarity Approach [J]. International Journal of Materials Engineering Innovation, 2017, 8(3/4): 222.

[73] 王贤锋，周磊，安庆龙，等. CFRP/Ti叠层钻削力热行为与切屑成形分析[J]. 航空制造技术，2018，61(23)：96-101.
WANG Xianfeng, ZHOU Lei, AN Qinglong, et al. Analysis on Force-Thermal Behaviors and Chip Forming of CFRP/Ti Stacks Drilling[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(23): 96-101.

[74] 王明海，印文典，王奔，等. 钻削参数对CFRP/Ti叠层材料钻削温度的影响[J]. 机械设计与制造，2017(12)：98-101.
WANG Minghai, YIN Wendian, WANG Ben, et al. Influence of Cutting Parameters on Drilling Temperature of CFRP/Ti Stacks[J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(12): 98-101.

[75] 谢大叶，孙忠海，刘标. CFRP/Ti叠层材料低频振动辅助钻削时不同参数对刀具磨损的影响[J]. 工具技术，2021，55(9)：88-91.
XIE Daye, SUN Zhonghai, LIU Biao. Effects of Different Parameters on Tool Wear in Low Frequency Vibration Aided Drilling of CFRP/Ti Laminates[J]. Tool Engineering, 2021, 55(9): 88-91.

[76] GAO Hang, ZHANG Xuanlong. Drilling of Composite and Titanium Stacks with Alternating Machining Parameters by PCD Drill[J]. International Journal of Machining and Machinability of Materials, 2011, 10(4): 280.

[77] XU Jinyang, LI Chao, CHEN Ming, et al. On the Analysis of Temperatures, Surface Morphologies and Tool Wear in Drilling CFRP/Ti6Al4V Stacks under Different Cutting Sequence Strategies [J]. Composite Structures, 2020, 234: 111708.

[78] KIM D, BEAL A, KANG K, et al. Hole Quality Assessment of Drilled CFRP and CFRP-Ti Stacks Holes Using Polycrystalline Diamond (PCD) Tools[J]. Carbon Letters, 2017, 23: 1-8.

[79] WANG Chunhao, LI Pengnan, LI Shujian, et al. Tool Wear in Longitudinal-torsional Ultrasonic Vibration Assisted Drilling of CFRP/Ti Stacks and Its Influence on Drilling Quality[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2024, 25(1): 35-50.

[80] WANG Ben, ZHAO Hua, ZHANG Fan, et al. Comparison of the Geometric Accuracy of Holes Made in CFRP/Ti Laminate by Drilling and Helical Milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112(11): 3343-3350.

[81] 邹凡，王贤锋，周磊，等. 刀具磨损对CFRP/Ti叠层制孔精度影响的试验研究[J]. 工具技术，2020，54(11)：18-21.
ZOU Fan, WANG Xianfeng, ZHOU Lei, et al. Experimental Study on Influence of Tool Wear on Precision of CFRP/Ti Stacks Drilling[J]. Tool Engineering, 2020, 54(11): 18-21.

[82] 王福吉，成德，赵猛，等. 冷却空气流向对CFRP制孔刀具磨损及孔质量的影响[J]. 复合材料学报，2019，36(2)：410-417.
WANG Fuji, CHENG De, ZHAO Meng, et al. Influence of Cooling Air Direction on Tool Wear and Hole Quality in CFRP Drilling [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(2): 410-417.

[83] XIA T, KAYNAK Y, ARVIN C, et al. Cryogenic Cooling-induced Process Performance and Surface Integrity in Drilling CFRP Composite Material [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(1): 605-616.

[84] KUMAR MISHRA S, GHOSH S, ARAVINDAN S. Machining Performance Evaluation of Ti6Al4V Alloy with Laser Textured Tools under MQL and Nano-MQL Environments[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 53: 174-189.

[85] IQBAL A, ZHAO Guolong, ZAINI J, et al. Sustainable Hole-making in a Titanium Alloy Using Throttle and Evaporative Cryogenic Cooling and Micro-lubrication[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 67: 212-225.

[86] 袁尧辉，王成勇，李伟秋，等. 微量润滑切削用气动雾化器设计及雾化特性研究[J]. 中国机械工程，2026，37(4)：837-845.
YUAN Yaohui, WANG Chengyong, LI Weiqiu, et al. Pneumatic Atomizer Design and Droplet Characterization for MQL in Metal Cutting[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(4): 837-845.

[87] XU Jinyang, JI Min, CHEN Ming, et al. Investigation of Minimum Quantity Lubrication Effects in Drilling CFRP/Ti6Al4V Stacks [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2019, 34(12): 1401-1410.

[88] 张玉玺，吴丹，杨亚鹏，等. 冷却润滑方式对CFRP/Al叠层钻孔质量及轴向力的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2018，58(4)：402-410.

ZHANG Yuxi, WU Dan, YANG Yapeng, et al. Influence of Cooling/Lubrication Conditions on the Drilling Quality and Thrust Force of CFRP/Al Stacks[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2018, 58(4): 402-410.

[89] JI Min, XU Jinyang, CHEN Ming, et al. Effects of Different Cooling Methods on the Specific Energy Consumption When Drilling CFRP/Ti6Al4V Stacks[J]. Procedia Manufacturing, 2020, 43: 95-102.

[90] GUO Nan, CHEN Yan, YAN Chaoren, et al. Machinability of CFRP/Ti6Al4V Stacks with Low-frequency-vibration Assisted Drilling under Different Cooling Strategies[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 108: 852-862.

[91] WANG Xi, WANG Chengyong, SHI Runping, et al. Research on the Effect of Low Temperature on the Performance of Drilling Carbon Fibre Reinforced Polymer and Ti Stack Materials [C] //Materials Science Forum. Jinan, 2012, 723: 30-34.

[92] RODRÍGUEZ A, CALLEJA A, DE LACALLE L N L, et al. Drilling of CFRP-Ti6Al4V Stacks Using $CO_2$-cryogenic Cooling [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64: 58-66.

[93] 孟祥军，郭南，陈燕，等. 冷却润滑方式对CFRP/钛合金叠层制孔刀具磨损的影响[J]. 航空制造技术，2023，66(13)：87-93.
MENG Xiangjun, GUO Nan, CHEN Yan, et al. Effect of Cooling Strategies on Tool Wear of Drilling CFRP/TC4 Stacks [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(13): 87-93.

[94] CHEN Tao, LI Chunhui, ZHANG Jianing, et al. Research on Milling Performance of CFRP/Titanium Alloy Stacks under Low Temperature Cold Wind Conditions[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 134(7): 3237-3250.

[95] 李远霄，焦锋，张世杰，等. 高低频复合振动钻削CFRP/钛合金叠层结构试验[J]. 航空学报，2021，42(10)：337-350.
LI Yuanxiao, JIAO Feng, ZHANG Shijie, et al. Experiment on High and Low Frequency Compound Vibration-assisted Drilling of CFRP/Titanium Alloy Laminated Structure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(10): 337-350.

[96] YANG Haojun, CHEN Yan, XU Jiuhua, et al. Tool Wear Mechanism in Low-frequency Vibration-assisted Drilling of CFRP/Ti Stacks and Its Individual Layer[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(5): 2539-2551.

[97] HUSSEIN R, SADEK A, ELBESTAWI M A, et al. An Investigation into Tool Wear and Hole Quality during Low-frequency Vibration-assisted Drilling of CFRP/Ti6Al4V Stack[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2019, 3(3): 63.

[98] HUSSEIN R, SADEK A, ELBESTAWI M A, et al. Low-frequency Vibration-assisted Drilling of Hybrid CFRP/Ti6Al4V Stacked Material [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98(9): 2801-2817.

[99] 聂鹏，马义迪，郭勇翼，等. CFRP/Ti叠层材料低频振动制孔试验研究[J]. 现代制造工程，2022(6)：56-62.
NIE Peng, MA Yidi, GUO Yongyi, et al. Experimental Research on Low Frequency Vibration Hole Making of CFRP/Ti Laminated Material[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022(6): 56-62.

[100] 晏超仁. CFRP/TC4叠层结构低频振动自适应变参数制孔工艺基础研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2022.
YAN Chaoren. Fundamental Research on Low-frequency Vibration-assisted Drilling and Adaptive Parameter-changeover Process of CFRP/Ti6Al4V Stacks[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022.

[101] LI Chao, XU Jinyang, CHEN Ming, et al. Tool Wear Processes in Low Frequency Vibration Assisted Drilling of CFRP/Ti6Al4V Stacks with Forced Air-cooling [J]. Wear, 2019, 426/427: 1616-1623.

[102] YING Enze, ZHOU Zehua, GENG Daxi, et al. High-efficiency Ultrasonic Assisted Drilling of CFRP/Ti Stacks under Non-separation Type and Dry Conditions[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2024, 25(4): 275-291.

[103] ONAWUMI P Y, ROY A, SILBERSCHMIDT V V, et al. Ultrasonically Assisted Drilling of Aerospace CFRP/Ti Stacks[J]. Procedia CIRP, 2018, 77: 383-386.

[104] LIU Fengyu, CHEN Tao, DUAN Zhenyan, et al. Ultrasonic Assisted Pecking Drilling Process for CFRP/Ti Laminated Materials[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 108: 834-851.

[105] ZOU Yuhe, CHEN Guang, REN Chengzu, et al. Performance and Mechanism of Hole-making of CFRP/Ti-6Al-4V Stacks Using Ultrasonic Vibration Helical Milling Process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 117(11): 3529-3547.

[106] 江庆泉，李鹏南，邱新义，等. 基于深度学习的CFRP/TC4叠层结构制孔刀具磨损状态监测[J]. 宇航材料工艺，2024，54(5)：40-49.
JIANG Qingquan, LI Pengnan, QIU Xinyi, et al. Tool Wear Condition Monitoring Based on Deep Learning during Drilling CFRP/TC4 Laminated Structure[J]. Aerospace Materials & Technology, 2024, 54(5): 40-49.

[107] LENG Sheng, WANG Zhan, MIN Tao, et al. Detection of Tool Wear in Drilling CFRP/TC4 Stacks by Acoustic Emission[J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2020, 8(3): 463-470.

[108] 谢松峰，陈燕，晏超仁，等. 基于力信号的低频振动制孔刀具磨损状态分析[J]. 机械制造与自动化，2022，51(1)：11-14.
XIE Songfeng, CHEN Yan, YAN Chaoren, et al. Tool Wear Condition Analysis Based on Cutting Force Signals of Low Frequency Vibration Assisted Drilling[J]. Machine Building & Automation, 2022, 51(1): 11-14.

[109] 聂鹏，杨程越，彭新月，等. 采用空间和通道激励注意力机制优化ResNet-50的CFRP/TC4叠层材料钻削刀具磨损状态监测[J]. 中国机械工程，2024，35(10)：1793-1801.
NIE Peng, YANG Chengyue, PENG Xinyue, et al. Tool Wear Condition Monitoring for Drilling CFRP/TC4 Laminated Materials Using scSE Optimised ResNet-50[J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(10): 1793-1801.

（编辑　王旻玥）

**作者简介：李鹏南***（通信作者），男，1963年生，教授、博士研究生导师。主要研究方向为难加工材料绿色高效精密加工。E-mail：2002lpn@163.com。

**本文引用格式：**

李鹏南，刘文杰，邱新义，等. CFRP/钛合金叠层结构制孔刀具磨损研究进展[J]. 中国机械工程，2026，37(9)：2216-2229.

LI Pengnan, LIU Wenjie, QIU Xinyi, et al. Research Progress on Tool Wear in Hole-making of CFRP/Titanium Alloy Stacked Structures[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(9): 2216-2229.