

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.03.005

低温铣削 T800 CFRP 多向层合板的刀具磨损研究

陈啸宇¹, 赵威¹, 赵国龙², 李亮², 李浩¹

(1.南京航空航天大学直升机传动技术重点实验室,南京 210016; 2.南京航空航天大学机电学院,南京 210016)

摘要:碳纤维增强树脂基复合材料(Carbon fiber reinforced plastics, CFRP)因其高强度比以及优秀的耐腐蚀等优异性能在航空航天、汽车等领域得到广泛应用。然而,由于CFRP材料的非均质性和各向异性,其加工过程相较传统均质材料更为复杂,导致刀具磨损严重。针对这一问题,本文选用PCD立铣刀对T800 CFRP多向层合板材料进行低温铣削试验,研究了切削速度、每齿进给量以及切削介质温度等对PCD刀具后刀面磨损的影响规律。结果表明,随着切削速度和每齿进给量的增大,刀具后刀面磨损带宽VB呈下降趋势,切削介质温度为-50℃时能够得到较小的刀具后刀面磨损带宽。此外,通过MATLAB对试验结果进行了非线性拟合,获得了切削速度、每齿进给量以及切削介质温度与刀具后刀面磨损带宽的映射关系经验模型,为T800 CFRP材料铣削刀具磨损抑制和延长刀具寿命提供了关键支撑数据。

关键词:碳纤维增强树脂基复合材料;低温铣削;刀具磨损;PCD立铣刀;低温氮气射流

中图分类号:TH162;V258 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2022)03-0397-07

Tool Wear of T800 CFRP Multi-directional Laminates Under Cryogenic Milling

CHEN Xiaoyu¹, ZHAO Wei¹, ZHAO Guolong², LI Liang², LI Hao¹

(1. Key Laboratory of Science and Technology on Helicopter Transmission, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Carbon fiber reinforced plastics (CFRP) are widely used in aerospace and automobile field because of its advantages, such as high strength and excellent corrosion resistance. However, due to its heterogeneity and anisotropy, the machining process is more complex than machining of traditional metal materials, which can lead to serious tool wear. In order to address this issue, PCD milling cutters are selected to conduct T800 CFRP multi-directional laminates milling tests under cryogenic condition. And then, the effect of cutting parameters and jet temperature on wear band width of flank face VB are analyzed. The results show that VB decreases with the increase of the cutting speed and the feed per teeth, and smaller VB is obtained when coolants temperature is -50℃. In addition, nonlinear fitting of the test results is carried out by MATLAB. The empirical model of mapping relationship between cutting parameters, coolants temperature and VB is obtained, which can provide key support data for T800 CFRP milling tool wear suppression and tool life prolonging.

Key words: carbon fiber reinforced plastics (CFRP); cryogenic milling; tool wear; PCD end mill; cryogenic nitrogen jet

碳纤维增强树脂基复合材料(Carbon fiber reinforced plastics, CFRP)因其高强度比、良好的隔

基金项目:国家重点研发计划(2018YFB2002202)

收稿日期:2022-03-29; **修订日期:**2022-04-20

通信作者:赵威,男,教授,博士生导师, E-mail: nuaazw@nuaa.edu.cn.

引用格式:陈啸宇,赵威,赵国龙,等. 低温铣削 T800 CFRP 多向层合板的刀具磨损研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(3): 397-403. CHEN Xiaoyu, ZHAO Wei, ZHAO Guolong, et al. Tool wear of T800 CFRP multi-directional laminates under cryogenic milling[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(3): 397-403.

热性能、耐腐蚀性能、抗疲劳性能以及可定制等优点在航空航天、汽车等领域得到了广泛的应用^[1-2]。在航空工业中CFRP零件大多是通过一次成型工艺制成^[3],但为了保证形位公差要求,通常需要进行二次加工,例如铣削、钻削等^[4]。然而,由于CFRP的非均质性和各向异性,加工过程中极易产生分层、毛刺等缺陷^[5]。同时,铣削加工过程中产生的高硬度碳纤维粉末以及高切削温度、高切削力,使得刀具磨损严重。过快的刀具磨损不仅降低了加工效率,也会因为刀具磨钝使得表面质量降低从而影响零件工作寿命和使用性能^[6]。

在切削加工CFRP时,由于传统切削液易渗透进CFRP材料导致其力学性能退化^[7],实际加工多采用干切削方式。但是由于干切削存在高切削力、高切削温度、低表面质量和刀具磨损严重等问题,因此,采用低温切削如利用液氮(LN₂)、液态二氧化碳(LCO₂)等低沸点低温介质对切削区进行冷却^[8],可有效避免传统切削液的使用,且加工过程中冷却润滑介质绿色无污染,近年来已成为CFRP加工的研究热点。如Kumar等^[9]对比了常温和低温环境下CFRP单向层合板的表面完整性,在低温条件下其表面质量相较于干切削最高提高了26.71%。Khairusshima等^[10]在加工过程中喷射-10℃的冷空气对硬质合金刀具进行冷却,结果表明,与室温相比刀具磨损和加工表面粗糙度明显得到改善。王彤辉^[11]在CFRP单向层合板侧铣加工中应用低温液氮冷却,以毛刺损伤指数(Fd)为指标,指出低温条件下毛刺缺陷得到了较好的抑制,且切削介质温度越低,则Fd越低。然而,CFRP材料以树脂作为基体材料,其力学性能在低温条件下通常会得到提升,从而导致切削力增大,因此存在刀具磨损加剧风险。如Ohashi等^[12]指出在低温条件下CFRP材料的硬度随着温度降低而不断提高,当温度达到-60℃,其硬度约为室温的1.5倍。Morkavuk等^[13]发现低温条件下CFRP的杨氏模量以及拉伸强度分别提高了3.65%和3.04%,从而导致更大的切削力。同样,Shao等^[14]发现在低温条件下纤维与树脂的结合强度提高了约31%,同时树脂的拉伸强度提高了27%。

综上所述可以看出,现有的研究中,国内外学者主要研究了低温切削对CFRP加工表面质量的影响,针对低温切削对刀具磨损影响的研究,尤其是面向工业上应用更为广泛的CFRP多向层合板的低温切削刀具磨损研究相对较少。而采用低温加工CFRP材料,在提升已加工表面质量和抑制刀具磨

损的同时,低温下的CFRP材料硬度和强度增加亦会导致切削力增大,从而对抑制刀具磨损不利。因此,从抑制刀具磨损和延长刀具寿命的角度考虑,探索低温切削CFRP时切削用量与切削介质温度等对刀具磨损的影响规律十分必要。

为此,针对上述问题,本研究以T800多向层合板为研究对象,选用PCD刀具进行了T800CFRP材料的低温铣削试验,并与干切削进行对比,深入分析了切削用量、切削介质温度等对刀具后刀面磨损VB的影响规律,进而利用MATLAB软件对试验结果进行拟合得到了切削速度、每齿进给量以及切削介质温度与刀具后刀面磨损带宽VB的映射关系经验模型,以期对T800CFRP材料铣削刀具磨损抑制和延长刀具寿命提供关键支撑。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验中采用T800CFRP多向层合板作为工件材料,工件尺寸为200 mm×100 mm×6.2 mm,如图1所示。T800CFRP多向层合板共计16个铺层,铺层方向为[0/90/45/-45]。T800CFRP的组成和力学性能如表1所示。

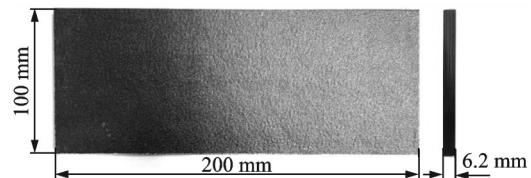


图1 T800CFRP多向层合板

Fig.1 T800CFRP multi-directional laminates specimen

表1 T800CFRP的组成和力学性能

Table 1 Mechanical properties and structural parameters of T800CFRP

纤维含量/ %	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	铺层 数量	弹性模量 E/GPa	拉伸强度 σ/MPa
59.2	1.58	16	160	2 860

1.2 试验刀具

试验所用刀具为PCD直刃铣刀,如图2所示。刀具具体参数如表2所示。该刀具采用0°螺旋角,能够有效减小轴向切削力从而抑制分层缺陷^[15]。刀柄为硬质合金材料,金刚石刀片通过焊接进行连接。PCD刀具硬度高,耐磨性能好,且避免了CVD刀具金刚石涂层高温易剥落的问题,是目前CFRP材料的最佳切削用刀具材料。

1.3 低温冷却系统

图3为试验所采用的低温液氮冷却系统实物

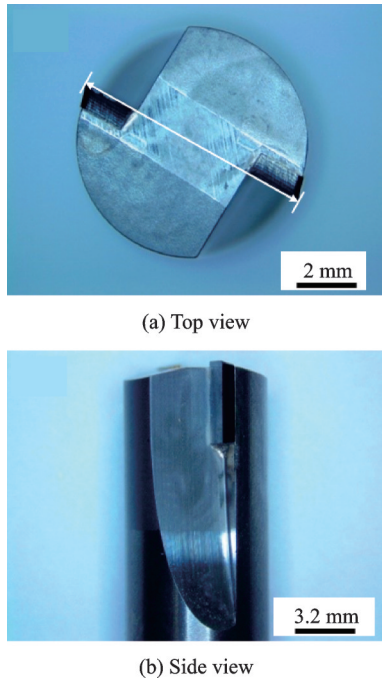


图 2 PCD 直刃铣刀

Fig.2 PCD straight milling cutter

表 2 PCD 直刃铣刀几何参数

Table 2 Geometrical parameters of the PCD straight milling cutter used in the experiment

齿数 Z	直径 D/mm	前角 $\gamma_0/(\text{°})$	后角 $\alpha_0/(\text{°})$	螺旋角 $h/(\text{°})$	刀刃半径 r/mm
2	8	5	10	0	0.1

图和原理图。该系统通过液氮与常温氮气混合形成低温射流,并在试验中维持自增压液氮罐的输出压力恒定(即液氮流量为 0.5 L/min),通过流量计调节常温氮气流量实现低温射流从 -196 °C 至 20 °C (室温)的调节,氮气流量可通过式(1)^[16]计算得到。切削介质(射流)温度通过温度传感器于喷嘴出口处进行测量,当切削介质温度上下波动不超过 10 °C 时视为射流输出温度稳定。

$$A = (83\ 087 + 210T) / (80.4 - 4T) \quad (1)$$

式中: A 为氮气流量, T 为低温射流温度。

1.4 试验设置

所有的低温铣削试验均在 DMG DMU60 monoBLACK 五轴立式加工中心上进行。机床最大转轴速度 $12\ 000\ \text{r/min}$,最大进给速度为 $20\ \text{m/min}$,最大功率为 $15\ \text{kW}$ 。试验采用侧铣方式(顺铣)对 T800 CFRP 多向层合板进行铣边,低温铣削现场加工图及示意图如图 4、5 所示。其中,切削介质输送喷嘴对准刀具后刀面并覆盖整个切削区(刀/工接触区),以便射流对刀具进行冷却。为了保护试验人员和机床,避免碳纤维粉尘对环境的污

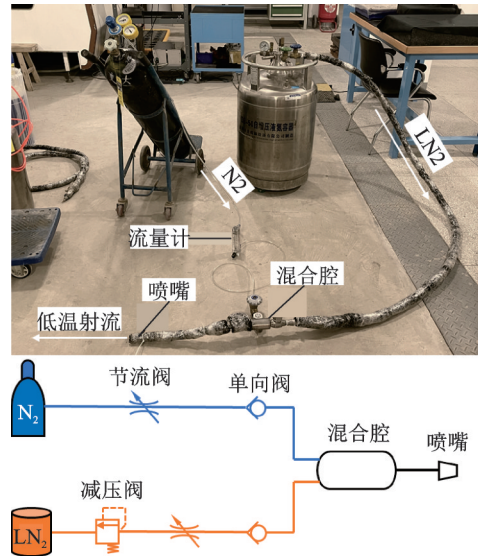


图 3 低温液氮冷却系统
Fig.3 Cryogenic cooling system

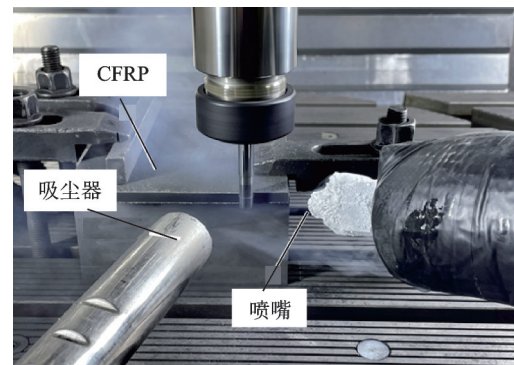


图 4 低温铣削现场加工图
Fig.4 Processing diagram of cryogenic milling

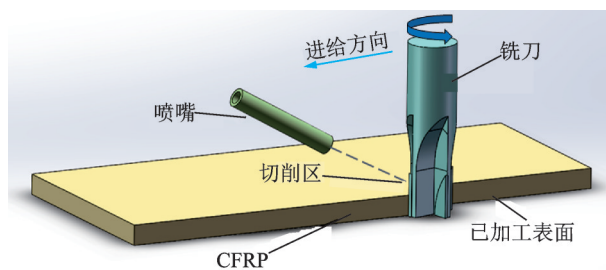


图 5 低温铣削示意图
Fig.5 Schematic diagram of cryogenic milling

染,在切削区附近使用工业吸尘器清除切屑。铣削过后,取下刀具,采用 LECIA DVM6 显微镜对刀具磨损进行图像获取以及测量。

该试验采用单因素试验,分别研究了切削速度、每齿进给量、切削介质温度对刀具磨损的影响。试验中每组试验使用一把新刀,切削 32 刀,铣削行程 $3.2\ \text{m}$,并重复 3 次试验,所得数据取平均值。表 3、4 为试验所采用的具体参数。

表3 CFRP单因素铣削试验参数表

Table 3 Parameter table of CFRP single factor milling test

切削速度 $v_c/(m \cdot \min^{-1})$	每齿进给量 $f_z/(mm \cdot z^{-1})$	径向切深 a_p/mm	轴向切深 a_e/mm	切削距离 L/m
125.6	0.02	1	3.2	3.2
	0.04			
	0.06			
	0.08			
62.8	0.04	1	3.2	3.2
251.2				
188.4				

表4 CFRP变温铣削试验参数表

Table 4 Parameter table of CFRP variable temperature milling test

切削介质温度 $t/^\circ\text{C}$	切削速度 $v_c/(m \cdot \min^{-1})$	每齿进给量 $f_z/(mm \cdot z^{-1})$	径向切深 a_p/mm	轴向切深 a_e/mm	切削距离 L/m
20	125.6	0.04	1	3.2	3.2
0					
-50					
-100					
-150					
-196					

2 试验结果与分析

2.1 刀具磨损形式

在实际侧铣时,仅PCD铣刀侧刃参与切削。切削时前刀面和后刀面分别与工件和已加工表面剧烈摩擦,造成切削区域温度升高,导致刀具在高温下逐渐发生磨损。另外,不同于传统金属材料,T800 CFRP材料切削产生的切屑为具有较高硬度的碳纤维粉末颗粒,刀/工接触区产生的剧烈摩擦导致后刀面以及刃口磨损严重。图6所示为前刀面及后刀面磨损形貌。从该图可以看出,由于碳纤维是典型的脆硬材料,主要发生脆性断裂,因此刀具磨损主要集中在刀具后刀面上。因此,本文选择后刀面磨损带宽来表征刀具磨损情况。

与此同时,从图6中还可以发现,后刀具磨损带呈现为一系列规律排列的月牙形磨损带,与切削传统金属时的刀具后面磨损带有明显不同,这一结果与Kim等^[17]以及Han等^[18]切削CFRP多向层合板得到刀具磨损形式相一致。这主要是由于多向层合板不同铺层方向的碳纤维材料去除机制不同,从而导致切削过程中切削力有明显差异所引起的^[19]。如已有研究结果^[20]表明,切削力随纤维角度变化由小到大排列为 $F_{90^\circ} < F_{45^\circ} < F_{135^\circ} < F_{0^\circ}$,即以 90° 为界,纤维切削方式由逆纤维切削转变为顺纤维切削,材料去除机理由弯曲断裂及挤压剪切断裂转变为剪切及拉伸断裂,而挤压剪切断裂消耗的能

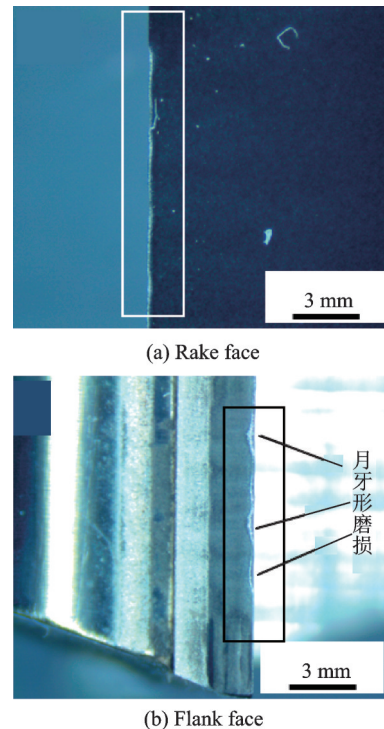


图6 前刀面及后刀面磨损形貌

Fig.6 Tool wear topography of rake face and flank face

量更多,因此切削力更大。此外,当切削 0° 纤维层时,纤维发生的挤压变形最大,因此纤维对后刀面的摩擦和挤压最为严重^[18],从而导致切削 0° 纤维时刀具磨损较为严重, 90° 刀具磨损较轻。由于PCD刀具后刀面磨损为规律分布的月牙形磨损带,为此本文对所有月牙形磨损区进行测量并取其平均值作为刀具的后刀面磨损带宽。

2.2 切削速度对刀具磨损的影响

采用PCD二齿直刃铣刀在干切削和液氮冷却条件下侧铣T800 CFRP后刀面磨损带宽随切削速度的变化规律如图7所示。从该图可以看出,在相同的切削用量下,液氮冷却条件(-196°C ,CT)下的刀具磨损均大于干切削(室温条件,RT)下的刀

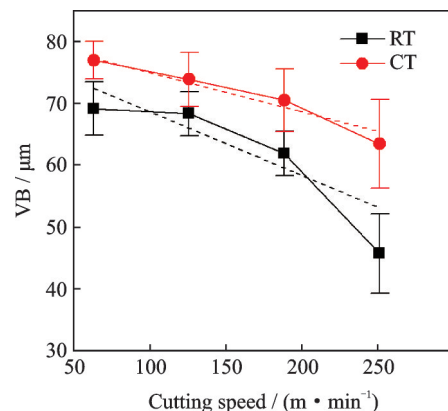


图7 后刀面磨损带宽随切削速度的变化

Fig.7 Wear band width of flank face varies with cutting speed

具磨损。这主要是由于低温环境下较低的切削温度虽能有效抑制刀具磨损,但树脂硬度提高,树脂与纤维之间的结合强度提高^[14],切削力明显增大,在纯液氮冷却(-196℃)的条件下切削力对刀具磨损的影响占据主导地位,使得刀具磨损相较于室温条件更为严重。此外,无论是在干切削还是液氮冷却条件下切削 T800 CFRP,刀具后刀面磨损带宽都随着切削速度的提高而不断减小。究其原因,随着切削速度的提高,单位时间内刀具与工件摩擦距离增大,切削区温度升高导致树脂硬度降低甚至软化^[21],从而降低了切削力。另外,随着切削速度的提高,单位体积材料的切削时间缩短,纤维变形减轻^[22],已加工表面粗糙度降低,从而减轻了纤维回弹挤压以及对刀具后刀面的摩擦。因此,大的切削速度条件下刀具磨损较小。

2.3 每齿进给量对刀具磨损的影响

如图 8 所示为 PCD 二齿直刃铣刀在干切削和液氮冷却条件下侧铣 T800 CFRP 后刀面磨损带宽随每齿进给量的变化规律。由该图可知,在干切削和液氮冷却条件下,后刀面磨损带宽随每齿进给量整体均呈下降趋势,该结果与 Ozkan 等^[23]采用 WC-Co 硬质合金刀具切削 CFRP 多向层合板时得到的刀具磨损变化趋势相似。当每齿进给量增大时,刀具单位时间内的材料去除量增大,切削阻力增大,切削力提高。然而,随着每齿进给量增大,相同切削行程,切削时间减少,刀/工接触区减小,刀具磨损降低^[24]。因此,在上述两种因素的共同作用下,室温条件下的后刀面磨损带宽先增大后减小,而在低温条件下,切削时间对刀具磨损的影响占主导地位,后刀面磨损带宽随着每齿进给量增大而不断减小^[24]。

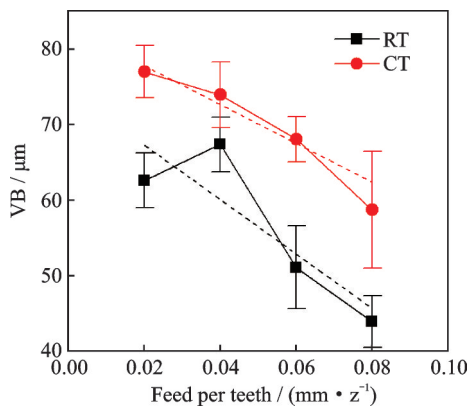


图 8 后刀面磨损带宽随每齿进给量的变化

Fig.8 Wear band width of flank face varies with feed rate per teeth

2.4 切削介质温度对刀具磨损的影响

图 9 为 PCD 二齿直刃铣刀在相同切削用量($v_c=125.6$ m/min, $f_z=0.04$ mm/z, $a_c=1$ mm)下铣削

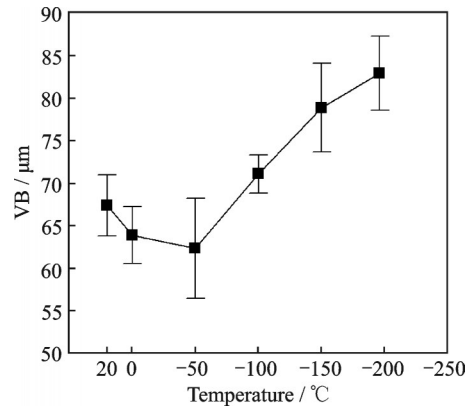


图 9 后刀面磨损带宽随切削介质温度的变化

Fig.9 Wear bandwidth of flank face varies with coolant temperature

T800 CFRP 刀具磨损带宽随切削介质温度的变化规律。从该图可以看出,刀具后刀面磨损带宽首先随着切削介质温度的降低而减小,并在 -50℃ 达到最小值,随后刀具后刀面磨损带宽迅速变大甚至超过室温条件下的刀具磨损。究其原因,随着切削介质温度的降低,CFRP 材料的力学性能随之提升,如树脂基体与碳纤维之间的结合强度逐渐增大,树脂硬度不断提高^[12-14],因此铣削 CFRP 所需的能量不断提高,导致切削力增大,加剧刀具磨损。然而,切削介质温度降低能够有效降低切削区域产生的切削热,对抑制刀具磨损有利。同时,已有研究表明^[11-20],随着切削介质温度的降低,树脂与碳纤维之间的结合强度增大,减少了纤维拔出、凹坑等表面缺陷的出现,已加工表面粗糙度得到改善,毛刺因子也随着温度降低不断减小,因此其对刀具后刀面的摩擦减小,从而减轻了刀具磨损。因此,在多重因素的综合作用下,刀具后刀面磨损带宽呈现出先下降后上升的趋势,并在 -50℃ 左右低温抑制刀具磨损以及低温改善加工表面质量所带来的正面影响远远大于低温增强 CFRP 材料力学性能导致切削力增大所带来的负面影响,从而在 -50℃ 得到了最小的刀具磨损,这一结论与 Jia 等^[25]建议低温切削 CFRP 准各向同性层合板时切削区域温度不高于 -25℃ 以避免切削力过大相似。

2.5 刀具磨损经验模型的建立

建立刀具磨损与切削用量之间的映射关系是抑制刀具磨损和延长刀具寿命的重要前提。为此,本文采用基于试验的方法,建立了刀具后刀面磨损带宽与切削速度 v_c 、每齿进给量 f_z 、切削介质温度 t 之间的映射关系经验模型。其中,采用复指形式,假设 VB 与 v_c 、 f_z 、 t 间的数学表达式为

$$VB = f(v, f, t) = C v^a f^b t^c \quad (2)$$

采用MATLAB软件的非线性回归nlinfit函数,结合处理后的试验数据即可以得出VB与切削用量之间的非线性回归方程

$$Y = 7.5943 - 0.1967X_1 - 0.2279X_2 - 0.4461X_3 \quad (3)$$

最终建立的刀具磨损映射方程如下

$$VB = e^{9.6017} (v_c/2)^{-0.2587} 100f_z^{-0.2602} (t/8+40)^{-0.8360} \quad (4)$$

为了确定映射方程(3)的可信度,需要对回归方程进行显著性验证,通过计算 R^2 可得,该经验模型拟合优度为80.45%。另外,本文选取了两组切削用量进行验证试验: $v_c=188.4$ m/min, $f_z=0.04$ mm/z, $t=-196$ °C; $v_c=251.2$ m/min, $f_z=0.04$ mm/z, $t=-196$ °C。通过刀具磨损映射方程可得刀具后刀面磨损带宽分别为71.83 μ m, 66.67 μ m,与实验得到的结果(70.54 μ m, 63.47 μ m)分别存在1.6%和5.02%的误差,均小于10%。因此,该映射关系经验模型对PCD刀具低温铣削T800 CFRP材料时的刀具后刀面磨损带宽进行了有效预测。

3 结 论

(1)采用PCD铣刀铣削T800 CFRP多向层合板,由于不同纤维角度碳纤维的去除机制存在差异,因此其刀具磨损主要为后刀面磨损,且形式为一系列规律排列的月牙形后刀面磨损带。

(2)通过干切削和低温切削试验得出后刀面磨损带宽随着切削速度和每齿进给量的增大而减小,随着切削介质温度的降低先减小后增大,并在-50 °C附近达到最小值。因此,从抑制刀具磨损的角度考虑,低温铣削CFRP材料时并非温度越低越好。

(3)利用MATLAB软件非线性回归nlinfit函数对试验数据进行拟合,得到刀具磨损关于切削用量和切削介质温度的映射方程,通过验证试验对方程进行检验,得到的结果与试验数据相比误差均在10%以内,能够有效预测刀具磨损情况。

参考文献:

- [1] GEIER N, DAVIM J P, SZALAY T. Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review[J]. Composites, Part A. Applied Science and Manufacturing, 2019. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105552.
- [2] VIGNESHWARAN S, UTHAYAKUMAR M, ARUMUGAPRABU V. Review on machinability of fiber reinforced polymers: A drilling approach[J]. Silicon, 2018, 10(5): 2295-2305.
- [3] DANISH M, GUPTA M K, RUBAIEE S, et al. Machinability investigations on CFRP composites: A comparison between sustainable cooling conditions[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114(11/12): 3201-3216.
- [4] 陈明,徐锦洪,安庆龙.碳纤维复合材料与叠层结构切削加工理论及应用技术[M].上海:上海科学技术出版社有限公司,2019.
CHEN Ming, XU Jinyang, AN Qinglong. Machining theory and application technologies for CFRP and multilayer stacks [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2019.
- [5] ZOU F, ZHONG B, ZHANG H, et al. Machinability and surface quality during milling CFRP laminates under dry and supercritical CO₂-based cryogenic conditions [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology, 2021, 9: 765-781.
- [6] ZOU F, DANG J, WANG X, et al. Performance and mechanism evaluation during milling of CFRP laminates under cryogenic-based conditions[J]. Composite Structures, 2021. DOI: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.114578.
- [7] 杨旭东,安涛,邹田春,等.湿热环境对碳纤维增强树脂基复合材料力学性能的影响及其损伤机理[J].材料工程,2019(7): 84-91.
YANG Xudong, AN Tao, ZOU Tianchun, et al. Effect of hygrothermal environment on mechanical properties and damage mechanism of CFRP[J]. Journal of Material Engineering, 2019(7): 84-91.
- [8] JAWAHIR I S, ATTIA H, BIERMANN D, et al. Cryogenic manufacturing processes[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2016, 65(2): 713-736.
- [9] KUMAR D, SUHASINI G. Machining damage and surface integrity evaluation during milling of UD-CFRP laminates: Dry vs. cryogenic[J]. Composite Structures, 2020. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112504.
- [10] NOR KHAIRUSSHIMA M K, CHE HASSAN C H, JAHARAH A G, et al. Effect of chilled air on tool wear and workpiece quality during milling of carbon fibre reinforced plastic[J]. Wear, 2013, 302(1/2): 1113-1123.
- [11] 王彤辉. T800碳纤维增强复合材料低温铣削基础研究[D].南京:南京航空航天大学,2021.
WANG Tonghui. Fundamental research on cryogenic milling of T800 carbon fiber reinforced plastic[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.
- [12] OHASHI K, MAENO H, FUJIHARA R, et al. Influence of grinding atmosphere on grinding characteristics of CFRP (effect of soluble coolant or liquid nitrogen supply) [J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C, 2013, 79(808): 5068-

- 5078.
- [13] MORKAVUK S, UĞUR K, MEHMET B, et al. Cryogenic machining of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composites and the effects of cryogenic treatment on tensile properties: A comparative study[J]. *Composites Part B*, 2018, 147: 1-11.
- [14] SHAO Y, XU F, WEI L, et al. Influence of cryogenic treatment on mechanical and interfacial properties of carbon nanotube fiber/bisphenol-F epoxy composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 145: 145-154.
- [15] KARPAT Y, BAHTIYAR O, DEGER B. Milling force modelling of multidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates[J]. *Procedia CIRP*, 2012, 1: 460-465.
- [16] 许清. 难加工材料超低温加工冷却系统设计与切削试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- XU Qing. A design of cooling system and cutting experiments for the cryogenic machining of difficult-to-cut materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [17] KIM M, LEE M, CHO G, et al. Effect of the fiber orientation and the radial depth of cut on the flank wear in end milling of CFRP[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2020, 21(7): 1187-1199.
- [18] HAN S C, CHEN Y, XU J H, et al. Experimental study of tool wear in milling multidirectional CFRP laminates[J]. *Materials Science Forum*, 2013, 770: 276-280.
- [19] 王昌赢. CFRP/Ti 叠层结构钻削损伤对孔壁质量和制孔精度作用机理与损伤抑制技术[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- WANG Changying. Drilling damage mechanism of CFRP/Ti stacks based on hole wall quality and accuracy and damage suppression technology[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
- [20] 舒磊. 碳纤维增强复合材料低温铣削基础试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- SHU Lei. Fundamental research on cryogenic milling of carbon fiber reinforced composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [21] 鄢国洪. 不同涂层的硬质合金菱齿立铣刀铣削 CFRP 的性能研究[J]. *工具技术*, 2015, 49(10): 32-35.
- YAN Guohong. Research on performance of milling carbon fiber-reinforced plastics with different coated fine-cross-nick router[J]. *Tool Engineering*, 2015, 49(10): 32-35.
- [22] LIU G, CHEN H, HUANG Z, et al. Surface quality of staggered PCD end mill in milling of carbon fiber reinforced plastics[J]. *Applied Sciences*, 2017. DOI: 10.3390/app7020199.
- [23] OZKAN D, GOK M S, GOKKAYA H, et al. The effect of cutting parameters on tool wear during the milling of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites[J]. *Medziagotyra*, 2019. DOI: 10.5755/j01.ms.25.1.22451.
- [24] OZKAN D, PANJAN P, GOK M S, et al. Experimental study on tool wear and delamination in milling CFRPs with TiAlN- and TiN-coated tools[J]. *Coatings*, 2020. DOI: 10.3390/coatings10070623.
- [25] JIA Z, FU R, WANG F, et al. Temperature effects in end milling carbon fiber reinforced composites[J]. *Polymer composites*, 2018, 39(2): 437-447.

(编辑: 胥橙庭)