DOI: 10.3901/JME.2019.13.195

CFRP 复合材料铣削表层损伤形成机制分析*

王福吉 王东 殷俊伟 杨帆 赵猛 王泽刚
(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室 大连 116024)

摘要: 碳纤维增强树脂基复合材料(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)以其轻质、高强等优点, 已成为高端装备的优选材料。该材料在固化成型之后, 仍需大量的边缘、盲窗口、异形轮廓等铣削加工以满足连接装配要求。然而, 这类材料极易在表面产生毛刺、撕裂等加工损伤, 严重影响构件的承载性能。阐明铣削加工中 CFRP 表层损伤的形成机制, 用以指导铣削工艺的优化, 是实现其高质量加工的关键。研究通过四种典型角度 CFRP 单向板的铣槽试验, 从表层损伤分布形式及未切断纤维长度两个方面阐明了纤维切削角、刀刃钝圆半径及铣刀运动特点对 CFRP 铣削加工表层损伤的综合影响机理。研究表明: 纤维切削角是影响 CFRP 表层加工损伤形成的关键因素。当其为锐角时, 在大刃圆半径影响下易由无损伤状态向毛刺多发状态过渡, 当其为钝角时损伤分布不受刀刃钝圆半径影响, 表层损伤集中分布在 $90^{\circ}\sim 135^{\circ}$ 之间, 为毛刺与撕裂共存形式。而铣刀运动特点造成了纤维切削角的连续动态变化, 在易形成损伤的区间内引起损伤的动态累积, 最终决定了未切断纤维长度。在此基础上, 提出可有效抑制 CFRP 侧铣加工表层损伤的方法, 并通过试验验证其有效性, 为后续有关加工损伤抑制的研究提供基础。

关键词: 碳纤维复合材料; 铣削; 纤维切削角; 刀刃钝圆半径; 表层损伤

中图分类号: TB332

Analysis of Surface Damage Formation Mechanism in Milling of CFRPs

WANG Fuji WANG Dong YIN Junwei YANG Fan ZHAO Meng WANG Zegang
(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education,
Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite has become the preferred material for high level equipment due to its light weight and high strength. A large number of edges, blind windows, profiled contours, etc. are required to be milled after curing in order to manufacture fitting and joining surfaces. However, machining damages such as burrs and tears are easily generated on the surface, which seriously affects the bearing performance of the components. Elucidating the formation mechanism of CFRP surface damage in milling to guide process optimization is the key to achieving high quality machining. Through milling slots in unidirectional CFRP specimens having different fibre orientations, the comprehensive influence mechanism of fiber cutting angle, cutting edge radius and milling cutter movement on the surface damage of CFRP milling is elucidated from two aspects of surface damage distribution and uncut fiber length. It suggests that, fiber cutting angle is a key factor influencing the formation of CFRP surface damage. When it is an acute angle, it is easy to transition from non-damaged state to burr-prone state under the influence of large cutting edge radius. However, the damage distribution at obtuse angles is not affected by cutting edge radius and the surface damage is concentrated between 90° and 135° , which is the coexistence of burr and tear. The milling cutter's movement characteristics cause continuous dynamic change of the fiber cutting angle, which leads to the dynamic accumulation of damage in the easy-to-damage range, and ultimately determine the length of uncut fiber. On this basis, a method for effectively suppressing the surface damage of CFRP trimming is proposed and its effectiveness is verified by experiments, which provides a basis for subsequent studies on the damage suppression.

Key words: carbon fiber reinforced polymer(CFRP); milling; fiber cutting angle; cutting edge radius; surface damage

* 国家自然科学基金(51575082, U1508207, 51621064)、国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2014CB046503)和基本科研业务费专项资金(DUT16TD01)资助项目。20180719 收到修改稿, 20190214 收到修改稿

0 前言

碳纤维增强树脂基复合材料(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)具有高比强度、高比刚度、耐腐蚀性及可设计性等诸多优点,这使得 CFRP 在飞机和航空航天领域中应用越来越广泛^[1-3]。CFRP 在固化成型之后仍需要一些传统的机械加工操作,如铣削、钻削等来实现构件最终的尺寸精度和装配需求。然而,CFRP 非均质、各向异性的特征导致其加工行为完全不同于金属等均质材料,在加工过程中特别容易产生分层、撕裂、毛刺等损伤。这些损伤对于构件自身的性能以及构件间的装配性能均会产生极其严重的影响,甚至会造成结构件的直接报废^[4]。若不加以有效控制,将导致生产效率的下降和严重的经济损失。因此,实现 CFRP 构件的高质量加工十分重要。

目前,CFRP 切削加工方面的研究主要以钻削为主^[5-8],然而随着复合材料应用的普及,CFRP 的修边、开槽等加工将会逐渐增多,CFRP 的铣削加工无疑将成为研究热点。在已有研究中,部分学者致力于切削用量和刀具几何参数对于加工质量的影响规律探究。DAVIM 等^[9]和 SHEIKH-AHMAD 等^[10]开展了一项研究以确定典型工艺参数对毛刺长度的影响并通过拟合试验数据获得了加工参数和毛刺长度之间的经验公式。CHIBANE^[11]和 ERKAN 等^[12]发现,毛刺长度随着每齿进给量的增加和切削速度的降低而增加。WANG^[13]通过微刃铣刀铣削 CFRP,分析建立了切削用量与切削力、切削温度的数学模型并进行了参数优化。殷俊伟等^[14]发现通过减小单次切削厚度和控制切削温度在适合区间可有效降低加工损伤。这些学者通过试验方法探究了切削用量或刀具几何参数对加工质量的影响规律并以此来指导实际生产,在一定程度上起到了提高加工质量的作用。然而,工艺参数优化作为 CFRP 高质量加工的一环仍需要与其他环节相配合以充分发挥其作用,而揭示铣削加工中损伤形成机制则是完成整个优化过程的基础环节。

CFRP 铣削中表层损伤形成的实质在于纤维未被有效切断,而最能影响这一实质的因素是纤维切削角和刀刃钝圆半径。在纤维切削角的研究方面,KOPLEV 等^[15]通过 CFRP 直角切削试验,将表面质量与纤维方向联系起来,发现纤维方向对纤维断裂形式有重大影响。WANG 等^[16]试验分析了单向和多向 CFRP 的切削机理并采用直角自由切削的方法,获得了纤维切削角对加工表面质量的影响方式。

SHEIKH-AHMAD^[17]依照纤维切削角及刀具前角的大小将 CFRP 直角切削中纤维的去除模式分为 5 类。贾振元等^[18]建立了可实现任意纤维角度单向板连续动态切削过程仿真分析的直角切削有限元模型,得到了纤维角度对面下损伤深度的影响规律。在刀刃钝圆半径方面,GHIDOSI^[19]发现侧铣中产生毛刺的主要原因是刀具磨损,而 FRANKE^[20]和 FARZA 等^[21]发现碳纤维引起的刀具磨损主要发生在切削刃上。RUMMENHÖLLER^[22]和 HOHENSEE^[23]将刀刃锋利度确定为切削过程的决定性因素。这些研究证明了纤维切削角和刀刃钝圆半径在材料去除过程及损伤形成方面有重要影响。

国内外学者常采用直角切削方式来探究 CFRP 切削加工的损伤形成机制。然而,铣削区别于直角切削,材料的去除需要经过刀刃的多次作用,刀刃轮替切削使纤维切削角发生动态变化,导致损伤的形成亦是一个动态变化过程,因此单单用直角切削所得理论不能完全揭示铣削加工中的损伤形成机制。虑及铣刀运动特点,全面探究纤维切削角和刀刃钝圆半径对表层损伤形成的影响机理并用以指导 CFRP 铣削工艺的优化过程意义重大。

本研究旨在通过不同刀刃钝圆半径下 0°、45°、90°和 135°四种典型角度的 CFRP 单向板铣槽试验,以涵盖 0°~180°整个纤维切削角范围的槽端半圆形加工边缘为观察分析对象,探究纤维切削角、刀刃钝圆半径及铣刀运动特点三者对于铣削表层损伤的影响机理。以此为基础,提出 CFRP 侧铣时顺逆铣工艺的优选方案,以期最大程度地抑制 CFRP 侧铣表层损伤的产生,为后期工艺参数的优化建立良好基础环境。并通过侧铣试验与预期效果进行比对,验证所提方案的可行性。本研究所得结论对 CFRP 损伤形成理论以及加工损伤抑制技术研究具有一定意义。

1 铣削运动与纤维切削角的关系

1.1 纤维切削角定义

CFRP 具有各向异性,其在切削加工中所表现的行为特征很大程度上取决于切削速度方向与纤维方向之间所成夹角的大小,定义该角度为纤维切削角。在铣削加工中,由于刀具绕自身做旋转运动,切削速度方向动态变化,因而纤维切削角亦是动态变化过程,具体由纤维取向角和刀齿旋转角两个因素决定。

以逆铣为例,取进给方向为基准线,向被去除材料一侧旋转直至与纤维方向重合,两者所成夹角

即为纤维取向角。刀齿旋转角用来表示刀具在旋转过程中所处的位置,以切削速度方向与进给方向同向时刀具所在位置为初始位置,主轴旋转方向为正向,刀具所旋转过的角度即为刀齿旋转角。定义 θ 为纤维取向角, φ 为刀齿旋转角, β 为纤维切削角,图 1 为逆铣加工中 β 、 θ 、 φ 三者关系示意图。其中 β 的大小可由 θ 、 φ 推导出来,按图 1 所示可分为两种情况考虑,具体表达式如式(1)所示,顺铣时各处的纤维切削角与逆铣时互补。

$$\beta = \begin{cases} \theta - \varphi & \varphi \leq \theta \\ 180^\circ - (\varphi - \theta) & \varphi > \theta \end{cases} \quad (1)$$

图 1 纤维切削角的定义及计算

1.2 铣槽加工中的纤维切削角分布

直角切削时刀具切削速度方向恒定不变,故加工过程中纤维切削角为一定值。若要揭示纤维切削角对损伤的影响机制,采用直角切削方法则需进行大量试验。此外,考虑到铣削加工铣刀不同于直角切削刀具的运动特点,材料的去除需要经过刀刃的多次作用,刀刃交替切削使纤维切削角发生动态变化,直角切削所获理论在应用到铣削的过程中可能会存在偏差。为获得 CFRP 铣削加工中表层损伤关于纤维切削角的全局分布规律,以 0°、45°、90°、135°四种典型角度的 CFRP 单向板为试验对象,采用铣槽方式进行试验。在 CFRP 铣槽加工中,前端半圆部位涵盖了 0°~180°整个纤维切削角范围,可作为理论分析的良好试验基础。铣槽时纤维取向角的定义以逆铣侧为准,采用式(1)进行纤维切削角的计算,各板纤维切削角随刀齿旋转角的具体变化过程如图 2 所示。

1.3 试验条件

试验所使用的工件材料为碳纤维增强树脂基复合材料单向层合板,单层采用 T800 级碳纤维浸渍 P2352 环氧树脂,性能参数见表 1。试验板包含 0°、45°、90°、135°四种典型角度,尺寸为 32 mm×32 mm×3 mm。

图 2 纤维切削角随刀齿旋转角的具体变化过程

表 1 CFRP 单向层合板的力学性能

性能参数	数值
纵向拉伸强度/MPa	2 842
横向压缩强度/MPa	165.6
纵向弹性模量/GPa	160
横向弹性模量/GPa	8.97
树脂及界面粘结强度极限/MPa	30

本文主要研究铣削加工中毛刺、撕裂等表层损伤,由于碳纤维复合板的层间结合强度相对较低,采用螺旋刃铣刀可能会产生较大轴向力引起严重分层现象,因此选用直刃形式铣刀作为试验刀具。采用 5 μm 和 20 μm 两种刀刃钝圆半径进行对比试验以探究其对于表层损伤的影响规律,默认 5 μm 为锋利刀具,20 μm 为磨钝刀具。铣刀材质为 GK05A 硬质合金,具体结构参数见表 2。

表 2 直刃铣刀结构参数

前角/(°)	后角/(°)	直径/mm	刃长/mm	刀刃钝圆半径/μm
4	9	8	20	5、20

试验所用加工设备为 Mikron HSM 500 立式高速铣削 CNC 加工中心,具体工装布局如图 3 所示。试验在干切削条件下进行,主轴转速和每齿进给量分别为 5 000 r/min 和 0.05 mm/tooth。试验的目的是探究铣削加工中刀刃钝圆半径、纤维切削角和表层损伤的行为关联,为了最大程度地降低加工过程中刀具磨损对结论的影响,铣槽长度不宜过长,单次铣槽距离设定为 20 mm。同时,针对同一刀刃钝圆半径下的试验,每次选取切削刃不同位置进行切削,以保证各次试验初始刀刃钝圆半径状态相同。为排除偶然因素对试验结果的影响,每组试验重复一次。采用日本 KEYENCE 公司的超景深三维数码显微镜

观测槽端半圆形加工边缘的表层损伤形貌及分布, 放大倍率为 $\times 30$ 。

图 3 试验工装

2 试验结果与铣削损伤形成机理分析

图 4 为 $5\ \mu\text{m}$ 和 $20\ \mu\text{m}$ 两种刀刃钝圆半径下, 0° 、 45° 、 90° 和 135° 四种典型角度 CFRP 单向板的铣槽加工效果图。观察各组表层损伤的分布情况, 发现槽端半圆形加工边缘总是可以分为两个区间, 一部分为包含严重毛刺与撕裂现象的加工边缘段, 另一部分为未见损伤的加工边缘段。图 4 中各加工效果图下侧配有相对应的表层损伤区域分布简图, 其中 AB 和 CD 段表示槽端存在明显损伤的加工边缘段。在 AutoCAD 中测量出 AB 和 CD 段所表征的

图 4 不同铣削条件下的表层损伤情况对比

刀齿旋转角范围, 按照章节 1 所述的纤维切削角计算公式, 分别得到各组槽端损伤区域所对应的纤维切削角范围, 见表 3。通过试验研究发现, 纤维切削角和刀刃钝圆半径对于铣削表层损伤存在显著影响, 具体分析如下。

2.1 纤维切削角对铣削表层损伤的影响

铣削过程的瞬态切削作用可看作是直角切削过程, 按纤维断裂形式可将纤维切削角划分为 $0^\circ \sim 90^\circ$

表 3 表层损伤区域的刀齿旋转角及纤维切削角变化范围($^\circ$)

纤维取向角	5 μm 刃圆半径		20 μm 刃圆半径	
	刀齿旋转角	纤维切削角	刀齿旋转角	纤维切削角
0	30~125	55~150	40~180	0~140
45	90~180	45~135	0~45 和 90~180	0~135
90	0~60 和 135~180	30~135	0~90 和 135~180	0~135
135	0~90	45~135	0~135	0~135

和 $90^\circ \sim 180^\circ$ 两个区间。图 5 为不同区间内纤维断裂

模式的示意图,分别为纤维在剪切作用下的断裂失效及纤维在弯曲作用下的断裂失效。

图5 纤维断裂模式示意图

0°~90°区间内,切屑形成是由于纤维受挤压引起的剪切破坏,在绝对锋利刀具的作用下加工边缘不会形成毛刺损伤。本研究中刀刃钝圆半径为 5 μm 时,45°~90°的区间内仍存在少量的毛刺现象(45°单向板除外,后续讨论),且越接近 90°现象越明显。这是因为锋利是一个相对概念,5 μm 相对于 20 μm 而言是锋利的,但与绝对锋利尚存在一定差距。并且,随着纤维切削角的增大,纤维与刀刃之间所成的几何位置关系会使得纤维更倾向于产生弯曲形变,造成纤维/树脂界面的开裂,形成未切断纤维的概率会有所上升。

90°~180°区间内,各组损伤分布情况基本相同,表层损伤集中分布在 90°~135°之间的加工区域,而 135°~180°之间的区域铣削效果良好。该现象表明在钝角区内,易产生损伤的纤维切削角范围不受刀刃钝圆半径的影响。这主要是不同于锐角区的纤维断裂模式导致的。纤维切削角为钝角时,前刀面率先接触并挤压纤维,随着刀具的持续行进,纤维会产生较大的弹性弯曲形变并诱发纤维/树脂界面开裂,当纤维的弯曲程度达到其弯曲强度极限时,纤维就会发生断裂。正是这种以弯曲断裂为主导的材料去除模式,使得刀刃钝圆半径对该区域的损伤分布并未产生明显影响。

钝角区的表层损伤除了密集的毛刺之外,伴有严重的面下撕裂现象,且损伤集中分布在 90°~135°之间。从弯曲断裂理论分析,这可能与最小曲率半径有关。由于纤维/树脂界面的结合强度相对较低,纤维受力弯曲变形极易造成纤维/树脂界面的开裂,而这种界面开裂会减弱周围树脂基体对纤维的约束作用,使纤维能够承受更大程度的弯曲形变,不易被有效切断从而形成未切断纤维。也就是说,若存在未切断纤维,则必然存在纤维受刀具推挤作用引起的弯曲形变过程。图6为钝角区内损伤存在

形式及分布范围的图形解释。纤维弯曲至与切削速度方向平行时为形变最大程度,定义此时纤维的曲率半径为最小曲率半径 $r_{\min}$ 。同时,若纤维曲率半径能够达到 $r_{\min}$,则必然存在一个纤维/树脂界面开裂深度 l_c 作为前者存在的充分条件。式(2)为 l_c 的数学表达式,其中 d 为纤维直径

$$l_c = (d + r_{\min})(1 - \cos \beta) \quad (2)$$

图6 钝角区损伤形成机理简图

图6中, $l_c(90^\circ)$ 、 $l_c(120^\circ)$ 、 $l_c(150^\circ)$ 分别表示纤维切削角 90°、120°、150°存在未切断纤维时所需要的纤维/树脂界面开裂深度。因此,纤维切削角大于 90°时,出现毛刺的区域同时伴有严重撕裂现象。

另一方面,纤维/树脂界面开裂深度 l_c 和纤维/树脂界面开裂长度 l_f 之间存在相互转换关系,将 l_c 通过式(3)转化为 l_f ,如图6中虚线所示

$$l_f = \frac{l_c}{\sin \beta} \quad (3)$$

l_f 的数值大小既表示了形成未切断纤维所必须的纤维/树脂界面开裂长度,同时侧面上反映了界面开裂所需要的能量大小。相比于 l_c , l_f 更能反映出形成未切断纤维的难易程度。以纤维切削角 120°和 150°为例,分别就 l_c 、 l_f 进行差值计算,如式(4)、式(5)所示

$$\Delta l_c = (d + r_{\min})(1 - \cos 150^\circ) - (d + r_{\min})(1 - \cos 120^\circ) = 0.366(d + r_{\min}) \quad (4)$$

$$\Delta l_f = \frac{(d + r_{\min})(1 - \cos 150^\circ)}{\sin 150^\circ} - \frac{(d + r_{\min})(1 - \cos 120^\circ)}{\sin 120^\circ} = 2(d + r_{\min}) \quad (5)$$

假定单位长度的纤维/树脂界面开裂能是一常量,则能量的变化量与长度变化量成正比关系。对两个差量进行比较, Δl_f 是 Δl_c 的 5.46 倍。两者的大幅差距表明 l_c 不能够替代更具有实际物理意义的 l_f 作为未切断纤维形成难易程度的评价指标。同时,观察纤维切削角 120°和 150°两种情况下 l_f 的差量

Δl_f , 后者的界面开裂长度明显大于前者, 因而形成未切断纤维时后者所需要的能量更多。能量越多表明对应角度形成未切断纤维越困难。因此, 在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 的纤维切削角区间内, 小角度相对于大角度更容易形成毛刺与撕裂损伤。

此外, 应变速率可能也会对本区域的损伤程度产生影响。材料在高应变速率下会表现出与静态或准静态载荷作用时截然不同的力学性能。GILAT A 等学者^[24]对固化后的环氧树脂(E-862, PR-520)进行了相关试验研究发现其力学性能与应变速率存在明显的相关性。树脂的强度会随着其应变速率的增大而增大, 而断裂伸长率会呈现下降趋势。也就是说, 应变速率的增加会使树脂的力学性能表现出由韧性向脆性过渡的趋势。随着树脂基体的力学性能提升, 其对纤维的约束作用增强, 对纤维弯曲的抗力增加。同时, 大应变速率条件下纤维/树脂界面的裂纹来不及扩展, 开裂深度较小应变速率下的稳态扩展应会有所降低。综上分析, 在大应变速率条件下, 未切断纤维出现的概率会出现下降趋势。这可能是本研究在 $90^\circ \sim 135^\circ$ 的纤维切削角区间内观测到严重表层损伤, 而 HINTZE^[25]却未观测到相应现象的原因。

2.2 刀刃钝圆半径对表层损伤的影响

刀刃钝圆半径为 $20\ \mu\text{m}$ 时, 产生损伤的纤维切削角区间要更大一些, 部分在 $5\ \mu\text{m}$ 下加工效果良好的区域在 $20\ \mu\text{m}$ 下产生明显损伤, 主要表现在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 区间。此外, 刀刃钝圆半径为 $20\ \mu\text{m}$ 时, 表层损伤更为严重, 毛刺长度增加且分布更密集, 其中 90° 、 135° 单向板的对比效果尤为明显。综上, 刀刃钝圆半径增大带来的宏观影响可归纳为两方面: 一是对损伤分布区域的扩区效应, 二是对毛刺长度的扩增作用。

(1) 对损伤分布区域的扩区效应。

刀刃钝圆半径对表层损伤的扩区效应主要体现在纤维切削角为锐角的区域。锐角区内切屑形成是基于剪切作用为主导的纤维断裂模式。当刀刃与纤维的接触应力达到纤维的径向剪切强度时, 纤维发生剪切断裂失效。有学者^[26]对刀刃与纤维的接触状态进行了简化并采用赫兹理论对接触应力 σ_c 进行了理论计算

$$\sigma_c = \frac{4E^* \cdot \sqrt{h}}{3\pi \cdot \sqrt{r}} \quad (6)$$

式中, E^* 为等效模量, 与纤维模量和刀具模量相关; r 为刀刃钝圆半径; h 为刀刃对纤维的挤压深度。

从式(6)可以看出, 当 r 趋于 0 时, 即使纤维形变很小, 刀刃与纤维的接触应力却是趋于无穷大的。因此, 采用小刃圆半径时, 纤维仅需发生微小形变, 接触应力就会达到纤维的剪切强度从而使纤维发生

剪切断裂失效, 如图 7a 所示。反之, 当 r 很大时, 接触应力若要达到纤维的剪切强度, 则必须增大挤压深度, 即增大纤维的形变程度。由于纤维/树脂界面的结合强度相对较低, 纤维的大幅形变会造成纤维/树脂界面的开裂, 如图 7b 所示。

图 7 刀刃钝圆半径的扩区效应机理

铣刀自身的运动特点也会产生重要影响。直角切削加工中刀具仅沿进给方向做直线运动, 对纤维会产生强烈的推挤作用, 而铣刀在沿进给方向做直线运动的同时绕自身轴线做旋转运动。在锐角区内, 刀刃对纤维的挤压作用会随着刀具的旋转而逐渐衰弱。同时, 大刃圆半径引起的界面开裂会使纤维在切削加工过程中表现出明显的让刀行为。因此, 相比于刀具的切削作用, 铣刀更像是在顺着纤维“滑行”, 不利于纤维的有效切断, 使锐角区内产生明显的毛刺现象。

(2) 对毛刺长度的扩增作用。

刀刃钝圆半径对毛刺长度的扩增作用实质是损伤的一种动态累积效应, 与扩区效应、铣刀运动特点密切相关。直角切削中纤维仅受到刀具的单次作用, 而铣削中纤维的去除是需要经过刀刃的多次作用, 刀刃交替切削使纤维切削角发生动态变化, 形成了损伤动态累积的基础条件, 而扩区效应起到了改变损伤累积范围的作用。图 8 以单根纤维为例, 描述了四种典型角度下纤维切削角随铣刀运动的变化过程以及刀刃钝圆半径为 $20\ \mu\text{m}$ 时的纤维去除情况。

刀刃与纤维在相切位置处, 即纤维切削角为 $0^\circ/180^\circ$ 时发生最初接触。以相切位置为界, 将纤维分为左右两部分, 在后续加工中, 纤维两侧分别经历不同的纤维切削角变化过程, 而毛刺长度与其密切相关。值得注意的是, 0° 单向板由于纤维取向特殊, 单根纤维所经历的纤维切削角不随铣刀运动而变化, 仅与其所在位置有关, 因而在易产生损伤的纤维切削角处, 会形成等同于加工长度的毛刺。为便于后续描述, 除 0° 单向板外, 将其余角度单向板以相切位置为界划分的左右两部分各命名为 1 区和 2 区。

图8 铣削加工中单根纤维的纤维切削角变化过程

45°单向板中, 1 区和 2 区的纤维切削角变化过程分别为 $0^\circ \rightarrow 45^\circ$ 、 $180^\circ \rightarrow 135^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 45^\circ$ 。由于刀刃钝圆半径的影响, 产生损伤的区域会扩增至锐角区, 1 区会出现毛刺现象。2 区的纤维切削角由钝角向锐角过渡, 在纤维切削角为 135° 时开始形成未切断纤维。由前述分析可知, 钝角区未切断纤维的出现会伴有严重撕裂现象, 此时纤维会处于强烈的弱约束状态, 即使采用小刃圆半径且历经 $90^\circ \rightarrow 45^\circ$ 的纤维切削角变化, 纤维仍不能被有效切断。这就是刀刃钝圆半径为 $5\ \mu\text{m}$ 时, 同样是 $45^\circ \sim 90^\circ$ 的纤维切削角区域, 45° 单向板的损伤程度明显大于其他三种单向板的原因。

90°和 135° 单向板中, 1 区的纤维切削角变化过

程分别为 $0^\circ \rightarrow 45^\circ \rightarrow 90^\circ$ 、 $0^\circ \rightarrow 45^\circ \rightarrow 90^\circ \rightarrow 135^\circ$ 。由于刀刃钝圆半径的扩区效应, 上述两个变化区间均在损伤动态累积的范围内。因此, 与 $5\ \mu\text{m}$ 相比较, 刀刃钝圆半径 $20\ \mu\text{m}$ 时 90° 、 135° 单向板的 1 区内会形成更严重的毛刺损伤。2 区内, 两者纤维切削角变化过程分别为 $180^\circ \rightarrow 135^\circ \rightarrow 90^\circ$ 、 $180^\circ \rightarrow 135^\circ$ 。由于刀刃钝圆半径对钝角区的损伤分布无影响, 所以与 $5\ \mu\text{m}$ 相比较, 刀刃钝圆半径 $20\ \mu\text{m}$ 时 2 区的毛刺长度并未出现明显变化。

综上所述, 表层损伤受纤维切削角、刀刃钝圆半径以及铣刀运动特点三者共同作用影响。当刀具旋转过程中的纤维切削角变化范围完全或者部分地包含 $0^\circ \sim 90^\circ$ 时, 损伤程度受刀刃钝圆半径影响显著。大刃圆半径会严重阻碍纤维的断裂, 导致刀齿旋转过程中出现未切断纤维, 最终残留下形成毛刺。纤维切削角为钝角时, 刀刃钝圆半径对钝角区的损伤分布无影响, 越接近 90° 的区域未切断纤维发生的概率越大, 并且会伴有严重的撕裂现象。铣刀运动特点造成了纤维切削角的连续动态变化, 在易形成损伤的区间内引起损伤的动态累积, 决定了未切断纤维的长度。因此, 采用小刀刃钝圆半径以及合理控制纤维切削角的范围, 可以保证刀齿旋转过程中各纤维切削角处纤维的有效切断, 进而达到抑制毛刺和撕裂损伤产生的目的。

3 侧铣加工铣削方式的选择方案

实际加工中铣刀由于磨损不能一直维持小刃圆半径状态, 因而调控纤维切削角是改善 CFRP 铣削加工质量的重要策略。在侧铣加工中, 铣削方式可分为顺铣和逆铣两种, 顺、逆铣作为影响纤维切削角的主要因素, 应在实际加工中予以考虑。依据第 2 节所述理论, 图 9 为 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四种典型角度 CFRP 单向板顺逆铣加工示意图及对应的损伤预测示意图, 其中径向切深为 50% 铣刀直径。选定铣刀直径为 $8\ \text{mm}$, 则具体的纤维切削角变化过程及预期毛刺高度和撕裂程度如表 4 所示。

图9 典型角度单向板顺逆铣图示及损伤预测示意图

表 4 不同铣削方式下纤维切削角变化情况及表层损伤预测

纤维 取向角/(°)	径向 切深/mm	逆铣方式			顺铣方式		
		纤维切削角 变化范围/过程/(°)	毛刺高度预测/mm	撕裂程度预测	纤维切削角 变化范围/过程/(°)	毛刺高度预测/mm	撕裂程度预测
0	4	90~180	0	不可见	90~0	4	不可见
45	4	180→135, 0→45	1.17	微弱	0→45, 180→135	0	不可见
90	4	0→90	4	微弱	180→90	1.17	可见
135	4	45→135	4	可见	135→45	4	可见

在侧铣加工中,若纤维切削角的变化区间内出现可由刀刃与纤维相切位置分为两部分的情况时,距离加工边缘较远的区间可不用考虑,因为该区间的材料会被完全去除,如逆铣和顺铣 45°单向板时。在撕裂程度预测方面,顺铣 0°单向板时预期产生高度为 4 mm 的附着型毛刺,但由于裂纹总是沿纤维/树脂界面扩展,故不存在加工表面之下的撕裂现象。其他角度单向板侧铣时若出现毛刺现象,依照前述理论应会存在撕裂现象,

其撕裂程度与纤维切削角相关,故纤维切削角为锐角时的撕裂程度预测为微弱,钝角时为可见。考虑到顺铣 135°单向板时远端钝角区产生的撕裂可能扩展至加工表面之下,因此顺铣 135°单向板的撕裂程度预测为可见。

选取刀刃钝圆半径为 20 μm、直径为 8 mm 的直刀铣刀,径向切深为 4 mm 时各 CFRP 单向板顺逆铣削表层损伤如图 10 所示。对比发现,表层损伤程度与预期情况基本符合。

图 10 典型角度单向板顺逆铣加工效果图

为验证顺铣 135°单向板时,撕裂的产生与远端 135°→90°这一纤维切削角变化有关,调整径向切深为 1 mm,将纤维切削角的变化范围限制在 45°~90°之间。图 11 为顺铣 135°单向板,径向切深分别为 1 mm 和 4 mm 的表层损伤对比图。对比发现,1 mm 切深时撕裂现象得到显著抑制。此外,不同切深下毛刺所呈现的形态存在明显区别,4 mm 切深时毛刺为片状形态,而 1 mm 切深时毛刺为针状形态。这表明了毛刺的形态与纤维切削角相关,不同区间内纤维断裂模式不同,所形成毛刺的形态也会因此发生变化。顺铣 135°单向板时,毛刺形态由远端 135°→90°的纤维切削角变化决定,并且在此区间内所形成的撕裂会有很大概率扩展至加工表面之下,从而形成最终的撕裂损伤。因此,顺铣 135°单向板时,可通过减小径向切深以避让 90°~135°区域,实现撕裂损伤的抑制。

图 11 不同切深下顺铣 135°单向板表层损伤对比图

顺、逆铣方式和径向切深作为影响纤维切削角

范围 and 变化过程的主要因素对 CFRP 侧铣加工质量有显著影响,在实际加工中应予以充分重视。对于不同角度的 CFRP 单向板,应通过合理选取顺、逆铣方式及适当调整径向切深使纤维切削角的变化过程在一个可接受的范围内,以获得更好的 CFRP 侧铣效果。若存在均无法获得无明显损伤侧铣边缘的情况时,应选取损伤程度较小的方案,利用后续工艺参数优化进行损伤再抑制,如 90° 和 135° 单向板。相对于毛刺,存在于加工表面之下的撕裂对 CFRP 的性能影响更为严重,应在实际加工中尽量避免。因此,针对本次试验所用单向板, 0° 逆铣、 45° 顺铣、 90° 逆铣以及 135° 顺铣为较优的控制方案,其中顺铣 135° 单向板时应通过减小径向切深以抑制撕裂损伤。

4 结论

(1) 纤维切削角为钝角时,表层损伤分布基本不受刀刃钝圆半径的影响,越靠近 90° 的区域形成损伤的可能性越大,且损伤是毛刺与撕裂共存的表现形式。

(2) 纤维切削角为锐角时,表层损伤的产生取决于刀刃钝圆半径。大刃圆半径条件下,纤维不易被切断从而形成毛刺,使得产生损伤的纤维切削角范围扩增,形成扩区效应。

(3) 纤维切削角受铣刀的运动特点影响处于动态变化之中,形成了损伤动态累积的基础。大刃圆半径引起的扩区效应会增大损伤动态累积的范围,造成毛刺长度上的扩增。

(4) 顺逆铣工艺和径向切深对表层损伤影响显著。 0° 逆铣、 45° 顺铣、 90° 逆铣以及 135° 顺铣为较优的控制方案,其中顺铣 135° 单向板时可通过减小径向切深以避让 $90^\circ \sim 135^\circ$ 区域,实现撕裂损伤的抑制。

参 考 文 献

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12.
- [2] CHE Demeng, SAXENA I., HAN Peidong, et al. Machining of carbon fiber reinforced plastics/polymers: a literature review[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2014, 136(3): 1-22.
- [3] 齐振超, 刘书暖, 程晖, 等. 基于三维多相有限元的 CFRP 细观切削机理研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(15): 170-176.
- QI Zhenchao, LIU Shunuan, CHENG Hui, et al. Research on the mesoscopic cutting mechanism of CFRP based on three-dimensional multiphase finite element models[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(15): 170-176.
- [4] 罗益锋. 先进材料在高端装备的应用进展[J]. 高科技纤维与应用, 2014, 39(5): 1-8.
LUO Yifeng. Application developments of advanced materials in high level equipment[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2014, 39(5): 1-8.
- [5] 章伟, 黄威武, 屈植华, 等. 碳纤维复合材料-钛合金叠层板钻孔工艺研究[J]. 硬质合金, 2017, 34(1): 21-26.
ZHANG Wei, HUANG Weiwu, QU Zhihua, et al. Experimental investigation on drilling of carbon fiber reinforced polymer-titanium alloy laminate[J]. Cemented Carbide, 2017, 34(1): 21-26.
- [6] 蔡建国, 林正英. 碳纤维复合材料钻削温度对孔壁微观形貌的影响分析研究[J]. 机械设计与制造工程, 2017, 46(7): 69-73.
CAI Jianguo, LIN Zhengying. The influence analysis of carbon fiber reinforced composites drilling temperature on morphology of hole wall[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2017, 46(7): 69-73.
- [7] KRISHNARAJ V, ZITOUNE R, DAVIM J P. Drilling of polymer-matrix composites[M]. Heidelberg: Springer, 2013.
- [8] 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.
- [9] DAVIM J P, REIS P. Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 160(2): 160-167.
- [10] SHEIKH-AHMAD J, URBAN N, CHERAGHI H. Machining damage in edge trimming of CFRP[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2012, 27(7): 802-808.
- [11] CHIBANE H, MORANDEAU A, SERRA R, et al. Optimal milling conditions for carbon/epoxy composite material using damage and vibration analysis[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(5-8): 1111-1121.
- [12] ERKAN Ö, IŞIK B, ÇİÇEK A, et al. Prediction of damage

- factor in end milling of glass fibre reinforced plastic composites using artificial neural network[J]. *Applied Composite Materials*, 2013, 20(4): 517-536.
- [13] WANG Haijin, SUN Jie, LI Jianfeng, et al. Evaluation of cutting force and cutting temperature in milling carbon fiber-reinforced polymer composites[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 82(9-12): 1517-1525.
- [14] 王福吉, 殷俊伟, 贾振元, 等. CFRP 复合材料铣削力、温度及表层损伤分析[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(3): 186-195.
- WANG Fuji, YIN Junwei, JIA Zhenyuan, et al. Measurement and analysis of cutting force, temperature and cutting-induced top-layer damage in edge trimming of CFRPs[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(3): 186-195.
- [15] KOPLEV A A, LYSTRUP A, VORM T. The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP[J]. *Composites*, 1983, 14(4): 371-376.
- [16] WANG D H, RAMULU M, AROLA D. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: unidirectional laminate[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1995, 35(12): 1623-1638.
- [17] SHEIKH-AHMAD J Y. *Machining of polymer composites*[M]. New York: Springer, 2009.
- [18] 殷俊伟, 贾振元, 王福吉, 等. 基于 CFRP 切削过程仿真的面下损伤形成分析[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(17): 58-64.
- JIA Zhenyuan, YIN Junwei, WANG Fuji, et al. FEM simulation analysis of subsurface damage formation based on continuously cutting process of CFRP[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(17): 58-64.
- [19] GHIDOSI P, EL MANSORI M, PIERRON F. Edge machining effects on the failure of polymer matrix composite coupons[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2004, 35(7-8): 989-999.
- [20] FRANKE V. Drilling of long fiber reinforced thermoplastics—influence of the cutting edge on the machining results[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2011, 60(1): 65-68.
- [21] FARAZ A, BIERMANN D, WEINERT K. Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, 49(15): 1185-1196.
- [22] RUMMENHÖLLER S. *Werkstofforientierte Prozeßauslegung für das Fräsen kohlenstoffaserverstärkter Kunststoffe*[M]. Shaker, 1996.
- RUMMENHÖLLER S. Material-oriented process design for milling carbon fiber reinforced plastics [M]. New York: Shaker, 1996.
- [23] HOHENSEE V. *Umrißbearbeitung faserverstärkter Kunststoffe durch Fräsen und Laserschneiden*[M]. London: Springer, 1992.
- HOHENSEE V. Outline machining of fiber-reinforced plastics by milling and laser cutting [M]. London: Springer, 1992.
- [24] GILAT A, GOLDBERG R K, ROBERTS G D. Experimental study of strain-rate-dependent behavior of carbon/epoxy composite[J]. *Composites Science and Technology*, 2002, 62(10-11): 1469-1476.
- [25] HINTZE W, HARTMANN D, SCHÜTTE C. Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs)—An experimental study[J]. *Composites Science and Technology*, 2011, 71(15): 1719-1726.
- [26] WANG Fuji, YIN Junwei, MA Jianwei, et al. Effects of cutting edge radius and fiber cutting angle on the cutting-induced surface damage in machining of unidirectional CFRP composite laminates[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 91(9-12): 3107-3120.
-
- 作者简介: 王福吉(通信作者), 男, 1974 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为复合材料去除机理与损伤成因。
E-mail: wfjssl@dlut.edu.cn
- 王东, 男, 1992 年出生, 硕士。主要研究方向为复合材料铣削工艺优化。
E-mail: S201265044@mail.dlut.edu.cn