

直角自由切削单向碳纤维复合材料的试验研究

陈文新^{1,2}

(1 湖南九嶷职业技术学院 湖南 永州 425000; 2 湖南潇湘技师学院 湖南 永州 425000)

摘要: 直角自由切削加工是一种刀具刀刃垂直于切削运动方向且主切削为一条直线的材料去除加工方式。本文首先采用切削加工方法对单向碳纤维复合材料开展了切削加工对比试验研究,其次采用扫描电镜观察、分析了加工后的材料表面,最后探讨了三种前角刨刀在不同纤维方向下的切削加工表面质量及切削力的变化规律。试验结果表明:同一切削方向下,切削力随切削深度的增加而逐步递增,其中,横向 45° 及 90° 纤维方向切削加工时,使用 10° 前角的刨刀时切削力相对较小;纵向 90° 纤维方向加工时,使用 -10° 前角刨刀切削力较小。且表面粗糙度在前角 -10° 刨刀加工下较低,平行纤维方向加工宜采用 10° 前角刨刀,纵向 90° 纤维方向加工时采用较低的切削深度和刀具前角,能够有效降低宏观裂纹损伤。

关键词: 单向碳纤维复合材料; 切削; 表面粗糙度; 前角

0 引言

碳纤维增强环氧树脂基复合材料(CFRP),因其材料密度较小、具备良好的抗腐蚀性能、在单位密度下拥有优良抗拉强度及刚度,在航空制造、军工产品、智能器械、整车及零部件等工业领域有着广泛的应用。CFRP是一种脆性材料,切削加工是CFRP结构件和零部件的主要制造方法^[1,2]。由于CFRP在宏观力学上表现出各向异性,材料在机械加工过程中容易出现不同程度的损伤,例如:CFRP基体开裂、材料纤维破碎、铺层断裂、材料分层、沟壑凹坑等。因此,对于探究适合CFRP的加工方式而言,积累加工工艺经验和理论基础就显得十分重要。

国内外不少学者开展了CFRP的制造加工研究。L.C.Zhang等^[1]采用一种直角切削加工的方式,对单向CFRP开展了加工试验,当选取特定的纤维方向进行切削加工,通过对比试验得出,当角度达到 90° 时,材料表面会产生严重损伤。Uhlmann等^[2]使用CVD涂层刀具,通过高压水射流切削技术开展了加工CFRP的试验研究,通过对比和数据分析,提出了一种CFRP经过加工后的表面质量评价方法。Hanasaki等^[3]对CFRP进行了磨削试验对比研究,采用干式磨削条件,探讨了加工时的温度、沿材料纤维的加工方向对表面质量的影响及变化关系,试验分析结果提示了干式磨削加工条件下的材料去除方式及表

面质量优化方向。Ogi等^[4]建立了单向CFRP在不同温度和载荷下的二维模型,运用该模型可进行材料阻力与压电电阻数值变化的定量计算。Sasahara等^[5]采用不同形式的喷嘴进行CFRP加工过程的冷却润滑,研究了CFRP在加工时不同方向上的粗糙度及材料的分层现象。Hu和Zhang等开展了CFRP的直角切削对比试验研究,对材料加工时的纤维方向、切削深度的大小对切削力及表面微观形貌的影响规律进行了探讨。Mahdi和Soo等采用金刚石砂轮和立方氮化硼砂轮对CFRP开展了特定条件下的磨削加工对比试验,分析并得出了材料表面和砂轮表面的磨损变化关系,以及磨削加工过程中切削力与表面质量的变化趋势。

基于CFRP的制造工艺和成型特性,其一般以叠层的形式组成,与传统金属切削加工的材料去除机理及力学模型相对比,存在较大的差异。因此,对CFRP切削加工过程的材料去除机理分析、切削力的变化规律、表面质量的优化方向、铺层纤维的损伤形式以及加工表面的微观形貌分析是研究的重点。直角自由切削是用来研究材料去除的机理、观察表面质量、微观形貌变化及切削力变化的直观方法之一,本文采用高速宽刃刨刀对单向CFRP进行切削性能的试验研究,为CFRP加工工艺领域提供切削机理、表面质量分析、微观形貌变化规律的理论基础。

1 试验材料、设备与方法

1.1 试验材料与设备

试验材料采购环宇复合材料生产制造厂的单向CFRP作为试验试件，生产工艺为预浸料单向铺层压制而成。其选购试件的力学性能见表1。试验采用宽刃刨刀进行CFRP的切削对比试验，示意图见图1。试验采用动态压电晶体式测力仪测量法向力和切向力；使用接触式测量仪测得刨削加工试验后的试件表面粗糙度；通过扫描电镜（SEM）得出刨削加工后的表面微观形貌，并观察加工表面的损伤情况。

表1 碳纤维复合材料的力学性能

碳纤维树脂	TC 35 12K 双酚 A 型环氧树脂
抗拉强度 /MPa	1600
拉伸模量 /GPa	135
抗压强度 /MPa	1380
压缩模量 /GPa	130
纤维体积 /%	60
密度 / (g/cm ³)	1.8

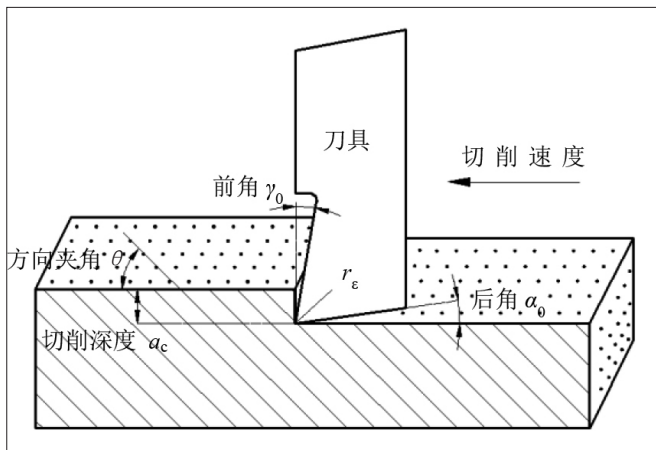


图1 切削试验示意图

1.2 试验方法

试件规格为16×10×10mm³，刀具的切削宽度大于试件宽度。由于刨削加工的损耗比较大，刀具的损伤较高，需要对刀刃进行时段的修磨。在刨削试验过程中，室内温度为25℃，试验一共采用五种纤维方向进行直角自由切削试验。五个方向分别为平行、横向45°、纵向45°、横向90°、纵向90°，其中：平行是指刨刀的切削运动方向与材料纤维的长度方向相互平行；横向是指刨刀的切削运动方向垂直于材料纤维的长度方向；纵向是指刨刀的切削运动方向垂直于

材料纤维长度方向的平面。具体切削试验参数如表2所示。切削试验完成后，进行试件的清理和保存，并及时进行表面粗糙度的测量。以Ra作为试验的评价指标，本次试验在试件的干净区域内，选取2.5mm作为试件的取样长度，选取10mm作为试件的测量长度，每个试样进行5次重复测量后，取其测量仪测得的平均粗糙度数值进行对比试验分析。

表2 切削试验参数

参数类型	数值
切削方向	平行、横向45°、纵向45° 横向90°、纵向90°
切削速度 v _c / (m·min ⁻¹)	6
切削深度 a _c / μm	20,50,100,200
前角 γ ₀ /°	-10,0,10
后角 α ₀ /°	8
刀尖圆弧半径 r _ε / μm	50
刀具材料	高速钢

2 试验结果及分析

2.1 切削力的影响分析

单向CFRP刨削加工去除材料的过程中，测得的法向切削力和切向切削力随着选取的切削深度、工件进给速度、刀具切削方向以及不同刀具前角的变化曲线图如图2所示。通过对比分析可知，刨削加工过程中，其法向切削力和切向切削力均随着切削深度的加大而单调递增。横向90°纤维方向进行刨削加工的切削力达到最小，纵向90°纤维方向进行刨削加工的切削力达到最大。

通过切削力曲线图的对比分析可知，刨削加工过程中，当切削运动方向平行于纤维方向加工时，其测得的切向力和法向力在刨刀前角为10°时达到最小，刨刀前角为0°时，其切向力的数值达到最大，而在刨刀前角为-10°时，法向力的数值达到最大。

在沿材料纤维方向为横向45°时进行的刨削加工中，其测得的切向力和法向力在刨刀前角为-10°时达到最大，刨刀前角为10°时，测得的切向力为最小，刨刀前角为0°时，测得的法向力为最小。

在沿材料纤维方向为纵向45°时进行的刨削加工中，当所选的切削深度少于50μm时，刨刀前角对切向力的影响略微，在切削深度在大于50μm后，选用的刨刀前角为0°时，测得的切向力最小，前角为10°时达到最大，法向力在刨刀前角为0°时，测得

的数值相对较小，在选用前角为 10° 的刨刀时，加工过程中的法向力达到最大。

在沿材料纤维方向为横向 90° 时进行的刨削加工中，当选用的刨刀前角为 10° 时，其测得的法向力和切向力均达到最小，当选用的刨刀前角角度分别为 0° 和 -10° 时，分别对应所测得的法向力和切向力，其数值最大。

在沿材料纤维方向为纵向 90° 时进行刨削加工中，当刨刀前角选取为 -10° 时，测得的法向力和切向力达到最小，选用的刨刀前角为 10° 时，切削加工过程中所测得的法向力及切向力最大。

通过上述分析可知，当平行纤维方向、横向 45° 和横向 90° 纤维方向进行加工时，使用刨刀前角为 10° 的刀具进行加工的切削力较小；纵向 45°

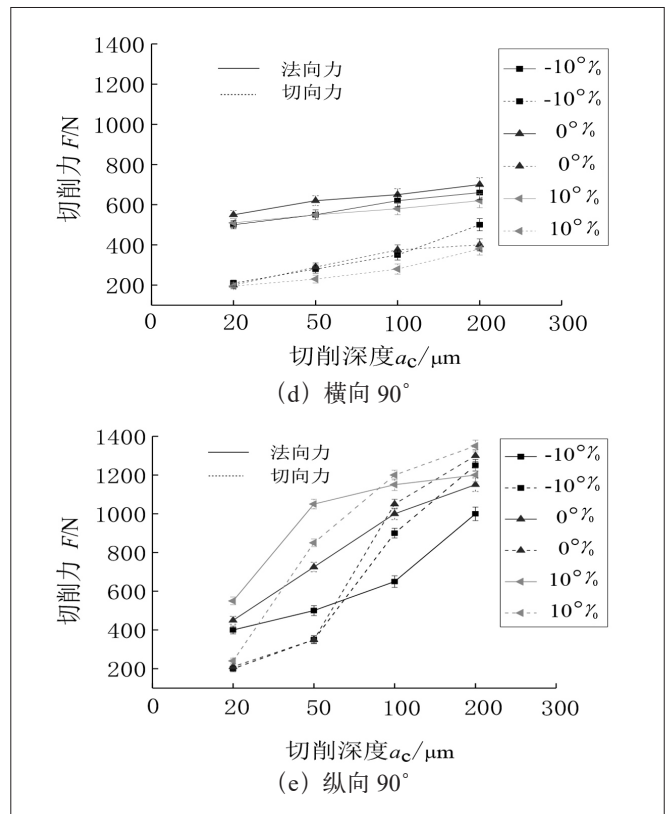
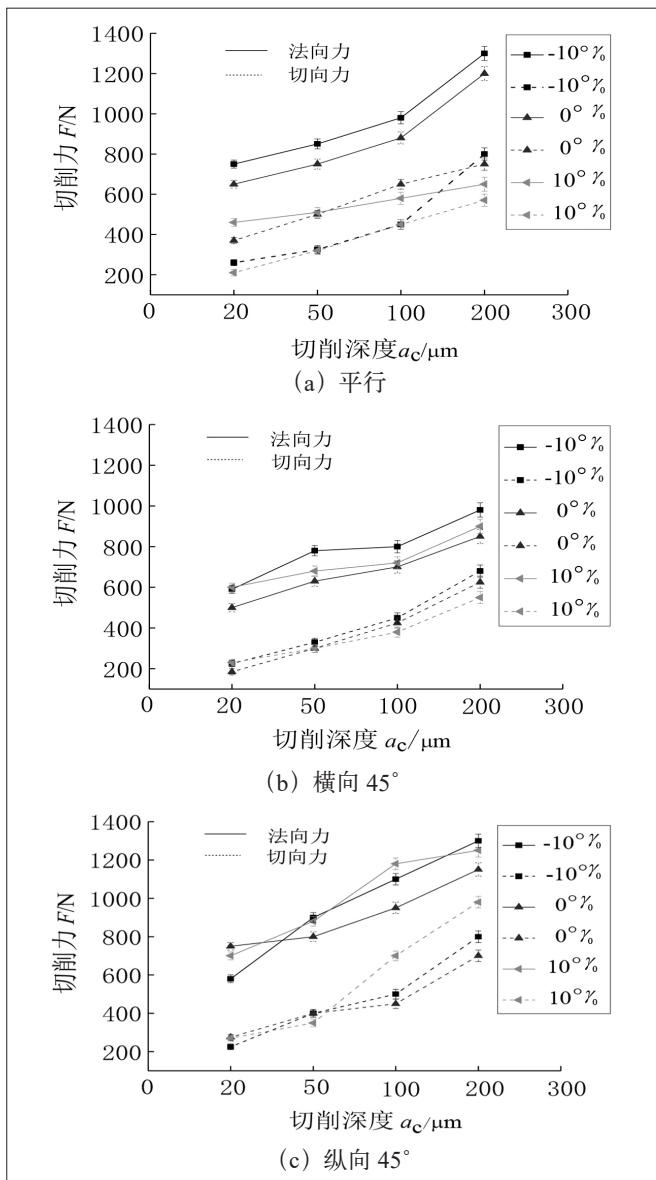


图 2 不同条件下 CFRP 切削力曲线图

纤维方向进行加工时，宜采用刀具前角为 0° 的刨刀进行加工，其切削力较小；纵向 90° 纤维方向加工时，采用刀具前角为 -10° 的刨刀进行加工，切削力相对较小。

2.2 表面粗糙度的影响分析

选取的三种刨刀前角在沿材料纤维不同加工方向下刨削加工后的表面粗糙度柱状图如图 3 所示。观察可知，试件的表面粗糙度与切削深度呈正相关，在整体上的变化趋势为单调递增，这是因为随着切削深度的加大会改变 CFRP 的材料去除方式，CFRP 由塑性去除方式转变为脆性去除方式，从而导致试件表面的损伤情况增加，其表面粗糙度的数值变化与图 2 中切削力的变化相对应。

通过对比分析可见：当刨刀切削深度为 20μm 时，刀具前角 -10° 和 0° 的刨刀在不同纤维方向进行切削加工后的表面粗糙度变化程度不大；当切削深度超过 20μm 时，纵向 90° 纤维方向和纵向 45° 纤维方向切削加工后的表面粗糙度明显较大，说明纵向刨削加工后所得到的试件表面损伤较大质量较差，这是因为在切削材料的加工过程中，其材料的去除方式是断面去除，从而切削力较大，切屑呈现崩碎状，

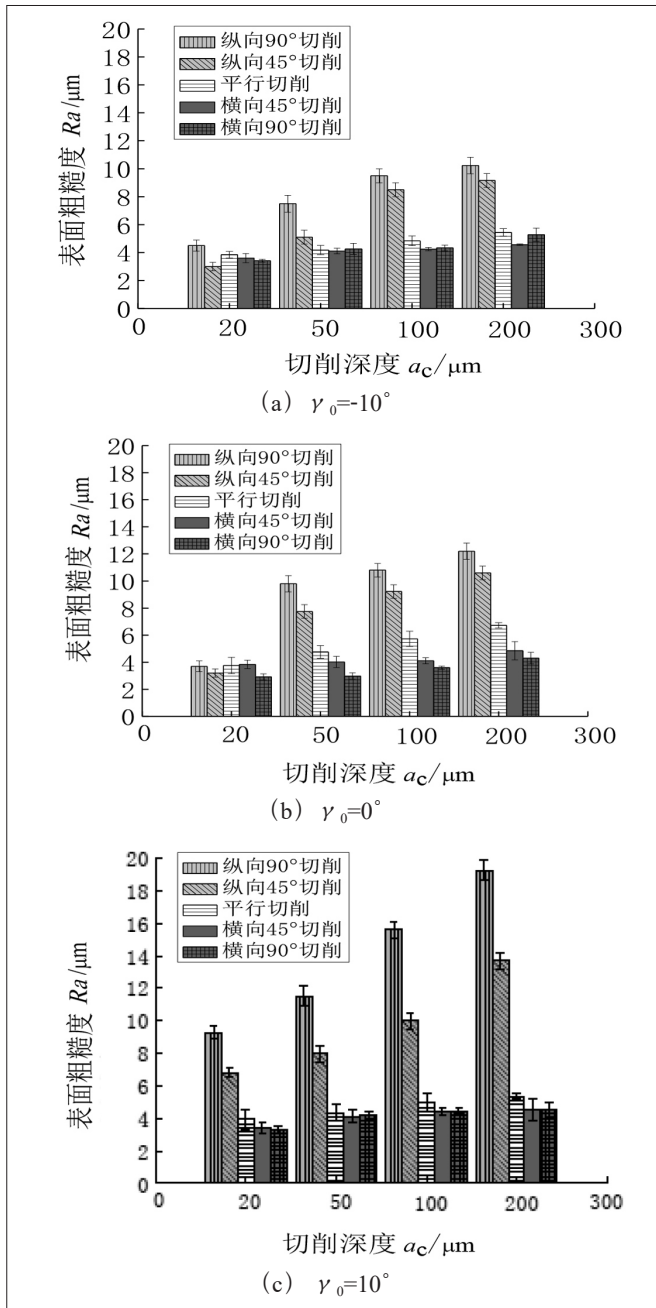


图3 不同切削方向下的试件表面粗糙度变化关系柱状图

材料表面受损程度较高, 致使试件表面粗糙度较大。

横向 45° 和横向 90° 纤维方向进行切削加工, 其表面粗糙度明显较低, 刀具角度对其影响较小, 这是因为负前角刀具在切削加工过程中的切削力指向加工试件的内部, 而 CFRP 为脆性材料, 切削加工过程中其材料的加工区域更容易向周边扩展, 从而使得材料能够有效去除。

平行纤维方向时加工后的表面质量受刀具角度的影响较少, 其表面粗糙度介于横向纤维方向加工和纵向纤维方向加工之间。

2.3 表面形貌的观察和分析

不同前角刨刀在切削深度为 50 μm 和 200 μm 时, 不同纤维方向 (平行纤维方向、纵向 45° 纤维方向、纵向 90° 纤维方向) 切削加工后的表面微观形貌图分别如图 5 ~ 图 12 所示。观察可得, 不同纤维方向切削加工后的表面质量与表面粗糙度柱状图变化趋势一致。在其他参数不变时, 随着切削深度的加大, 表面破损程度逐步加大, 试件表面质量随切削深度的加大而逐步出现不同程度的沟壑、凹坑、裂纹、分层破碎、表面剥离等损伤。纵向 90° 纤维方向进行切削加工后的表面质量最差, 存在明显的材料分层、剥离损伤。

平行纤维方向进行加工时, 低切削深度的表面形貌在刀具角度为 10° 时, 其损伤较少, 材料基体包裹程度较为完整, 刀具角度在 0° 和 -10° 时, 加工后的试件表面存在明显的纤维分层现象, 出现一定程度的纤维裸露情况。切削深度为 200 μm 时, 负前角刀具加工后表面出现了挤压覆盖现象, 而正前角刀具加工后的表面没有出现明显的分层和断裂现象, 可知平行纤维方向进行加工时, 采用刀具前角

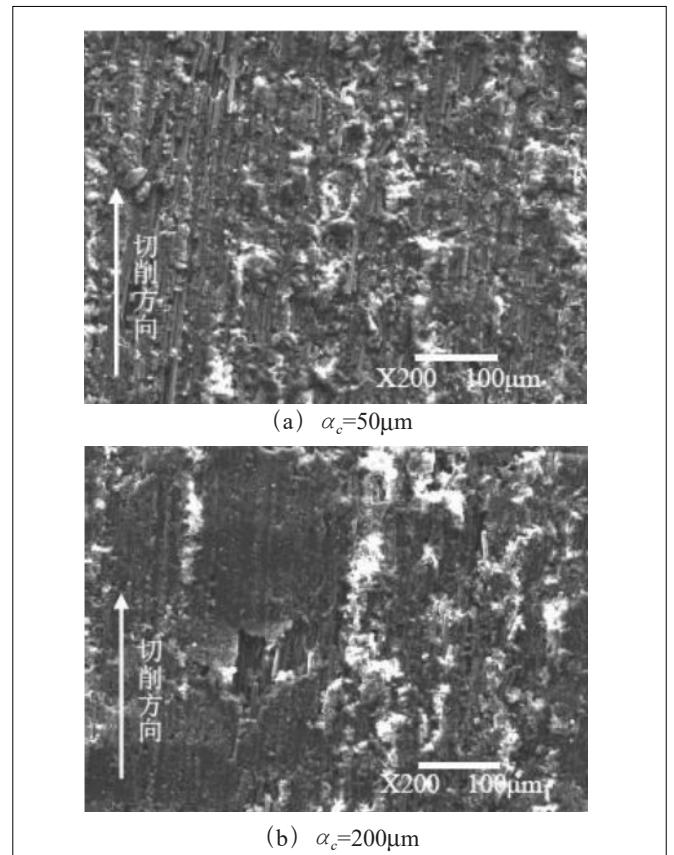


图4 平行纤维切削 ($\gamma_0 = -10^\circ$)

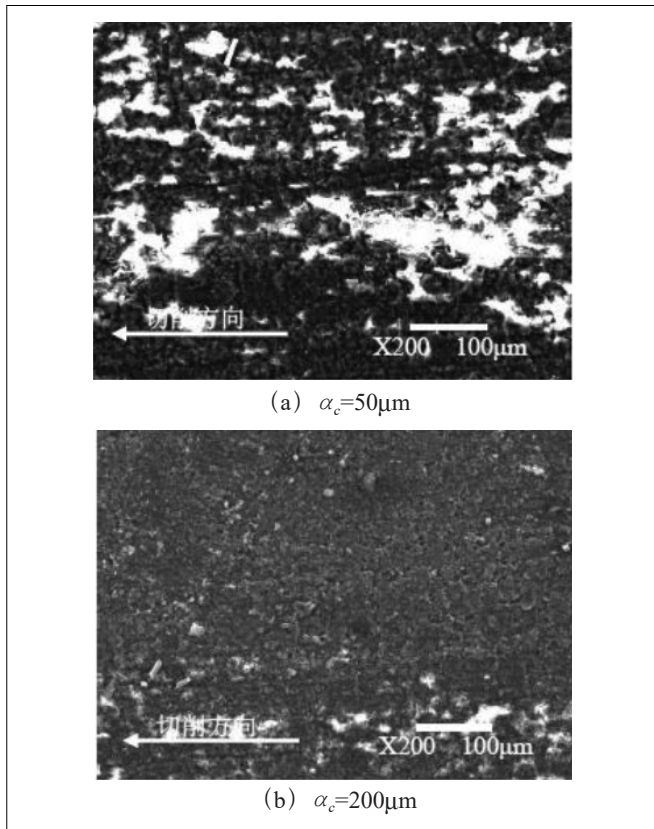


图5 纵向 45° 纤维切削 ($\gamma_0 = -10^\circ$)

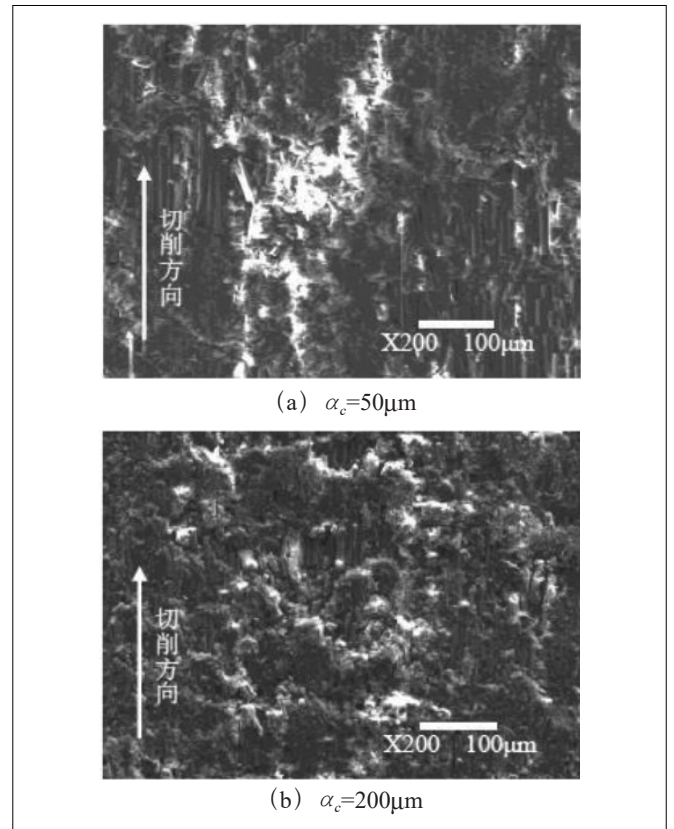


图7 平行纤维切削 ($\gamma_0 = 0^\circ$)

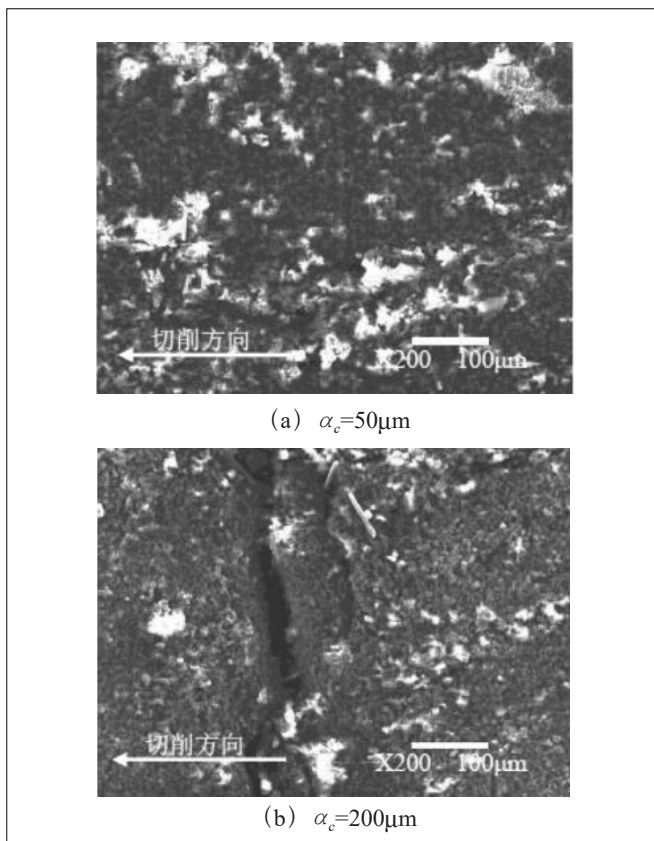


图6 纵向 90° 纤维切削 ($\gamma_0 = -10^\circ$)

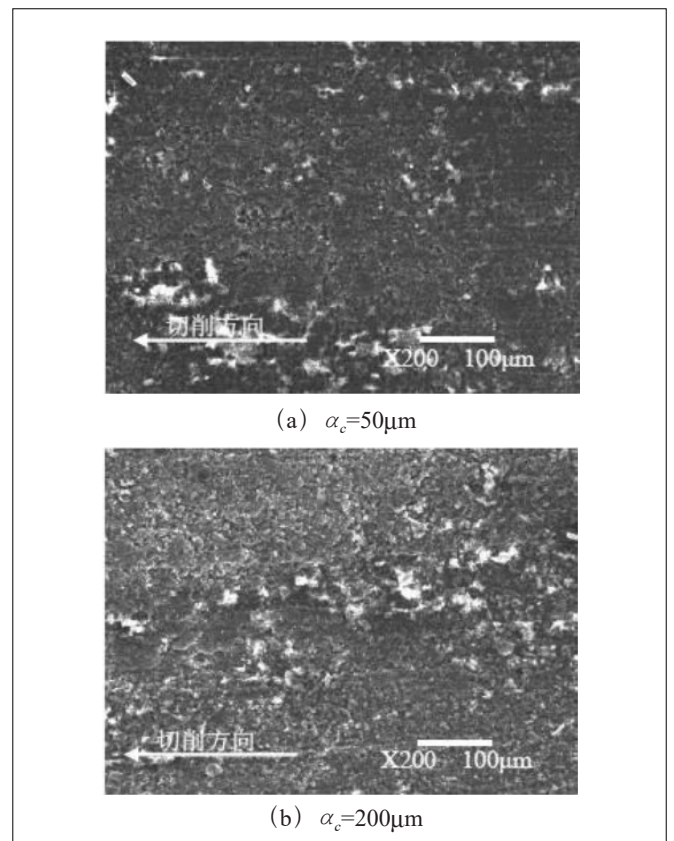


图8 纵向 45° 纤维切削 ($\gamma_0 = 0^\circ$)

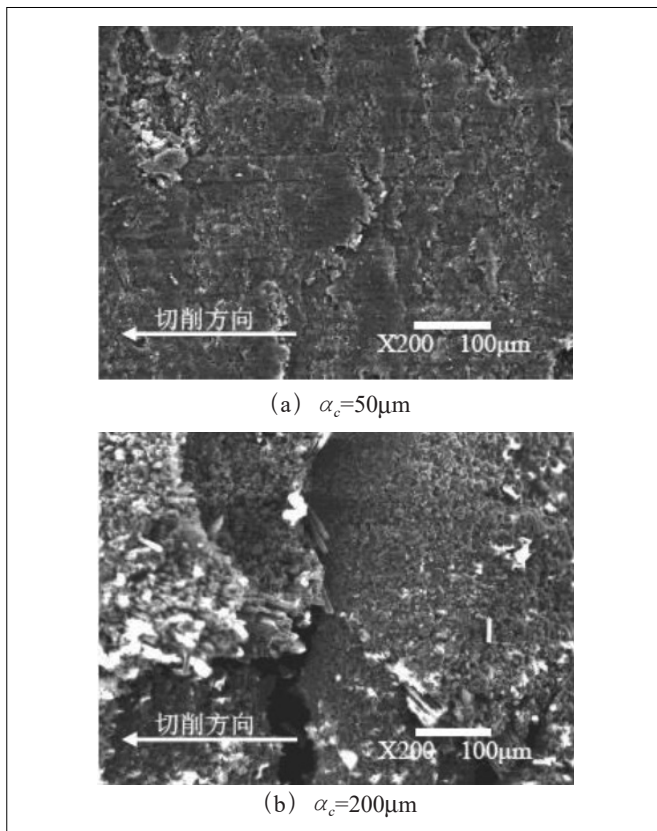


图9 纵向 90° 纤维切削 ($\gamma_0 = 0^\circ$)

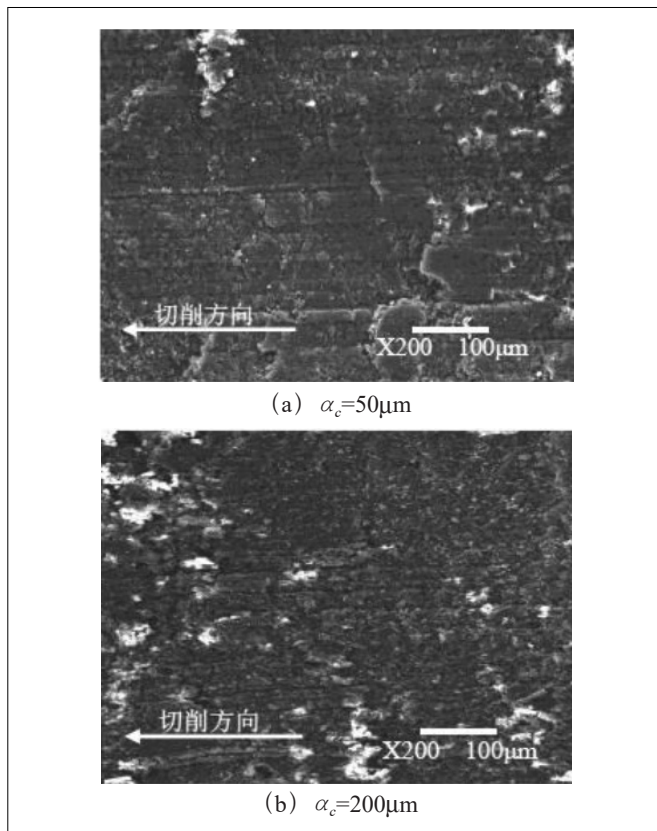


图11 纵向 45° 纤维切削 ($\gamma_0 = 10^\circ$)

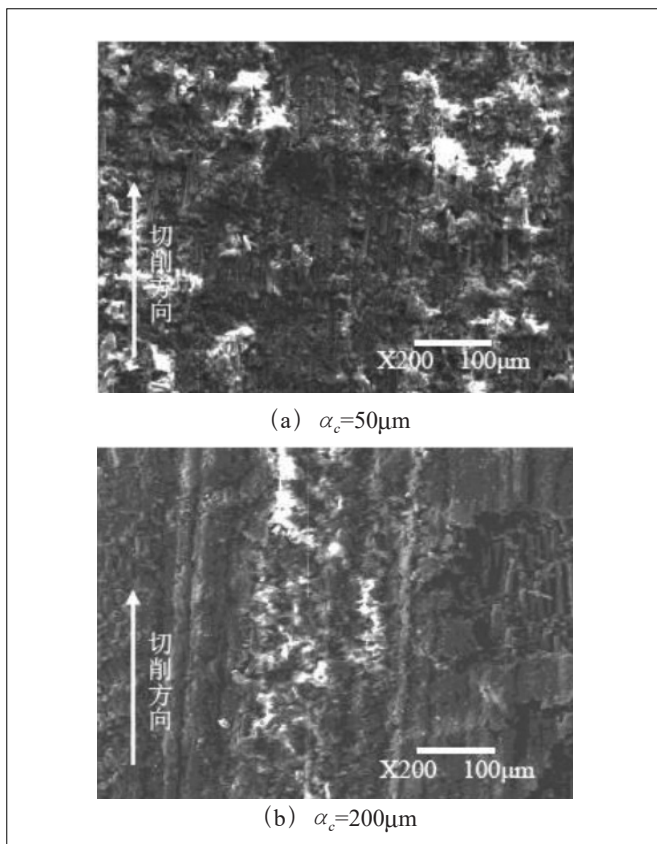


图10 平行纤维切 ($\gamma_0 = 10^\circ$)

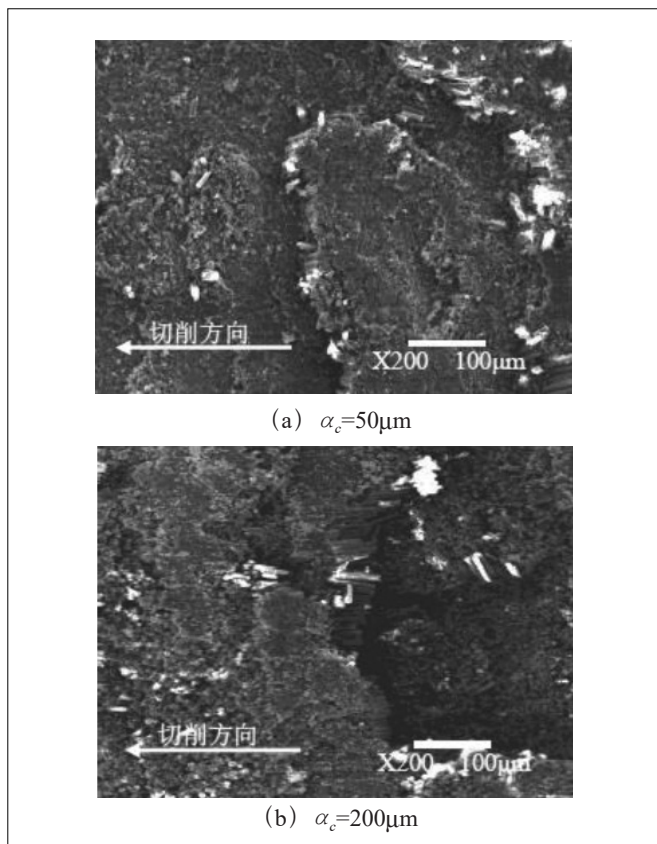


图12 纵向 90° 纤维切削 ($\gamma_0 = 10^\circ$)

为 10° 的刨刀进行加工能获得更好的加工质量。

纵向 45° 纤维方向加工时,刀具前角为 10° 时,加工后的表面质量相对较差,出现了明显的沟壑,随着切削深度的加深而增大。其余前角加工后的表面损伤较浅,表面质量较优,可得纵向 45° 纤维方向进行切削加工时,应避免使用 10° 前角刀具。

纵向 90° 纤维方向进行切削加工时,结合微观形貌图可得,在较高的切削深度下,无论哪种前角的刨刀加工出来的表面都存在明显的分层破碎及沟壑损伤。在较低的切削深度下,采用 -10° 前角的刨刀进行加工后的表面质量较优。

3 结语

本文选用刀具后角为 8° ,不同刀具前角的三种高速钢宽刃刨刀,采用直角自由切削加工的方式,对单向CFRP进行了五个纤维方向下的切削加工试验研究,探讨了法向切削力、切向切削力、试件表面粗糙度、试件表面微观形貌与切削加工深度、刨刀刀具前角、纤维切削加工方向的变化规律,其试验分析与探究表明:

(1)在同一个纤维方向下进行切削加工,其切削力的大小在整体趋势上,会随着切削深度的增加而单调递增。当沿着不同纤维方向进行切削加工时,其切削力会出现较大的变化,CFRP的切削方向对切削力有较大的影响,当采用平行纤维方向和横向 45° 及横向 90° 纤维方向进行切削加工时,宜使用刀具前角为 10° 的刨刀进行切削加工,其产生的切削力较小;当采用纵向 45° 纤维方向进行切削加工时,宜采用刀具前角为 0° 的刨刀进行加工,其切削力相对较小;当采用纵向 90° 纤维方向进行加工时,宜采用刀具前角为 -10° 的刨刀进行加工,所受切削力最小;

(2)切削深度、刀具前角和切削方向对CFRP切削加工后的表面粗糙度有着不同程度的影响,总体上来看,随着切削深度的增加,其表面粗糙度呈现递增趋势。纵向纤维方向切削加工后的表面粗糙度随切削深度的加大,其增加幅度最大,横向纤维方向切削加工后的表面粗糙度受切削深度的变化影响较小。表面粗糙度在选用刀具前角为 -10° 的刨刀进

行切削加工时,整体相对较低。

(3)表面微观形貌随着切削深度的增加而逐步出现不同程度的损伤,平行纤维方向进行切削加工时,采用刀具前角为 10° 的刨刀进行切削加工后,材料的基体包裹较为完整,表面质量相对较优。纵向 45° 纤维方向进行切削加工时,应避免选用前角为 10° 的刀具。纵向 90° 纤维方向进行切削加工时,应采用较低的切削深度进行加工,当使用刀具前角为 -10° 的刨刀进行加工时,获得的表面质量较高。

参考文献:

- [1]X. M. WANG, L. C. ZHANG. An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics[J]. International journal of Machine Tools and Manufacture: Design, research and application, 2003, 43(10):1015-1022.
- [2]Uhlmann E, Sammler F, Richarz S, et al. Machining of Carbon Fibre Reinforced Plastics[J]. Procedia CIRP, 2014, 24:19-24.
- [3]Hanasaki S, Fujiwara J, Tashiro T. 218 Study on Surface Grinding of Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Plastics in Dry Method[J]. Proceedings of International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st century LEM21, 2003:297-302
- [4]Ogi K, Inoue H, Takao Y. An electromechanical model for the temperature dependence of resistance and piezoresistance behavior in a CFRP unidirectional laminate[J]. Composites Science and Technology, 2008, 68(2):433-443.
- [5]Hiroyuki Sasahara, Tomoko Kikuma, Rei Koyasu, et al. Surface grinding of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) with an internal coolant supplied through grinding wheel[J]. Precision Engineering, 2014, 38(4):775-782.

作者简介:陈文新(1992.05-),男,汉族,湖南永州人,硕士研究生,助教,研究方向:机械工业、先进制造。