

引文格式:王海艳,金天,王健宇,等.基于球头铣刀的碳纤维增强复合材料螺旋铣孔切削特性分析[J].航空制造技术,2022,65(20):118-123,131.

WANG Haiyan, JIN Tian, WANG Jianyu, et al. Analysis of cutting characteristics of ball end milling cutter in helical milling of CFRP[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(20): 118-123, 131.

基于球头铣刀的碳纤维增强复合材料螺旋铣孔 切削特性分析*

王海艳,金天,王健宇,武晔

(东北大学秦皇岛分校,秦皇岛 066004)

[摘要] 碳纤维增强复合材料(CFRP)具有跨尺度、多相等结构特点,呈现显著的各向异性和不均匀性,加工性能差,容易出现明显的毛刺和分层。为了分析CFRP螺旋铣孔特性,采用球头铣刀针对CFRP开展了螺旋铣孔工艺技术的研究,着重对切削力、刀具磨损和制孔质量进行了详细分析。首先基于试验结果分析了径向切削力、轴向切削力以及切削温度随切削参数变化而变化的状况,接着分别从侧刃和球面的角度对刀具磨损进行了研究,最后根据制孔深度分析了制孔直径的变化,同时分析了制孔入口和出口的质量情况,并采用分层因子描述了制孔入口的分层情况。结果显示,球头铣刀在CFRP螺旋铣孔过程中具有较好的切削特性,但制孔质量还有待提高。

关键词:球头铣刀;碳纤维增强复合材料(CFRP);螺旋铣孔;刀具磨损;制孔质量

Analysis of Cutting Characteristics of Ball End Milling Cutter in Helical Milling of CFRP

WANG Haiyan, JIN Tian, WANG Jianyu, WU Ye

(Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China)

[ABSTRACT] Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) has the characteristics of multi-scale and multi-equal structure, showing significant anisotropy and heterogeneity, poor machining performance, and easy to appear obvious burrs and delamination. In order to analyze the characteristics in helical milling of CFRP, the ball helical milling of CFRP was studied, and cutting forces, tool wear and hole-making quality were analyzed in detail. First, based on the result of the experiment, the changes of axial and radial cutting force and cutting temperature over cutting parameters were analyzed. Then, tool wear was studied respectively from the lateral edge and spherical edge. Finally, hole diameter was analyzed from the perspective of the hole deep, entry and exit hole-making quality, and delamination factor was used to describe entry delamination state. The results show that the ball end milling cutter has better cutting characteristics in the ball helical milling of CFRP, but hole-making quality needs to be improved.

Keywords: Ball end milling cutter; Carbon fiber reinforced polymer (CFRP); Helical milling; Tool wear; Hole-making quality

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.20.118

碳纤维增强复合材料(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)具有比强度高、比模量大、刚度和强度可设计、抗腐蚀性好及优良的减振特性,广泛应用于航空工业^[1-3]。然而,材料各向异性以及高硬度的特点使得CFRP的可

加工性较差,尤其在钻孔过程中极易产生撕裂和分层等制孔缺陷。螺旋铣孔是近10年出现的新型制孔工艺技术,专用铣刀在自转的基础上公转并保持轴向进给,断续的加工方式使得切屑较易排出,较小的轴向力

* 基金项目:河北省自然科学基金(E2020501014)。

减少了制孔缺陷,因此,关于螺旋铣孔工艺的研究逐渐得到重视。

早期, Ni^[4] 通过切削试验研究了航空铝合金、钛合金和 CFRP 螺旋铣孔过程中的动力学和刀具切削性能,为后续螺旋铣孔工艺的研究指明了方向。Denkena 等^[5] 验证了在复钛叠层材料螺旋铣孔过程中,选择高的切向进给速度和低的轴向进给速度时,切削力较小,刀具和直径偏差也较小。Sasahara 等^[6] 比较了微量润滑(MQL)条件下铝合金的螺旋铣孔过程与钻孔过程,结果显示,无论是哪种加工方式,在微量润滑条件下,制孔质量都得到较大改善。Sadek 等^[7] 考虑了复合材料螺旋铣孔过程中切削参数对制孔质量的影响,进而分析和优化了加工参数。王奔等^[8] 从理论角度对螺旋铣削与传统钻削刀具的运动轨迹进行分析,并对制孔过程中的切削温度、切削力及加工质量进行了检测与分析,结果显示,由于螺旋铣削制孔时的切削温度显著低于传统钻削制孔温度,因此螺旋铣削制孔质量明显优于传统钻削制孔质量,有效避免了制孔出口处的撕裂及分层现象。近年来,难加工材料螺旋铣孔的试验逐渐开展,着重研究如何改善刀具磨损和提高制孔质量。同时,切削力、切削温度和切削运动学等理论研究也取得了重大进展,并通过切削试验进行了验证^[9-11]。目前,为了改善制孔质量,尉言振等^[12] 在考虑复合材料易出现明显出口缺陷的基础上,提出了反向进给螺旋铣孔工艺,并设计了特殊形状的专用刀具,分析了该工艺抑制分层的机制,研究结果表明,反向进给螺旋铣孔工艺可以有效抑制复合材料出口缺陷的形成,取得了较好的制孔效果。

目前,理论研究和试验工作主要集中在专用立铣刀上。球头铣刀不仅能完成圆周进给,还能同时完成轴向进给,球头铣刀在加工复杂曲面的过程中具有明显的优势。利用球头铣刀完成螺旋铣孔过程的研究并不多见。Iyer 等^[13] 研究了采用球头铣刀在淬硬工具钢上的螺旋铣孔过程,得到了较好的制孔质量,相对于钻孔工艺来说,不需要额外的扩孔过程。

本文基于螺旋铣孔运动学原理,采用球头铣刀开展了 CFRP 螺旋铣孔试验研究,主要分析和讨论切削力、刀具磨损和制孔质量等与加工直接有关参数的变化情况,对于提高制孔质量,减少刀具磨损具有指导意义。

1 螺旋铣孔运动学

螺旋铣孔过程中,刀具在自转的同时围绕预加工孔中心公转并保持一定的轴向进给,刀具中心的路径为螺旋线^[14],如图 1 所示。

由螺旋铣孔的运动学特性可知,刀具与预加工孔中间留有间隙,散热性较好,并增加了排屑空间,在螺

旋铣孔过程中,刀具不仅要完成侧向进给,还要完成轴向进给,所以刀具的选择非常重要。球头铣刀以其他刀具无法比拟的优势完成轴向进给,切削特性也会有所不同。

如图 1 所示,假设刀具直径为 d , mm; 加工孔直径为 D , mm; 刀具刃数为 Z ; 刀具主轴自转速度(主轴转速)为 n , r/min; 公转速度为 n_0 , r/min; 每公转轴向切削深度(切削深度)为 a , mm/转; 则刀具每齿切向进给量(切向进给量) f_{za} 为

$$f_{za} = \pi(D-d)n_0 / Z / n \quad (1)$$

刀具轴向每齿进给量(轴向进给量) f_{za} 为

$$f_{za} = a \cdot n_0 / Z / n \quad (2)$$

刀具中心轨迹的螺旋角 α 为

$$\alpha = \arctan(a / \pi / (D-d)) \quad (3)$$

在螺旋铣孔过程中,由式(1)可知,当刀具和孔直径不变时,刀具主轴转速、公转速度和切向进给量互相关联;而从式(2)可知,刀具主轴转速、公转速度、切削深度和轴向进给量互相关联;式(3)显示,切向进给量和轴向进给量的比值决定了刀具中心轨迹螺旋角的大小。综上分析并结合在实际加工过程中参数的选择,最终选取刀具主轴转速、切向进给量和轴向切削深度作为后续分析的依据。

2 试验流程

如图 2 所示, CFRP 螺旋铣孔试验在三轴数控机床

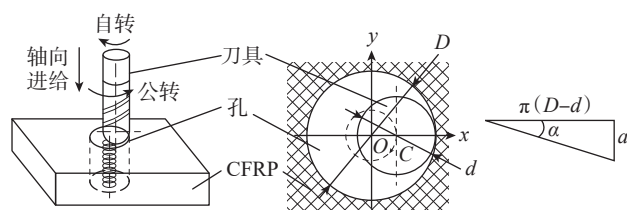


图 1 螺旋铣孔工艺

Fig.1 Helical milling technology

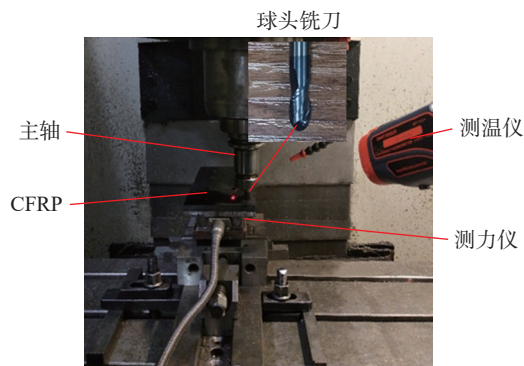


图 2 试验装置

Fig.2 Experiment setup

床 (XK714D) 上进行干切削, TiAlN 涂层的两刃球头铣刀直径为 6 mm, 总长度为 60 mm。CFRP 板材的面积为 200 mm × 100 mm, 厚度为 10 mm。预加工孔直径为 10 mm。在切削过程中, 利用 Kistler 9119AA2 测力计实时跟踪切削力的变化, 利用非接触式红外测温仪 (AT1350+) 检测切削过程中的温度变化。在加工过程中每隔 2~3 个孔卸下刀具, 通过工具显微镜测量刀具的磨损状态。试验过程中具体加工参数如表 1 所示。

3 结果与讨论

3.1 切削力

当主轴转速 4000 r/min、切向进给量 0.02 mm/z、切削深度 0.2 mm/r 时, CFRP 螺旋铣削时的 x 、 y 、 z 3 向切削力如图 3 所示, 其中 z 向为轴向。可以看出, 轴向力波动非常严重, 同时轴向力远大于其他两个方向的切削力, 由于 CFRP 材料独特的铺层结构, 如果轴向力较大, 则会在加工出口区域出现撕裂和拉拔以及分层等现象, 严重影响制孔质量。此外, x 和 y 方向切削力在初始阶段呈现出逐渐增加的趋势, 之后切削力稳定在一定范围内, 而在最终切削区域, 切削力并没有出现明显的下降趋势。分析出现这一现象的原因可能在于球头铣刀逐渐切入工件, 刀头部位与工件之间的接触面积逐渐扩大, 直到刀具球头部分完全切入工件, 同时在切出区域,

主要是切削刃的球头和圆柱部位参与切削, 切削状态并没有发生太大的变化, 这种情况有利于控制刀具磨损, 提高制孔质量。

在制孔过程中, 径向力一般与刀具偏差和孔壁质量有关, 而轴向力则与刀具磨损和孔的进口、出口质量直接有关, 因此采用径向力和轴向力来分析切削力的变化。轴向力为 z 方向力, 径向力为

$$F_r = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (4)$$

式中, F_r 为径向力; F_x 、 F_y 分别为 x 、 y 方向的切削力。

如图 4 所示, 轴向和径向切削力均随着切削深度和切向进给量的增加而增大, 而随着主轴转速的增加而降低, 轴向力的变化远大于径向力, 因此主要讨论切削参数对轴向力的影响。当主轴转速从 4000 r/min 增加到 6000 r/min (切削深度为 0.2 mm/r, 切向进给量为 0.04 mm/z) 时, 轴向切削力从约 228.3 N 减小到 126.1 N, 下降了 44.8%; 当切向进给量从 0.02 mm/z 增加到 0.06 mm/z (主轴转速为 4000 r/min, 切削深度为 0.2 mm/r) 时, 轴向力从 175.1 N 增加到 295.3 N, 增幅为 68.6%; 随着切削深度从 0.1 mm/r 增加到 0.2 mm/r (主轴转速为 4000 r/min, 切向进给量为 0.04 mm/z), 轴向力从 248.1

表 1 全因子切削参数
Table 1 Cutting parameters of full factors

主轴转速 / ($r \cdot \min^{-1}$)	切削深度 / ($\text{mm} \cdot r^{-1}$)	切向进给量 / ($\text{mm} \cdot z^{-1}$)
4000	0.1	0.02
5000	0.15	0.04
6000	0.2	0.06

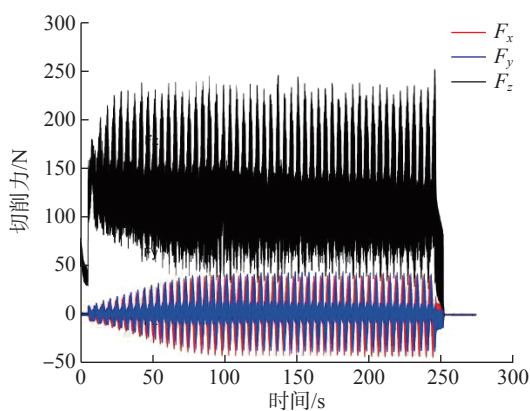
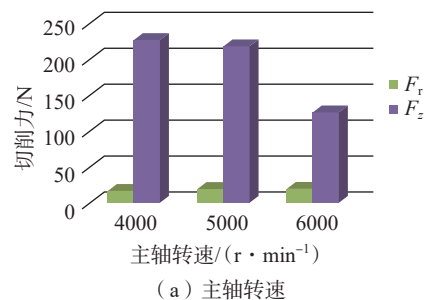
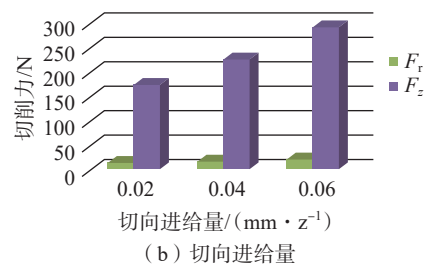


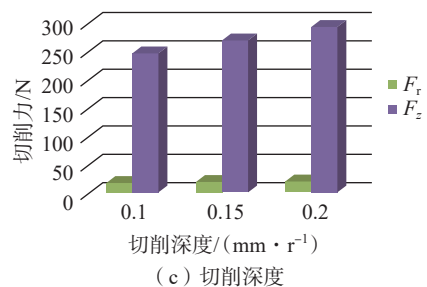
图 3 实测切削力
Fig.3 Measured cutting forces



(a) 主轴转速



(b) 切向进给量



(c) 切削深度

图 4 切削参数对切削力的影响
Fig.4 Effect of cutting parameters on cutting forces

N 增加到 295.3 N,增幅为 19%。可以看出,如果需要控制轴向切削力,应当尽可能采用较高的主轴转速,较小的切削深度,及选择适当的切向进给量。

3.2 切削温度

螺旋铣孔过程中,由于孔直径大于刀具直径,增加了排屑空间,也降低了切削区的温度,但是由于切削温度的变化对刀具磨损的影响非常关键,研究和分析切削温度条件的变化对于后续的研究具有参考价值。红外测温仪测量的距离切削区 80 mm 处的切削温度如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,加工第 1 个孔后的温度约为 48 °C,第 9 个孔加工完成,切削区温度约为 100 °C,而第 27 个孔加工完成,最高温度一直没超过 102 °C,整体上来说,切削区温度随着加工孔数量的增加呈现增大的趋势,但是切削参数的影响也不能忽略。从图 6 中可以看出,切削温度随主轴转速、切向进给量和切削深度的增加而升高,相比于切削参数对切削力的影响程度,切削参数对切削温度的影响相对较小。当主轴转速从 4000 r/min 增加到 6000 r/min (切削深度 0.2 mm/r,切向进给量 0.04 mm/z)时,切削温度从 67 °C 升高到 83.7 °C,最后升到 84 °C。当切向进给量从 0.02 mm/z 增加到 0.06 mm/z (主轴转速为 4000 r/min,切削深度为 0.2 mm/r)时,切削温度从 83 °C 增大到 94 °C,后又增大到 102 °C。随着切削深度从 0.1 mm/r 增加到 0.2 mm/r (主轴转速为 4000 r/min,切向进给量为 0.04 mm/z),切削温度从 63.8 °C 变化到 86 °C。从分析结果可以看出,尤其在大切削参数情况下,切削温度基本无变化。

3.3 刀具磨损状况

考虑到复合材料的耐磨特性,在加工过程中,刀具磨损问题会直接影响切削过程,因此,刀具磨损问题的分析着重于分析刀具不同切削刃和微观特性。图 7 为铣削 27 个孔后的刀具磨损状态,可以看出,刀具的侧面和前缘均出现了明显的磨损,球面切削刃处出现了典型的沟槽以及磨亮的情况,而侧刃则出现了明显白层甚至

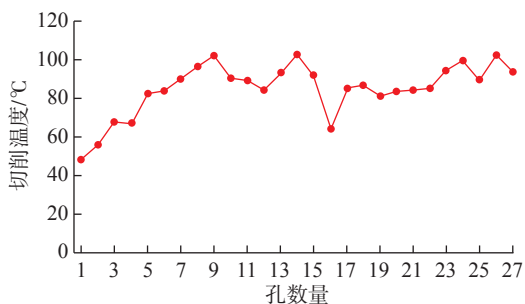


图 5 CFRP 材料的切削温度
Fig.5 Cutting temperatures of CFRP

破损的情况,无论是球面还是侧刃,刀具均呈现出典型的磨料磨损形态。从分析结果可知,球头立铣刀的磨损程度相对较轻,主要原因可能是球头立铣刀的入口区域与孔壁没有直接接触,材料去除量很小,随着切削的进行,切削刃逐渐切入,导致切削力的逐渐增加,同样,刀具到达孔出口区域时逐渐退出加工区域,但是圆柱切削刃一直参与切削,因此切削力并不像入口区域那样明显减小,与稳态切削过程基本一致。因此,球头刀具的磨损并不十分严重。

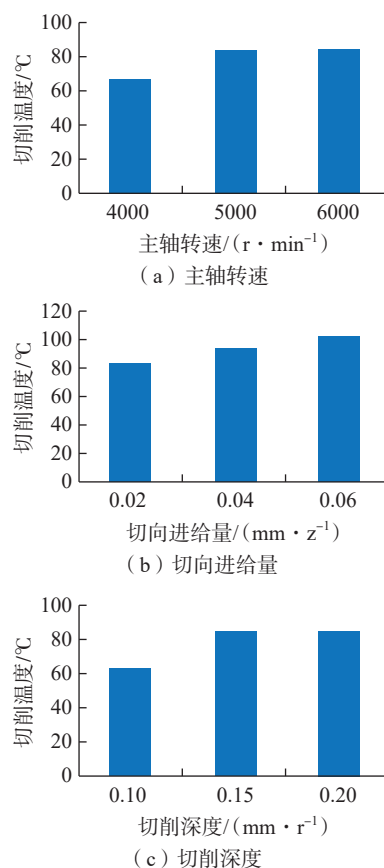


图 6 切削参数对切削温度的影响
Fig.6 Effect of cutting parameters on cutting temperatures

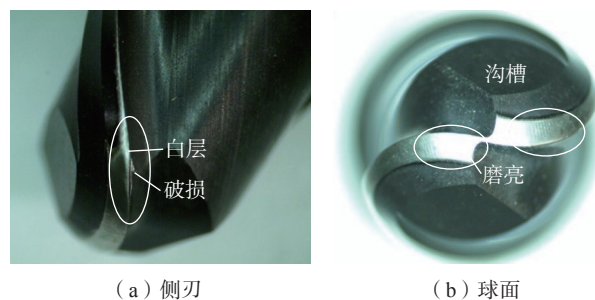
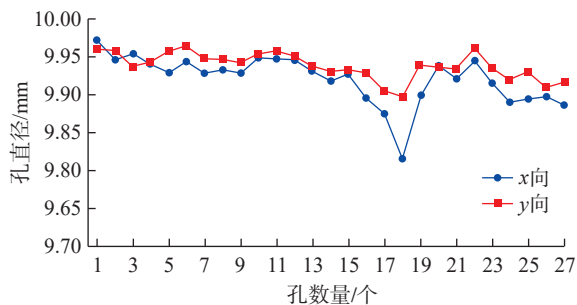


图 7 刀具磨损情况
Fig.7 Tool wear condition

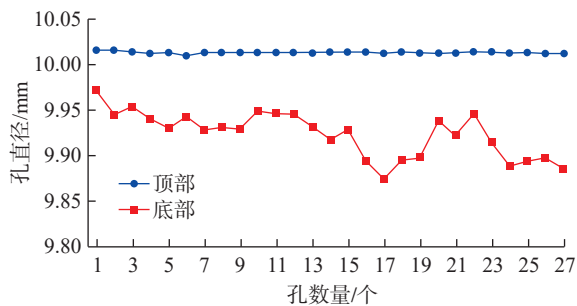
3.4 制孔质量分析

3.4.1 直径

由于 CFRP 材料的各向异性,孔直径变化情况不同于金属材料,呈现明显的方向性,如图 8(a)所示。孔直径分别检测 x 和 y 相互垂直方向,可以看出,除第 1 个和第 3 个孔外, y 方向的孔直径均大于 x 方向。从试验过程中可知, x 方向为纤维铺层方向, y 方向垂直于纤维铺层方向,也就是说垂直于纤维铺层方向的直径更大一些,这是 CFRP 各向异性的体现。此外,由于按顺序加工,孔直径呈现较小的减小趋势。同时从图 8(b)可以看出,孔入口直径均大于名义直径(10 mm),而孔出口直径均小于名义直径,而且随着加工孔数量的增多,出口直径减小的趋势逐渐增大。



(a) 不同方向的孔直径



(b) 不同位置的孔直径

图 8 不同方向和位置孔直径

Fig.8 Hole diameters at different directions and positions

3.4.2 孔入口和出口质量

采用工具显微镜详细观察孔入口和出口情况,CFRP 孔口情况如图 9 所示,可以看出,随着加工过程的进行,入口毛刺和分层问题逐渐增多,但是由于 CFRP 材料特性明显不同于金属,无法通过毛刺去除来提高孔口质量。较小的缺陷可以暂时忽略,较大的缺陷需要特殊处理甚至报废。

从图 9 可以看出,入口分层状态并不严重,但随着刀具磨损的增加,出现了明显的毛刺和分层情况。加工第 1 个孔时,入口质量相对较好,当加工继续进行,一些特殊方向上出现了明显毛刺,当加工到第 27 个孔之后,毛刺增大,毛刺的方向主要位于沿水平轴逆时针旋转 $45^\circ \sim 90^\circ$ 和 $180^\circ \sim 225^\circ$ 之间。当制孔底部无支撑板时,孔出口质量问题比较严重,由于纤维铺层方向是单向铺层,沿图 1 中 x 轴方向为 0,严重的毛刺和撕裂现象出现在 x 轴的下部,位于顺时针 30° 位置,如图 9(c)所示。因此在 CFRP 的加工过程中必须采取一些措施,如在孔出口部位设置垫板或支撑板等,研究结果表明,支撑板能够抑制切削加工过程中出口材料的外变形,增大临界轴向力,减少开裂的概率,并极大地降低分层损伤^[8]。另外,出口材料越受约束,变形越少,纤维越容易断裂,毛刺损伤也大大减少^[13]。由于 CFRP 材料的特性,进、出口的毛刺和分层状态直接决定了制孔质量。

CFRP 分层损伤通常发生在进、出口两侧表面的几层材料之间,损伤的大小需要通过超声波扫描等设备检测。毛刺和撕裂系数随孔数的变化没有规律性,而分层系数则有一定规律性,证明了 CFRP 制孔过程中几种损伤形式的产生具有随机性,它们之间没有必然的联系。例如,当毛刺损伤较严重时,出口分层损伤可能较轻,任何损伤都难以准确表征和反映整体制孔质量。

3.4.3 入口分层因子

分层会影响零件的连接强度,由于出口区域的分层状态与有无支撑板有很大关系,如果没有支撑板,出口

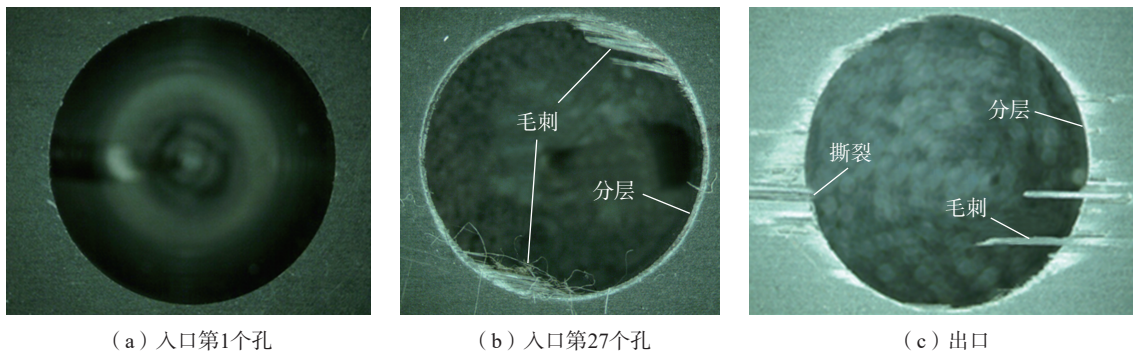


图 9 CFRP 孔口质量

Fig.9 Hole edge quality of CFRP

缺陷非常严重;有支撑板时,孔出口基本无缺陷。因此,选择入口分层缺陷进行分析,分层因子作为评价指标,分层因子表示成孔的最大直径与理想直径的比值为

$$f_d = D_m / D \quad (5)$$

式中, D_m 为实际测量的孔径; D 为孔的理想直径。将计算的分层因子绘于图 10 中,可以看出,入口分层因子基本位于 1.05~1.14 之间,同时分层因子随孔数的增加而增加,即刀具磨损会影响 CFRP 螺旋铣削过程中的分层。

从图 11 可以看出,对于 CFRP 材料,径向力随制孔数量的增加而增大的现象不如轴向力明显,但两向切削力也都呈现出增大的态势,而当制孔数量越多,刀具磨损也会越发严重,进而影响制孔质量。随着刀具磨损量的增加,切削刃变钝,不能尖锐地切割纤维,导致毛刺、撕裂和分层的增加。因此,在 CFRP 螺旋铣孔过程中,切削力、刀具磨损状态及制孔质量互相关联,彼此影响。

4 结论

基于螺旋铣孔切削机理,开展了基于球头铣刀的 CFRP 螺旋铣孔试验研究,试验过程中实时测量了切削力、切削温度,每隔 2~3 个孔测量刀具磨损状况,试验结束后测量了制孔质量。试验结果显示,在复合材料螺旋铣孔初始阶段,切削力逐渐增加,而当球头铣刀的圆柱部分进入切削区,切削力稳定在一个固定值;在出口区,

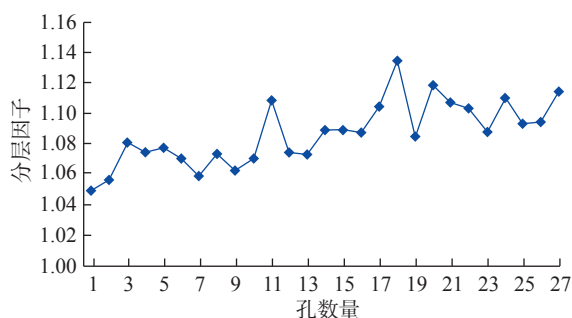


图 10 入口分层因子随制孔数量的变化

Fig.10 Change of entry delamination factors over hole-making numbers

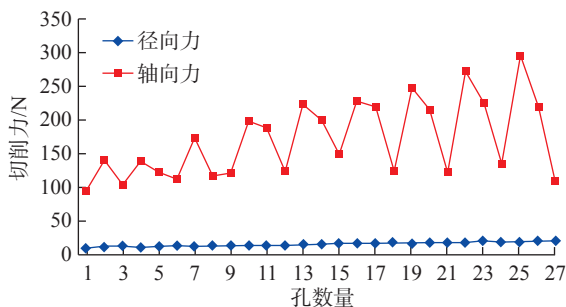


图 11 切削力随制孔数量的变化

Fig.11 Change of cutting forces over hole-making numbers

切削力呈现相对稳定的状态,这种切削力的变化状态有利于控制刀具磨损,提高制孔质量。从径向和轴向两个角度分析了切削参数对切削力的影响。具体结论如下。

(1) 切削力随切削深度和切向进给量的增加而增大,随主轴转速的增加而减小;轴向力的变化趋势大于径向力,主轴转速和切削深度对切削力的影响程度也相对较大。

(2) 随着加工过程的进行,整体切削温度呈上升趋势,主轴转速、切削深度和切向进给量对切削温度的影响较小,切削温度随切削参数的增加呈现微小增大的态势。

(3) 刀具磨损形式为典型的磨料磨损,刀头出现明显的沟槽和光泽,边沿出现明显的白层。球头立铣刀与特殊立铣刀的磨损形式基本相同,但磨损程度更轻。

(4) CFRP 的孔直径在不同方向上并不相等,纤维铺层方向的直径小于垂直方向的直径,体现了 CFRP 的各向异性,且由于 CFRP 的收缩现象,孔直径呈下降趋势;明显的毛刺和分层出现在特殊方向,随着切削过程的进行,毛刺逐渐增大,但是方向不变,基本处于沿水平轴方向逆时针 $45^\circ \sim 225^\circ$ 之间,此外,CFRP 入口分层因子基本位于 1.05~1.14 之间。

参考文献

- [1] 张厚江,陈五一,陈鼎昌. 碳纤维复合材料(CFRP)钻孔出口缺陷的研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(7): 150-155.
ZHANG Houjiang, CHEN Wuyi, CHEN Dingchang. Investigation of the exit defects in drilling carbon fibre-reinforced plastic plates[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(7): 150-155.
- [2] 孟庆勋,姜寿山,刘书暖,等. CFRP 层合板制孔周期内轴向力分布规律研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(11): 110-120.
MENG Qingxun, JIANG Shoushan, LIU Shunuan, et al. Study of thrust force distribution in a drilling cycle during drilling of CFRP laminates[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(11): 110-120.
- [3] 王东,焦锋. 基于横刃轴向力的 CFRP 钻孔分层临界进给量研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(3): 255-266.
WANG Dong, JIAO Feng. Study on critical feed rate of delamination based on thrust force of chisel edge during CFRP drilling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(3): 255-266.
- [4] NI W Y. Orbital drilling of aerospace materials[C]//SAE Technical Paper Series. Warrendale: SAE International, 2007.
- [5] DENKANA B, BOEHNKE D, DEGE J H. Helical milling of CFRP-titanium layer compounds[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2008, 1(2): 64-69.
- [6] SASAHARA H, KAWASAKI M, TSUTSUMI M. Helical feed milling with MQL for boring of aluminum alloy[J]. Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing, 2008, 2(6): 1030-1040.
- [7] SADEK A, MESHREKI M, ATTIA M H. Characterization and optimization of orbital drilling of woven carbon fiber reinforced epoxy laminates[J]. CIRP Annals, 2012, 61(1): 123-126.

(下转第 131 页)

Microstructural control in metal laser powder bed fusion additive manufacturing using laser beam shaping strategy[J]. *Acta Materialia*, 2020, 184: 284–305.

[9] ZHIRNOV I V, PODRABINNIK P A, OKUNKOVA A A, et al. Laser beam profiling: Experimental study of its influence on single-track formation by selective laser melting[J]. *Mechanics & Industry*, 2015, 16(7): 709.

[10] 曹浩, 雷振, 黄瑞生, 等. 激光摆动焊接工艺参数对高强度钢气孔率和焊缝成形的影响[J]. *焊接*, 2019(4): 39–43, 67.

CAO Hao, LEI Zhen, HUANG Ruisheng, et al. Effects of laser swing welding parameters on porosity and weld formation of high strength steel[J]. *Welding & Joining*, 2019(4): 39–43, 67.

[11] 郝雨. 铝合金摆动激光熔池热场与流场研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

HAO Yu. Study on temperature field and flow field of aluminum alloy oscillating laser welding molten pool[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.

[12] BRANDL B B E. Wire-based-additive-layer-manufacturing-comparison-of-microstructure-and-mechanica[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211(6): 1146–1158.

[13] JIANG Z G, CHEN X, LI H, et al. Grain refinement and laser energy distribution during laser oscillating welding of Invar alloy[J]. *Materials & Design*, 2020, 186: 108195.

[14] SRIDHARAN N, CHEN Y M, NANDWANA P, et al. On the potential mechanisms of β to α' + β decomposition in two phase titanium alloys during additive manufacturing: A combined transmission Kikuchi diffraction and 3D atom probe study[J]. *Journal of Materials Science*, 2020, 55(4): 1715–1726.

[15] ZHU Y Y, TANG H B, LI Z, et al. Solidification behavior and grain morphology of laser additive manufacturing titanium alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 777: 712–716.

[16] 卢颖, 汤海波, 王华明. 激光成形 TC4 钛合金亚临界退火组织及形成机制[J]. *材料热处理学报*, 2012, 33(11): 58–62.

LU Ying, TANG Haibo, WANG Huaming. Microstructure and forming mechanism of a laser melting deposited TC4 titanium alloy after sub-critical annealing[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2012, 33(11): 58–62.

[17] 宋静雯, 韩远飞, 方旻翰, 等. 退火温度对激光选区熔化成形 TC4 合金显微组织和力学性能的影响[J/OL]. *热加工工艺*, [2020–11–06]. DOI: 10.14158/j.cnki.1001–3414.20200150.

SONG Jingwen, HAN Yuanfei, FANG Minhan, et al. Effect of annealing temperature on microstructure and mechanical properties of TC4 alloy formed by laser selective melting[J/OL]. *Thermal Processing Technology*, [2020–11–06]. DOI: 10.14158/j.cnki.1001–3414.20200150.

[18] 张成, 刘玉德, 张萌, 等. 选区激光熔化 TC4 试样的力学性能及微观组织分析[J]. *特种铸造及有色合金*, 2020, 40(3): 302–306.

ZHANG Cheng, LIU Yude, ZHANG Meng, et al. Mechanical properties and microstructure analysis of selective laser melting TC4 sample[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2020, 40(3): 302–306.

[19] 陈素明, 胡生双, 张颖, 等. 退火工艺对增材制造 TC18 钛合金力学性能和组织的影响[J]. *金属热处理*, 2020, 45(8): 142–146.

CHEN Suming, HU Shengshuang, ZHANG Ying, et al. Effect of annealing process on mechanical properties and microstructure of additive manufactured TC18 titanium alloy[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2020, 45(8): 142–146.

[20] LIANG Z L, SUN Z G, ZHANG W S, et al. The effect of heat

treatment on microstructure evolution and tensile properties of selective laser melted Ti6Al4V alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 782: 1041–1048.

[21] WANG B, HUANG L J, HU H T, et al. Superior tensile strength and microstructure evolution of TiB whisker reinforced Ti60 composites with network architecture after β extrusion[J]. *Materials Characterization*, 2015, 103: 140–149.

[22] GEY N, HUMBERT M. Characterization of the variant selection occurring during the $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$ phase transformations of a cold rolled titanium sheet[J]. *Acta Materialia*, 2002, 50(2): 277–287.

[23] ZENG L, BIELER T R. Effects of working, heat treatment, and aging on microstructural evolution and crystallographic texture of α , α' , α'' and β phases in Ti–6Al–4V wire[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, 392(1–2): 403–414.

通讯作者: 顾海, 副教授, 博士, 从事智能制造及增材制造研究。

(责编 阳光)

(上接第 123 页)

[8] 王奔, 高航, 毕铭智, 等. C/E 复合材料螺旋铣削制孔方法抑制缺陷产生的机理[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(15): 173–181.

WANG Ben, GAO Hang, BI Mingzhi, et al. Mechanism of reduction of damage during orbital drilling of C/E composites[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(15): 173–181.

[9] WANG H Y, QIN X D, LI H, et al. Analysis of cutting forces in helical milling of carbon fiber-reinforced plastics[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2013, 227(1): 62–74.

[10] LIU J, CHEN G, JI C H, et al. An investigation of workpiece temperature variation of helical milling for carbon fiber reinforced plastics (CFRP)[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, 86: 89–103.

[11] QIN X D, WANG B, WANG G F, et al. Delamination analysis of the helical milling of carbon fiber-reinforced plastics by using the artificial neural network model[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, 28(2): 713–719.

[12] 尉言振, 董志刚, 杨国林, 等. 复合材料反向进给螺旋铣孔工艺研究[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(22): 76–81, 87.

WEI Yanzen, DONG Zhigang, YANG Guolin, et al. Investigation on reverse helical milling of composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(22): 76–81, 87.

[13] IYER R, KOSHY P, NG E. Helical milling: An enabling technology for hard machining precision holes in AISI D2 tool steel[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, 47(2): 205–210.

[14] 秦旭达, 陈仕茂, 刘伟成, 等. 螺旋铣孔技术在航空制造装配业中的发展应用[J]. *航空制造技术*, 2009, 52(6): 58–60.

QIN Xuda, CHEN Shimao, LIU Weicheng, et al. Development and application of hole helical milling technology in aviation manufacturing assembly industry[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2009, 52(6): 58–60.

通讯作者: 王海艳, 副教授, 博士, 研究方向为难加工材料高效切削机理与技术。

(责编 阳光)