

引文格式: 杨亚堃, 郑侃, 董松, 等. CFRP/铝合金薄壁叠层构件旋转超声铤孔试验研究[J]. 航空制造技术, 2024, 67(23/24): 105-113.

YANG Yakun, ZHENG Kan, DONG Song, et al. Experimental study on rotary ultrasonic countersinking of CFRP/aluminum alloy thin-walled laminated structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(23/24): 105-113.

CFRP/铝合金薄壁叠层构件旋转超声铤孔试验研究

杨亚堃, 郑侃, 董松, 孙振文, 孙连军

(南京理工大学, 南京 210094)

[摘要] 针对弱刚性 CFRP/铝合金叠层构件铤孔孔壁表面粗糙度及铤孔深度难以控制的问题, 开展了叠层构件旋转超声铤孔试验研究。重点开展了不同刚度条件下有、无超声振动铤孔对比试验, 揭示了工艺参数、超声场能及制孔位置刚度对铤孔轴向力和表面粗糙度的影响规律。试验结果表明, 超声振动有效降低了铤孔轴向力、提升了铤孔孔壁质量, 平均铤孔轴向力降幅达到 12%, 平均粗糙度 R_a 降低 10%。横向刚度最小的孔位铤孔轴向力和孔壁粗糙度最大, 其余孔位铤孔轴向力和孔壁粗糙度均随轴向刚度的减小而增大。同时, 旋转超声加工可以实现铝合金有效断屑, 避免长切屑对 CFRP 铤孔孔壁的二次损伤。

关键词: CFRP/铝合金叠层构件; 旋转超声铤孔; 制孔位置刚度; 轴向力; 表面粗糙度

Experimental Study on Rotary Ultrasonic Countersinking of CFRP/Aluminum Alloy Thin-Walled Laminated Structures

YANG Yakun, ZHENG Kan, DONG Song, SUN Zhenwen, SUN Lianjun

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

[ABSTRACT] For the problem of surface roughness and depth of countersink of weakly rigid CFRP/aluminum alloy laminated members, an experimental study on rotary ultrasonic countersinking of laminated members was carried out. The experiments focused on the comparison of countersinking with and without ultrasonic vibration under different rigidity conditions, and revealed the influence of process parameters, ultrasonic field energy and rigidity of hole-making position on axial force and surface roughness of countersinking. The experimental results show that ultrasonic vibration effectively reduces the axial force and improves the wall quality of the countersink, with an average reduction of 12% in axial force and 10% in roughness R_a . The axial force and wall roughness of the countersink in the hole with the lowest transverse stiffness are the highest, while the axial force and wall roughness of the countersink in the rest of the holes increase with the decrease of axial stiffness. Meanwhile, the rotary ultrasonic machining can achieve effective chip breaking of aluminum alloy and avoid secondary damage to CFRP countersink hole wall by long chips.

Keywords: CFRP/aluminum alloy laminated components; Rotary ultrasonic countersinking; Stiffness of hole-making position; Thrust force; Surface roughness

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.23/24.105

CFRP/铝合金叠层构件具有高强度、低重量的整体材料特性, 常以薄壁叠层件的形式被广泛应用于飞机设计与制造过程中^[1-2]。进入 21 世纪后, 复合材料在先进飞机中的用量快速提升, 如新一代波音 787 复合材料的用量高达 50%, 空客 A350 系列飞机复合材料的比重更

是达到 62%^[3]。杜善义院士指出国产大飞机复合材料的比重至少要达到 25% 以上^[4]。在军用飞机领域, 美国第四代主力战机 F-22 复合材料比重达到 25%, 我国自行研制的歼-20 战机, 其复合材料比重也达到 20% 左右^[5]。飞机叠层材料需要加工大量的连接孔, 大部分的

连接孔通过钻-铤工序加工^[6]。然而,CFRP薄壁件铤孔加工难度较大,传统CFRP薄壁件铤孔加工方式容易造成材料分层、撕裂等现象,造成加工出的孔壁粗糙度增大,且轴向力过大会造成弱刚性工件轴向变形,导致铤孔深度精度不足^[7-8]。近年来,为提高飞机制孔效率,采用钻铤一体刀对叠层材料铤孔加工的方式成为飞机孔加工研究热点^[9]。

为提高CFRP/铝合金叠层构件制孔质量,诸多学者开展了CFRP/铝合金叠层构件制孔研究。王华等^[10]进行了PCD与硬质合金钻头钻削CFRP/铝合金叠层材料的对比试验,结果表明,随制孔数量的增加,两种刀具的磨损量、轴向力及制孔缺陷均增大,PCD刀加工的刀具磨损和制孔效果更好。黄树涛等^[11]利用ABAQUS软件进行了CFRP/铝合金叠层构件制孔缺陷有限元仿真,结果表明,麻花钻横刃对碳纤维的拉伸作用是造成CFRP撕裂的主要原因,CFRP分层损伤与主轴转速、进给速度呈正相关,分层损伤主要集中在入口处,铝合金板的支撑作用可以有效减小CFRP出口的分层损伤。Dong等^[2]进行了CFRP/铝合金旋转超声钻削出口毛刺的研究,结果表明旋转超声加工技术可以有效降低出口毛刺高度。韦学文^[12]进行了CFRP/铝合金叠层构件变参数制孔试验研究,探究了CFRP/铝合金叠层构件各层材料最优加工参数。Angelone等^[13]进行了CFRP/铝合金叠层构件钻削加工孔壁粗糙度研究,探究了工艺参数对孔壁粗糙度的影响。王帅普等^[14]提出了一种基于正弦曲线设定进给量的变进给钻削CFRP/铝合金叠层构件的方法,该方法使钻削出口处撕裂因子降低了3.28%,出口毛刺高度降低了31.65%。

旋转超声加工技术作为新兴的先进加工技术,可以有效降低钻削轴向力,提高钻削加工稳定性,从而抑制制孔损伤^[15]。鉴于铤孔加工与钻孔加工机理有相似性,有学者将钻孔加工技术应用到铤孔加工中。Li等^[16-17]以CFRP和钛合金为研究对象,开展了旋转超声铤孔试验研究,试验结果表明,超声振动铤孔使CFRP加工时的最大轴向力降低了8%~9%,平均扭矩降低了30%~43%,最大切削温度降低了15%~23%,并提高了铤孔表面完整性;旋转超声铤孔加工钛合金使 x 、 y 、 z 3个方向的最大切削力分别降低了56.5%、35.2%、20.6%,使孔壁表面粗糙度降低了41.2%~42.3%,并抑制了铤孔加工过程的颤振现象。Guo等^[18]进行了CFRP旋转超声钻铤一体研究,开展了传统加工和超声加工的对比试验,结果表明,旋转超声加工可以降低最大铤孔轴向力10%~22.5%,改善CFRP铤孔孔壁表面分层、撕裂等损伤。

目前,CFRP/铝合金叠层构件孔加工研究均为钻孔工艺,CFRP/铝合金叠层构件的铤孔工艺研究鲜有报

道。旋转超声铤孔加工的研究对象均为刚性较大的单层板,而飞机零件多为叠层薄壁构件,弱刚度薄壁件由于刚性不足导致铤孔几何精度难以保证,同时下层铝合金钻屑的缠绕会损伤上层CFRP铤孔已加工表面,增大铤孔孔壁粗糙度。采用钻铤一体刀具对薄壁叠层件铤孔加工的特性及铤孔轴向力、孔壁表面粗糙度变化规律的研究鲜有报道。因此,本文通过开展旋转超声铤孔加工弱刚性CFRP/铝合金叠层构件对比试验,阐明超声场能、加工参数、工件刚度对铤孔轴向力及铤孔孔壁表面粗糙度 R_a 的影响规律。

1 试验设计

1.1 试验材料与刀具

试验采用的工件为CFRP/铝合金叠层材料,其中,CFRP层合板为双向交织铺层结构,铺设方向为 0° 和 90° ,基体材料为T300环氧树脂,尺寸为 $160\text{ mm} \times 120\text{ mm} \times 2\text{ mm}$,材料属性如表1所示;T7075铝合金尺寸为 $160\text{ mm} \times 120\text{ mm} \times 2\text{ mm}$,材料属性如表2所示。

铤孔试验使用PCD钻铤一体刀,刀具分为钻头、铤刀、刀柄3个部分,该刀具尺寸简图与实物图如图1所示,铤刀半锋角为 50° ,铤刀刃前角为 10° 。

1.2 试验设备

CFRP/铝合金叠层铤孔试验在MCV-L850德西数控机床上开展,该机床工作时的最大主轴转速和最大进给速度分别为 8000 r/min 和 1500 mm/min ,工作台尺寸为 $500\text{ mm} \times 1150\text{ mm}$ 。采用干切加工方式,旋转超声

表1 CFRP属性
Table 1 CFRP properties

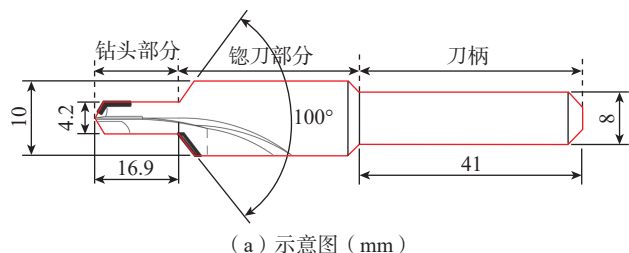
材料属性	值
抗拉强度/MPa	3950
弹性模量/GPa	232
密度/(g/cm^3)	1.76
伸长率/%	1.7

表2 T7075铝金属性
Table 2 T7075 aluminum alloy properties

材料属性	值
抗拉强度/MPa	572
剪切强度/MPa	150
弹性模量/GPa	7.17×10^4
密度/(g/cm^3)	2.81
泊松比	0.32

加工系统及测力仪如图 2 所示。旋转超声加工系统由钻铤一体刀、变幅杆、压电陶瓷换能器和超声发生器组成。加工时,超声发生器发出高频电信号,由压电陶瓷换能器转换成机械振动,再经变幅杆放大后传输到钻铤一体刀末端形成持续稳定的高频(20 kHz)轴向振动。超声装置输出的超声振幅由超声电流控制。采用激光测振仪(Polytech, CLV2534)对刀尖振幅进行标定,测量结果表明,当超声电流为150 mA 时,超声振幅约为10 μm。切削力信号通过 Kistler 9119AA2 测力仪采集,而后由 Dynoware 软件处理并绘制切削力曲线。

本文工件加工孔位分布及孔位序号如图 3 所示,根据孔位刚度分布规律,将工件分为 a、b、c、d 4 种刚度不同的孔位类型。每个工件有 4 组刚度相同的加工孔位,分别对 4 种尺寸大小、孔位布置和孔位序号相同的工件进行加工。通过 ABAQUS 软件建立装夹模型,将铤孔轴向力设置为 60 N,刚度仿真结果表明(表 3),4 种加工孔位的轴向刚度从大到小顺序:a>b>c>d,横向刚度



(a) 示意图 (mm)



(b) 实物图

图 1 钻铤一体刀

Fig.1 Drilling and countersinking tool

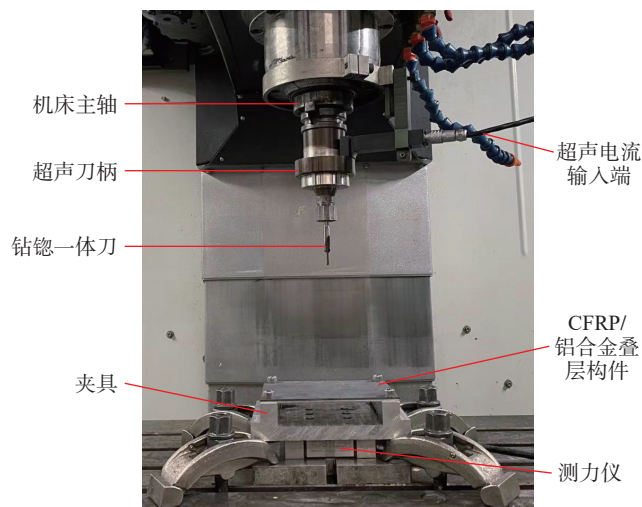


图 2 旋转超声加工系统及测力仪

Fig.2 Rotary ultrasonic processing system and force measuring instrument

从大到小顺序:d>c>a>b。轴向刚度 K_a 为孔位抵御工件轴向变形的能力, $K_a=60/L_z$, L_z 为工件沿轴向的变形量, mm; 横向刚度 K_t 为孔位抵御 xoy 平面变形的能力, $K_t=60/L_{xy}$, L_{xy} 为工件沿 xoy 平面的变形量, mm。

为分析不同刚度条件下加工参数对铤孔轴向力和铤孔孔壁粗糙度的影响,设置工艺参数如表 4 所示^[19]。通

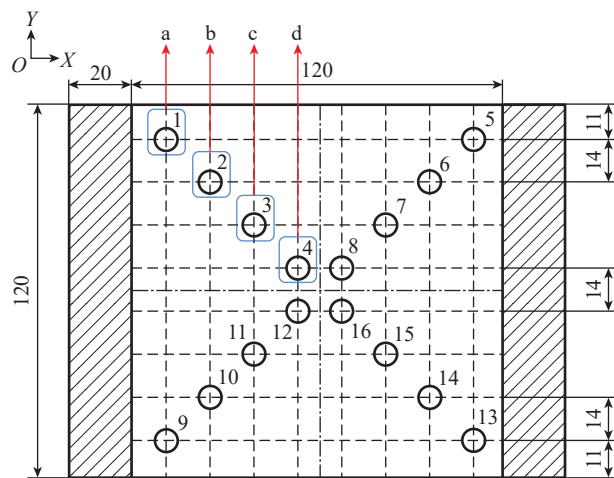


图 3 工件加工孔位分布 (mm)

Fig.3 Distribution diagram of machining holes positions for workpieces (mm)

表 3 不同类型加工孔位刚度值

Table 3 Stiffness values of different types of machining holes positions N/mm

孔位类型	孔位	轴向刚度 K_a	横向刚度 K_t
a	1、5、9、13	1749	18120
b	2、6、10、14	426	12776
c	3、7、11、15	300	22498
d	4、8、12、16	240	65301

表 4 旋转超声钻铤加工参数^[19]

Table 4 Parameters of rotary ultrasonic drilling and countersinking^[19]

试验组序号	孔位类型	主轴转速/(r/min)	进给速度/(mm/min)	超声电流/mA
1	a/b/c/d	2000	25	150、0
2	a/b/c/d	2500	25	150、0
3	a/b/c/d	3000	25	150、0
4	a/b/c/d	3500	25	150、0
5	a/b/c/d	2500	20	150、0
6	a/b/c/d	2500	30	150、0
7	a/b/c/d	2500	40	150、0
8	a/b/c/d	2500	50	150、0

过试验组 1~4 可以对比出 4 种不同刚度条件下有 / 无超声变主轴转速镗孔的试验结果;通过试验组 5~8 可以对比出 4 种不同刚度条件下有 / 无超声变进给速度镗孔试验结果。

2 试验结果分析

2.1 镗孔轴向力研究

2.1.1 孔位刚度和加工参数对镗孔轴向力的影响

采用图 2 所示的轴向力采集系统对 64 个孔位在镗孔阶段的最大轴向力进行测量,分析不同刚度条件的孔位有 / 无超声加工镗孔轴向力和镗孔孔壁粗糙度 R_a 的变化规律,如图 4 和 5 所示。其中,CC 为传统镗孔加工 (Conventional countersinking); RUC 为旋转超声镗孔加工 (Rotary ultrasonic countersinking)。

受薄壁件的加工特性影响,不同刚度条件的孔位镗孔轴向力与孔壁粗糙度变化规律不同,薄壁件的镗孔轴向力 F_z 由刀具切削材料产生的轴向分力 F_{th} 、由于切削厚度不均匀引入的动态切削力 F_w 、工件变形沿轴向的回弹力 F_e 3 部分组成,即

$$F_z = F_{th} + F_w + F_e$$

F_{th} 、 F_e 的产生机理如图 6 所示,镗刀刃沿进给方向切削材料,刀具前刀面与待去除材料发生相对运动,形成相互作用力。由于薄壁件在加工过程中易发生形变,工件的回弹作用会导致接触面与镗刀切削刃之间产生额外的相互作用力。以刀具为受力研究对象,两对相互作用力对刀具的分力分别为 F_1 、 F_2 ,产生沿轴向的分力 F_{th} 、 F_e 。

根据直角切削模型^[20], F_{th} 的大小与切削厚度 $h(t)$ 呈线性关系,即

$$F_{th} = K \cdot h(t)$$

式中, K 为切削力系数,与 CFRP 的材料特性和刀具结构有关。

若孔位的横向刚性小,则会造成切削厚度不均匀,产生较大的动态切削力 F_w 。 F_w 的产生示意图见图 7, h_0 为理论切削厚度,孔位在 xoy 平面发生变形后,刀具切削材料会产生周期性的切削力变化,这种不稳定的切削力变化累积会产生额外的 F_w ,切削速度越大,切削力变化越剧烈,最终引入的 F_w 越大。

薄壁件镗孔轴向力的产生是 F_{th} 、 F_w 、 F_e 相互耦合的结果,不同刚度条件下,镗孔轴向力的变化规律不同。试

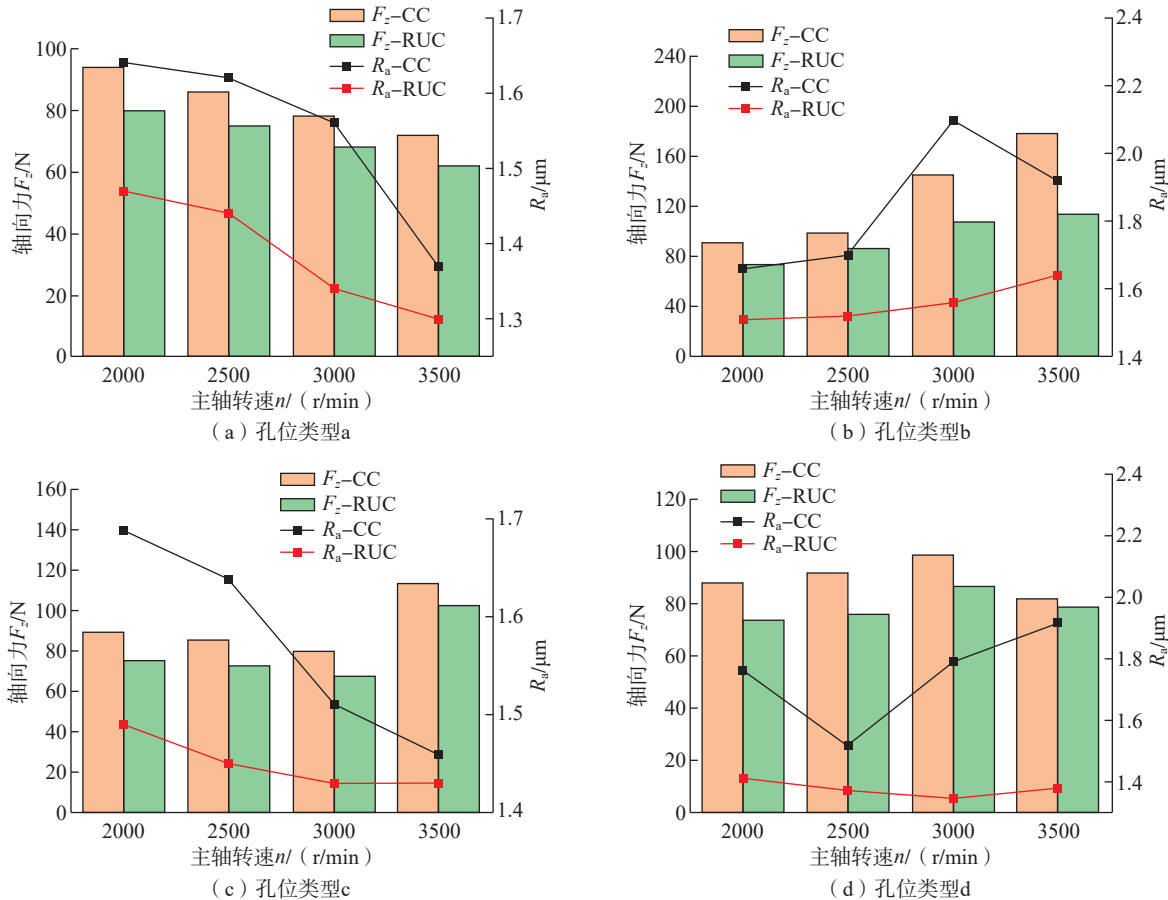


图 4 主轴转速对镗孔轴向力和镗孔孔壁粗糙度的影响

Fig.4 Influence of spindle speed on axial force of countersink and roughness of countersink hole wall

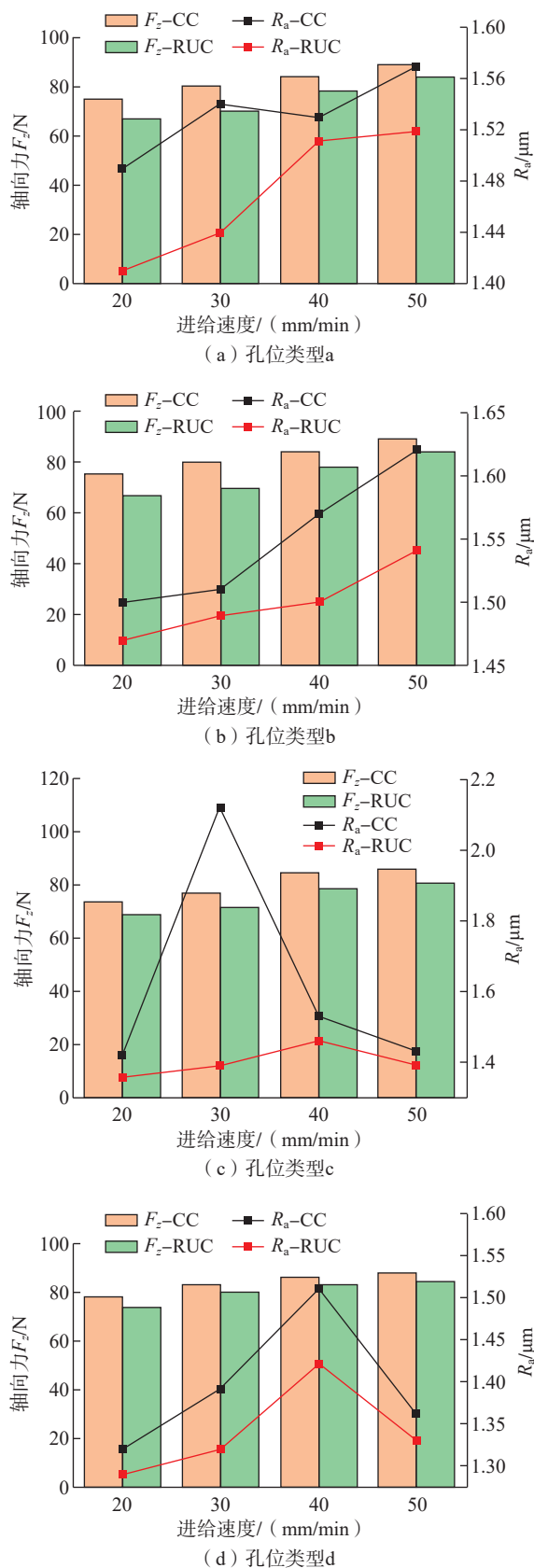


图5 进给速度对铤孔轴向力和铤孔孔壁粗糙度的影响
Fig.5 Influence of feed rate on axial force of countersink and roughness of countersink hole wall

实验中不同孔位的最终变形弹力相近, F_c 对 F_z 的变化影响较弱。 F_w 的大小可用铤孔轴向力波动性表征, 本文将铤孔轴向力波动性定义为铤孔过程轴向力与拟合轴向力曲线的偏差平均值, 不同类型孔位主轴转速对铤孔轴向力波动性的影响如图 8 所示。孔位类型 a 加工孔的横向刚度和轴向刚度较大, 铤孔轴向力波动性较小, 加工过程较稳定, 主轴转速增大造成切削厚度减小, F_{th} 减小, 导致 F_z 减小。孔位类型 b 加工孔的横向刚度较小, 随主轴转速增加, 铤孔力波动性增大, 最大值达到 24.7 N, F_w 增大, 导致 F_z 增大。孔位类型 c 加工孔, 主轴转速在 2000~3000 r/min 范围内铤孔轴向力波动性较小, F_w 较小, 主轴转速增加, F_{th} 减小, 导致 F_z 减小; 当主轴转速增大到 3500 r/min, 铤孔力波动性急剧增大, F_w 增大, 导致 F_z 增大。孔位类型 d 加工孔, 主轴转速在 2000~3000 r/min

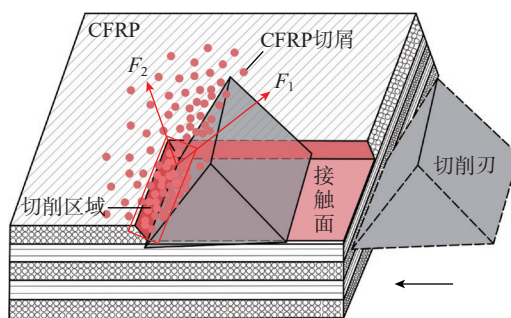


图6 F_{th} 、 F_c 产生机理示意图
Fig.6 Diagram of F_{th} , F_c generation mechanism

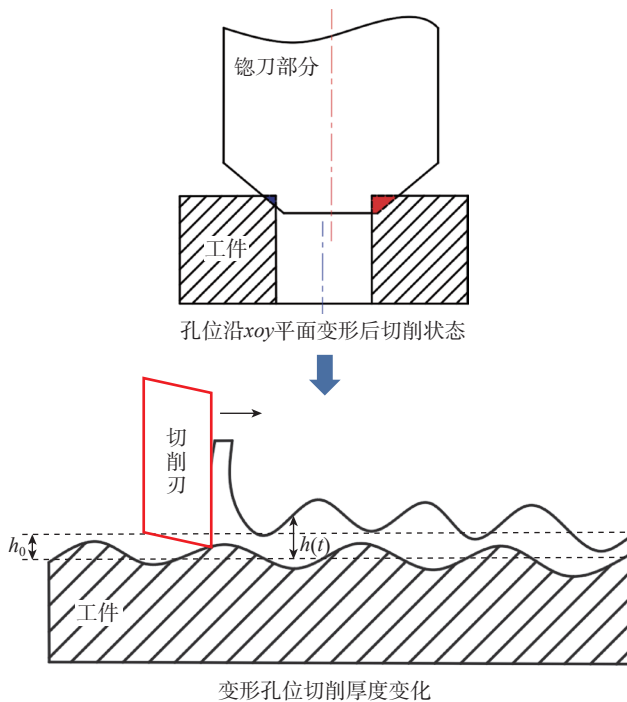


图7 动态切削力产生示意图
Fig.7 Schematic diagram of dynamic cutting force generation

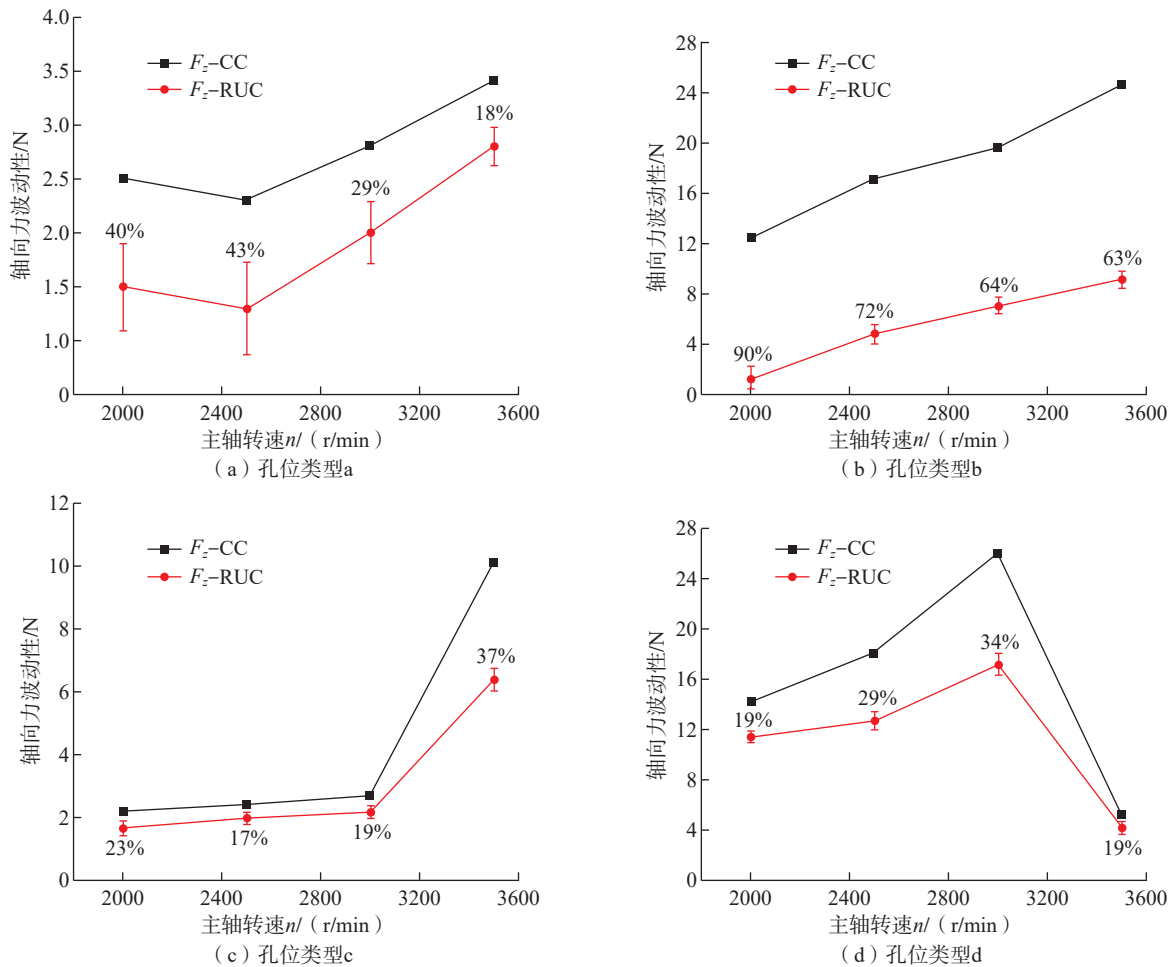


图 8 不同孔位类型主轴转速对铰孔轴向力波动性影响

Fig.8 Influence of spindle speed on the fluctuation of axial force in countersink of different hole position types

范围内, 主轴转速增大, 铰孔力波动性增大, F_w 增大, 导致 F_z 增大; 当主轴转速增大到 3500 r/min, 铰孔轴向力波动性急剧减小, F_w 和 F_{th} 均减小, F_z 减小。

变进给速度试验中(图 5), 进给速度对铰孔轴向力波动性影响较小, F_z 的大小主要受 F_{th} 的影响, 4 种孔位类型的铰孔轴向力均随进给速度增加而增大。

不同类型的孔位平均轴向力与铰孔孔壁粗糙度变化如图 9 所示, 横向刚性最小的孔位类型 b 铰孔平均轴向力较大, 其余 3 个孔位类型铰孔平均轴向力相近, 且随轴向刚性的减小而增大。不同类型的孔位铰孔轴向力波动性平均值变化如图 10 所示, 可见孔位类型 b 的铰孔力波动性平均值较大, 所以在孔位类型 b 内 F_w 较大导致 F_z 增大。

2.1.2 超声场能对铰孔轴向力影响研究

如图 4 和 5 所示, 超声振动可使不同刚度条件、不同加工参数下的铰孔轴向力减小。RUC 加工技术使 a、b、c、d 4 种孔位类型的铰孔轴向力分别降低了 11%、18%、10%、9%, 32 个孔位平均轴向力降低了 12%。其中, 4 种

孔位类型的 RUC 加工和 CC 加工轴向力标准差为 5.4 N 和 9.6 N, 轴向力波动性标准差为 0.78 N 和 3.18 N。另外, 在 CC 加工中, 孔位类型 b 的加工轴向力及轴向力波动性最大, RUC 加工对该孔位类型的轴向力及轴向力波动

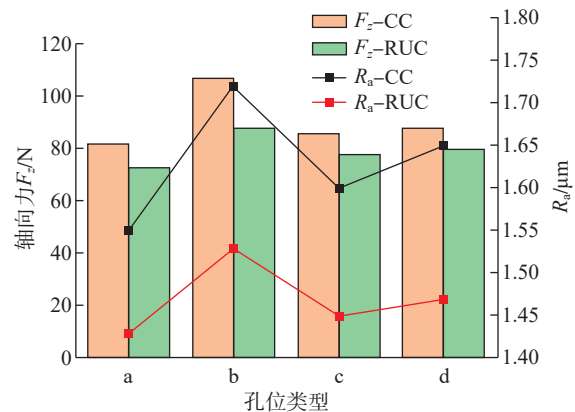


图 9 不同孔位类型铰孔轴向力与孔壁粗糙度平均值
Fig.9 Average values of axial force and roughness of countersinks with different hole position types

性的影响也最大,分别使轴向力和轴向力波动性降低了18%和64%。可见,超声振动可以缩小孔位刚度差异对铤孔轴向力的影响,并降低薄壁工件弱刚性区域的铤孔轴向力,提高薄壁件铤孔加工的稳定性和精度。在同等刚度条件下,铤孔轴向力越大,工件轴向变形越大,铤孔深度精度越低。根据RUC加工可使轴向力减小的特性,可以提高铤孔的深度和精度。

超声振动导致铤孔轴向力降低的原因较多。超声场能的引入一方面改变刀尖的运行轨迹,使得平均切削厚度降低, F_{th} 和 F_z 减小。RUC加工可以降低铤孔力波动性(图8和10),提高铤孔加工稳定性,使 F_w 、 F_z 减小。另外,刀尖沿轴向高频、高速的振动增大了刀刃对CFRP纤维的切削作用,纤维在超声振动的作用下更容易发生断裂,造成 F_z 减小。

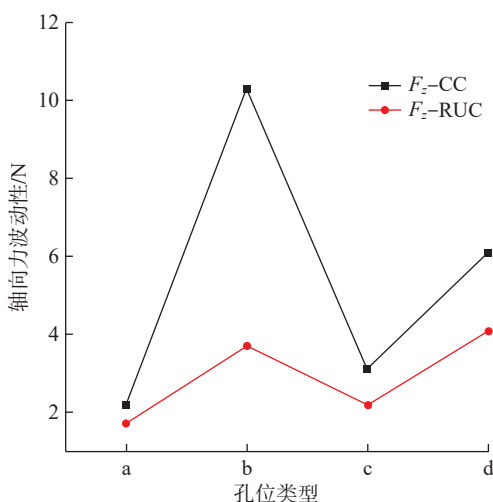


图10 不同孔位类型铤孔轴向力波动性平均值

Fig.10 Average value of fluctuation of countersink force in different hole position types

2.2 铤孔孔壁表面粗糙度研究

2.2.1 加工参数、孔位刚度、超声场能对铤孔孔壁表面粗糙度影响

表面粗糙度 R_a 是判断铤孔加工表面质量的重要参数,航空领域中,铤孔孔壁表面粗糙度要求 $R_a < 4 \mu\text{m}$ ^[7]。本文试验结果均满足 $R_a < 4 \mu\text{m}$ 。主轴转速、进给速度对铤孔孔壁粗糙度 R_a 的影响规律与铤孔轴向力变化规律一致,CC加工个别孔位粗糙度突增的现象,由钻铤一体刀加工叠层材料的特性决定。RUC加工使a、b、c、d 4种孔位类型的加工孔平均铤孔孔壁粗糙度分别降低了8%、11%、10%、11%,RUC加工使32个孔位的平均孔壁粗糙度降低了10%。主轴转速为3000 r/min、进给速度为25 mm/min的加工孔位有/无超声铤孔壁微观形貌如图11所示。可以看出,铤孔孔壁表面损伤随轴向刚度的减小而增大。孔位类型a和b轴向刚度较大,CC加工表面有明显的基体脱粘、纤维断裂,RUC加工表面相对光滑;孔位类型c和d的轴向刚度较小,CC加工表面有严重的分层、纤维拔出、基体脱粘,RUC加工表面有轻微的基体脱粘。分析表明,RUC加工可以降低铤孔孔壁粗糙度 R_a ,有效提高铤孔孔壁表面完整性。

单个转动周期内刀具切削CFRP纤维切削角度变化规律如图12所示,其中 θ 为纤维切削角度。除个别孔位外,RUC加工和CC加工孔壁粗糙度变化规律与铤孔轴向力变化规律基本一致(图4和5)。轴向力增大,刀刃对CFRP材料造成的损伤增大,较大的轴向力更容易造成CFRP分层、基体脱粘、纤维丝裂,导致孔壁粗糙度增大。另外,RUC加工使铤孔轴向力波动性降低了74%,减弱了刀具与工件间的相对振动,刀具对材料的宏观振动破坏降低。如图9所示,加工孔位类型b,其铤孔孔壁粗糙度在超声振动的作用下明显减小。

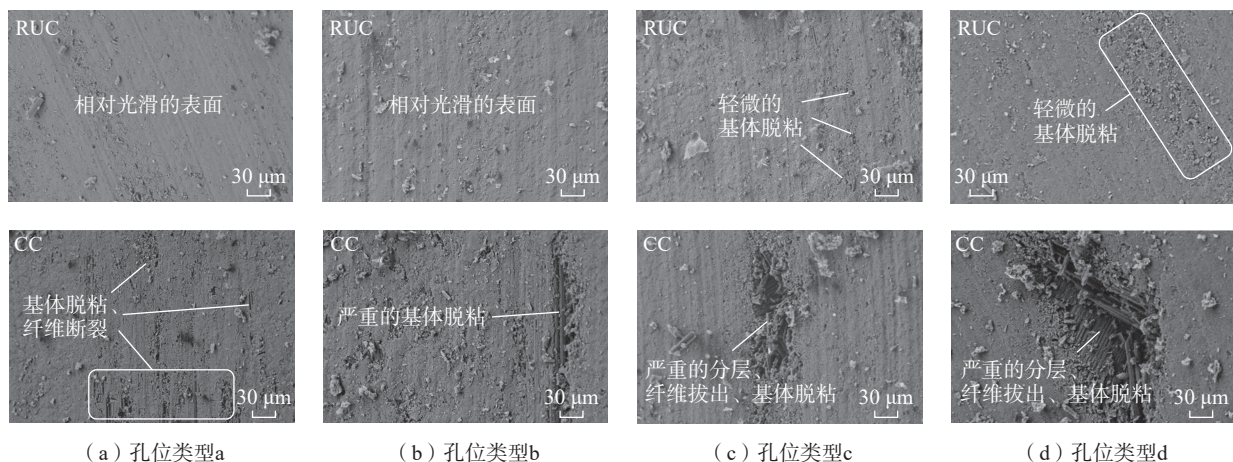


图11 不同孔位类型有/无超声铤孔孔壁微观形貌对比

Fig.11 Comparison of surface profile of hole wall with and without ultrasonic countersinking of different hole position types

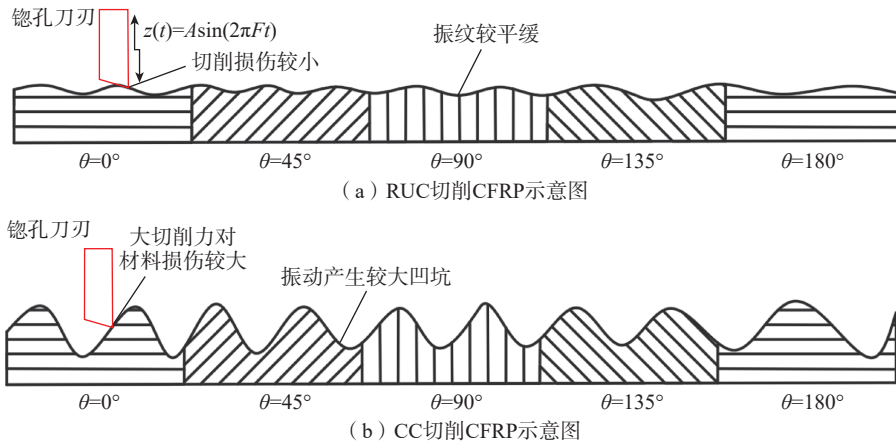


图 12 刀具切削 CFRP 纤维切削角度变化规律
Fig.12 Variation of cutting angle of tool cutting CFRP fiber

2.2.2 铝合金钻屑对铤孔孔壁表面粗糙度的影响

钻屑缠绕是铝合金钻削加工中的常见问题。钻铤一体加工 CFRP/ 铝合金薄壁件的钻屑缠绕, 不仅会影响加工效率, 也会对铤孔孔壁表面质量造成负面影响, 需要及时清除。将叠层构件加工过程分为 3 个阶段: 钻削阶段、铤孔阶段、退刀阶段, 如图 13 所示。对试验中出现的不同切屑类型进行划分, 将断屑良好的切屑类型定义为 I 型切屑; 将钻屑缠绕在铤孔阶段之前断开的切屑类型定义为 II 型切屑; 将钻屑缠绕在铤孔阶段断开的切屑类型定义为 III 型切屑; 将钻屑缠绕严重, 铤孔结束后钻屑缠绕不掉的切屑类型定义为 IV 型切屑。不同加工类型的切屑缠绕情况如表 5 所示, RUC 加工孔位没有出现 III、IV 型切屑, 而 CC 加工孔位的 III、IV 型切屑缠绕概率均为 9%。

I、II 型切屑不会对铤孔加工产生影响, III、IV 型切屑会在铤孔过程中与孔壁发生干涉, 造成铤孔孔壁粗糙度增大, 如图 13 所示。统计 CC 加工 32 个孔位不同切屑类型下孔壁粗糙度均值, 如表 6 所示, III、IV 型切屑下的铤孔孔壁平均粗糙度较大, 所以在 1-4、2-4、4-4、1-2、3-2 号加工孔会出现粗糙度突增现象 ($n-m$ 号孔为第 n 个板的第 m 个孔)。试验中, RUC 加工没有 III、IV 型切屑出现, 不仅提高了加工效率, 也避免了切屑缠绕对铤孔已加工表面的损伤。

3 结论

本文利用钻铤一体刀开展了旋转超声技术与传统技术下的 CFRP/ 铝合金薄壁件铤孔试验, 通过对比不同刚度条件下有 / 无超声铤孔加工试验结果, 得出如下结论。

(1) 旋转超声加工技术能减小铤孔轴向力波动性, 减小铤孔最大轴向力, 所有加工孔的平均铤孔轴向力降

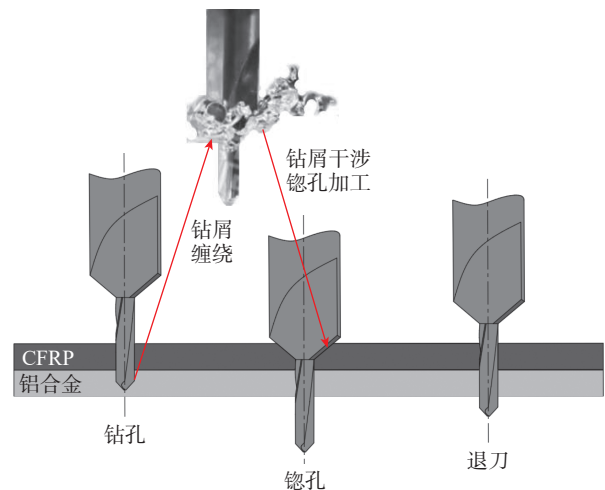


图 13 铤孔过程及钻屑干涉铤孔加工示意图
Fig.13 Schematic diagram of countersinking process and chip interference

表 5 有/无超声不同类型切屑缠绕概率
Table 5 Winding probability of different types of chips with and without ultrasound %

加工类型	II 型切屑缠绕概率	III 型切屑缠绕概率	IV 型切屑缠绕概率
RUC 加工	11	0	0
CC 加工	28	9	9

表 6 传统加工不同切屑类型的铤孔孔壁平均粗糙度
Table 6 Average roughness of the hole walls for different chip types by conventional countersinking

切屑类型	孔壁粗糙度/ μm
I / II	1.5
III	1.63
IV	2

幅为12%。(2)旋转超声加工技术改变了铤孔过程中刀刃切削CFRP纤维的角度,有效减小铤孔孔壁表面粗糙度,改善铤孔孔壁表面形貌。(3)旋转超声加工CFRP/铝合金叠层构件,能实现铝合金稳定有效断屑,提高加工效率,避免钻屑对铤孔孔壁表面粗糙度的影响。

致谢

感谢航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司提供的资助。

参考文献

- [1] 宋丹龙,李原,骆彬,等. CFRP/Al复合构件无头铆钉压铆力建模与仿真分析[J]. 西北工业大学学报, 2012, 30(4): 558–564.
- [2] DONG S, LIAO W H, ZHENG K, et al. Investigation on exit burr in robotic rotary ultrasonic drilling of CFRP/aluminum stacks[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 151: 868–876.
- [3] TANG L Y, LI P N, YU Z, 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.
- [4] 张兴金, 邓忠林. 浅谈纤维复合材料与中国大飞机[J]. 纤维复合材料, 2009, 26(2): 24–26.
- [5] ZHANG Xingjin, DENG Zhonglin. The discussion on carbon fiber composite and passenger-carrying aircraft of China[J]. Fiber Composites, 2009, 26(2): 24–26.
- [6] 李欣. 热固性环氧树脂基改性复合材料制备与3D打印研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
- [7] LI Xin. Study on preparation and 3D printing of thermosetting epoxy resin-based modified composites[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.
- [8] ZHANG Y X, WU D, MA X G, et al. Countersink accuracy control of thin-wall CFRP/Al stack drilling based on micro peck strategy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101(9): 2689–2702.
- [9] FERNÁNDEZ-PÉREZ J, CANTERO J L, DÍAZ-ÁLVAREZ J, et al. Influence of cutting parameters on tool wear and hole quality in composite aerospace components drilling[J]. Composite Structures, 2017, 178: 157–161.
- [10] WANG C K, YUAN P J, WANG T M, et al. The study of drilling and countersink technology in robot drilling end-effector[C]//2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Piscataway: IEEE, 2014: 1858–1863.
- [11] ZHANG Y X, WU D, CHEN K. A theoretical model for predicting the CFRP drilling-countersinking thrust force of stacks[J]. Composite Structures, 2019, 209: 337–348.
- [12] 王华, 陈燕, 唐文亮, 等. PCD与硬质合金钻头钻削CFRP/Al叠层材料对比研究[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(1): 23–25, 54.
- [13] WANG Hua, CHEN Yan, TANG Wenliang, et al. Comparative study of drilling CFRP/Al stacks with PCD and carbide drills[J]. Machine Building & Automation, 2019, 48(1): 23–25, 54.
- [14] 黄树涛, 王浩涛, 张攀. CFRP/Al叠层结构制孔缺陷的有限元仿真[J]. 材料科学与工程学报, 2019, 37(3): 493–500, 504.
- [15] HUANG Shutao, WANG Haotao, ZHANG Pan. Finite element analysis on drilling defects of carbon fiber reinforced plastic and aluminum stacks[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2019, 37(3): 493–500, 504.
- [16] 韦学文. 航空叠层材料变参数制孔工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [17] WEI Xuewen. Study on variable parameter hole-making technology of aviation laminated materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [18] ANGELONE R, CAGGIANO A, IMPROTA I, et al. Roughness of composite materials: Characterization of hole quality in drilling of Al/CFRP stacks[J]. Procedia CIRP, 2020, 88: 473–478.
- [19] 王帅普, 梁杰, 崔松涛, 等. CFRP/Al叠层材料变进给钻削表面质量分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(2): 95–98.
- [20] WANG Shuaipu, LIANG Jie, CUI Songtao, et al. Analysis of burr morphology of CFRP/Al laminated material in variable feed drilling[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2022(2): 95–98.
- [21] LI Z, YUAN S M, MA J, et al. Cutting force and specific energy for rotary ultrasonic drilling based on kinematics analysis of vibration effectiveness[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(1): 376–387.
- [22] LI Z, GUO H J, LI L Z, et al. Study on surface quality and tool life in ultrasonic vibration countersinking of titanium alloys (Ti6Al4V)[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(1): 1119–1137.
- [23] LI Z, ZHANG D Y, QIN W, et al. Feasibility study on the rotary ultrasonic elliptical machining for countersinking of carbon fiber-reinforced plastics[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2017, 231(13): 2347–2358.
- [24] GUO D M, WEN Q, GAO H, et al. Prediction of the cutting forces generated in the drilling of carbon-fibre-reinforced plastic composites using a twist drill[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2012, 226(1): 28–42.
- [25] 孙林, 黄彪, 兰勇, 等. 切削参数对钻铤一体刀CFRP板孔加工轴向力的影响[J]. 工具技术, 2018, 52(8): 105–107.
- [26] SUN Lin, HUANG Biao, LAN Yong, et al. Effect of cutting parameters on axial force of CFRP plate hole machining of drilling and reaming tool[J]. Tool Engineering, 2018, 52(8): 105–107.
- [27] 马文瑞. 碳纤维复合材料/铝合金叠层构件超声振动辅助钻削技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [28] MA Wenrui. Study on ultrasonic vibration-assisted drilling technology of carbon fiber composite/aluminum alloy laminated members[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.

通讯作者: 郑侃, 教授, 博士, 研究方向为航空航天先进制造技术与装备。

(责编 七七)