

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.12.008

Al/CFRP 叠层结构低频振动辅助钻削工艺研究*

王帅飞,王福吉*,栗盛开,王小鞅,贾振元
(大连理工大学 机械工程学院,辽宁 大连 116024)

摘要:在低频振动辅助 Al/CFRP 叠层结构配钻过程中,低频振动对复合材料的去除作用不明,难以同时保证 Al 和 CFRP 加工质量。针对这一问题,从理论角度对振动条件下刀具钻削过程中位置的变化规律进行了分析,并基于此讨论了低频振动对 Al/CFRP 叠层构件 Al 入口、CFRP 出口和二者孔壁材料去除和加工质量的影响;进一步研究了低频振动工艺参数对加工质量的影响,搭建了包含低频振动刀柄的低频振动制孔实验平台,使用能够抑制 CFRP 出口损伤的刀具,进行了不同振幅下的低频振动辅助钻削实验。研究表明:低频振动能够有效地实现铝合金断屑,避免了长切屑对入口和铝合金孔壁的刮擦,提高了上层铝合金的加工质量;但低频振动的引入在一定程度上会增大钻削过程中的最大轴向力,同时过大的振幅会加剧中下层 CFRP 出口的撕裂损伤,并降低 CFRP 孔壁的加工质量。

关键词:叠层材料钻削;低频振动工艺;振幅;加工质量

中图分类号:TH163;TG506.5

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)12-1447-06

Low frequency vibration aided drilling technology for Al /CFRP laminated structure

WANG Shuai-fei, WANG Fu-ji, LI Sheng-kai, WANG Xiao-da, JIA Zhen-yuan
(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Aiming at the problem that the unclear removal mechanism of CFRP could not ensure machining quality of Al and CFRP at the same time during low-frequency vibration-assisted drilling process of Al/CFRP laminated structure, the tool path during vibration-assisted drilling was analyzed by theoretic method. Based on this, the effect of low frequency vibration on material removal and processing quality at Al entrance, CFRP exit and hole wall of the laminated structure was revealed. The influence of low-frequency vibration parameters was further studied, a drilling platform including low-frequency vibration tool holder was built, based on which low-frequency vibration-assisted drilling experiments with special designed tools for CFRP at different amplitudes were conducted. The results indicate that low-frequency vibration can effectively achieve aluminum alloy chip breaking, avoiding scratching of long chips and improving the processing quality of Al part. The introduction of low-frequency vibration can increase the maximum axial force and excessive amplitude can exacerbate tear damage of CFRP at the exit and reduce the quality of drilled hole wall.

Key words: drilling of laminated materials; low frequency vibration; amplitude; processing quality

收稿日期:2020-03-23

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFA0702803);辽宁省“兴辽英才计划”资助项目(XLYC1801008,XLYC1902014);商飞企业攻关项目(67924)

作者简介:王帅飞(1992-),男,河南平顶山人,硕士研究生,主要从事低频振动辅助加工方面的研究。E-mail:wangshuaifei@mail.dlut.edu.cn。

通信联系人:王福吉,男,教授,博士生导师。E-mail:wfsll@dlut.edu.cn。

0 引 言

碳纤维增强树脂基 (CFRP) 复合材料因具有高比强度、高比刚度、抗疲劳、耐腐蚀等优异特性,已广泛地应用在许多工业领域中^[1,2]。但是为了保证结构件能够承受大的复杂交变载荷,仍需要在连接和支撑部位使用金属零件,这样结构件中就形成了大量的复材金属叠层结构。例如在 B787、A350XWB 等飞机中复合材料用量高达 50%,其中蒙皮使用复合材料,主框架仍使用铝合金,形成大量铝合金、复合材料叠层结构^[3,4]。

这些叠层结构在服役过程中往往需要承受巨大、复杂的交变载荷,为了保证其可靠性和承载性能,研究人员通常采用铆接、螺接等机械方式连接。因此,制孔是叠层结构加工中极其重要的一个环节。对于大的零部件来说,工件刚性差、易变性,分别对零件加工再进行装配连接时,由于二次装夹以及加工误差,易导致组成零件之间孔的位置偏差,强行装配时极易引发碳纤维复合材料的损伤甚至失效,严重影响加工质量和效率。

因此,为了保证加工效率和加工精度,叠层结构件通常采用整体装夹配钻。配钻过程中,由于两种材料的性能差异巨大,难以同时保证两种材料的加工质量,尤其是 CFRP 作为出口材料时,缺乏支撑,极易产生分层、撕裂等加工损伤。因此,目前加工 CFRP 作为出口材料的叠层构件时通常选用适用于 CFRP 材料加工的刀具,保证下层 CFRP 材料加工质量。但加工 CFRP 材料的刀具通常难以实现金属断屑,形成长切屑缠绕在刀具上,不仅会造成孔壁的划伤,还会对入口金属表面形成严重的刮擦,影响加工质量。

为了解决叠层材料加工过程中金属断屑问题,有学者提出引入低频振动辅助工艺。目前,国内外学者对于低频振动辅助加工已有较多的研究,主要有:不同工艺下(振幅和频率)低频振动辅助工艺对 CFRP 加工质量的影响,低频振动对金属切屑的控制,以及低频振动对叠层构件加工质量的影响。如 SADEK A 等人^[5]探究了不同振幅和频率下,低频振动对 CFRP 加工质量的影响,发现小振幅高频率可以减少每次循环切削的切削量,进而减小切削力,从而提高加工质量。PE-CAT O 等人^[6]探究了低频振动辅助钻削铝合金,理论计算并试验验证了低频振动对铝合金切屑的控制,设定合适的参数低频振动加工可以很好地实现金属断屑,减少切屑对孔壁的刮擦,提高加工质量。南成根等

人^[7]探究了 CFRP/钛合金叠层的钻孔过程,发现长切屑不利于入口和孔壁的加工质量;侯书军等人^[8]探究了碳纤维复合材料和钛合金叠层在普通、超声、低频振动下的加工,发现低频振动可以有效地断屑,并降低钻削温度,减轻了金属切屑对 CFRP 损伤的影响,提高了叠层构件加工质量。

目前,针对 CFRP 在出口工况下的叠层材料加工面临许多加工问题,低频振动辅助工艺对于金属,以及上层 CFRP 下层金属的叠层材料的加工质量具有较显著的提升作用;但对于上层金属下层 CFRP 的叠层材料作用效果尚不明晰。

针对铝合金/CFRP 叠层材料,笔者选用适合于 CFRP 低损伤加工的阶梯微齿刀具,添加轴向低频振动辅助工艺,通过实验验证低频振动对铝合金和 CFRP 的加工影响,并探究不同振幅对铝合金/CFRP 叠层材料加工质量的影响规律。

1 振动对切削过程影响分析

在叠层材料加工过程中存在多种加工工况,对于 Al/CFRP 叠层材料的加工,由于铝合金在上层,CFRP 在下层,金属形成的切屑对下层的 CFRP 影响较小,本研究分别看低频振动工艺对两种材料的影响,从理论上分析低频振动辅助工艺对两种材料的作用效果,揭示低频振动辅助工艺对加工质量的影响。

1.1 振动对切削刀轨迹的影响

低频振动辅助加工是在原有的轴向进给运动上叠加一个正弦运动,主要是机床提供恒定的主进给速度,低频振动辅助装置提供正弦振动,叠加构成刀具体体的进给运动;通过调节转速、进给和振幅,来控制钻削过程,实现切屑的控制。钻头一般包含两个主切削刃,相位角相差 180°,假设切削刃 1 是由 0°开始,360°结束一个周期,那么切削刃 2 就是以 180°开始,180°结束周期^[9]。

因此,两个切削刃的实际位置分别为:

$$Y_1 = \frac{X}{360^\circ} \times f + A \sin(X) \quad (1)$$

$$Y_2 = \frac{X - 180^\circ}{360^\circ} \times f + A \sin(X - 180^\circ) \quad (2)$$

式中: X —钻头转过的相位角,°; Y_1 —主切削刃 1 的进给位移,mm; Y_2 —主切削刃 2 的进给位移,mm; f —进给率,mm/r; A —低频振动振幅,mm。

1.2 振动对材料加工过程的影响

对于入口铝合金材料来说,低频振动可以实现切

削厚度的控制,使形成厚度不均匀的切屑,甚至可以使切削刃和工件间歇性分离,生成碎片状切屑^[10,11],可以很好地避免产生长切屑,根除切屑缠刀,以及对孔壁和入口表面的刮擦问题。

对于出口 CFRP 材料,由于 CFRP 是由多层不同方向的纤维预浸料铺放,然后高温固化成型,是不均匀的各向异性材料,不存在长切屑问题,低频振动会使每次切削的厚度发生变化。根据 CFRP 的材料特性,可以将低频振动钻削 CFRP 材料的运动分解为径向和轴向两个方向的切削运动。

从轴向上来说,相当于是在匀速进给的基础上叠加正弦运动,使加工过程由匀速直角切削变为振动直角切削。

振动直角切削示意图如图 1 所示。

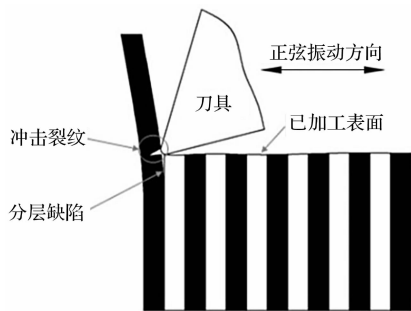


图 1 振动直角切削示意图

振动造成刀具对工件的冲击作用,增大了冲击裂纹,加速了纤维断裂^[12,13],同时也在一定程度上能够增加最大轴向力;且随着振幅的增加,轴向力越来越大。对于 CFRP 出口来说,当最大轴向力超过临界分层轴向力时,会加剧出口层纤维材料的层间分层缺陷^[14],加剧分层损伤,因此振幅需要限制在一定范围内,不能过大。

对于径向同一层纤维来说,低频振动不影响径向运动速度,但是低频振动会造成同一层材料的切削不均匀,形成匀速间断切削。

振动对同一层纤维去除影响如图 2 所示。

图 2 显示:(1)无低频振动时,随着刀具沿进给方向运动,同一层材料被一圈一圈地去除,最终达到终孔直径,每次切削时都有环形的材料支撑,分步均匀去除;(2)低频振动时,切削沿径向方向观察,同一层材料先是有一部分被去除,然后有一段与工件分离,然后再接触切割,循环断续切割,每次切削时后部支撑会减少,因此,在一定程度上会增加纤维的损伤。

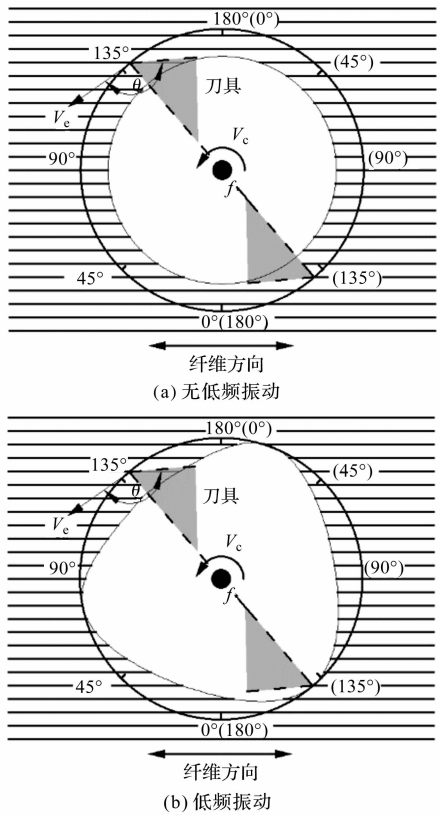


图 2 振动对同一层纤维去除影响

2 实验材料及方法

笔者采用实验的方法验证低频振动辅助工艺对 Al/CFRP 叠层材料加工质量的影响规律;采用能够减少出口 CFRP 损伤的刀具,配合不同振幅的低频辅助振动,得出振幅对叠层材料的作用规律。

2.1 工件材料

实验中选用的是 7075 铝合金和 T800 级准各向同性 CFRP 层合板;CFRP 工件通过采用单向预浸料,按照[90/0/0/0/45/90/45/(0/0/0/90)2/(0/0/0/45)2/0/0/0/90]S 方向铺放,抽真空后高温固化而成,其中预浸料纤维体积分数约为 60%;层合板尺寸为 150 mm × 89 mm × 10 mm。

预浸料的具体力学性能如表 1 所示。

表 1 预浸料力学性能表

密度/ (g · cm ⁻³)	沿纤维方 向弹性模 量/GPa	沿纤维方 向剪切模 量/GPa	横向泊 松比	拉伸强度 /MPa	压缩强度 /MPa
2.7	160	6.21	0.36	2 843	1 553

2.2 试验刀具

在铝合金和 CFRP 叠层中,CFRP 更易产生加工损伤,且 CFRP 在出口侧无支撑。因此,要优先保证

CFRP 的加工质量。制孔刀具的结构对 CFRP 加工质量的影响尤其显著,是决定最终加工质量的重要因素。在对于 CFRP 制孔刀具的研究中发现,采用阶梯结构能够有效地减小轴向力,在副切削刃上开微齿结构可以有效地提高 CFRP 出口质量^[15,16]。

笔者采用的阶梯微齿双刃带钻头如图 3 所示。

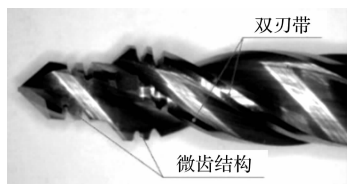


图 3 阶梯微齿双刃带钻头

钻头直径为 6.36 mm,刀具材料为 K44UF 硬质合金,无涂层,WC 颗粒粒度为 0.7 mm,第一阶梯直径 4.20 mm。

阶梯微齿双刃带钻头参数如表 2 所示。

表 2 阶梯微齿双刃带钻头参数

双顶角钻头参数	数值
第一阶梯直径/mm	4.96
第二阶梯直径/mm	6.36
第一阶梯顶角/°	90
第二阶梯顶角/°	90
横刃长度/mm	0.2

2.3 实验方法

低频振动制孔实验平台如图 4 所示。

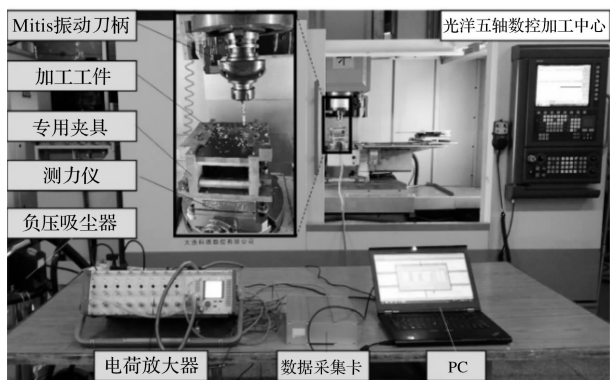


图 4 低频振动制孔实验平台

笔者在光洋 CONA 五轴加工中心上进行钻削制孔实验,通过在主轴上安装 mitis 振动夹头,可实现轴向低频振动钻孔,振幅范围 0~0.25 mm,频率 2.5 次/转;加工工件采用专用夹具装夹,通过螺栓连接紧固在测力仪装夹平面上。

实验中,使用 kistler9257B 型测力仪采集切削力信号,并通过电荷放大器和 A/D 转换系统,将切削力信号传输至计算机;测力仪通过螺栓装夹在机床工作台上,保证整个钻削和测力过程准确、稳定。

笔者采用阶梯微齿钻头合适的工艺参数进行实验,转速为 3 000 r/min,轴向进给为 150 mm/min^[17];MITIS 刀柄振幅分别调节为 0、0.025 mm、0.05 mm、0.1 mm、0.15 mm;为了减少刀具磨损对实验结果的影响,笔者在改变振幅的同时更换新刀具,每把刀具钻削相同数量的孔。

3 实验与结果分析

笔者主要从切削力、入口和出口质量、以及孔壁质量 3 个方面,对实验的结果进行总结,分析低频振动振幅对 Al/CFRP 叠层构件加工质量的影响规律,进而得出适用于 Al/CFRP 叠层构件加工的最佳低频振动辅助加工工艺。

3.1 振动对轴向力的影响

笔者使用 MITIS 低频振动刀柄,在振幅为 0、0.025 mm、0.05 mm、0.1 mm、0.15 mm 分别使用新刀具制孔,工件安装在测力仪上,测力仪 Z 轴方向力 F_z 即为钻削过程中材料承受的轴向力。

钻削过程中轴向力变化如图 5 所示。

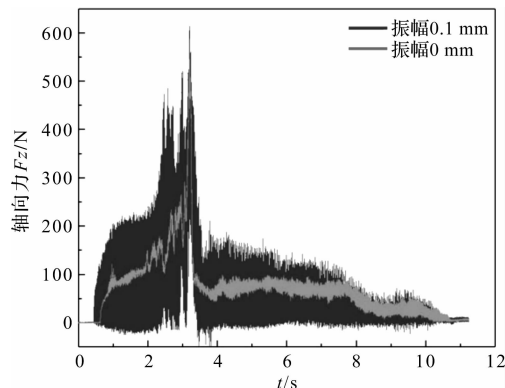


图 5 钻削过程轴向力变化

由图 5 可知:低频振动改变了刀具轴向进给的形式,使刀具进给叠加了循环变化的加速度,造成刀具和工件的间歇性接触,轴向力也处于循环往复变化;且 CFRP 出口部位由于缺乏支撑极易产生损伤。

钻尖在材料内部时,低频振动对轴向力影响较大,但第一阶梯钻出后,低频振动对轴向力的增加作用明显减弱,因此小振幅下对出口撕裂影响不大;但随着振幅的增加,钻头对出口材料冲击作用逐渐增强,会对出口造成越来越严重的损伤,因此振幅不宜过大。

3.2 振动对出、入口质量影响

由于低频振动改变了主切削刃的行走轨迹,造成切削过程的改变,可以通过调节振幅来实现对切屑的控制。

实验中笔者采用最小振幅 0.025 mm 时产生的切

屑为不连续切屑,这是由于刀具与工件未分离,形成厚薄不均匀的长切屑,切屑的薄弱区域在外界作用下极易折断,因此形成长短不均匀的碎切屑。随着振幅继续增大,刀具振动幅度增加,在一个小阶段内刀具进给距离小于振动回缩距离,刀具会暂时离开工件,不参与切削,然后再回到工件继续切削,整个过程循环往复,因此产生形状、厚度均匀的切屑;同时由于是双阶梯钻,会有扇形和锥形两种切屑。

对于铝合金入口,无振动辅助加工时随着加工孔数的增加,刀具缠屑越来越多,缠在刀具上的切屑不仅会对金属孔壁造成刮擦,而且对入口表面刮擦越来越严重,严重影响加工质量和加工效率。而加入低频辅助振动后,不再产生长切屑,刀具不存在缠屑问题,入口表面也完全没有刮擦。

对于出口 CFRP 材料,魏良耀等人^[17]研究发现,撕裂损伤对 CFRP 构件的整体性能影响较大。笔者采用撕裂因子来衡量撕裂损伤程度。

撕裂因子测量如图 6 所示。

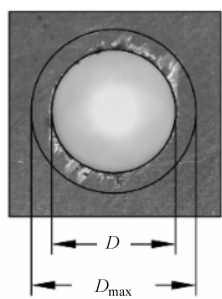


图 6 撕裂因子测量

撕裂因子的计算公式为:

$$L_d = D_{\max}/D \quad (3)$$

式中: $D_{\max}$ —撕裂损伤的最大直径; D —加工孔的实际直径。

在每种振幅下,笔者取第 2、3、4 个孔进行测量,并求取其平均值。

CFRP 出口撕裂因子随振幅变化如图 7 所示。

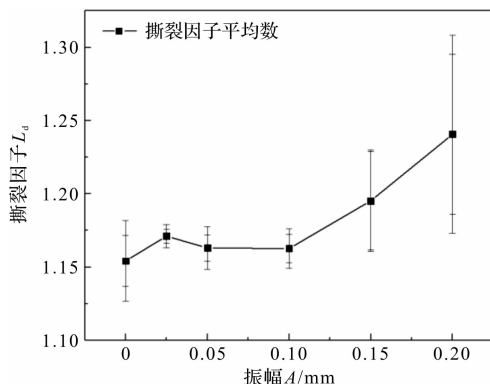


图 7 CFRP 出口撕裂因子随振幅变化

由图 7 可知:当振幅较小时,低频振动对孔的撕裂因子影响并不明显,但随着振幅的增大,撕裂因子逐渐增加,并且制孔质量变得不稳定。

3.3 振动对孔壁质量的影响

低频振动可以抑制长切屑的产生,避免了切屑缠刀造成的对孔壁的刮擦,不仅可以提升上层铝合金材料的孔壁质量,还可以控制其孔径偏差;同时由于 CFRP 在下方,受铝合金切屑影响不大。

但是低频振动本身对 CFRP 加工会产生一定的影响,同一层材料钻削,145°纤维切削最容易产生损伤,微观表现为纤维拔出,形成凹坑;低频振动会导致径向切削时的不均匀,切削径向支撑减弱,在一定程度上会加重损伤。

笔者分别观察铝合金和 CFRP 孔壁,得到孔壁的质量对比结果如图 8 所示。

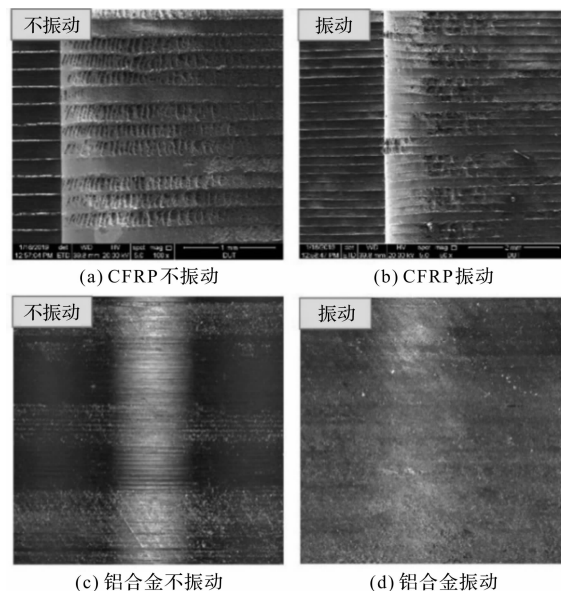


图 8 孔壁质量对比

由图 8 可知,低频振动辅助工艺使得 CFRP 孔壁表面凹坑的数量减少,但是深度会增加;对于铝合金来说,低频振动能够明显地减少孔壁上的刮痕,使表面更加平整。

为了定量地表征低频振动对孔壁加工质量的影响,笔者采用 InfiniteFocus G5 三维扫描共聚焦显微镜对相同位置孔壁进行扫描,得出三维形貌,并测量出三维面粗糙度值 S_a 。

孔壁三维面粗糙度随振幅变化如图 9 所示。

由图 9 可知:(1)当振幅小于 0.05 mm 时,低频振动对 CFRP 的孔壁质量影响不明显,但随着振幅的继续增加,表面粗糙度急剧升高;(2)低频振动能提高铝合金的孔壁质量。

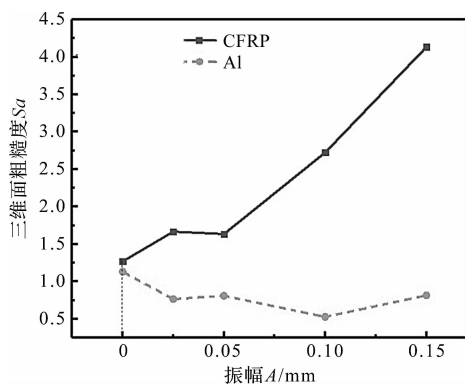


图9 孔壁三维面粗糙度随振幅变化

4 结束语

针对 Al/CFRP 叠层材料加工时易出现的加工问题,笔者引入了低频振动辅助工艺,先从理论上分析了低频振动对加工质量的作用形式,然后从实验上进一步验证,同时对比了不同振幅对加工过程及加工质量的影响,最终得出如下结论:

(1)相对于常规钻削,低频振动辅助可以有效地实现铝合金切削断屑,避免切屑缠刀,能够很好地提高铝合金孔壁粗糙度,并且减少对入口的刮擦;

(2)采用不同振幅的低频振动加工对于出口 CFRP 材料均有一定影响,振幅小于 0.1 mm 时,出口撕裂因子也保证在较小范围内,随着振幅的继续增加,出口撕裂也变得严重;

(3)振幅小于 0.05 mm 时,孔壁粗糙度变化不明显,随着振幅的继续增加,CFRP 的孔壁粗糙度明显变大。因此,CFRP 材料不适合大振幅的振动辅助加工;

(4)对于 Al/CFRP 材料的加工过程,为了更好地避免效率降低和切屑缠刀造成的质量损伤,可以采用低频振动辅助加工;同时,为了保证入口铝合金和出口 CFRP 材料的加工质量,振幅应该保持在较小的范围内。

参考文献 (References):

[1] 李 威,郭权锋. 碳纤维复合材料在航天领域的应用[J]. 中国光学,2011,4(3):201-212.
 [2] 陈 涛,苗 光,李素燕. 碳纤维复合材料切削加工技术研究进展[J]. 哈尔滨理工大学学报,2016,21(2):71-77.
 [3] 陈亚莉. 从 A350XWB 看大型客机的选材方向[J]. 航空制造技术,2009(12):34-37.

[4] 陈亚莉. 空客 A350 的结构选材特点[J]. 国际航空,2007(3):60-62.
 [5] SADEK A, ATTIA M H, MESHREKI M, et al. Characterization and optimization of vibration-assisted drilling of fibre reinforced epoxy laminates[J]. *Cirp Annals Manufacturing Technology*, 2013, 62(1):91-94.
 [6] PECAT O, MEYER I. Low frequency vibration assisted drilling of aluminium alloys[J]. *Advanced Materials Research*, 2013(769):131-138.
 [7] 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.
 [8] 侯书军,高晓星,李 慨,等. 碳纤维复合材料/钛合金叠层板振动辅助钻孔技术[J]. 南京航空航天大学学报,2018,50(3):295-301.
 [9] 王 昕. 振动钻削新钻削力模型及定、变参数振动钻削的研究[D]. 长春:吉林大学机械科学与工程学院,2004.
 [10] PAULSEN T, PECAT O, WAGNER A, et al. Modification of oscillation modes in low frequency vibration assisted drilling[J]. *Procedia Manufacturing*, 2017(14):1-7.
 [11] JALLAGEAS J, K'NEVEZ J Y. Modeling and optimization of vibration-assisted drilling on positive feed drilling unit [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 67(5-8):1205-1216.
 [12] XU W X, ZHANG L C. Effect of frequency and amplitude on the performance of elliptic vibration-assisted cutting of fibre-reinforced polymer composites[J]. *Advanced Materials Research*, 2014(1017):753-757.
 [13] XU W, ZHANG L C, WU Y. Elliptic vibration-assisted cutting of fibre-reinforced polymer composites; understanding the material removal mechanisms[J]. *Composites Science and Technology*, 2014(92):103-111.
 [14] 崔西亮,田 彪,王永生. 碳纤维复合材料钻孔加工的缺陷分析[J]. 机电工程,2013,30(2):182-184,196.
 [15] JIA Zhen-yuan, FU Rao, NIU Bin, et al. Novel drill structure for damage reduction in drilling CFRP composites [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2016(110):55-65.
 [16] 何春伶. 双顶角钻尖几何参数对碳纤维复合材料钻削轴向力和制孔分层的影响[D]. 大连:大连理工大学机械工程学院,2016.
 [17] 魏良耀. 碳纤维复合材料钻削轴向力及刀具磨损的试验研究[D]. 南京:南京理工大学机械工程学院,2013.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

王帅飞,王福吉,栗盛开,等. Al/CFRP 叠层结构低频振动辅助钻削工艺研究[J]. 机电工程,2020,37(12):1447-1452.

WANG Shuai-fei, WANG Fu-ji, LI Sheng-kai, et al. Low frequency vibration aided drilling technology for Al/CFRP laminated structure[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020, 37(12):1447-1452.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>