DOI: 10.3901/JME.2021.07.224

CFRP/Ti 叠层结构钻孔过渡域表面粗糙度演化机理*

刘书暖 宋 晔 郭东林 张开富
(西北工业大学机电学院 西安 710072)

摘要: 碳纤维增强复合材料/钛合金(CFRP/Ti)叠层构件广泛应用于飞机结构, 而其连接孔的表面粗糙度对连接可靠性具有重要影响。当钻头从 CFRP 侧钻入时, 在 CFRP 过渡域的表面质量问题比较严重。为从钻削全过程控制表面粗糙度, 研究了 CFRP 过渡域表面粗糙度的演化过程, 提出了钻孔周期内/间表面粗糙度演化的概念模型, 建立了粗糙度变化因子指标 RVF_{in} 和 RVF_{bet} 。通过对比试验发现, 在钻孔周期内, 0° 、 45° 和 90° 纤维方向上的表面粗糙度恶化, 而 135° 纤维方向上的表面粗糙度改善, 在钻孔周期间, 四个角度上的表面粗糙度发生不同程度地恶化, RVF_{in} 和 RVF_{bet} 的数值变化能够方便地反映表面粗糙度的变化趋势, 为 CFRP/Ti 叠层钻孔表面质量评价的工程应用提供了理论基础和技术方法。

关键词: CFRP/Ti 叠层; CFRP 过渡域; 粗糙度演化; 钻孔周期; 粗糙度变化因子

中图分类号: TH16

Study on the Surface Roughness of Transitional Field in Drilling CFRP / Ti Stacks

LIU Shunuan SONG Ye GUO Donglin ZHANG kaifu
(School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract: Carbon fiber reinforced plastics and titanium (CFRP/Ti) stacks are widely used in aircraft structures, and the surface roughness of connection holes has an important impact on connection reliability. When drilling from the side of CFRP processing, serious surface quality problems often occur in the transition region of CFRP. In order to control the surface roughness in the whole drilling process, the evolution process of the surface roughness in the transition region of CFRP is mainly studied, an evolution model of surface roughness in / between drilling cycles is proposed, index of roughness variation factor, RVF_{in} and RVF_{bet} , are established. Through comparative experiments, it is found that the surface roughness of 0° , 45° and 90° fiber direction are deteriorated, while 135° fiber direction improved in the drilling cycle. It is also found that the surface roughness of four directions is deteriorated in varying degrees between the drilling cycle. However, the numerical change of RVF_{in} and RVF_{bet} can easily reflect these trends, and provides theoretical basis and technical method for engineering application of CFRP / Ti drilling surface quality evaluation.

Key words: CFRP / Ti stacks; transitional field of CFRP; roughness evolution; drilling cycle; roughness variation factor

0 前言

以碳纤维增强复合材料(Carbon fiber reinforced plastics, 简称 CFRP)和钛合金为代表的航空材料,

因其比强度高, 密度小和耐腐蚀等优势, 应用日益广泛^[1-2]。而在飞机装配过程中, 常常需要将 CFRP 壁板与钛合金骨架(即 CFRP/Ti 叠层构件)进行铆接。在钻孔工序中, 考虑可操作性和减少 CFRP 出口分层, 一般选择从 CFRP 侧钻入。但这无可避免地导致了钛合金切屑对 CFRP 孔壁表面的“二次切削”, 形成 CFRP 孔壁表面缺陷, 导致表面粗糙度变差^[3-5]。连接

* 国家自然科学基金(51475379)和陕西省重点研发计划(2017GY-101)资助项目。20200820 收到初稿, 20210301 收到修改稿

孔的表面粗糙度是影响连接件疲劳寿命的主要因素之一。据统计, 75%~80%的疲劳破坏发生在机体结构的连接部位上。因此, 保证 CFRP 孔壁表面粗糙度对于飞机的安全服役有着重要影响^[6]。

CFRP/Ti 叠层构件的钻削带来了叠层界面过渡域钻削问题, 刀尖钻出 CFRP 至刀刃全部钻入钛合金的过程, 即为 CFRP/Ti 叠层界面过渡域钻削。钻削过程中刀具同时切削 CFRP 与钛合金这两种性能截然不同的材料, 引起切削力、刀具振动和切削温度的快速增加, 以及后续钛合金切屑排出过程的刮孔效应, 这些因素的综合影响使得 CFRP 过渡域位置的孔壁表面质量往往最差^[7], 因而控制和改善过渡域表面质量对提高孔壁表面质量具有重要意义。

针对 CFRP/Ti 叠层构件的钻削表面质量问题, 国内外学者进行了研究。AN 等^[7]发现, CFRP 过渡域位置相比 CFRP 入口位置, 孔径值和圆度误差值要明显偏大。他将原因归结于钛合金切屑的“刮擦效应”。南城根等^[8]认为钛合金切屑的流出会对 CFRP 孔壁造成侵蚀, 使得 CFRP 过渡域孔壁位置表面质量恶化。通过降低进给量, 能在一定程度上改善这一现象。PARK 等^[9]发现单独钻削 CFRP 比 CFRP/Ti 叠层钻削时有更好的表面粗糙度。因为钻削钛合金使刀刃产生积屑瘤, 切削时更易造成纤维的拔出。XU 等^[10]发现 CFRP 不同于金属材料, 其纤维方向角对切削温度影响突出, 顺纤维方向上的切削温度明显高于逆纤维方向上的, 切削温度在 90° 方向时达到最大值。陈明等^[10]发现过高的温度会引起树脂基体的分解, 形成孔壁烧伤。WANG 等^[12]发现钻削 CFRP/Ti 叠层构件时, 刀具的磨损并不简单等于单独钻削 CFRP 和钛合金时的叠加。CFRP 的纤维断口能够刷除刀刃上的钛合金黏附物, 有利于减少崩刃, 从而延长刀具的使用寿命。WANG 等^[13]发现钛合金切削会导致 CFRP 温度上升, 降低了树脂基体的刚度和粘接性能, 并提出了一种评估纤维层表面损伤的方法。KARPAT 等^[14]发现钻削 CFRP 时, 孔壁质量从入口到出口呈现恶化趋势。如果 CFRP 孔壁附近的温度升高超过树脂玻璃化转变的峰值温度, 并伴随有高接触应力, 则可能出现表面损伤。安华等^[15]以刀具磨损状态值、进给速度以及主轴转速构成特征向量, 进而建立基于支持向量回归的孔壁粗糙度在线监测模型。当监测系统判定孔壁粗糙度不合格时, 利用模拟退火算法在当前刀具磨损状态下进行钻削参数优化。齐振超等人^[16]借助数值仿真方法建立了 CFRP 直角切削的三维多相有限元模型, 直观地展示了基体和纤维的失效形式以及切削亚表面损伤。

综上所述, 影响 CFRP 孔壁最终表面质量的影响因素众多且相互耦合。上述研究重点关注 CFRP 孔壁整个表面损伤的现象及其影响因素, 针对过渡域这一表面质量最差位置, 追溯其孔壁表面演变过程的研究很少。因此, 本文针对连续钻孔过程, 从不同维度出发, 建立评价指标, 进行钻孔试验, 研究 CFRP 过渡域的粗糙度演化机理。

1 CFRP 过渡域表面粗糙度演化模型及评价指标

CFRP/Ti 叠层界面过渡域钻削如图 1 所示, 针对 CFRP/Ti 叠层构件的连续钻孔过程, 从多维度和多阶段考虑 CFRP 过渡域表面粗糙度的演化过程。每进行一次完整阶段(I~V)的钻孔, 称为一个钻孔周期。在钻孔周期内维度, 初始表面和最终表面分别指钻头切削刃恰好完成 CFRP 和钛合金切削时的 CFRP 孔壁表面。中间表面则是指钻头切削刃只切削钛合金时的 CFRP 孔壁表面。CFRP 过渡域表面依次经历初始表面、中间表面和最终表面等不同阶段。在钻孔周期内维度上, 最终表面随钻孔周期的增加不断变化, 如图 2 所示。

图 1 过渡域示意图

CFRP 过渡域表面粗糙度在钻孔周期之内与钻孔周期之间有着不同的影响因素。对于前者, 考虑的直接影响因素为钻孔参数, 而对于后者, 则为刀具的磨损。

假设有 A 和 B 两位置, 某初始时刻下 A 、 B 位置的粗糙度分别为 $1\ \mu\text{m}$ 和 $5\ \mu\text{m}$, 经历后续加工过程的影响后, 分别变为 $2\ \mu\text{m}$ 和 $6\ \mu\text{m}$ 。显然, 两位置的粗糙度变化值均为 $1\ \mu\text{m}$, 若就此认为 A 、 B 位置粗糙度变化程度基本一样, 显然不太合适, 因为忽略了 A 位置初始时刻粗糙度本就小得多的事实。为解决评价粗糙度变化程度时遇到的这类问题, 需要提出一种更易于评价的新指标。

图 2 CFRP 过渡域表面粗糙度演化概念模型

考虑到单向 CFRP 层合板的各向异性特点, 采用孔壁不同纤维方向的轴向线粗糙度作为 CFRP 过渡域表面质量的评价指标。为了评价和对比不同纤维方向的粗糙度的变化趋势, 本文提出粗糙度变化因子 (Roughness variation factor, RVF), 即某一位置粗糙度在不同时刻的相对变化程度, 为无量纲量。其表达有钻孔周期内与钻孔周期期间两种形式。

在钻孔周期内, 最终表面相对初始表面的粗糙度变化程度, 即为钻孔周期内的 RVF, 表达如下。

$$RVF_{in} = \frac{R'_a - R_a}{R_a} \quad (1)$$

式中, R_a 表示初始表面沿轴向的表面粗糙度; R'_a 表示最终表面沿轴向的表面粗糙度。

在钻孔周期期间, 第 $i(i=1,2,\dots)$ 个钻孔周期相比首个钻孔周期, 其最终表面间的相对变化程度, 即为钻孔周期期间的 RVF, 表达如下。

$$RVF_{bet} = \frac{R'_{a,i} - R'_{a,1}}{R'_{a,1}} \quad (2)$$

式中, $R'_{a,1}$ 表示首个钻孔周期的最终表面, 在轴向的表面粗糙度; $R'_{a,i}$ 表示第 i 个钻孔周期的最终表面, 在轴向的表面粗糙度。

如图 3a 所示, 横轴表示初始表面粗糙度, 竖轴表示最终表面粗糙度, 那么 $\tan\alpha$ 的值即为 RVF_{in} ,

表示的是粗糙度变化的斜率。若用横轴和竖轴分别表示首个和第 i 个钻孔周期的最终表面粗糙度, 那么 $\tan\alpha_i$ 的值即为 RVF_{bet} , 如图 3b 所示。无论 RVF_{in} 还是 RVF_{bet} , 表示的均是粗糙度变化的速率, 能够反映粗糙度的变化程度。其值越接近 0, 表示粗糙度变化越稳定。其值为正, 表示粗糙度变差。其值为负, 则表示粗糙度变好。绝对值越大, 表明粗糙度变化程度越大。新指标避免了采用粗糙度变化值描述变化程度时, 多个位置间难以比较的情况。

图 3 评价指标的几何含义

2 CFRP 过渡域钻孔试验

试验所用 CFRP 为光威复材的 0° 单向铺层层合板, 单层厚度为 0.2 mm, 总厚度 6 mm。碳纤维为 T300 级, 树脂型号为 7901, 含量为 33%。钛金牌号为 Ti-6Al-4V, 厚度为 4 mm。性能参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 0°单向 CFRP 层合板力学性能

拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /GPa	弯曲强度 /MPa	压缩强度 /MPa	层间剪切强度 /MPa
1 800	115	1 200	1 000	55

表 2 钛合金性能

抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	剪切模量 /MPa	弹性模量 /GPa	硬度/HB
1 015	960	650	110	300

试验在精雕 JDCT1200A12S 型数控加工中心上进行。钻孔刀具为西安达硕科技的标准型 YG6 硬质合金麻花钻,无涂层,直径 6 mm,钻顶角为 120°。刀具磨损通过 Alicona 公司的 InfiniteFocus G4 自动变焦三维表面轮廓仪进行测量。孔壁形貌泰思肯公司的 VEGA 3LMU 型扫描电子显微镜测量。粗糙度由马尔 Marsurf M300C 型便携式粗糙度测量仪进行测量。钻削试验的进行如图 4 所示。

CFRP 过渡域粗糙度的测量沿着轴向进行。测量探头紧贴着 CFRP 孔壁的表面,从 CFRP 的出口位置开始,直至过渡域结束位置,如图 5 所示。测量角度从 0° 开始,间隔 15° 测量一次。

图 4 CFRP/Ti 叠层构件的钻削

图 5 粗糙度测量的进行方向

试验分 A、B 和 C 组,A 和 B 互为对照,研究钻孔周期内,初始表面到最终表面的粗糙度演化规律。C 组研究钻孔周期期间,最终表面之间的粗糙度演化规律。试验参数如表 3 所示。

表 3 试验参数

组别	转速/(r/min)	进给/(mm/r)	钻孔形式	钻孔数	组别	转速/(r/min)	进给/(mm/r)	钻孔形式	钻孔数
A	800	0.03	complete	3	B	800	0.05	incomplete	3
A	800	0.05	complete	3	B	800	0.07	incomplete	3
A	800	0.07	complete	3	B	800	0.09	incomplete	3
A	800	0.09	complete	3	B	800	0.11	incomplete	3
A	800	0.11	complete	3	B	800	0.13	incomplete	3
A	800	0.13	complete	3	B	1 000	0.03	incomplete	3
A	1 000	0.03	complete	3	B	1 000	0.05	incomplete	3
A	1 000	0.05	complete	3	B	1 000	0.07	incomplete	3
A	1 000	0.07	complete	3	B	1 000	0.09	incomplete	3
A	1 000	0.09	complete	3	B	1 000	0.11	incomplete	3
A	1 000	0.11	complete	3	B	1 000	0.13	incomplete	3
A	1 000	0.13	complete	3	B	1 200	0.03	incomplete	3
A	1 200	0.03	complete	3	B	1 200	0.05	incomplete	3
A	1 200	0.05	complete	3	B	1 200	0.07	incomplete	3
A	1 200	0.07	complete	3	B	1 200	0.09	incomplete	3
A	1 200	0.09	complete	3	B	1 200	0.11	incomplete	3
A	1 200	0.11	complete	3	B	1 200	0.13	incomplete	3
A	1 200	0.13	complete	3	C	1 200	0.03	complete	31
B	800	0.03	incomplete	3					

注:“complete”指钻孔过程包含钻削阶段 I~V,“incomplete”指钻孔过程仅包含钻削阶段 I~III。所有钻孔均测量 CFRP 过渡域表面粗糙度,仅 C 组测量刀具磨损。

3 钻孔周期内的过渡域粗糙度演化

3.1 初始表面与最终表面的对比

通过试验 A 和 B 得到初始表面与最终表面的粗糙度随纤维方向的分布(转速 1 200 r/min, 进给量 0.03 mm/r), 如图 6 所示。总体来看, 从 0° 开始, 两者均呈现先下降, 再上升, 最后下降的趋势, 且最终表面的粗糙度变化更为缓和。具体来看, 在 0° ~ 90° 之间, 最终表面粗糙度要比初始表面粗糙度高, RVF_{in} 均为正值。而在 105° ~ 165° 之间, 最终表面粗糙度要比初始表面粗糙度低, RVF_{in} 均为负值。

图 6 钻孔周期内的 CFRP 过渡域粗糙度变化

为方便观察, 先通过金刚石切割机对钻孔试验件进行切割, 再依次用 500# 和 2000# 的砂纸进行打磨。去除余量后, 再使用丙酮清洗并晾干。最后进行喷金处理并在 VEGA 3LMU 型扫描电子显微镜下进行观察, 结果图 7 所示。总体来看, 初始表面与最终表面的孔壁形貌具有显著的区别。在初始表面,

出现了环绕孔壁表面的划痕状缺陷, 而在最终表面则不能明显观察到该缺陷。可能是 CFRP/Ti 叠层界面过渡域钻削时, 刀具振动增大, 使得刀具外圆转角处, 在 CFRP 初始表面留下深浅不一的划痕。而对于最终表面, 钛合金切屑对孔壁的挤压摩擦影响较大, 使得 CFRP 的表面普遍变差。从而淡化了划痕特征。CFRP 过渡域表面形貌差异还与纤维方向角关系密切。针对 0°、45°、90° 和 135° 四个代表性纤维方向角, 展开进一步分析。

图 7 钻孔周期内的 CFRP 过渡域孔壁形貌 ×23

当纤维方向角为 0° 时, 初始表面与最终表面的对比如图 8 所示。初始表面上, 纤维暴露较多, 但纤维之间的树脂基体存在一定的约束作用。而最终表面上, 纤维暴露更多, 且存在严重的纤维剥离, 剥离纤维的表面缺乏树脂基体的约束作用。结合粗糙度和 RVF_{in} 数据, 也发现该方向上表面质量变差。该现象是由高温下的树脂基体分解所致^[7, 17-18]。

图 8 0° 纤维方向的孔壁形貌 ×200

当纤维方向角为 45° 时, 初始表面与最终表面的对比如图 9a 所示。初始表面上, 存在着横向划痕。划痕区域之内, 有着明显的孔隙。在划痕区域之外, 纤维断口几乎全被树脂基体所包覆, 孔隙很少。最

终表面上, 很难看到树脂基体包覆纤维断口的理想情形, 表面的树脂基体出现不同程度的剥落。结合粗糙度和 RVF_{in} 数据来看, 该方向上表面质量变差。该现象是由钛合金切屑挤压摩擦孔壁^[19], 树脂发生

不同程度的迁移和涂抹所致。

当纤维方向角为 90° 时, 初始表面与最终表面的对比如图 9b 所示。初始表面上, 除了较少的划痕外, 纤维断口齐整, 树脂基体包覆完好。最终表面上, 未出现明显的孔隙或纤维拔出, 但切削表面平整度较差。结合粗糙度和 R/VF_{in} 数据来看, 该方向上表面质量变差。该现象是由钛合金切屑不均匀挤压摩擦孔壁, 破坏了原有平整表面所致^[19]。

当纤维方向角为 135° 时, 初始表面与最终表

面的对比如图 9c 所示。初始表面上, 呈现出显著的波纹状表面特征, 表面非常粗糙。最终表面上, 波纹状表面特征消失, 呈现出纤维暴露、凹坑与树脂基体包覆等现象共存的特点。结合粗糙度和 R/VF_{in} 数据可知, 最终表面质量好于初始表面。出现这种现象可能是钻削的 IV 和 V 阶段, CFRP 孔壁过于粗糙的波纹状表面增强了钛合金切屑对孔壁的挤压摩擦作用, 使得钛合金切屑的锋利边缘能够削平波纹状结构的波峰, 从而降低了粗糙度。

图 9 45° 、 90° 和 135° 纤维方向的孔壁形貌 $\times 200$

综上所述, CFRP 过渡域的最终表面相比初始表面, 粗糙度随纤维方向的变化更稳定。 R/VF_{in} 值越小(最好为负), 表明粗糙度增长越小, 表面质量向着变好的方向改善。高温下的树脂基体分解和钛合金切屑的挤压摩擦, 造成 0° 、 45° 和 90° 纤维方向下的最终表面质量相比初始表面质量变差。而 135° 时, 由于钛合金切屑对微观波峰的切削作用, 表面质量反而变好。

3.2 钻削参数的影响

上节结论是在固定钻削参数下获得。为了确认不同钻削参数下该结论的普遍性, 在 800 r/min 、 $1\,000\text{ r/min}$ 和 $1\,200\text{ r/min}$ 三种不同转速下, 设置进给量分别为 0.03 mm/r 、 0.05 mm/r 、 0.07 mm/r 、 0.09 mm/r 、 0.11 mm/r 和 0.13 mm/r , 对 R/VF_{in} 的变化进行分析。

如图 10 所示。整体来看, 在 45° 和 90° 纤维

方向,三种不同转速水平下, RVF_{in} 在小进给量时较小,大进给量时较大。这是因为进给量增大,钛合金切屑的刚度相应增大,造成排屑不畅,对孔壁造成损伤(具体形式见上一节),引起粗糙度更大幅度的增长。在 0° 和 135° 纤维方向,三种不同转速水平下, RVF_{in} 变化无明显规律,但波动相对其他角度更小一些。这可能是因为此纤维方向上的初始表面粗糙度原本较高,对进给量增加导致的排屑状态变化不够敏感。

图 10 不同转速下 RVF_{in} 变化趋势

此外, RVF_{in} 在 0° 、 45° 和 90° 纤维方向上几乎均为正值,而在 135° 纤维方向上,则几乎均为负值。这表明转速和进给量的改变,几乎不会影响钻孔周期内的粗糙度的变化趋势,即 0° 、 45° 和 90° 纤维方向上粗糙度变差,而 135° 纤维方向粗糙度变好。

4 钻孔周期期间的过渡域粗糙度演化

4.1 最终表面间的对比

通过试验 C 得到最终表面的粗糙度变化如图 11 所示。当钻孔周期数增大时, 0° 、 45° 、 90° 和 135° 纤维方向角下的粗糙度均不断增大。在任一个钻孔周期内,不同纤维方向的粗糙度从大到小,按角度排序为 $135^\circ > 0^\circ > 45^\circ$ 、 90° 。通过统计 RVF_{bet} ,可以横向对比粗糙度的变化程度。如图 12 所示,不同纤维方向角下,随着钻孔周期数增加, RVF_{bet} 交错上升。此外,粗糙度水平一直最高的 135° 纤维方向上,第 31 个钻孔的 RVF_{bet} 最小,粗糙度增长最缓慢;粗糙度水平一直较低的 45° 和 90° 纤维方向上,其 RVF_{bet} 较大,粗糙度增长相对最迅速。

图 11 最终表面粗糙度与钻孔周期数

图 12 RVF_{bet} 与钻孔周期数

借助 SEM 的观测结果(图 13),进一步对上述规律进行解释。对比第 7、19 和 31 个孔的最终表面,发现 135° 纤维方向上的纤维拔出和孔壁凹坑等缺陷逐步加重,质量恶化较为明显。这是由于刀刃磨损变钝后,使得纤维切断时产生更大的变形所致^[12]。而在 0° 、 45° 和 90° 方向上,粗糙度变化区间小,很难用肉眼直接判断表面质量的细微变化。这进一步说明采用 RVF_{bet} 评价粗糙度变化程度,更能直观地展现出表面质量的变化趋势。

图 13 钻孔周期期间的 CFRP 过渡域孔壁最终表面形貌 ×200

4.2 后刀面磨损值的影响

试验 C 中, 以常用的后刀面的磨损量 VB 为衡量指标。从第一个钻孔开始, 每间隔 6 个钻孔周期统计其数值大小, 测量位置如图 14 所示。

图 14 磨损值 VB 测量位置示意图

在 InfiniteFocus G4 自动变焦三维表面轮廓仪上进行 VB 的多点测量, 结果如图 15 所示。发现 VB 随着钻孔周期数的增加而不断增大。将 VB 均值与 0° 、 45° 、 90° 和 135° 纤维方向的粗糙度值或 RVF_{bet} 值进行相关性分析, 相关性系数 r 皆依次为 0.792、0.959、0.926 和 0.961, 不同纤维方向粗糙度的增加与刀具后刀面的磨损均有一定的线性关系。刀具后刀面磨损的快速增加, 引起了 CFRP 过渡域表面不同纤维方向上最终表面粗糙度不同程度上的增加。

图 15 后刀面磨损与钻孔周期数

5 结论

(1) 在钻孔周期内, CFRP 过渡域初始表面与最终表面的粗糙度均随纤维方向角增大, 呈现先下降, 后上升, 最后再下降的变化趋势, 且后者相比前者更为缓和。

(2) 在钻孔周期内, 以 RVF_{in} 来评价粗糙度的变化趋势, 发现 0° 、 45° 和 90° 纤维方向下, 其值为正, 表明从初始表面到最终表面时, 粗糙度变差。而 135° 纤维方向下, 其值为负, 表明表面初始表面到最终表面时, 粗糙度变好。这种规律几乎不受

转速和进给量变化的影响。

(3) 在钻孔周期间, CFRP 过渡域最终表面粗糙度随着钻孔周期数的增加而增加。但不同纤维方向上的粗糙度水平存在差异, 按照粗糙度的大小排序, 为 $135^\circ > 0^\circ > 45^\circ$ 、 90° 。

(4) 在钻孔周期间, 以 RVF_{bet} 来评价粗糙度的变化趋势, 发现 0° 、 45° 和 90° 纤维方向下, 其值均为正, 并随钻孔周期数增加而交错上升, 这与刀具的磨损相关。截止第 31 个钻孔周期, RVF_{bet} 最大值出现在 90° 纤维方向, 即该纤维方向上的粗糙度增长相对最快。

(5) 实际的连续钻孔加工中, 粗糙度变化因子 RVF_{in} 与 RVF_{bet} 的增长表明质量变差, 都需要抑制。

参 考 文 献

- [1] MELTEM A K, HASAN G. A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials[J]. Defence Technology, 2018, 14(4): 318-326.
- [2] 朱知寿. 我国航空用钛合金技术研究现状及发展[J]. 航空材料学报, 2014, 34(4): 44-50.
ZHU Zhishou. Recent research and development of titanium alloys for aviation application in china[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(4): 44-50.
- [3] 全燕鸣, 叶邦彦. 复合材料的切削加工表面结构与表面粗糙度[J]. 复合材料学报, 2001(4): 131-135.
QUAN Yanming, YE Bangyan. Machined surface texture and roughness of composites[J]. Acta Material Composite Sinica, 2001(4): 131-135.
- [4] ANDREWS S D, OCHOA O O, OWENS S D. The effects of fastener hole defects[J]. Journal of Composite Materials, 1993, 27(1): 2-20.
- [5] PERSSON E, ERIKSSON I, ZACKRISSON L. Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates[J]. Composites Part A Applied Science and Manufacturing, 1997, 28(2): 141-151.
- [6] 袁红璇. 飞机结构件连接孔制造技术[J]. 航空制造技术, 2007(1): 84-87.
YUAN Hongxuan. Manufacturing technology of connecting hole in aircraft structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007(1): 84-87.
- [7] An Q, Dang J, Li J, et al. Investigation on the cutting responses of CFRP/Ti stacks: With special emphasis on the effects of drilling sequences[J]. Composite Structures, 2020: 112794.
- [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] PARK K H, BEAL A, KIM D W, et al. A comparative study of carbide tools in drilling of CFRP and CFRP-Ti stacks[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2014, 136(1): 014501.
- [10] 文亮, 姜丽萍, 张烘州, 等. 碳纤维增强复合材料单向层合板直角自由切削热特性试验[J]. 复合材料学报, 2015, 32(5): 1469-1479.
WEN Liang, JIANG Liping, ZHANG Hongzhou, et al. Test on thermal characteristics when orthogonally free machining carbon fiber reinforced plastic unidirectional laminates [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(5): 1469-1479.
- [11] 陈明, 邱坤贤, 秦声, 等. 高强度碳纤维增强复合材料层合板的钻削制孔过程及其缺陷形成分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(5): 667-674.
CHEN Ming, QIU Kunxian, QIN Sheng, et al. Study on drilling behaviors and defects forming process of high-strength CFRP laminates[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics Astronautics, 2014, 46(5): 667-674.
- [12] WANG X, KWON P Y, STURTEVANT C, et al. Comparative tool wear study based on drilling experiments on CFRP/Ti stack and its individual layers[J]. Wear, 2014, 317(1-2): 265-276.
- [13] WANG B, WANG Y, ZHAO H, et al. Effect of a Ti alloy layer on CFRP hole quality during helical milling of CFRP/Ti laminate[J]. Composite Structures, 2020, 252: 112670.
- [14] KARPAT Y, UMUT K, BAHTIYAR O. A thermo-mechanical model of drill margin-borehole surface interface contact conditions in dry drilling of thick CFRP laminates[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 154: 103565.
- [15] 安华, 王喆, 王国锋, 等. 复合材料钻削表面粗糙度在线监测与加工参数自适应优化[J]. 机械工程学报, 2020, 56(2): 27-34.
AN Hua, WANG Zhe, WANG Guofeng, et al. Research on on-line monitoring of surface roughness in composite drilling and adaptive optimization of parameters[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(2): 27-34.
- [16] 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.
- [17] SATO M, TANAKA H, YAMAMOTO K. Temperature variations in drilling of CFRP/aluminum and CFRP/titanium stacks[J]. International Journal of Automation Technology, 2016, 10(3): 348-355.
- [18] XU J, LI C, CHEN M, et al. On the analysis of temperatures, surface morphologies and tool wear in drilling CFRP/Ti6Al4V stacks under different cutting sequence strategies[J]. Composite Structures, 2020, 234(15): 111708.
- [19] DAHNEL A N, ASCROFT H, BARNES S. An investigation of hole quality during drilling of carbon fibre reinforced plastic and titanium (Ti6Al4V) using tungsten carbide drills[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 152: 161167.

作者简介: 刘书暖(通信作者), 女, 1979 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为难加工材料切削加工、数字化工艺设计、复合材料与结构切削加工工艺等。
E-mail: liusn@nwpu.edu.cn