

# 变参数钻削对 CFRP/铝合金叠层的孔径精度影响

韦学文<sup>1</sup>,田威<sup>1</sup>,邱燕平<sup>2</sup>,张霖<sup>1</sup>,廖文和<sup>1,3</sup>

(1. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016; 2. 洪都航空工业集团,江西 南昌 330024;  
3. 南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094)

**摘要:**碳纤维增强复合材料和铝合金具有不同的物理力学性能和钻削工艺参数,采用相同的参数一次钻削 CFRP/铝合金叠层材料不能满足高质量制孔需求。采用变参数工艺对叠层材料进行制孔实验,分析了变参数方式和变参数位置对孔径的影响,并与定参数钻削进行对比。结果表明,变参数工艺能有效降低铝合金与 CFRP 的孔径差值,提高钻削孔径精度。

**关键词:**碳纤维增强复合材料;铝合金;钻削;变参数

**中图分类号:** TG52 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2020)01-0040-04

## Influence of Variable Parameters on Aperture Accuracy of Drilling CFRP and Aluminum Alloy Stacks

WEI Xuewen<sup>1</sup>, TIAN Wei<sup>1</sup>, QIU Yanping<sup>2</sup>, ZHANG Lin<sup>1</sup>, LIAO Wenhe<sup>1,3</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Hongdu Aviation Industry Group, Nanchang 330024, China;  
3. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The physical and mechanical properties and drilling process parameters of carbon fiber reinforced composites are different from ones of aluminum alloys. The same parameters are used to drill CFRP and aluminum alloy stacks, it is difficult to meet the requirement of high quality of drilling. A series of experiments are carried out on drilling on the multilayered materials with variable parameters. The influence of the way and location of variable parameter process on the aperture is investigated and compared with the constant parameter process. The results show that variable parameter process can be used to effectively reduce the difference in aperture between aluminum alloy and CFRP. This method can be used to improve the aperture accuracy of drilling.

**Keywords:** CFRP; aluminum alloy; drilling; variable parameter

## 0 引言

飞机的结构质量影响飞机的运载能力、飞行距离以及经济效益<sup>[1-2]</sup>,因此飞机机体材料应尽量选择轻质和高强度材料,以减轻飞机的结构质量。铝合金密度低,耐腐蚀性能好,抗疲劳性能较高,且具有较高的比强度、比刚度,是飞机结构中常用的金属材料之一<sup>[3]</sup>。近年来,复合材料由于具有密度低、比强度高和比模量高的特性也被广泛应用到飞机结构中,其中应用最多的是碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced plastics, CFRP),且占据了极其重要的地位<sup>[4]</sup>。在飞机部件装配中,CFRP/铝合金是一种常见的叠层结构,它们之间的主要连接方式为铆接和螺接,因此,需要对 CFRP/铝合金叠层结构进行孔加工,麻花钻钻削制孔是主要方法<sup>[5]</sup>。叠层结构制孔的孔径精度是影响连接件疲劳性能的重要因素之一。ZITOUNE 等<sup>[6]</sup>对 CFRP/铝合金叠层进行了钻孔实验,结果显示 CFRP 孔径小于钻头直径时,会出现“缩孔”现象。D' Orazio 等<sup>[7]</sup>发现 CFRP/铝合金叠层钻削时,CFRP 入口处孔径较大,出口处孔径较小,而铝合金的孔径介于 CFRP 最大孔径与

最小孔径之间。栾皓童等<sup>[8]</sup>则发现 CFRP/钛合金叠层钻削中 CFRP 孔径和钛合金孔径都大于刀具直径,且 CFRP 孔径比钛合金孔径大。可以看出,CFRP/金属叠层结构制孔不同层材料间的孔径差异是一个普遍存在的现象。本文针对 CFRP/铝合金叠层使用麻花钻进行了钻削实验,分析了叠层孔径差异的原因,提出变参数方案,并研究了变参数钻削方法对叠层制孔孔径精度的影响。

## 1 叠层材料定参数钻削实验及结果分析

### 1.1 实验方案

实验采用的实验板为 150 mm×105 mm×4 mm 的 CFRP 板(CCF300)和 150 mm×105 mm×4 mm 的 7075-T651 铝合金板。加工时,CFRP 板在上层,铝合金在下层,即钻削顺序为先钻 CFRP,后钻铝合金。实验所用的钻头为硬质合金普通麻花钻,钻头直径为 4.175 mm。实验参数选取 3 组工艺参数,分别为适合铝合金钻削的参数、折中的参数和适合 CFRP 钻削的参数,如表 1 所示。每组工艺参数钻削

6个孔。钻孔完成后使用 HEXAGON 三坐标测量机测量对 CFRP 和铝合金不同位置的孔径进行测量,测量位置为 CFRP、铝合金各层的孔中间位置。以每种方案的 6 个孔测量结果的平均值作为实验结果。

表 1 定参数钻削工艺参数

工艺参数	方案 1	方案 2	方案 3
转速/(r/min)	1 000	3 000	5 000
进给速度/(mm/r)	0.040	0.015	0.010

## 1.2 实验结果分析

钻削孔径测量结果如图 1 所示,铝合金与 CFRP 的孔径差值如表 2 所示,其中差值计算方法为铝合金孔径减去 CFRP 孔径。

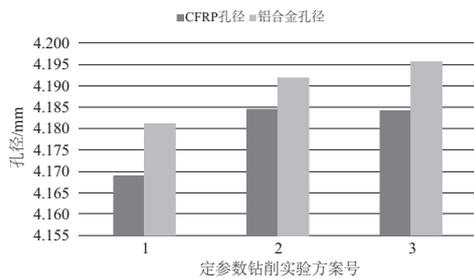


图 1 定参数钻削孔径

表 2 定参数钻削铝合金与 CFRP 孔径差值

参数	方案 1	方案 2	方案 3
孔径差值/(mm)	0.012 2	0.007 4	0.011 3

从图 1 可以看出,3种实验方案都出现了铝合金孔径大于 CFRP 孔径的情况。其中,方案 1 转速为 1 000 r/min 时,由于转速较低,碳纤维与刀具的研磨作用并不强,钻削温度较低,钻孔完成后 CFRP 孔壁回弹,导致孔径小于钻头直径,出现“缩孔”现象。这个工艺参数下铝合金的孔径仅仅比钻头直径大了 0.006 mm,这可能是由于钻头旋转不可避免的微量偏心和振动造成的,铝合金孔径应当是正常的。方案 1 两种材料的孔径偏差主要是因为 CFRP 的缩孔导致。在方案 3 中,转速为 5 000 r/min,高转速下碳纤维与刀具产生较大的摩擦,钻削温度升高,树脂基体软化被切除,CFRP 孔壁回弹作用减小,导致 CFRP 的孔径比方案 1 大。铝合金层由于高转速,切削振动加剧,同时钻削温度的升高也加大了积屑瘤产生的风险,这两种因素共同作用下铝合金的孔径也比方案 1 有所增大,同时由于方案 3 的切削振动和进给速度降低导致的排屑变得困难,这些因素也会对上层已经加工的 CFRP 孔壁产生影响。方案 3 两层材料的孔径偏差为 0.0113 mm,这个差距主要是由于铝合金层高转速下的孔径偏大导致,相比较而言,CFRP 比较适合 5 000 r/min 的转速。方案 2 是折中的参数钻削结果,对于方案 2 的参数来说,3 000 r/min 下也会引起铝合金层的切削振动,但比方案 3 要小,积屑瘤产生的几率也小,因此铝合金层的孔径大于方案 1 但小于方案 3。CFRP 的孔径比方案 1 大,和方案 3 差不多,这可能是

因为 3 000 r/min 和 5 000 r/min 都是 CFRP 较为合适的转速区间,二者的钻削状态相似。方案 2 作为折中的参数,由表 2 可知其两层材料孔径差距是 3 种方案里面最小的,但仍有 0.0074 mm。需要指出的是,本文仅测量了孔径差值,事实上,使用折中的参数钻削时,尽管两层材料的孔径差值有所降低,但两层材料都达不到各自的最佳状态,其他方面如孔壁光滑度、铝合金出口毛刺等会比以各自适合的加工参数下效果差。

## 2 叠层材料变参数钻削工艺

由第 1 节可知,用同一种工艺参数钻削 CFRP/铝合金叠层材料时,难以同时满足两种材料的加工参数需求,因此采用变参数制孔工艺,即在 CFRP 层使用适合钻削 CFRP 的参数,在铝合金层使用适合铝合金钻削的参数,叠层界面区域工艺参数由适合 CFRP 的参数变为适合铝合金的参数。为方便下文叙述,定义钻削区段的工艺参数为  $(n, f)$ ,其中  $n$  代表转速,  $f$  代表进给速度。设 CFRP 钻削区段的工艺参数为  $(n_c, f_c)$ ,铝合金钻削区段的工艺参数为  $(n_a, f_a)$ 。叠层界面区域的工艺参数变化过程可以分为两个方面,一是变参数方式,二是变参数位置。

### 2.1 变参数方式

根据钻头运动方式,可以将变参数方式分为阶跃变参数和退让变参数。

1) 阶跃变参数:当钻头以工艺参数  $(n_c, f_c)$  钻削至某个位置时,钻头停止进给,将工艺参数变为  $(n_a, f_a)$  后继续钻削,如图 2 所示。

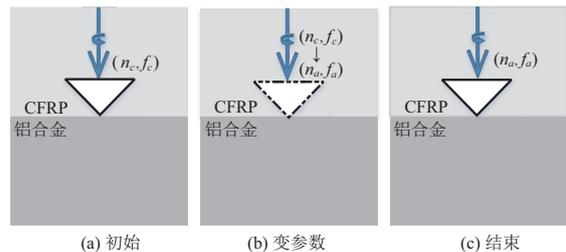


图 2 阶跃变参数

2) 退让变参数:当钻头以工艺参数  $(n_c, f_c)$  钻削至某个位置时,钻头停止进给并退出已加工孔外,将工艺参数变为  $(n_a, f_a)$  后继续钻削,如图 3 所示。

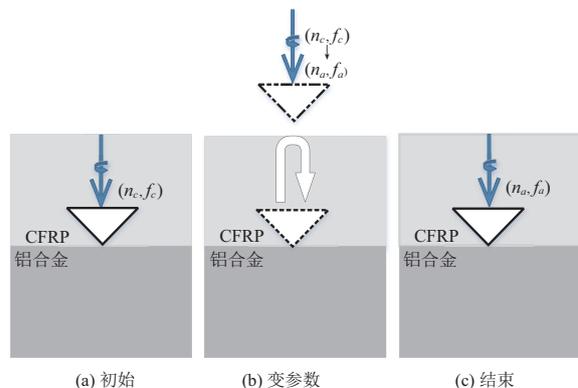


图 3 退让变参数

## 2.2 变参数位置

对于阶跃变参数和退让变参数,都是在钻头钻削至某个位置时进行变参数,在不同的位置变参数,效果也不相同。位置 1:钻心尖接触铝合金入口表面时;位置 2:钻尖轴向厚度的一半钻入铝合金时;位置 3:钻尖完全钻入铝合金时。以一级阶跃变参数为例,如图 4 所示。

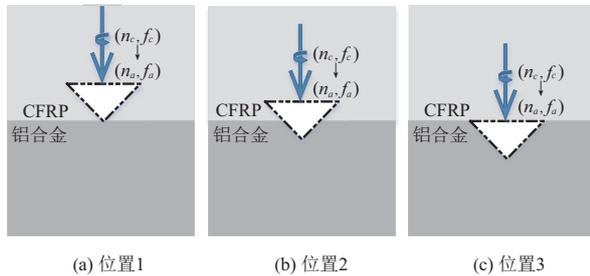


图 4 变参数位置

## 3 叠层材料变参数钻削实验及结果分析

### 3.1 实验方案

对阶跃变参数和退让变参数的不同变参数位置进行了钻削实验,其中阶跃变参数 3 种变参数位置构成 3 种实验方案,退让变参数 3 种变参数位置构成 3 种实验方案,共计 6 种实验方案,每种实验方案钻 6 个孔。变参数钻削中,选取 CFRP 层的钻削工艺参数为转速  $n_c = 5000 \text{ r/min}$ ,进给速度  $f_c = 0.01 \text{ mm/r}$ ,铝合金层的钻削工艺参数为转速  $n_a = 1000 \text{ r/min}$ ,进给速度  $f_a = 0.04 \text{ mm/r}$ 。实验所用刀具、实验板材料、孔径测量仪器及测量位置与定参数钻削实验相同。

### 3.2 实验结果分析

不同变参数方案的 CFRP 孔径如图 5 所示,铝合金孔径如图 6 所示。

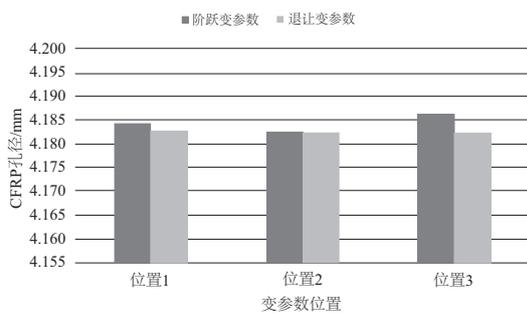


图 5 变参数钻削 CFRP 孔径

从图 5 可以看出,在所有的变参数位置中,阶跃变参数的 CFRP 孔径都大于退让变参数的 CFRP 孔径,这种现象的原因为:阶跃变参数时,钻尖停留在孔内部进行参数变化,此时钻头并没有停止转动。当已加工的 CFRP 孔壁产生部分回弹时,不停旋转的钻头侧刃对回弹部分二次切削,导致阶跃变参数的 CFRP 孔径比退让变参数大。而当钻头钻入下层铝合金后,钻削情况变得平稳,从图 6 可以看出阶

跃变参数和退让变参数的铝合金孔径并没有明显差异。

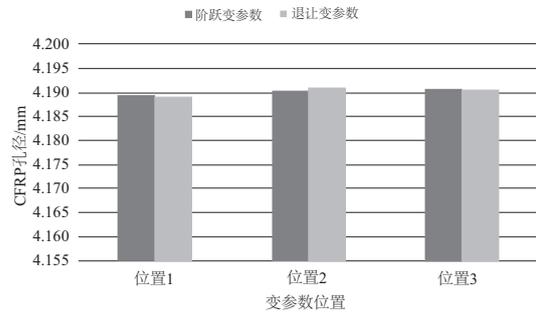


图 6 变参数钻削铝合金孔径

对阶跃变参数和退让变参数下铝合金与 CFRP 的孔径差值进行对比如图 7 所示,孔径差值的具体数值如表 3 所示。

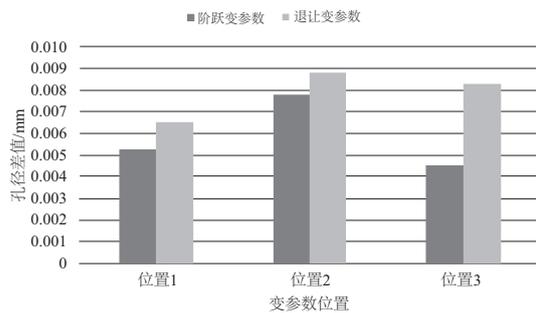


图 7 不同变参数方式下铝合金与 CFRP 孔径差值

表 3 变参数钻削铝合金与 CFRP 孔径差值 单位:mm

参数	位置 1	位置 2	位置 3
阶跃变参数孔径差值	0.005 2	0.007 8	0.004 5
退让变参数孔径差值	0.006 5	0.008 8	0.008 3

由图 7 可知,退让变参数的孔径差值比阶跃变参数大。根据上面的分析,退让变参数下 CFRP 孔径比阶跃变参数小,但铝合金孔径和阶跃变参数接近,由于孔径差值是铝合金孔径减去 CFRP 孔径,这就导致了退让变参数铝合金与 CFRP 的孔径差值比阶跃变参数大。从图 7 还可以发现,变参数位置 2 的孔径差值比位置 1 和位置 3 大,分析其原因可能为:位置 2 的时候,钻尖一半钻入下层铝合金,一半留在上层 CFRP,钻削情况复杂,在这个位置进行变参数会导致钻削振动增大,钻削情况比位置 1 和位置 3 差。位置 1 和位置 3 之间没有明显区别。从表 3 可知,所有的变参数方案中,孔径差值最大为 0.008 8 mm,这一数值仅略大于定参数钻削中最小的孔径差值 0.007 4 mm。所有变参数方案中孔径差值最小的是阶跃变参数的位置 3,此时孔径差值为 0.004 5 mm,比定参数钻削中的最小值 0.007 4 mm 减小了 39.2%,这证明变参数钻削工艺能显著减小叠层制孔孔径差值,从而提高孔径精度。

## 4 结语

1) CFRP/铝合金叠层定参数钻削时,因为两种材料的性能差异,叠层钻削存在孔径差值过大的问题。当使用

1 000 r/min 的低转速钻削时,孔径差值的原因主要是 CFRP 的回弹导致“缩孔”现象;当使用 5 000 r/min 的高转速钻削时,孔径差值的原因主要是钻削振动增大,同时钻削温度升高,钻削铝合金时出现积屑瘤,导致铝合金层孔径偏大;当使用 3 000 r/min 的折中转速钻削时,孔径差值有所降低,但铝合金层仍有钻削振动现象。

2) 变参数钻削 CFRP/铝合金叠层时,由于阶跃变参数钻头停留在孔内部进行参数变化,导致阶跃变参数的 CFRP 孔径比退让变参数的大,从而缩小了铝合金与 CFRP 的孔径差值。

3) 不同的变参数位置,孔径差值有所不同。当钻尖处于叠层界面中间时,因为钻削工况较差,这个位置下孔径差值较大;当钻尖刚接触下层铝合金或钻尖完全钻入下层铝合金后进行变参数时,孔径差值并没有明显区别。所有的变参数方案中孔径差值最大值为 0.008 8 mm,这一数值仅略大于定参数钻削中最小的孔径差值 0.007 4 mm。

3) 采用阶跃变参数方式,当钻尖完全钻入下层铝合金时进行参数变化的情况下,铝合金与 CFRP 孔径差值最小,为 0.004 5 mm,比定参数钻削中的最小孔径差值缩小了 39.2%,证明变参数钻削可以有效降低 CFRP/铝合金叠层钻削不同材料层的孔径差值,提高孔径精度。

#### 参考文献:

[1] 江东. 趣谈百年飞机材料之变迁 [J]. 大飞机, 2013(6): 97-

99.

- [2] 康仁科,杨国林,董志刚,等. 飞机装配中的先进制孔技术与装备 [J]. 航空制造技术, 2016(10): 16-24.
- [3] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册 第 3 卷 铝合金 镁合金 [M]. 北京:清华大学出版社,2013.
- [4] ZHANG Xuesong, CHEN Yougjun, HU Junling. Recent advances in the development of aerospace materials [J]. Composite Structures, 2018, 97:22-34.
- [5] ZITOUNE R, KRISHNARAJ V, COLLOMBET F, et al. Experimental and numerical analysis on drilling of carbon fibre reinforced plastic and aluminium stacks [J]. Composite Structures, 2016, 146:148-158.
- [6] ZITOUNE R K, VIJAYANCOLLOMBET, FRANCIS. Study of drilling of composite material and aluminium stack [J]. Composite Structures, 2010, 92:1246-1255.
- [7] D'orazio A, El Mehtedi M, FORCELESE A, et al. Tool wear and hole quality in drilling of CFRP/AA7075 stacks with DLC and nanocomposite TiAlN coated tools [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 30:582-592.
- [8] 栾皓童,王奔,徐勇增,等. CFRP/钛合金叠层构件制孔孔径分布规律研究 [J]. 工具技术, 2017, 51(2): 46-49.

收稿日期:2018-11-23

#### (上接第 32 页)

和缺陷半径为定值时,随着缺陷间距  $l_d$  的增加,剩余强度先增加后不变,出现临界值  $0.5l_s$ ;当缺陷间距  $l_d$  小于临界值  $0.5l_s$  时,缺陷间距对剩余强度影响较大,剩余强度与缺陷间距大致呈线性关系;当缺陷间距  $l_d$  大于临界值  $0.5l_s$  时,剩余强度保持不变,缺陷间距对剩余强度影响可以忽略不计;在缺陷半径  $R_1$ 、缺陷半径  $R_2$ 、缺陷深度  $d_2$ 、缺陷间距  $l_d$  为定值时,随着缺陷深度  $d_1$  的增大,剩余强度呈减小的趋势,发生强度破坏时内压较小,安全性降低。

### 3 结语

1) 靠近腐蚀缺陷区域,等效应力最大,最容易发生强度失效;远离腐蚀缺陷区域,不连续应力迅速衰减至薄膜应力。

2) 随着轴向位置的增加,双腐蚀缺陷管道等效应力在屈服极限与抗拉极限之间变化。

3) 在缺陷深度和缺陷半径为定值时,随着缺陷间距  $l_d$  的增加,剩余强度呈增加的趋势,大致呈对数关系;在缺陷深度、缺陷半径  $R_1$ 、缺陷间距  $l_d$  为定值时,随着缺陷半径  $R_2$  的增大,剩余强度呈增加的趋势,安全性增强。

4) 在缺陷深度和缺陷半径为定值时,随着缺陷间距  $l_d$  的增加,剩余强度先增加后不变,出现临界值  $0.5l_s$ ;在缺陷半径  $R_1$ 、缺陷半径  $R_2$ 、缺陷深度  $d_2$ 、缺陷间距  $l_d$  为定值时,随着缺陷深度  $d_1$  的增大,剩余强度呈减小的趋势,安全性降低。

#### 参考文献:

[1] 狄彦,帅健,王晓霖,等. 油气管道事故原因分析及分类方法研究 [J]. 中国安全科学学报, 2013, 44(7): 109-115.

- [2] 宋艾玲,梁光川,王文耀. 世界油气管道现状与发展趋势 [J]. 油气储运, 2006, 30(10): 63-62.
- [3] 李影,李国义,马文鑫. 我国油气管道建设现状及发展趋势 [J]. 中国西部科技, 2009, 22(14): 6-8.
- [4] 李睿. 输气管道内腐蚀缺陷剩余强度评估方法适应性分析与应用 [J]. 工业安全与环保, 2018, 44(8): 1-4.
- [5] 周红明,周闻青,茅振华,等. 海底油气管道剩余强度参数化建模方法研究 [J]. 机械强度, 2018, 40(2): 444-448.
- [6] 黄坤,吴佳丽,全恺,等. 含腐蚀缺陷油气管道评价技术研究进展 [J]. 表面技术, 2018, 47(1): 116-122.
- [7] 王莉莉,张寒,齐哈兵,等. 高温下含椭圆型缺陷管道局部应力分析 [J]. 石油化工高等学校学报, 2018, 31(1): 95-100.
- [8] 李增亮,陈猛. 外腐蚀管道剩余强度及剩余寿命的有限元分析 [J]. 润滑与密封, 2010, 35(10): 86-89.
- [9] 范晓勇,胡军,张晓峰,等. 不同钢级含腐蚀缺陷管道的剩余强度评价比较 [J]. 化工设备与管道, 2016, 53(5): 73-76.
- [10] 赵纪禹,王笑楠,李璐. 含双体积型腐蚀缺陷管道的有限元应力分析 [J]. 石油化工腐蚀与防护, 2017, 34(4): 37-40.
- [11] 曹学文,赵联祁,崔铭伟,等. 相互影响双腐蚀缺陷管道的剩余强度 [J]. 油气储运, 2015, 34(4): 354-355.
- [12] 崔铭伟,封子艳,韩建红,等. 不同尺寸双点蚀缺陷管道剩余强度分析 [J]. 石油矿场机械, 2015, 44(2): 14-21.
- [13] 张兆贵,崔铭伟. 双点蚀缺陷管道剩余强度计算方法 [J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(8): 759-765.
- [14] 崔铭伟,封子艳,由洋,等. 双点蚀缺陷管道剩余强度分析 [J]. 化工机械, 2016, 43(3): 365-372

收稿日期:2018-11-12