

碳纤维复合材料制件手工钻孔 加工技术

Manual Drilling Processing Technology for Carbon Fiber Reinforced Plastic Part

中航工业西飞国际国航总厂 谭雪峰



谭雪峰

工程师,就职于中航工业西飞国际国航总厂。从事飞机部件装配工艺技术工作,2002年毕业于哈尔滨工程大学,2009年开始主管波音747-8内襟翼转包项目的工艺工作,在工作期间积累了大量复合材料钻孔的实践经验。

碳纤维复合材料(CFRP)是以碳纤维为增强材料、树脂为基体的复合材料,因其具有比强度和比刚度高、抗疲劳性能好、耐温性能好等优点,在航空航天领域的应用日益广泛,并已迅速发展成为继铝、钢、钛之后的四大航空航天结构材料之一。

由于手工钻孔在刀具稳定性、进给速度稳定性等方面控制性较差,因此手工在碳纤维复合材料上制孔时更容易产生各种孔加工缺陷。这已成为使用复合材料制件按传统工艺方法进行装配的难点和关键点。

钻孔是碳纤维复合材料制件装配加工工艺中一个极为重要的工序。由于碳纤维复合材料具有硬度高、强度大、导热性差、各向异性、层间强度低等特性,属于难加工材料。在碳纤维复合材料上进行孔加工时,极易出现材料烧伤、孔表面质量差、分层、撕裂等缺陷,从而导致碳纤维复合材料制件报废。目前,国内外对在碳纤维复合材料上的钻孔技术已经开展了许多试验性研究,也得出了一些有益的经验 and 结论,但这些经验和结论通常都只适用于使用机械设备进行钻孔的工艺方法。对于制造企业而言,在碳纤维复合材料上使用先进的自动化设备进行钻孔操作,无疑会带来巨大的成本投入,因此较多企业仍然选择了成本较低、技术经验相对成熟

的手工钻孔方式。由于手工钻孔在刀具稳定性、进给速度稳定性等方面控制性较差,因此手工在碳纤维复合材料上制孔时更容易产生各种孔加工缺陷。这已成为使用复合材料制件按传统工艺方法进行装配的难点和关键点。

碳纤维复合材料手工钻孔的常见问题

碳纤维复合材料性能脆,强度高,碳纤维硬度高,导热能力差(导热系数仅为奥氏体不锈钢的1/5~1/10),各向异性,层间强度低,切削时在切削力的作用下容易产生分层、撕裂等缺陷,手工钻孔时尤其严重,加工质量难以保证。在碳纤维复合材料上制孔主要存在以下问题。

(1) 碳纤维硬度高,其硬度高达 HRC53~65 相当于高速钢的硬度 (HRC62~65),因此钻孔过程中的钻头磨损很快^[1]。

(2) 热导率小,钻孔时局部热量集中较大,容易产生材料烧伤缺陷。

(3) 钻孔时的切屑为粉尘状,污染环境,危害人体健康。同时,碳纤维切屑的导电性易使电气设备和电网发生短路。

(4) 层间强度低,在钻孔过程中易产生分层缺陷。

(5) 属于各向异性材料,钻孔处的应力集中较大,极易引起撕裂、毛边等缺陷。

问题分析和解决方案

1 钻头磨损问题

由于碳纤维材料的硬度与高速钢的硬度相当,因此不宜使用高速钢材料的刀具,可选用高硬度刀具材料(包括硬质合金、陶瓷、金刚石等)进行加工。对比说明:使用钻速为 6000r/min 的手枪钻,在厚度为 7mm 的碳纤维复合材料上手工钻制 $\phi 4.85\text{mm}$ 的孔时,高速钢钻头在钻制 3~4 个孔后出现进给困难现象,硬质合金钻头可以钻制 50~70 个孔,带有金刚石镀层(PCD 镀层)的硬质合金钻头可以钻制 100~120 个孔。

2 材料烧伤问题

一方面是由于刀具锋利度不够,造成手工钻孔时进给缓慢,延长了切削时间和刀具与材料之间的摩擦时间,从而产生了较多的热量,使材料局部位置和刀具的温度急剧上升,造成材料烧伤。因此应选用较锋利的刀具进行钻孔,以缩短摩擦时间减少热量。麻花型钻头由于在钻尖处横刃的存在,使得此处的切削情况极为恶劣,实际上横刃不产生切削作用,只是滚卷和粉碎纤维,不仅是轴向力的主要来源^[2],同时也是钻孔过程中热量的主要产生部位。因此如选用钻型麻花钻头进行钻孔,适当减小麻

花钻头的横刃大小,是增加刀具锋利度,改善钻孔质量的良好方法。美国 HP 刀具公司生产的一种直刃钻铰复合钻(也叫匕首钻),由于其螺旋角为 90° ,在钻尖处没有横刃存在,刀具与材料接触面积小,因此钻孔过程中所产生的热量少,能够有效避免材料烧伤现象。但这种刀具由于其排屑槽为直槽,不能有效排出金属切屑,因此仅适用于纯复合材料夹层上的钻孔,并不适合于复合材料与金属材料夹层。

另一方面由于碳纤维材料本身热传导性差,钻孔过程中所产生的热量不能及时散发而造成局部温度上升烧伤材料,因此可以在钻孔过程中加入冷却液,使钻孔过程中产生的热量及时被冷却液带走,从而避免产生局部热量集中而造成烧伤现象。

3 粉尘问题

针对在碳纤维复合材料上制孔会产生粉尘的问题,同样可以在钻孔过程中使用冷却液将钻孔时产生的粉尘带走,使粉尘不散布到空气中,从而避免对环境和人体产生危害。另外,还可以使用机器人钻孔,一方面使操作者远离有粉尘污染的环境;另一方面,还可以对钻孔过程进行监控,进一步确保钻孔质量。由于使用机器人钻孔的一次性投入成本和后续维修成本极高,使用局限性较大,且加工效率并不见得比传统工艺高,因此极少有企业选择使用机器人钻孔。

对于手工钻孔,在钻孔过程中添加冷却液很不方便,且碳纤维粉尘与冷却液混合后不便于清理,因此也可以使用带有吸尘附件的钻孔工具,在钻孔时与高负压吸尘器连接,通过高负压吸尘器所产生的大量空气快速流动,将

钻孔所产生的粉尘吸入到吸尘器中。另外,避免粉尘在空气中飘散。

4 分层问题

在钻孔过程中产生的分层是指钻孔过程中轴向力作用引起孔壁周围材料发生层间分离的现象。其评价指标为分层因子 F_d ,定义如下:

$$F_d = \frac{D_m}{D_o}$$

其中, D_m 为孔的层间破坏区域最大直径; D_o 为被加工孔的名义直径。

分层因子 F_d 与平均轴向力 F_z 之间存在着线性或分段线性的关系, F_z 越大, F_d 越大,分层也就越严重。而轴向力的大小又受钻孔过程中的进给速度、刀具钻速、钻头直径、切削刃几何参数、材料厚度、CFRP 材质等多种因素的影响。在钻头直径、切削刃几何参数、材料厚度、CFRP 材质一定的情况下,进给速度和刀具钻速将是影响轴向力大小的主要因素。

图 1 是 $\phi 4\text{mm}$ 硬质合金钻头钻削 3.5mm 厚复合材料时轴向力与转速 n 及进给量 i 的关系曲线^[3]。从图 1 可以看出,轴向力随着转速的增大而减小,这是因为较高的切削速度产生较多的切削热,使工件材料的强度和硬度下降,轴向力有所下降;轴向力随着进给量的增加而增大,这是由于随着进给量增加,切削层厚度增加,所以会使轴向力增大。同时可以看出进给量的影响远大于转速的影响,所以进给量是控制轴向力的一个关键因素。

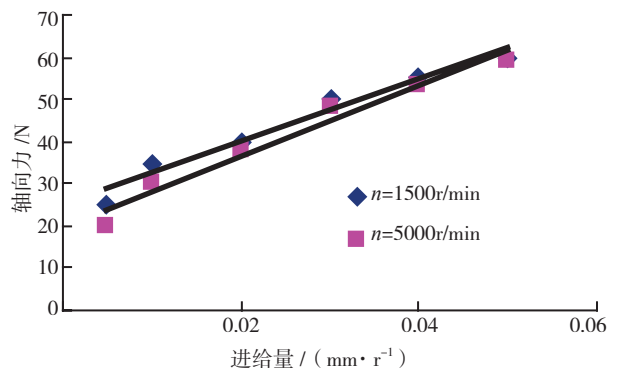


图1 转速和进给量对轴向力的影响

在手工钻孔时,进给速度完全由工人手工控制,因此非常不稳定,这也是造成手工钻孔孔质量不稳定的主要因素。因此,控制手工钻孔时的进给速度就成了在碳纤维复合材料上钻孔成败的关键。控制手工钻孔的进给速度可以在普通风钻上增加一个可调式液压系统,通过调整液压的压力来抵消工人的手工推力,从而控制刀具的进给速度。美国 Hi-shear 工具公司生产的一种高速钻(Lap Drill,图2)就是采用液压控制装置来控制刀具进给速度的工具。



图2 高速钻 (Lap Drill)

此外,刀具的钻速也影响着轴向力的大小。对于手工钻孔,当工具的钻速特别高时,人手将很难保证钻孔过程中工具和刀具的稳定性,钻孔质量反而会出现下滑的趋势,因此控制刀具钻速也很重要。对于手工钻孔而言,刀具的钻速完全取决于风动工具提供的钻速,而风动工具所能提供的转速又受风压、工具精度等方面的影响。因此改善风路条件、提高风压稳定性和选择质量较好的风动工具也对提高手工钻孔质量有所帮助。通过在7mm厚的碳纤维复合材料上手工使用1500r/min、3300r/min和6000r/min的风动工具钻制 $\phi 4.85\text{mm}$ 的孔进行对比试验表明,使用6000r/min的工具时能够更有效的减少分层缺陷的出现。

5 撕裂和毛边问题

撕裂和毛边缺陷是碳纤维复合材料加工中最常见的故障,且多发生在孔的出口一侧。撕裂和毛边的产

生都是由于钻头锋利度不够,复合材料纤维没有被完全切断造成的。因此提高切削刃的锋利性能够有效解决此类缺陷。在手工钻孔中,一般采用气相沉积金刚石镀膜(CVD)或聚晶金刚石镀膜(PCD)硬质合金刀具进行切削加工。金刚石刀具具有极锋利的切削刃,可以在进给量非常小的情况下进行良好的切削。同时,锋利的切削刃也使钻削力变小,加上金刚石的摩擦系数小,可以进一步降低切削力,从而降低轴向力,防止各种缺陷的发生。由于目前国内罕有企业掌握金刚石涂层技术和拥有相应设备,因此在实践中大多使用氮铝钛涂层的硬质合金刀具进行孔加工。实践对比,氮铝钛涂层刀具的锋利度比金刚石涂层稍差,且使用寿命也较短。因此为确保孔质量,需根据夹层厚度规定钻孔数量在孔的出口处垫上胶木块,确保钻削过程中碳纤维纤维不偏倒,这也是减少撕裂和毛边的有效办法。

手工钻孔时提高孔质量的其他方法

与机械自动钻孔相比,手工钻孔有许多的不确定因素和人为影响,因此提高手工钻孔质量的关键在于减少或减小这些不确定因素和人为因素的影响,从而达到一个平稳钻削的过程。为获得高质量的孔,采用合理的工艺措施是必要的。

1 采用分步钻孔的工艺方法

分步钻孔的方法就是在钻孔时并不一次将孔钻制到终孔,而是钻孔后采用扩孔或铰孔的方式将孔加工到终孔的方法。采用分步钻孔的方法能够减少钻孔过程中的吃刀量,从而降低轴向力,减小缺陷产生的几率。吃刀量的减少还能够减少刀具的磨损,提高刀具使用寿命。而且钻孔后采用铰孔,能够有效降低孔表面的粗糙度和提高孔的圆度。

2 使用垂直器或钻模板

手工钻孔过程中,如材料夹层厚度较厚时,手工钻孔的稳定性进一步降低,将大大增加加工缺陷的产生。因此,在夹层较厚的情况下,手工钻孔应使用垂直器或与钻模板配合钻孔,以起到稳定刀具的作用,从而增加钻孔过程中的稳定性。

3 选择正确的钻孔方向

当钻孔夹层中既有碳纤维复合材料又有金属材料时,选择合适的钻孔方向也是影响孔质量的重要因素。通常情况下,在复合材料和金属材料夹层上钻孔时,应选择从金属材料向复合材料钻孔,以避免排屑过程中金属切屑损坏复合材料上的孔。如结构空间限制,只能从复合材料向金属零件制孔,那么可以选择加大钻头的排屑槽尺寸,以确保刀具良好的排屑能力,减小金属切屑损伤复合材料的几率;或选用左旋铰刀,将金属切屑向刀具出口方向推,以保证最终孔的质量。

结束语

碳纤维复合材料是一种新兴的材料,国内对在碳纤维复合材料上的钻削加工技术研究仍处于起步阶段。本文通过对手工在碳纤维复合材料上的钻孔技术初步研究,得出以下结论。

- (1)手工钻孔时应选择较锋利的刀具。
- (2)应选择钻速较高、稳定性较好的工具。
- (3)应选择合适的工艺方法以降低手工钻孔时的不稳定性。

参考文献

- [1] 张厚江,陈五一,陈鼎昌.碳纤维复合材料的钻削加工.新技术新工艺,1998(5):16-18.
- [2] 于晓江,曹增强,蒋红宇,等.碳纤维增强复合材料结构钻削工艺.航空制造技术,2010(5):66-70.
- [3] 孙路华,金燕鸣,钟文旺.碳纤维复合材料高速钻削力的研究.纤维复合材料,2005(4):30-33.

(责编 三丰)