

碳纤维复合材料导弹舱段高效制孔方法研究

叶 鹰 李红卫 龚志强 师智斌

(北京星航机电装备有限公司, 北京 100074)



摘要: 针对导弹中的复合材料舱段钻削加工的实际生产难题, 建立了复合材料钻削加工的数学模型, 并在切削参数、切削刀具及加工方法等方面提出了一系列提高复合材料钻削精度和效率的工艺方法, 解决了复合材料钻削加工难题。

关键词: 碳纤维复合材料; 钻削加工; 刀具

Carbon Fiber Composite Materials Missile Compartment Efficiently Holing Method Research

Ye Ying Li Hongwei Gong Zhiqiang Shi Zhibin

(Beijing Xinghang Electromechanical Equipment Co. Ltd., Beijing 100074)

Abstract: This paper aims at the actual production difficulty in composite materials missile compartment. The mathematical model of drilling process is established, and a series of process method on the cutting parameters, cutting tool and machining methods is put forward to improve the drilling accuracy and efficiency and solve the difficulty in composite materials drilling processing.

Key words: composite materials; drilling; cutting tools

1 引言

碳纤维复合材料(CFRP)由于碳纤维的优良力学性能,使其保持了基体耐侵蚀、抗热冲击、耐高温性能的同时又具有高比强度、高比刚度、抗热震、抗高温等优良性能。因其性能优越,碳纤维复合材料在航空航天、武器系统(导弹等)等领域得以广泛应用。美国空军最新F-22“猛禽”战斗机中复合材料占35%,我国导弹武器装备中诸如设备舱、雷达舱等舱段均采用了碳纤维复合材料。

钻削加工是碳纤维复合材料的主要切削加工形式,占总切削加工量的50%以上。复合材料在进行钻削加工时在钻削力作用下易在出口处发生孔壁周围材料分层、孔口撕裂等缺陷。同时其钻削过程是一个基体破坏和纤维断裂相互交织的复杂过程,在此过程中碳纤维作为切削硬质点连续磨耗刀具,造成刀具磨

损严重,刀具耐用度低。

综上所述,碳纤维复合材料的钻削加工难题已成为制约复合材料应用和导弹武器生产的瓶颈。本文结合碳纤维复合材料导弹舱段的制孔加工,建立了钻削加工数学模型,总结复合材料实际钻削加工经验,从切削参数、切削刀具及加工方法等方面提出了一系列方法,提高了复合材料钻削加工的精度和效率。

2 碳纤维复合材料钻削加工数学模型

钻削力是钻削加工过程中造成孔壁周围材料分层、孔出口撕裂的最主要原因,钻削力的大小直接影响着钻孔质量的优劣。通过开展碳纤维正交切削试验,采用MATLAB对切削试验数据进行线性回归分析,获得了硬质合金钻头加工碳纤维复合材料的数学模型。

$$\begin{aligned}
 F &= 2298.472 \cdot n^{-0.30} \cdot f_r^{0.12} = 2298.472 \cdot n^{-0.30} \cdot \left(\frac{f}{n}\right)^{0.12} \\
 &= 2298.472 \cdot n^{-0.42} \cdot f^{0.12} \\
 L &= -28.5 \cdot n^{-0.30} \cdot f_r^{0.12} + 3.485 = -28.5 \cdot n^{-0.30} \cdot \left(\frac{f}{n}\right)^{0.12} + 3.485 \\
 &= -28.5 \cdot n^{-0.42} \cdot f^{0.12} + 3.485 \\
 T &= 1.225 \times 10^{-3} \cdot d_0^{3.8} \cdot f_r^{-2.2} \cdot v_c^{-2} = 1.225 \times 10^{-3} \cdot d_0^{3.8} \cdot \left(\frac{f}{n}\right)^{-2.2} \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_0 \cdot n}{1000}\right)^{-2} \\
 &= 124.24 \cdot d_0^{-0.2} \cdot f^{-2.2} \cdot n^{0.2}
 \end{aligned}$$

式中： F ——轴向力，N； L ——撕裂长度，mm； T ——刀具耐用度，min； f_r ——单转进给量，mm/r； f ——进给量，mm/min； n ——主轴转速，r/min； v_c ——切削速度，m/min； d_0 ——钻孔直径，mm。

分析钻削加工模型可知：为实现降低钻削轴向力，抑制缺陷产生，提高刀具耐用度的目的，在钻削加工时，可采用降低主轴进给速度，提高主轴转速的方法。鉴于此，在实际生产中技术人员在切削参数、刀具参数及加工方法上采取了一系列的方法，实现了碳纤维复合材料的高效制孔加工。

3 复合材料高效钻削加工的经验方法

3.1 合理选择切削参数提高钻削效率

切削速度、进给量和吃刀量是切削过程中不可缺少的因素，被称为切削三要素。合理选择切削三要素可以有效地提高加工效率、加工质量及刀具使用寿命。

3.1.1 切削速度的选择

切削速度是切削刃选定点相对于工件的主运动的瞬时速度。切削速度的计算公式为：

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_0 \cdot n}{1000}$$

通过钻削加工数学模型可知，为降低钻削轴向力，抑制缺陷产生，提高刀具耐用度，应尽量提高主轴转速，从而增大切削速度。

3.1.2 进给量的选择

进给量是刀具在进给方向上相对于工件的位移量。通过钻削加工数学模型可知，进给量对轴向力、孔出口撕裂长度和刀具耐用度有着至关重要的影响。较小的进给速度可以有效地减小钻削加工时的轴向力，抑制加工缺陷的产生，提高刀具的耐用度，然而

较小的进给量会严重影响加工效率。考虑到轴向力是引起复合材料钻孔加工出现出口缺陷的主要原因，因此在加工时采用如图1所示的进给曲线。在入口和出口时采用小进给量，中间采用较高的进给量。入口处采用小进给量有助于提高孔的定位精度，出口处采用小进给量可以减小轴向力，最大限度地减小孔加工时的分层、劈裂及崩块缺陷。中间由于壁厚较厚，加工部位刚性好，可以采用较大的进给量以提高加工效率。

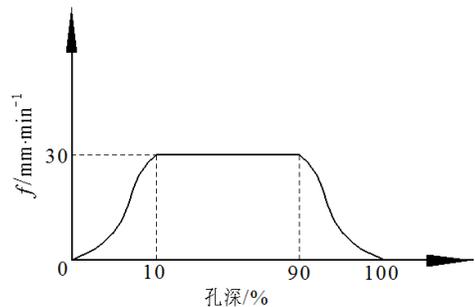


图1 复合材料钻削加工进给量曲线

3.1.3 吃刀量的选择

吃刀量是在垂直于进给运动方向上测量的主切削刃切入工件的深度。对于钻削加工，其吃刀量等于刀具的半径，且吃刀量对轴向力和刀具耐用度基本没有影响，因此在此不予讨论。

3.2 改进切削刀具提高钻削效率

切削刀具的材料及刀具的几何参数对切削加工的效率及质量也有着十分重大的影响。通过研究刀具材料及刀具几何参数来提高钻削加工的效率，并且自行改制了“三尖两刃”的钻头，大幅提高了刀具的使用寿命及钻孔效率。

3.2.1 刀具材料的改进

在复合材料导弹舱段钻削加工时，选择不同材料

的刀具进行了广泛的试验。得出了对于碳素工具钢、高速工具钢、硬质合金、金刚石等材质的刀具的制孔数与磨损程度之间的关系，如图2所示。

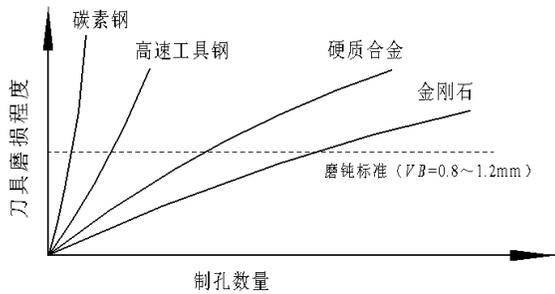


图2 制孔数与磨损程度关系曲线

当刀具磨损量超过磨钝标准 ($VB=0.8\sim 1.2mm$) 时，刀具磨损严重，无法进行复合材料加工，需进行刀具刃磨方可使用。通过曲线可知，对于碳素工具钢

和高速工具钢材质的刀具，由于刀具的材料硬度不够，刀具磨损较快，几乎无法使用。硬质合金材质的钻头一次可以完成140~160个孔的加工，金刚石刀具可完成500~600个孔的加工。但是一方面金刚石刀具成本要比硬质合金刀具高的多，另一方面金刚石刀具的刃磨加工比硬质合金刀具磨困难的多。

综合成本和刀具刃磨的难易程度等多方面因素，在实际生产中主要采用硬质合金材质的刀具进行碳纤维复合材料的加工。

3.2.2 刀具几何参数的改进

经过近十年的针对导弹复合材料舱段的钻削加工研究，总结出复合材料钻削加工的刀具几何参数，如表1所示。

表1 复合材料切削加工刀具参数

参数名称	参数值	作用
前角	$12^{\circ}\sim 15^{\circ}$	适当增大前角，可以加大切割作用，减少切削热，提高刀具寿命。
后角	$6^{\circ}\sim 8^{\circ}$	适当增大后角，保证切削轻快，减少摩擦和切削热。
主偏角	$75^{\circ}\sim 90^{\circ}$ $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$	可以减小径向力和震动，提高刀具强度，改善刀具散热条件。
刃偏角	$0^{\circ}\sim 5^{\circ}$	适当减小刃偏角可减少加工中的冲击力，保护刀具强度。
刃口形状	锐角	保持刃口锋利。
刀尖形状	圆弧刀 ($r=0.2\sim 0.5mm$) 修光刀 ($c=1\sim 1.5mm$)	提高刀具形状和耐用度。

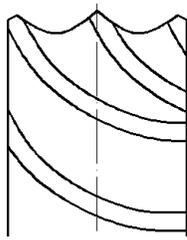


图3 “三尖两刃”钻头

同时通过多年摸索，我厂技术人员通过刀具改制的方法制做了如图3所示的“三尖两刃”钻头。利用此钻头在制孔时，由于将钻削在一定程度上转化为了铣削，大幅降低了切削轴向力，同时中间刀尖比其余两刀尖略高，能对孔进行精确定位，从而提高了钻削加工的加工精度和质量，但是此方法只适用于较大直径 ($\geq \Phi 10mm$) 的钻头。

3.3 采用合理加工方法提高钻削加工效率

在进行复合材料钻削加工时由于复合材料的层间强度低，在轴向力作用下易在出口处造成复合材料

分层、劈裂、崩块等缺陷。在实际生产中通过改进加工方法减少出现加工缺陷的概率。

3.3.1 垫块补强法

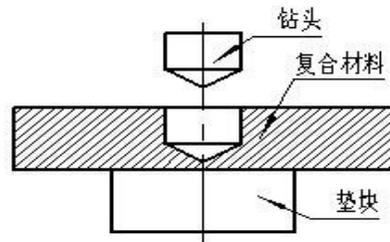


图4 垫块补强法示意图

垫块补强法是通过在孔的出口处加装铝合金或者胶带类的垫块来提高钻削加工刀具出口处的刚度，进而避免出现出口分层、崩块、劈裂缺陷的产生。如图4所示。

这种方法的优点是能够在大幅减小加工缺陷的发生，缺点是垫块与复合材料的安装固定困难，受限

于加工部位特点及操作空间,适用范围较小,使用垫块作为耗材造成材料的浪费。

3.3.2 双向加工法

双向加工法时将出刀位置由复合材料的一侧转移到材料中部,由于中部复合材料的层间强度比边缘

处的层间刚度高,因此在加工时首先从一侧进行加工孔深的60%,然后从另一侧进行钻孔加工,从而将出刀位置转移到材料中部,提高了出刀处的材料强度,降低了加工缺陷的几率。其加工方法如图5所示。

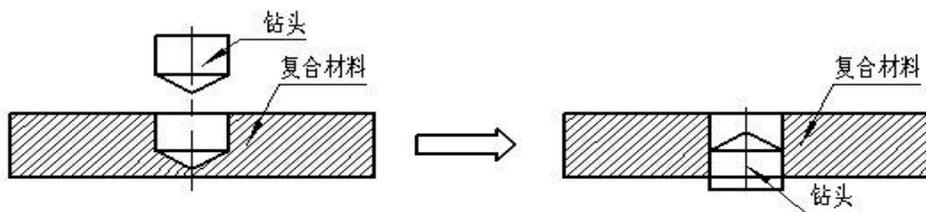


图5 双向加工法示意图

此方法虽然能够有效抑制加工缺陷的产生,但受限于零件特点、加工环境等因素,适用范围较小,而且由于一个孔分两次加工完成,加工质量难以保证。

4 结束语

本文建立了复合材料钻削加工的数学模型,并结合实际生产从切削参数、切削刀具及加工方法三方面提出了一系列行之有效的改善复合材料钻削加工质量,提高复合材料制孔效率的方法,解决了复合材料的制孔难题,大幅提高了加工效率。

对于采用垫块补强法和双向加工法以改善复合材料钻削加工质量时,受限于零部件形状、工作空间及安装条件,适用范围较小,在实际生产中主要是采用改进切削刀具及切削参数的方法来提高加工效率及质量。

同时,通过现有理论、钻削数学模型和实际加工经验可知,提高主轴的转速能够很大程度上减小轴向力并大幅度地提高刀具的耐用度。除此之外磨削加工的切削力远小于钻削及铣削加工,能够有效的减少钻削加工缺陷的发生。因此,对于复合材料加工,采用高速加工及磨削加工是行之有效的加工方法和研究

方向。

参考文献

- 1 孙路华,全燕鸣,钟文旺.碳纤维复合材料高速钻削力的研究[J].航天制造技术,2005(3):30~32
- 2 于晓江,曹增强,蒋红宇,等.碳纤维复合材料与钛合金结构制孔工艺研究[J].航空制造技术,2011(3):95~97
- 3 张厚江,陈五一,陈鼎昌,等.碳纤维复合材料钻削孔分层缺陷的研究[J].中国机械工程,2003,14(22):1978~1980
- 4 赵军.二十一世纪复合材料市场前景广阔[J].国际学术动态,2005(2):33~35
- 5 鲍永杰.碳纤维增强复合材料钻削的若干研究[D].大连理工大学,2006
- 6 张厚江,樊锐,陈五一.复合材料高速钻削试验台的研制[J].新工艺新技术新设备,1998(5):26~27
- 7 Doug Smock.波音787:复合材料革命的代表[J].工业设计,2007(9):46~48
- 8 罗鸿涛,陈鼎昌.难加工材料切削加工学[M].北京:北京航空航天大学出版社,1988
- 9 韩荣第,于启勋.难加工材料切削加工[M].北京:机械工业出版社,1994
- 10 孙路华,全燕鸣,钟文旺.碳纤维复合材料高速钻削力的研究[J].航天制造技术,2005(3):9~12