

# 旋转超声钻削碳纤维复合材料 钻削力和扭矩的研究\*

袁松梅<sup>1,2</sup>, 宋 衡<sup>1,2</sup>, 路宜霖<sup>1,2</sup>

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191;

2. 北京市高效绿色数控加工工艺及装备工程技术研究中心, 北京 100191)

[摘要] 针对碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)加工过程中的问题,对金刚石套料钻旋转超声钻削 CFRP-T700 型复合材料展开了研究。研究发现,钻削力随主轴转速的增加具有减小的趋势,而扭矩则随着主轴转速的增加,呈现增大的趋势;与传统加工相比,旋转超声振动钻削可降低切削力及扭矩达 56.6% 和 39.1%,有效抑制加工缺陷的产生。初步建立了切削力和扭矩之间的数学模型,并通过试验对切削力和扭矩之间的比例常数  $k$  加以验证。研究结果表明,旋转超声钻削 CFRP 在降低切削力和扭矩方面有较大优势。

关键词: 碳纤维增强树脂基复合材料; 超声振动钻削; 金刚石套料钻; 钻削力; 扭矩; 加工参数

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.16.096



袁松梅

教授,博士研究生导师,主要研究方向为先进制造(超声加工、超高压水射流加工、复合材料加工、绿色加工)、医工结合、智能微小型执行器等。发表论文 90 余篇,其中 SCI 收录论文 16 篇,已授权发明专利 22 项,申请国际 PCT 专利 1 项。

碳纤维作为新型增强材料,是一种由片状石墨微晶等有机纤维沿纤维轴向堆砌而成,经碳化及石墨化处理而得到的微晶石墨材料。其抗拉强度约为 2000~7000MPa,拉伸模量约为 200~700GPa,密度仅为 1.5~2.0g/cm<sup>3</sup>,具有较好的耐腐蚀性。碳纤维增强树脂基复合材料(Carbon fiber reinforced plastics, CFRP)是由树脂基体与碳纤维材料组合而成,具有比强度高、比模量高、耐腐蚀性好、耐疲劳、阻尼减震性好等优势,在航空航天、建筑、机械、汽车、能源、化工、造船、生物工程、医疗器械和体育器材等领域的应用日益广泛<sup>[1]</sup>。世界各国的战机对 CFRP 使用尤为突出,法国“阵风”战机 CFRP 用量达到 24%,美国空军 F-22“猛禽”战机 CFRP 材料使用量达到了 35%,英国战机“台风”(EP2000)CFRP 用量约为 40%。

当前,飞机装配连接通常有机械连接、胶接和机械连接/胶接混杂连接 3 种形式。由于机械连接具有抗疲劳性良好、便于检测和拆装维护等优点,以铆钉和螺栓为代表的机械连接已成为航空制造工业中最主要的结构件连接方式,因此复合材料孔加工技术在航空航天等领域起着至关重要的作用。由于 CFRP 材料的层间结合强度低、各向异性、材料硬度高、导热性差等特性,在制孔过程中易产生毛刺、纤维撕裂、孔壁分层等加工缺陷,严重影响了连接结构的强度和疲劳寿命。为解决 CFRP 孔加工过程中存在的种种问题,国内外学者展开了深入的研究。

2009 年,Rawat 等<sup>[2]</sup>研究了硬质合金刀具钻削 CFRP 时的失效形式,发现钻头主切削刃后刀面磨损是最主要的磨损形式,并揭示了刀

\* 基金项目: 国家 973 计划项目 (2014CB046504)。

具磨损与切削力及表面质量的关系。2011年, Liu等<sup>[3]</sup>对CFRP型复合材料旋转超声椭圆振动加工展开了可行性研究,发现与常规钻削相比,旋转超声椭圆振动加工的加工精度与加工质量更好,并可有效降低刀具磨损、减少加工缺陷。2011年,贺虎<sup>[4]</sup>采用整体硬质合金钻头和钎焊金刚石套料钻进行对比,分析了钻削参数对钻削力的影响,通过对比钻削力及刀具磨损情况得出套料钻更适合加工CFRP。2011年, Lazar等<sup>[5]</sup>研究了锥面直槽钻、八面钻、普通双面钻钻削CFRP,研究表明钻尖形式对钻削力和扭矩有较大的影响,其中八面钻的钻削力与扭矩最小,普通双面钻钻削力与扭矩最大。2012年, Cong等<sup>[6]</sup>研究了使用金刚石套料钻超声振动钻削CFRP,取得了较好的加工效果。同年,天津大学的学者们研究分析了超声振动钻孔和铣槽崩边断裂机理,提出分别采用增加辅助支撑和改善刀具路径方法,可有效解决钻孔和铣槽崩边的问题<sup>[7-8]</sup>。2014年, Geng等<sup>[9]</sup>对比旋转超声钻削与常规钻削CFRP复合材料的加工效果,发现旋转超声加工可有效降低钻削力并提高刀具寿命。2016年, Ning等<sup>[10]</sup>通过切削试验全面对比了传统套料钻磨削制孔和超声振动钻削的加工效果,指出超声钻削可以有效降低切削力和扭矩,并获得更好的加工质量与加工精度,加工效率也更高。

现阶段的研究多集中在刀具的优选及加工工艺的优化上,有关旋转超声钻削力及扭矩与切削参数、刀具参数之间关系缺乏系统化、理论化的研究。为改善CFRP的制孔过程并有效减少制孔过程中的加工缺陷,本文将旋转超声振动系统应用到传统的金刚石套料钻制孔工艺中,采用课题组自主研发出的小型化旋转超声振动系统结合机床平台

进行了CFRP制孔试验,并结合相关试验分析各加工参数对制孔过程中钻削力及扭矩的影响情况。结果表明:相比于传统的金刚石套料钻加工,旋转超声振动钻削CFRP在降低钻削力和扭矩、提高进出口质量方面具有显著的效果。

## 超声振动制孔机理

### 1 CFRP钻削加工缺陷形成原因

CFRP孔加工的过程中,由于树脂基体与碳纤维增强材料的力学性能差异巨大,导致大部分的载荷由碳纤维承担,材料去除过程大致经历基体损伤、开裂、碳纤维与基体脱离、碳纤维断裂等过程。根据断裂力学,按裂纹的受力与断裂特性,可分为3种裂纹形式:张开型破坏(I型)、滑开型破坏(II型)以及撕开型破坏(III型)<sup>[11]</sup>,如图1所示。

在钻削末段,随着钻头不断接近钻孔出口,用来抵抗轴向钻削力的CFRP厚度变小,复合材料的刚度降低,容易产生较大的变形,在CFRP层间引起较大垂直应力,并在孔边缘处产生裂纹,当载荷超过层间结合强度时,裂纹扩展,并在层间平面上传播,造成I型裂纹。在钻孔出口处,较大的扭矩会对工件外层材料产生较大的剪切应力,当该剪切应力超过材料层间结合强度,就会引起II型裂纹,最终形成撕裂。钻削过程中,若钻头不能全部切断纤维或切削力不能有效破坏树脂基体,CFRP产生开裂并沿着纤维铺层方向扩展,引起III型裂纹破坏,导致分层的产生。因此,

有效控制钻削过程中的钻削力及扭矩对减少CFRP孔加工缺陷至关重要。

### 2 旋转超声加工材料去除机理

采用金刚石磨粒刀具的旋转超声加工材料去除的机理是基于赫兹接触理论和压入深度理论。根据该理论可知材料的去除过程<sup>[12]</sup>,如图2<sup>[13]</sup>所示。

(1) 金刚石磨粒压入工件,产生一个塑性变形区;

(2) 金刚石磨粒继续压入,塑性变形区的正下方产生中央裂纹;

(3) 磨粒压入深度进一步增大,中央裂纹扩张;

(4) 金刚石磨粒随着振动周期脱离工件表面,纵向裂纹闭合;

(5) 纵向裂纹周期性打开与闭合导致横向裂纹产生;

(6) 横向裂纹不断扩展,材料最终脱离工件表面,形成切屑。

旋转超声振动钻削技术是一种新兴的复合加工技术,在制孔过程中刀具运动轨迹由轴向进给运动、主轴回转运动及高频垂直振动叠加而成,充分利用了超声振动加工技术中的锤击、磨抛以及划擦等机理<sup>[14]</sup>,如图3<sup>[15]</sup>所示。这种加工方式可有效降低钻削硬脆材料时的钻削力,降低了材料的加工难度,并可显著提升刀具耐用度、降低刀具成本。

## 试验方法

试验选用T700型CFRP,厚度为6mm,材料参数:密度 $1.8\text{g}/\text{cm}^3$ ,泊松比0.30,弹性模量53GPa,断裂

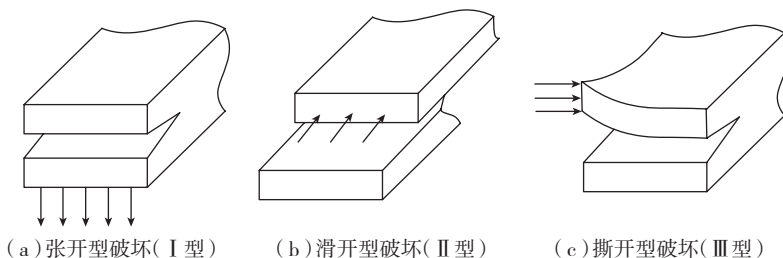


图1 3种裂纹产生形式  
Fig.1 Three forms of breakages

韧度  $11.5\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , 硬度 HV0.6。试验中所用机床为沈阳机床厂生产的 VMC0850B 立式加工中心, 机床主轴的最大转速为  $6000\text{r}/\text{min}$ 。采用 Kistler-9257B 型台式测力仪实时测量钻削力。超声振动加工装置采用北京航空航天大学自主研发的旋转超声加工系统, 该系统的频率和功率连续可调, 在工作前可通过手动调整功率及频率寻找装置与刀具的最佳匹配参数。

试验采用郑州建帮电气设备有限公司生产的系列金刚石套料钻, 刀具形状如图 4 所示, 金刚石浓度为 100%, 粒度为 80/100 目。为探究各加工参数对制孔过程中钻削力及扭矩的影响, 本文设计两组试验方案, 试验(1), 使用金刚石套料钻, 研究主轴转速及进给量对钻削力及扭矩的影响规律, 试验参数如表 1 所示; 试验(2), 研究套料钻几何参数对钻削力及扭矩的影响规律, 试验参数如表 2 所示。

### 试验结果与讨论

在实际的加工过程中, 每个孔的钻削过程都包括钻入阶段、中间稳定钻削阶段和钻出阶段, 如图 5 所示。取稳定钻削阶段钻削力和扭矩的平均值作为本文所使用的钻削力和扭矩的数值。

#### 1 加工参数对钻削力及扭矩影响

试验(1), 首先研究旋转振动加工中, 主轴转速及进给量对钻削力及扭矩的影响规律。本次试验采用大径为  $8\text{mm}$ , 小径为  $6.4\text{mm}$  的套料钻钻削 CFRP, 测得其钻削力如图 6 所示, 钻削扭矩如图 7 所示。

由图 6 和图 7 可知, 在相同的进给量下, 钻削力  $F$  随主轴转速的增加, 具有减小的趋势, 而扭矩则随着主轴转速的增加, 呈现增大的趋势。这是由于每转进给量  $f$  指的是刀具每旋转一周沿加工方向所前进的距离, 当进给量保持不变时, 随着

主轴转速的增加, 刀具进给速度相应增大。旋转超声钻削过程中, 刀具前进相同的距离, 前端金刚石磨粒对材料的锤击次数减少, 旋转超声加工的锤击作用削弱。随着磨粒

对 CFRP 材料锤击作用的减弱, 金刚石磨粒对材料的磨抛作用愈加明显, 磨粒所受到的轴向力减小、切向力增大, 而所有磨粒切向力与该磨粒到刀具回转中心距离的乘积即为

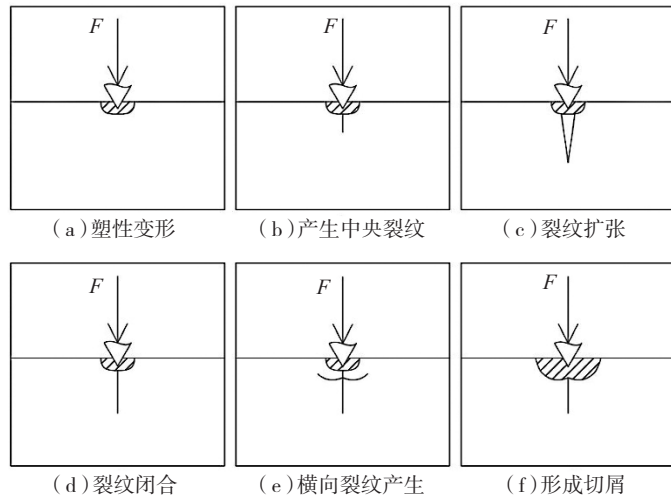


图2 超声加工材料去除过程

Fig.2 Material removal process of ultrasonic machining

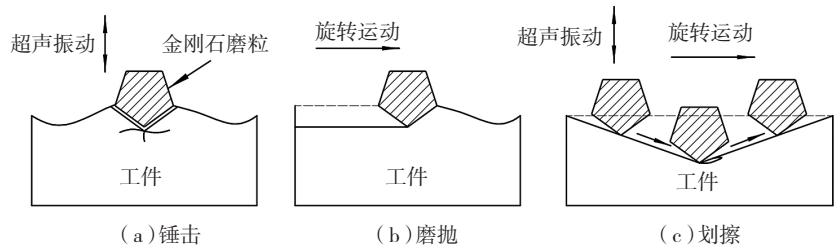
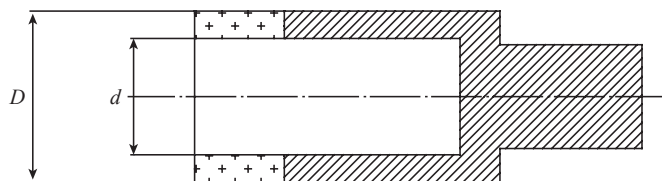


图3 旋转超声加工材料去除机理

Fig.3 Material removal mechanism of rotary ultrasonic machining



(a) 套料钻实物图



(b) 套料钻设计图

图4 试验所用套料钻

Fig.4 Trepanning core tool

刀具所受到的扭矩,因此在旋转超声钻削过程中的扭矩随主轴转速的增加呈上升的趋势,轴向钻削力呈现出下降的趋势。

在主轴转速不变的情况下,进给量增大,钻削力及扭矩都随之增大。这是由于当主轴转速不变时,进给量  $f$  增大,材料去除率相应增大,刀具每转去除材料所需做的功也随之增加,因此钻削力及扭矩同时增加。

为验证旋转超声振动加工在钻削 CFRP 材料上所具有的优势,设计试验与常规加工相对比。由图 8 可知,当进给量为 0.01mm/r 时,主轴转速由 2000r/min 提升到 4000r/min,相比于常规加工,使用旋转超声振动加工技术,可以分别降低切削力 54.6%、57.2%、58.0%,降低扭矩 39.4%、38.8%、39.1%,切削力平均降低了 56.6%,扭矩平均降低了 39.1%。由图 9 可知,在进给量为 0.01mm/r 时,主轴转速由 2000r/min 增大到 4000r/min,旋转超声钻削 CFRP 的出口质量相对稳定,无明显毛刺、撕裂等加工缺陷,而传统钻削下的出口质量随着主轴转速的增大,撕裂、毛刺等加工缺陷的面积及数量也相应增加,因此使用旋转超声加工出口质量好于常规的套料钻加工。

## 2 刀具参数对钻削力及扭矩影响

在使用金刚石套料钻旋转超声钻削 CFRP 复合材料时,钻头上的金刚石磨粒周期性地锤击、划擦、磨抛工件材料,每个磨粒受到的力可分解为沿刀具进给方向的轴向力及与磨粒线速度方向相反的切向力,如图 10 所示。由于在加工过程中套料钻侧壁磨粒仅对孔壁起到划擦修正的作用,所受到的力与套料钻端面磨粒相比可忽略不计。因此,可认为加工过程中刀具端面所有磨粒所受到的轴向力的合力,即为刀具加工过程中的切削力,而刀具端面所有磨粒所受到的切向力与该磨粒到刀具回转中心距离的乘积,即为刀具所受到的扭

矩。

假设刀具为理想刀具,磨粒在刀具上的排布均匀,高度一致,则可认

为套料钻钻削过程中的轴向力由端面磨粒平均承担,即刀具端面所受压力处处相同。假设相同的切削参数

表1 试验(1)加工参数

参数	数值
主轴转速 $S/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	2000, 3000, 4000
每转进给量 $f/(\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$	0.01, 0.02
刀具大径 $D/\text{mm}$	8
刀具小径 $d/\text{mm}$	6.4

表2 试验(2)加工参数

参数	数值
主轴转速 $S/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	3000
每转进给量 $f/(\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$	0.01
刀具大径 $D/\text{mm}$	12, 10
刀具壁厚 $h/\text{mm}$	0.8, 1.2, 1.5

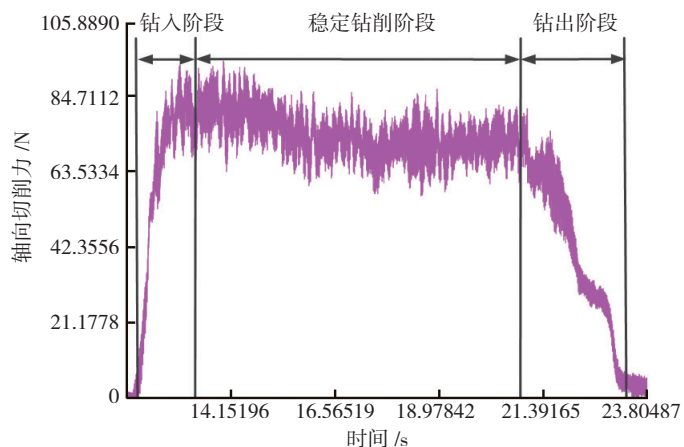


图5 钻削过程  
Fig.5 Drilling process

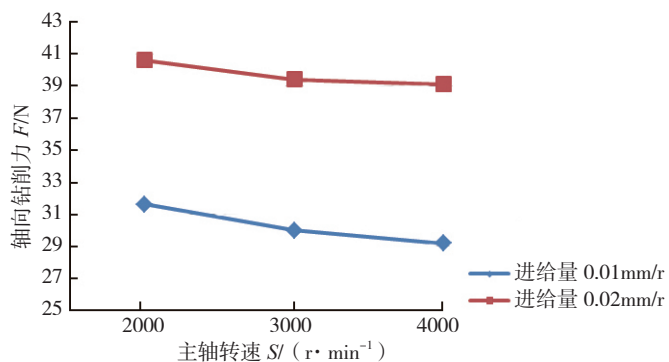


图6 轴向钻削力与加工参数关系

Fig.6 Relationship between cutting force and processing parameters

下,刀具端面每个磨粒所受到的切向力与轴向力存在一个固定的比值 $k$ ,可以得出在刀具端面单位面积微元轴向切削力和扭矩的关系:

$$dM = k \frac{F}{A} x ds \quad (1)$$

式中,  $M$  为套料钻钻削过程中所受到的扭矩,  $N \cdot mm$ ,  $dM$  为扭矩微元;

$F$  为套料钻所受轴向力,  $N$ ;  $A$  为套料钻端面面积,  $mm^2$ ;  $ds$  为套料钻端面面积微元;  $x$  为该面积微元到套料钻轴心距离,  $mm$ 。

同时对公式(1)两边进行积分可得:

$$M = \int_D k \frac{F}{A} x ds = \int_r^R k \frac{F}{A} x \cdot 2\pi x dx = \frac{2kF(R^2 + r^2 + Rr)}{3(R + r)} \quad (2)$$

式中,  $M$  为套料钻所受扭矩,  $N \cdot mm$ ;  $R$  为金刚石套料钻大径直径,  $mm$ ;  $r$  为金刚石套料钻小径直径,  $mm$ 。

通过公式(2)可以得到:

$$k = \frac{3M(R + r)}{2F(R^2 + r^2 + Rr)} \quad (3)$$

为验证假设的正确性,特设计试验对公式(3)进行检验。设计试验在主轴转速为 3000r/min,进给量为 0.01mm 时,采用标称大径为 12mm,小径分别为 10.4mm、10mm、9.6mm 的套料钻各进行 6 次试验,计算  $k$  值,再用大径 10mm 的刀具检验  $k$  值的稳定性,大径 12mm 套料钻试验结果如图 11 所示,求出  $k$  的平均数为 0.4975,标准差为 0.03181。

使用大径为 10mm,小径分别为 8.4mm、8mm、7.6mm 的系列刀具各重复 6 次试验,通过实测的切削力及扭矩数据及刀具尺寸计算  $k$  值,与大径为 12mm 系列刀具所得  $k$  值平均值 0.4975 对比,大径 10mm 类型刀具的  $k$  值及偏差  $\omega$ ,如图 12 所示。 $k$  的偏差计算公式为:

$$\omega = \frac{k - 0.4975}{0.4975} \times 100\% \quad (4)$$

试验结果表明,与大径 12mm 刀具的平均  $k$  值 0.4975 相比,由大径 10mm 刀具计算所得  $k$  值平均偏差为 8.3%,最大偏差为 15.1%, $k$  值平均值为 0.5145,与大径 12mm 刀具平均  $k$  值相差 3.42%。可认为在相同的切削参数下,更换刀具对  $k$  值的影响较小,可忽略不计,因此可以判定假设正确,即在相同的切削参数下,旋转

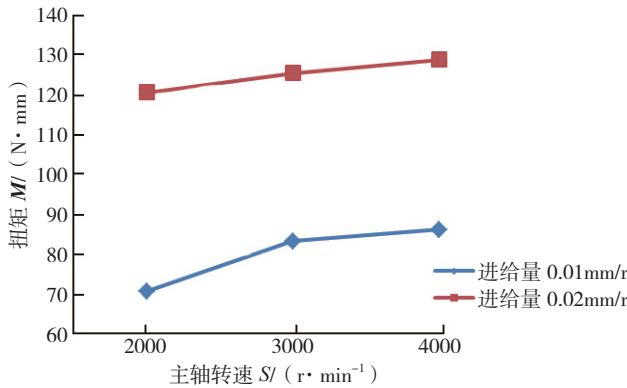


图7 钻削扭矩与加工参数关系

Fig.7 Relationship between torque and processing parameters

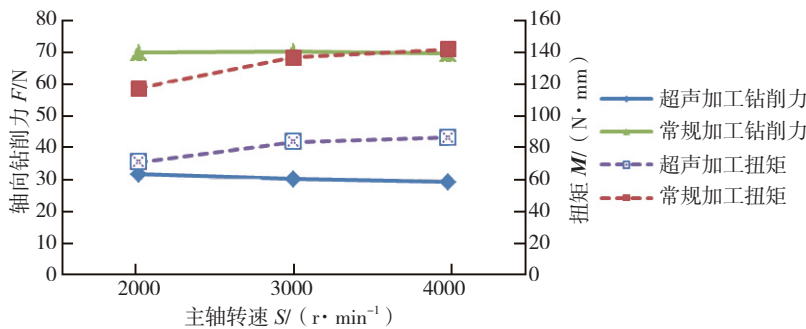


图8 超声加工和常规加工钻削力及扭矩对比

Fig.8 Comparison of the force and torque between ultrasonic and conventional machining

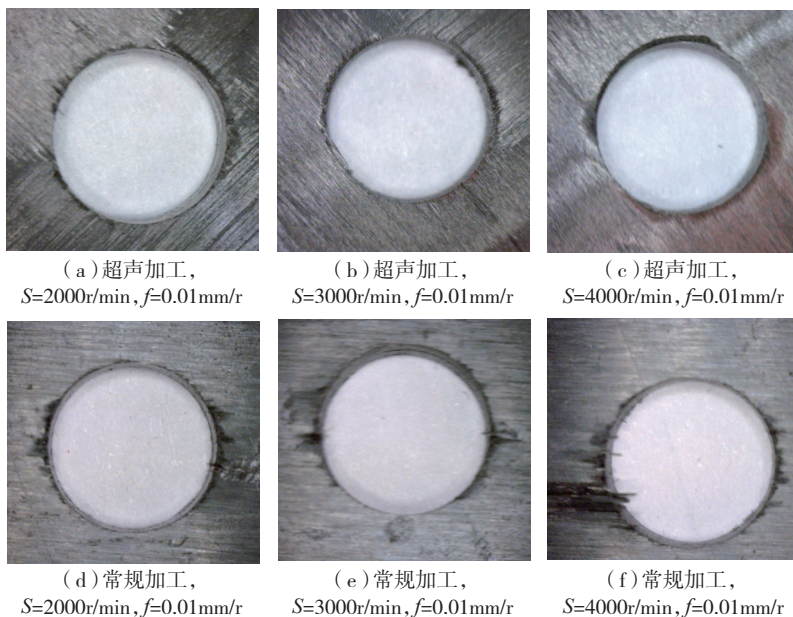


图9 超声加工和常规加工出口质量对比

Fig.9 Comparison of the export quality between ultrasonic and conventional machining

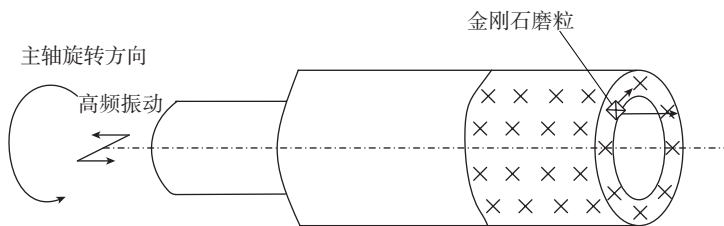


图10 刀具磨粒受力分解图

Fig.10 Cutting force of diamond grits

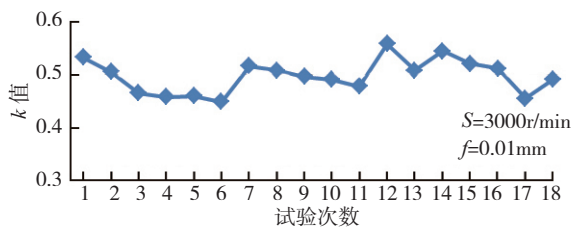


图11 大径12mm刀具的k值

Fig.11 k value of diameter 12mm cutter

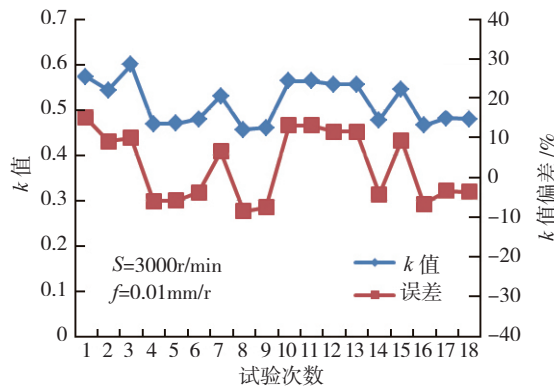


图12 大径10mm系列刀具的k值

Fig.12 k value of diameter 10mm cutter

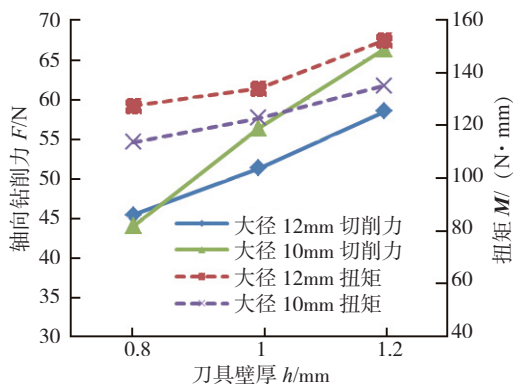


图13 套料钻切削力及扭矩与壁厚关系

Fig.13 Relationship between cutting force, torque and thickness of cutting tool

超声钻削 CFRP, 钻削力  $F$  和扭矩  $M$  之间满足公式(3)所示的函数关系。 $k$  值反应了 CFRP 旋转超声钻削过程中材料的可加工性,  $k$  值越小, 则旋转超声加工的锤击作用越明显, 材料

表层的微裂纹产生的就越充分<sup>[16]</sup>, 嵌入工件表面的磨粒在划擦、磨抛工件材料所需的切削力也更小, 对工件材料的破坏更小, 有助于提高加工质量。

由图 13 可知随着刀具壁厚的增加, 加工过程中的轴向力及扭矩同时呈现增加的趋势。其原因是, 在相同的加工参数下, 随着刀具壁厚的增加, 每转材料去除量增加, 克服材料变形所做的功增加, 切削力和扭矩也随之增大。

## 结论

(1) 在相同的进给量下, 钻削力  $F$  随主轴转速的增加, 具有减小的趋势, 而扭矩则随着主轴转速的增加, 呈现增大的趋势; 当主轴转速不变时, 进给量增大, 钻削力及扭矩都随之增大。

(2) 在进给量为 0.01mm/r 时, 随着主轴转速由 2000r/min 提升到 4000r/min, 相比于传统的套料钻加工, 使用旋转超声振动加工技术, 可平均降低切削力及扭矩达 56.6% 和 39.1%, 并可获得更好的加工质量。

(3) 在同一切削参数下, 切削力与扭矩之间满足特定函数关系; 其中,  $k$  值体现了旋转超声钻削 CFRP 的可加工性, 减小  $k$  值, 并保持  $k$  值的稳定性, 有助于减小材料的加工损伤, 保障加工质量的稳定性。

## 参考文献

[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.  
LI Wei, GUO Quanfeng. Application of carbon fiber composites to cosmonautic fields[J]. Chinese Journal of Optics, 2011, 4(3): 201-212.

[2] RAWAT S, ATTIA H. Wear mechanisms and tool life management of WC-Co drills during dry high speed drilling of woven carbon fibrecomposites[J]. Wear, 2009, 267(5): 1022-1030.

[3] LIU J, ZHANG D Y, QIN L G, et al. Feasibility study of the rotary ultrasonic elliptical machining of carbon fiber reinforced plastics (CFRP)[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 53(1): 141-150.

[4] 贺虎. 碳纤维复合材料钻削力与质量研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.  
HE Hu. Research on the thrust force and

holes quality in drilling CFRP[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.

[5] LAZAR M B, XIROUCHAKIS P. Experimental analysis of drilling fiber reinforced composites[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51(12): 937-946.

[6] CONG W L, PEI Z J, FENG Q, et al. Rotary ultrasonic machining of CFRP: a comparison with twist drilling[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2012, 31(5): 313-321.

[7] 杜鹃. 难加工材料复杂零件旋转超声辅助加工工艺与机理研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.

DU Juan. Study on the process and mechanism of rotary ultrasonic assisted machining for difficult-to-machine-materials complex parts[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.

[8] 倪皓, 宫虎, 房丰洲. 旋转超声振动加工硬脆性材料中边缘破损的研究[J]. 航空精密制造技术, 2009, 45(5):8-10.

NI Hao, GONG Hu, FANG Fengzhou. Study on edge-chipping of brittle and hard materials in rotary ultrasonic machining[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2009, 45(5):8-10.

[9] GENG D X, ZHANG D Y, XU Y G, et al. Comparison of drill wear mechanism between rotary ultrasonic elliptical machining and conventional drilling of CFRP[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2014, 33(9): 797-809.

[10] NING F D, CONG W L, PEI Z J, et al. Rotary ultrasonic machining of CFRP: a comparison with grinding[J]. Ultrasonics, 2016, 66: 125-132.

[11] 赵冬. C/E 复合材料制孔缺陷分析与评价方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.

ZHAO Dong. Study on drilling damages and evaluation method of carbon/epoxy composite[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.

[12] MARSHALL D B, LAWN B R, EVANS A G. Elastic/plastic indentation damage in ceramics: the lateral crack system[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1982, 65(11): 561-566.

[13] 张翀. 旋转超声振动加工复合材料的切削机理及工艺技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2016.

ZHANG Chong. Rotary ultrasonic machining of composite materials: experimental, numerical, and theoretical

investigations[D]. Beijing: Beihang University, 2016.

[14] 冯冬菊. 超声波铣削加工原理及相关技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.

FENG Dongju. Study on the principle and relevant technology of ultrasonic milling[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.

[15] PRABHAKAR D, FERREIRA P M, HASELKORN M. An experimental investigation of material removal rates in rotary ultrasonic machining[C]// Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME 20. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 1992:211-218.

[16] 郑书友, 冯平法, 徐西鹏. 旋转超声加工技术研究进展[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(11): 1799-1804.

ZHENG Shuyou, FENG Pingfa, XU Xipeng. Development trends of rotary ultrasonic machining technology[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009, 49(11): 1799-1804.

通讯作者: 袁松梅, E-mail: yuansm@buaa.edu.cn.

## Research for Cutting Force and Torque in Rotary Ultrasonic Drilling of Carbon Fiber Reinforced Polymers

YUAN Songmei<sup>1,2</sup>, SONG Heng<sup>1,2</sup>, LU Yilin<sup>1,2</sup>

( 1. School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Beijing Engineering Technological Research Center of High-Efficient & Green CNC Machining Process and Equipment, Beijing 100191, China )

**[ABSTRACT]** Aiming at the problems in the processing of carbon fiber reinforced polymers (CFRP), the rotary ultrasonic drilling has been carried out on CFRP-T700 composites with the abrasive trepanning core tool. From the graphical analysis, the cutting force has been found decreased with the increase of spindle speed whereas the corresponding torque has been found increased with the increase of spindle speed. The decrease in cutting force and the corresponding torque values has been found up to 56.6% and 39.1%, respectively in comparison with conventional machining. The mathematical relation of the cutting force and the torque has been developed. The proportionality constant,  $k$  has been found between the cutting force and the torque has been found experimentally. The rotary ultrasonic drilling with trepanning tool is the essential need to reduce the cutting force and torque for machining of CFRP composites. This research can be applied for practical machining at the industry level.

**Keywords:** Carbon fiber reinforced polymers; Rotary ultrasonic drilling; Abrasive trepanning core tool; Cutting force; Torque; Machining parameter

(责编 逸飞)