

树脂基纤维复合材料钻削研究进展

伍俏平 刘平 邓朝晖

(难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室,湖南科技大学,湘潭 411201)

文 摘 主要介绍了树脂基纤维复合材料钻削过程中的钻削力、钻削温度、加工表面质量等钻削性能及材料去除机理、缺陷形成机理、刀具磨损机理等钻削机理方面的研究现状;阐述了树脂基纤维复合材料钻削工艺及钻头改进方面的最新研究进展,并对树脂基纤维复合材料钻削加工技术的下一步研究重点进行了展望。

关键词 树脂基纤维复合材料,钻削性能,钻削机理,钻削工艺

中图分类号: TG52

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.05.004

Progress and Prospect on Drilling of Resin Matrix Fiber-Reinforced Composites

WU Qiaoping LIU Ping DENG Zhaohui

(Hunan Province Key Laboratory of High Efficiency and Precision Machining of Difficult to Machine Materials, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

Abstract This paper introduces the research status on drilling performance of drilling force, drilling temperature, machining surface quality, which presents drilling mechanism such as the material removal mechanism, defects forming mechanism and tool wearing mechanism during drilling the resin matrix fiber-reinforced composites. And it gives status of the latest research on the drilling technique and the drilling-bit improvement and an expectation of the key point on the next study of drilling technique.

Key words Resin matrix fiber-reinforced composite, Drilling performance, Drilling mechanism, Drilling technique

0 引言

树脂基纤维复合材料应用很广、发展很快,常用的树脂基纤维复合材料有树脂基碳纤维复合材料(CFRP)、树脂基玻璃纤维复合材料(GFRP)、树脂基芳纶纤维复合材料(AFRP)等。由于其具有良好的抗疲劳性能、较高的比强度、可设计性强以及质感美观等诸多优点,目前已应用广泛^[1]。但由于树脂基纤维复合材料存在层间剪切系数小、纤维各向异性、导热性差等特性,这给其加工带来了不少困难,属于典型的难加工材料之一。目前,钻削加工是树脂基纤维复合材料最常用的制孔加工技术,约占总切削加工量的50%以上^[2]。但在树脂基纤维复合材料钻削过程中常存在钻头磨损严重、钻头寿命短,加工精度难

以保证,容易产生分层、撕裂等加工缺陷。对此,国内外相关学者开展了一系列卓有成效的研究工作。本文详细介绍了树脂基纤维复合材料钻削过程中的钻削力、钻削温度、加工表面质量等钻削性能及材料去除机理、缺陷形成机理、刀具磨损机理等钻削机理方面的研究现状;阐述了树脂基纤维复合材料钻削工艺改进方面的最新研究进展,并对树脂基纤维复合材料钻削加工技术的下一步研究重点进行了展望。

1 树脂基纤维复合材料钻削性能研究

1.1 钻削力

钻削轴向力是导致树脂基纤维复合材料产生分层和撕裂等加工缺陷的主要原因。大量研究表明^[3-5]:轴向力的产生主要是钻削过程中横刃和主切

收稿日期:2015-12-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575179, 51205126),湖南省自然科学基金青年人才联合培养项目(12JJB006)

作者简介:伍俏平,1981年出生,副教授,主要从事新型工具制备及精密加工技术的研究. E-mail:meishanzi11@sina.com

削刃与工件材料之间的挤压作用形成的,其中,横刃产生的轴向力可高达整个钻削轴向力的 80%; ZITOUNE 等建立了一个基于断裂力学的数值模型,很好地验证了横刃是导致轴向力产生的主要原因,并预测了临界轴向力值以防止分层缺陷的产生^[6]; TSAO 等通过减小钻头横刃长度来钻削 CFRP,发现轴向力被大大削减,有效防止了分层缺陷的产生^[7]。钻头的几何形状也能在一定程度上影响钻削力, CHEN 等研究了钻顶角、螺旋角以及横刃角对钻削轴向力的影响,发现增大钻顶角,钻削轴向力有所增加,而增大螺旋角和横刃角,钻削轴向力则有所减小^[8]; ABRAO 等通过对 GFRP 进行钻削实验研究,发现增大钻顶角会增大轴向力的产生^[9]; 王海明等采用小角度螺旋槽钻头和普通麻花钻对 CFRP 进行钻削实验,研究结果表明小角度螺旋槽钻头在钻削过程中所产生的轴向力明显小于麻花钻所产生的轴向力^[10]。

钻削轴向力还受钻削加工参数的影响。RAJAMURUGAN 等建立了 GFRP 在钻削过程中轴向力与钻削参数(主轴转速,进给速度,钻头直径等)之间的数学关系,并通过实验验证了所建立的数学关系的正确性^[11]; TSAO 等研究了钻削加工参数对钻削轴向力的影响,研究表明钻削轴向力随着钻头直径和进给速度的增大而增大,而随着切削速度的增大反而减小,而进给速度对轴向力的影响最为突出^[12]; 张厚江等对 CFRP 进行高速钻削实验研究,发现钻头转速、进给速度、进给量和钻头直径的变化对钻削力有明显影响,并给出了进给量、切削速度/进给速度(v/v_f)与钻削力之间的经验公式^[13]; MOHAN 等以钻削参数组合的形式对钻削轴向力进行了研究,发现相比其他的组合,切削速度和钻孔直径组合因素对轴向力的影响更为显著^[14]; SHYHA 等也分析了不同加工参数对钻削力的影响,认为进给速度和钻头形状是影响钻削轴向力的主要因素,并指出了随着轴向力的增大,刀具的磨损越严重^[15]。

此外,研究人员对其他因素对树脂基纤维复合材料钻削力的影响也进行了一些探索性的研究工作。如 KARIMI 等通过实验发现纤维含量、纤维取向、纤维/基体的黏结性能和制造方法等对轴向力产生了较大的影响,且随着进给的增加,纤维对切削刃的影响也越大^[16]; SONBATY 等对 GFRP 进行了钻削实验研究,发现除了进给速度、主轴转速与钻头尺寸对钻削力有影响外,纤维体积分数对钻削力也有影响,且钻削力随纤维体积分数的增大而增大^[17]; KAVAD 等在研究中还发现钻头的材质对钻削力的影响很大,相比高速钢材质的钻头,硬质合金材质的钻头所产生的钻削力明显较小^[18]。

1.2 钻削温度

树脂基纤维复合材料存在热导率小等特性,而钻削过程又属于半封闭加工,钻削热不易及时传出,当积累的钻削热超过树脂基纤维复合材料的玻璃转化温度时,会导致树脂基纤维复合材料产生热损伤,降低零件的使用性能,甚至引起零件失效。

研究表明^[19-20]:树脂基纤维复合材料在钻削加工过程中,钻削热主要是沿着纤维方向传导,垂直纤维方向上的热量则是通过树脂以及树脂/纤维间的界面传导,这使得平行纤维方向的热导率大于其他方向,从而引起材料内部产生温度梯度的现象,而当钻削温度梯度过大时,会引起加工缺陷的产生,进而降低制孔质量。不少学者对树脂基复合材料钻削过程中钻削温度的相关影响因素进行了大量的研究。如 RAMESHA 等通过对 GFRP 进行钻削实验发现:主轴转速对钻削温度的影响最大,其次是进给速度,并发现随着温度的升高,损伤因子在一定程度上会有所增加^[21]; KRISHNARAJ 等研究了 CFRP 高速钻削过程中钻削参数对钻削温度的影响,实验结果表明增大主轴转速、降低进给速度会增大钻削热的产生,引起钻削温度上升,使得制孔直径增大^[22]。DURAO 等通过研究也发现:在一定范围内降低进给速度会导致温度上升,使得钻削区域树脂基体产生软化,甚至会造成树脂基体的烧伤^[23]; 赵建设通过红外热像仪对高速钻削 CFRP 加工过程进行观测,发现钻削温度随主轴转速和钻削深度的增加而增大,随进给量的增大而降低,而钻头直径对其影响不大^[24]。

同时,在树脂基纤维复合材料的钻削加工过程中,随着钻孔数目的增加,钻头的磨损越来越严重,从而也会引起钻削温度发生变化。RAMIREZ 等探讨了刀具磨损对温度的影响,实验发现钻削温度随切削刃磨损的加剧呈上升趋势,这是由于刀具磨损后需要更多的能量才能使材料被切除^[25]。彭思泽等也研究了刀具的磨损对钻削温度的影响,发现钻削温度随着刀具的磨损呈上升趋势,当主轴转速小于 1 000 r/min 时,刀具磨损对钻削温度的影响较大,而超过 2 500 r/min 时,钻削温度的增加趋于平缓^[26]。CHANG 等利用有限元方法建立了预测刀具温度场的模型,并通过所建的模型很好地验证了刀具磨损对钻削温度的影响趋势^[27]。

此外,ZITOUNE 等开展了 CFRP 的钻削实验研究,发现钻削温度受纤维取向的影响,纤维方向与刀具切削方向的夹角为 90°时对钻削温度的影响最大,这是由于此时切屑的形成需要更多的能量才能使材料被切断^[28]; 朱国平发现钻削的最高温度值会随着钻头的深入而发生变化,即在横刃未钻出工件底部

前,热量集中在中心横刃附近,致使此区域的温度值最高,而随着横刃的钻出,最高温度从中心位置逐渐向外移动^[29]。陈浩等通过设计、修磨出不同形状的钻头,研究了钻头的几何形状对钻削温度的影响,发现减小横刃长度,钻削温度有所下降,而改变钻顶角与螺旋角的大小,对钻削温度无明显影响^[30]。

1.3 钻削加工质量

树脂基纤维复合材料在钻削过程中产生的分层缺陷是导致工件报废的一个主要因素。RAHME 等对树脂基纤维复合材料分层加工缺陷进行了研究,提出了产生分层缺陷原因是存在一个极限进给速度,只有速度超过此极限速度时才会导致分层缺陷的产生^[31];张厚江等研究发现分层主要集中在孔出口侧和孔入口侧,并伴随着进给量的增加而增大,随着主轴转速的增加而减小^[32];NASIR 等对亚麻纤维增强树脂基复合材料进行了钻削实验,研究表明进给速度对分层的影响最大,其次是主轴转速与刀具几何形状^[33];ABILASH 等研究了树脂基竹纤维复合材料在钻削过程中进给速度、主轴转速、钻头直径与分层之间的关系,实验发现进给速率和钻头直径越大,产生分层缺陷越严重,而主轴转速对其影响较小^[34]。

树脂基纤维复合材料在钻削过程中,毛刺和撕裂也是制孔过程中最为常见的加工缺陷,通常发生在工件材料的出、入口处,且出口处的毛刺和撕裂远大于入口处的。李桂玉等使用大顶角的硬质合金钻头进行了钻削实验,发现入口处基本没有毛刺和撕裂缺陷的产生,但出口处则出现不同程度平行于纤维方向的撕裂并有毛刺现象存在^[35]。ENEYEW 等对 GFRP 进行钻削实验研究,发现当进给量与主轴转速超过一定值时会有毛刺缺陷产生,且毛刺量随进给量和主轴转速的增大而增大^[36];鲍永杰等通过实验研究发现,毛刺和撕裂主要集中在纤维方向与切削方向夹角为 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的地方,这是由于制孔加工过程中,刀具旋转方向与纤维方向为 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的区域,纤维同时受到拉伸和弯曲作用,造成纤维束退让而使纤维不易被切断,从而产生毛刺的现象^[37]。

随着对制孔加工质量要求的提高,对孔壁粗糙度的要求也不断提高。影响孔壁粗糙度的因素有很多,PARIDA 等采用高速钢对 GFRP 进行钻削实验研究,发现影响表面粗糙度的主要因素是主轴转速,其次是进给速度和钻头直径,且表面粗糙度值随主轴转速的增大而增大^[38];林伟等研究了 CFRP 高速钻削过程中钻头钻顶角对表面粗糙度的影响,结果显示在一定范围内表面粗糙度值随钻顶角的增加而逐渐减小^[39];SIVASANKARAN 等对两种不同类型的 GFRP 进行了钻削实验,发现合理的切削速度、进给量和切

削深度可以改善其孔壁质量,且在钻削过程中表面粗糙度的大小与 GFRP 的材质有关^[40];ENEYEW 等通过对 CFRP 的钻削实验研究发现,表面粗糙度与纤维的取向有关,且最大平均孔壁粗糙度值发生在切削方向与纤维方向成 135° 和 315° 的地方^[36]。

2 树脂基纤维复合材料钻削机理

2.1 材料去除机理

钻削加工过程中,材料的去除主要受工件的各向异性影响。目前,相关研究人员主要是采用垂直于纤维轴向的方式对树脂基纤维复合材料进行加工以分析其材料去除机理。KOPLEV 等对工件材料进行快速落刀切削试验,提出了材料的去除过程就是工件材料的断裂过程,并指出了加工质量与纤维的取向有关^[41];WANG 等研究了 CFRP 的材料去除机理,指出了材料的破坏是以切断、剪切以及树脂与纤维之间的断裂为主,并总结出了在一定范围内纤维角(纤维取向与刀具运动方向之间的夹角)的碳纤维和树脂基体所受剪切力与切削力之间的经验公式^[42-43];张厚江等对 CFRP 进行二元直角自由切削实验,分析了纤维角与材料去除之间的关系,并将材料的去除形式分为层间分离、纤维切断、弯曲断裂,且从理论上推导出了纤维切断型的切削力理论计算公式^[44];鲍永杰等针对单根纤维切断模型进行了分析,指出了产生的拉应力超过纤维自身抗拉强度时,纤维是被拉断的,而当产生的剪切力超过纤维自身的剪切强度时,纤维则被剪断^[45]。

温泉等认为材料的去除是以纤维剪切和树脂剪切为主,当刀具切削刃对工件材料的推挤所形成的剪切应力超过材料本身的剪切应力值时使得纤维断裂,断裂的纤维在刀具的作用下沿纤维树脂界面进行滑移,此时当界面间的剪切应力超过材料的剪切强度时,造成切断的材料与工件的分离^[46];李志强等通过实验发现在切削纤维的过程中,随钻头的转动,切削方向与纤维方向之间的夹角是变化的,会引起纤维发生不同的断裂形式(即层间分离、切断和弯曲剪断等),且具有周期性的变化规律^[47];USUI 等也发现了类似的规律^[48];ZENIA 等研究了材料的去除过程,分析认为材料的去除首先是沿纤维方向上纤维的断裂,随后紧接着的是纤维和树脂基体界面之间的分离,最终随着刀具的前进使材料得以去除^[49-50]。

2.2 刀具磨损机理

树脂基纤维复合材料在钻削过程中,刀具与工件材料以及切屑接触产生摩擦,会导致钻头的严重磨损,这不仅降低了制孔质量,也增加了加工成本。MAYUETA 等研究认为,CFRP 在钻削过程中,刀具剪断的纤维会挤压刀具,与刀具产生摩擦,摩擦产生的

钻削热会使树脂基体软化而黏附在钻头表面而进一步增大摩擦,从而加剧了刀具的磨损^[51];RAWAT 等对 CFRP 的钻削实验也表明,钻削过程中钻头的磨损主要是断裂的纤维与钻头之间的摩擦和热效应所导致的,其中刀具的后刀面磨损最为严重^[52];赵建设等认为导致钻头后刀面磨损最为严重的原因是由于钻削过程中纤维的弹性回复而挤压刀具后刀面,导致刀具后刀面与被加工材料的接触压力增大,纤维断口以很高的速度摩擦后刀面而产生大量的钻削热,造成了后刀面严重的磨损^[53]。

RAMIREZ 等通过实验研究,发现纤维角为 45° 时刀具的主要磨损是刀具后刀面的磨损,其原因是纤维发生弯曲和断裂,断裂的纤维随着刀具的转动回到原来的位置摩擦刀具后刀面所导致的,同时也会造成周边切削刃的磨损加剧^[25];FARAZ 等深入探讨了在钻削过程中钻头的磨损机理,发现切削刃最早发生磨损,并提出了磨粒磨损是导致切削刃磨损的主要形式,且切削刃的磨损是均匀地沿着整个切削刃进行的^[54]。然而,不同刀具的磨损机理存在一定的差异,所制孔的质量也会有所不同。CADORIN 等对比分析了两种不同钻头的磨损机理,发现硬质合金钻头的磨损主要发生在钻头后刀面部位,其原因主要是刀具与纤维之间的摩擦而导致的,且产生的孔壁损伤与纤维方向有关,而钎焊金刚石套料钻的磨损则主要是断裂的纤维对钻头上的金刚石颗粒产生压力而导致其脱落和磨损^[55]。

2.3 缺陷形成机理

不同的加工缺陷其形成的原因也有所不同。徐锦泮等阐述了毛刺缺陷形成的原因,即刀具在进给运动过程中,出口处的纤维为无约束的自由表面,在钻头后刀面推挤工件材料的作用下,少数纤维沿刀具进给方向发生退让而未被切掉所导致的^[56];温泉等通过对碳纤维/环氧树脂复合材料进行划痕实验与理论研究,发现毛刺缺陷的产生是由于刀具前进方向纤维束有足够的退让空间而不容易被切断而形成的。而撕裂缺陷则是由于纤维受到过大的横向载荷而发生弯曲变形,当应力值超过纤维与纤维之间的结合强度则会产生撕裂现象^[57];李桂玉等也对撕裂缺陷形成的原因进行了深入研究,发现随着横刃快速钻出,被加工材料的厚度逐渐减少,被加工材料不能完全被切削刃切除,且在横刃的推挤作用下被加工材料将产生沿钻头轴向的弯曲变形,使得让刀预留材料沿孔径圆周方向产生撕裂^[58]。

而对于分层缺陷的产生,研究人员认为分层缺陷产生的原因与轴向力的大小有关,是钻削过程中产生的轴向力大于分层缺陷产生的“临界轴向力值”时产

生的^[59];KARIMI 等对分层缺陷的形成机理进行了研究,发现分层缺陷的形成是由于钻削时产生的应力大于叠层板复合材料板材之间所能承受的轴向压力和横向剪切应力所致^[16];孙国强等认为分层加工缺陷产生的原因是:钻削轴向力所引起的层间应力值大于本身的层间结合力所导致的,同时钻削热会使材料内部产生局部应力,在一定程度上也会影响分层的产生^[60]。此外,钻削树脂基纤维复合材料过程中常常也会出现孔壁粗糙度过大的现象,导致不能满足使用性能要求,相关研究人员对孔壁表面粗糙度过大的原因进行了解释,认为在加工过程中,在刀具的推挤作用下切屑会摩擦孔壁,影响孔壁粗糙值的大小,直到钻削加工结束形成最终的孔壁粗糙度值^[61]。

3 树脂基纤维复合材料钻削工具及工艺改进

由于树脂基纤维复合材料存在层间剪切强度低、各向异性等特殊性能,给钻削加工带来了很大困难。对此,一些学者相继开发出了不同类型的新型钻头,不仅提高了钻头的使用寿命,其制孔效率和质量也得到了明显改善。刘汉良等从刀具几何结构和刀具材质入手,介绍了几种适合于 CFRP 与 AFRP 钻削加工的高性能、高质量的钻头,发现制孔质量大大提高了,可解决树脂基纤维复合材料高效精密制孔加工的问题^[62];VANKANTI 等通过适当减小钻顶角和横刃长度减小了钻削力的产生,有效防止了孔圆度误差和分层等缺陷的产生^[63];ZITOUNE 等则通过设计和修磨出双锋刃钻头,发现相比未修磨的钻头,使用双锋刃钻头钻削 CFRP 所得孔的质量更好^[64];ISBILIR 等基于 Hashin 理论建立了一个可以优化钻头几何形状的三维模型,发现通过优化后所制造出的钻头分层缺陷明显减少^[65];TSAO 等通过设计钻磨复合型制孔刀具进行钻削实验,发现使用此钻头,切屑的排屑性能得到了大幅度的提升,同时钻削力被大大削减,减少了分层、毛刺等缺陷的产生^[66];李凤全等通过设计、研制出了由硬质合金麻花钻头和电镀金刚石钻头复合而成的钻-扩一体复合钻头,制孔质量得到了明显改善,加工效率也大大得到了提高^[67];贺武等使用钎焊金刚石套料钻和硬质合金麻花钻对 CFRP 进行钻削对比试验,发现采用钎焊金刚石套料钻能获得更好的加工质量和更高的加工效率,钻头的使用寿命也 longer^[68]。

此外,相关学者对树脂基纤维复合材料的钻削工艺进行了改进研究。MAKHDUM 等采用超声波辅助装置(UAD)进行了钻削实验研究,发现相对传统钻削,采用 UAD 技术钻削可有效减少轴向力的大小,大大地削减了分层缺陷的产生,表面粗糙度有所改善,整体制孔质量得到提高^[69]。庄原等通过采用雾化

气冷技术对 AFRP 钻削过程进行降温处理,发现其所制孔的热损伤明显得到改善^[70];王奔等发现相比无冷却的加工,通过使用涡流管制备冷却气体的方法进行钻削加工,工件的热损伤明显得到改善,制孔质量也较为理想^[71];LI 等通过采用碳纳米管和微波固化工艺以提高层间强度以及导热性能,可有效抑制复合材料的分层和热损伤等缺陷^[72]。

辅助装置的设计也可以在一定程度上解决树脂基复合材料时出现的制孔问题。譬如树脂基纤维复合材料薄板件在横刃快钻穿时易产生撕裂现象,但通过在孔出口处设计、安置垫板或在钻孔部位出口处粘贴可剥布或固化胶层,可以有效防止出口处分层和撕裂缺陷的产生^[73];金浩等通过在制孔区域采用预应力辅助装置,有效地防止了分层与撕裂等加工缺陷的产生^[74];KLOTZ 等也通过采用专门的装夹装置对工件进行装夹,发现制孔质量有所提高^[75]。

4 展望

随着树脂基纤维复合材料的广泛应用,更多高性能的树脂基纤维复合材料被研制出来,对其制孔质量的要求也不断提高,为了有效实现树脂基纤维复合材料的高效精密加工目的,有以下重点值得深入研究。

(1) 结合计算机仿真和实验等手段,系统研究钻削过程中的钻削热分布及传输、应力大小与影响、切屑形态及排屑方式等,并采取相应工艺降低钻削热,提高制孔质量。

(2) 研发高性能的优质钻头,提高钻头的耐磨性、使用寿命以及加工效率等,建立基于树脂基纤维复合材料的刀具寿命预测模型,实现树脂基纤维复合材料的低/无损加工。

(3) 研究树脂基复合材料加工质量无损检测方法,构建树脂基复合材料的制孔质量评价体系,有效实现工件制孔质量的高效、精确检测与评估。

(4) 建立不同增强体及不同基体的树脂基纤维复合材料钻削加工数据库和专家系统,实现钻削过程中的工艺路线、加工参数、刀具选配等方面的优化选取。

(5) 研发更先进的钻削用机床,提高机床的刚度和加工精度,实现钻削加工的稳定性和可靠性,有效提高树脂基纤维复合材料的加工精度和质量。

参考文献

[1] 陈祥宝,张宝艳,邢丽英. 先进树脂基复合材料技术发展及应用现状[J]. 中国材料进展, 2009, 28(6): 3-12.
 [2] 李桂玉,汪海晋,孙杰,等. 基于复合材料钻削缺陷容差值的工艺参数优化[J]. 复合材料学报, 2014, 31(4): 1022-1029.
 [3] LACHAUD F, PIQUET F, COLLOMBET F, et al. Drill-

ing of composite structures[J]. Composite Structures, 2001(52): 511-516.

[4] LANGELLA A, NELE L, MAIO A. A torque and thrust prediction model for drilling of composite materials[J]. Composites: Part A, 2005(36): 83-93.

[5] 郑伟. 玻璃纤维夹层复合材料钻削技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

[6] ZITOUNE R, COLLOMBET F. Numerical prediction of the thrust force responsible of delamination during the drilling of the long-fibre composite structures[J]. Composites: Part A, 2007(38): 858-866.

[7] TSAO C C, HOCHENG H. The effect of chisel length and associated pilot hole on delamination when drilling composite materials[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003(43): 1087-1092.

[8] CHEN W. Some experimental investigations in the drilling of carbon fibre-reinforced plastic composite laminates. Int J Mach Tools Manufact, 1997, 37(8): 1097-108.

[9] ABRAO A M, RUBIO J C C, FARIA P E. The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite[J]. Materials and Design, 2008(29): 508-513.

[10] 王明海,孙国强,孙越. 小角度螺旋槽钻头加工复合材料的模拟研究[J]. 制造技术与机床, 2012(12): 182-185.

[11] RAJAMURUGAN T, SHANMUGAN K. Modelling and analysis of trust force in drilling of GFRP Composites using Response surface Methodology[J]. Procedia Engineering, 2012(38): 3757-3768.

[12] TSAO C C, HOCHENG H. Evaluation of thrust force and surface roughness in drilling composite material using Taguchi analysis and neural network [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 03: 342-348.

[13] 张厚江,樊锐,陈五一,等. 高速钻削碳纤维复合材料钻削力的研究[J]. 航空制造技术, 2006(12): 76-79.

[14] MOHAN N S, RAMACHANDRA A, KULKARNI S M. Influence of process parameters on cutting force and torque during drilling of glass-fiber polyester reinforced composites[J]. Composite Structures, 2005, 71: 407-413.

[15] SHYHA L S, ASPINWALL D K, SOO S L. Drill geometry and operating effects when cutting small diameter holes in CFRP [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009, 49: 1008-1014.

[16] KARIMI N Z, HEIDARY H, MINAK G, et al. Effect of the drilling process on the compression behavior of glass/epoxy laminates[J]. Composite Structures, 2013, 98: 59-68.

[17] SONBATY I E, KHASHABA U A, MACHALY T. Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites [J]. Composite Structures, 2004, 63: 329-338.

[18] KAVAD B V, PANDEY A B, TADAVI M V, et al. A Review Paper on Effects of Drilling on Glass Fiber Reinforced Plastic [J]. Procedia Technology, 2014, 14: 457-464.

- [19] 鲍永杰,高航,梁延德,等. 碳纤维/环氧树脂复合材料钻削温度场建模与试验[J]. 兵工学报,2013,35(7):846-852.
- [20] WEI J C, JIAO G Q, JIA P R, et al. The effect of interference fit size on the fatigue life of bolted the Fiber Cutting Angle on Work Piece Temperature in Drilling of Unidirectional CFRP [C]. Berend Denkena. New Production Technologies in Aerospace Industry. Berlin: Springer, 2013: 137-143.
- [21] RAMESHA B, ELAYAPERUMAL A, KUMAR A. Influence of cooling on the performance of the drilling process of glass fibre reinforced epoxy composite [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2015(3): 297-298.
- [22] KRISHNARAJ V, PRABUKARTHI A, ZITOUNE R, et al. Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic laminates [J]. Composites: Part B, 2012(43): 1791-1799.
- [23] DURAO L M P, GONCALVES D J S, MARQUES A T, et al. Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates [J]. Composite Structures, 2010(92): 1545-1550.
- [24] 赵建设. 碳纤维复合材料钻削温度测试与分析[J]. 宇航材料工艺, 2000, 30(5): 49-52.
- [25] RAMIREZ C, POULACHON G, ROSSI F, et al. Tool wear monitoring and hole surface quality during CFRP drilling [J]. Procedia CIRP, 2014(13): 163-168.
- [26] 彭思泽,李鹏南,唐思文. 钻削碳纤维复合材料刀具磨损与加工质量的研究[J]. 制造技术与机床, 2015(7): 45-49.
- [27] CHANG C S, HWANG, L R, HSUE W J. A Study of Cutting Temperatures in Turning of Glass Fiber Reinforced Plastics Materials [J]. Materials Science Forum, 2008(594): 193-213.
- [28] ZITOUNE R, COLLOMBET F, LACHAUD F. Experiment - calculation comparison of the cutting conditions representative of the long fiber composite drilling phase [J]. Composites Science and Technology, 2005(65): 455-466.
- [29] 朱国平. 单向 C/E 复合材料钻削温度场研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [30] 陈浩,李鹏南,唐思文,等. 麻花钻几何参数对碳纤维复合材料钻削性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 2015, 45(3): 63-67.
- [31] RAHME R, LANDON Y, LACHAUD F, et al. Delamination-free drilling of thick composite materials [J]. Composites: Part A, 2015(72): 148-159.
- [32] 张厚江,陈五一,陈鼎昌. 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, 22(14): 1978-1980.
- [33] NASIR A A, AZMI A I, KHALIL A N M. Measurement and optimisation of residual tensile strength and delamination damage of drilled flax fibre reinforced composites [J]. Measurement, 2015(75): 298-307.
- [34] ABILASH N, SIVAPRAGASH M. Optimizing the delamination failure in bamboo fiber reinforced polyester composite 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2016年 第5期
- [J]. Journal of King Saud University Engineering Sciences, 2013(9): 1-11.
- [35] 李桂玉,李剑峰,孙杰,等. 硬质合金钻头钻削碳纤维增强复合材料工艺[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2010, 15(6): 580-585.
- [36] ENEYEW E D, RAMULU M. Experimental study of surface quality and damage when drilling unidirectional CFRP composites [J]. Journal of Materials & Technology, 2014, 3(4): 354-362.
- [37] 鲍永杰. C/E 复合材料制孔缺陷成因与高效制孔术 [D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [38] PARIDA A K, ROUTARA B C, BHUYAN R K. Surface roughness model and parametric optimization in machining of GFRP composite; Taguchi and Response surface methodology approach [J]. Materials Today, 2015(2): 3065-3074.
- [39] 林伟,涂俊翔. 高速钻削复合材料加工参数对粗糙度影响研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2015, 1(1): 11-14.
- [40] SIVASANKARAN S, HARISAGAR P T, SAMI-NATHAN E. Effect of process parameters in surface roughness during turning of GFRP pipes using PCD insert tool [J]. Procedia Engineering, 2014(97): 64-71.
- [41] KOPLEV A, LYSTRUP A, VORM T. The cutting process chips and cutting forces in machining CFRP [J]. Composites, 1983, 14(4): 371-376.
- [42] WANG D H, RAMULU M, AROLA D. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part1: unidirectional laminate [J]. Tools Manufacture, 1995, 35(12): 1623-1638.
- [43] WANG D H, RAMULU M, AROLA D. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part2: multi-directional laminate [J]. Tools Manufacture, 1995, 35(12): 1639-1648.
- [44] 张厚江,陈五一,陈鼎昌. 碳纤维复合材料切削机理的研究[J]. 航空制造技术, 2004(7): 57-59.
- [45] 鲍永杰,高航. 碳纤维复合材料构件加工缺陷与高效加工对策[J]. 材料工程, 2009(2): 254-259.
- [46] 温泉. C/E 复合材料制孔损伤形成机理与评价方法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [47] 李志强,樊锐,陈五一,等. 纤维增强复合材料的机械加工技术 [J]. 航空制造技术, 2003(12): 34-37.
- [48] USUI S, WADELL W, MARUSICH T. Finite Element Modeling of Carbon Fiber Composite Orthogonal Cutting and Drilling [J]. Procedia CIRP, 2014, 14: 211-216.
- [49] ZENIA S, AYED L B, NOUARI M. Numerical prediction of the chip formation process and induced damage during the machining of carbon/epoxy composites [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2015, 90: 89-101
- [50] ZENIA S, AYED L B, NOUARI M. Numerical analysis of the interaction between the cutting forces, induced cutting damage, and machining parameters of CFRP composites [J]. International of Advanced Manufacture Technology, 2015, 78: 465-

- [51] MAYUETA P, GALLO A, PORTAL A. Damaged area based study of the break-in and break-out defects in the dry drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) [J]. *Procedia Engineering*, 2013, 63: 743–751.
- [52] RAWAT S, ATTIA H. Wear mechanisms and tool life management of WC-Co drills during dry high speed drilling of woven carbon fibre composites [J]. *Wear*, 2009, 267: 1022–1030.
- [53] 赵建设, 李仲平. 碳/环氧复合材料钻孔刀具磨损机理研究[J]. *宇航材料工艺*, 2006, 36(2): 68–70.
- [54] FARAZ A, BIERMANN D, WEINERT K. Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, 49(15): 1185–1196.
- [55] CADORIN N, ZITOUNE R. Wear signature on hole defects as a function of cutting tool material for drilling 3D interlock composite [J]. *Wear*, 2015(1): 742–751.
- [56] 徐锦洪, 蔡晓江, 魏莹莹, 等. 高强度型 T800S/250F CFRP 的制孔缺陷研究[J]. *制造技术与机床*, 2013(3): 97–100.
- [57] 温泉, 郭东明, 高航, 等. 基于划痕试验的碳纤维/环氧树脂复合材料制孔毛刺与撕裂缺陷形成机制研究[J]. *复合材料学报*, 2014, 31(1): 9–17.
- [58] 李桂玉. 叠层复合材料钻削加工缺陷产生机理及工艺参数优化[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [59] DURAO L M P, MOURA M F S, MARQUES A T. Numerical prediction of delamination onset in carbon/epoxy composites drilling [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75: 2767–2778.
- [60] 孙国强. 钻头几何角度对复合材料制孔质量影响的研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2012.
- [61] BHATTACHARYYA D, HERRIGAN D P W. A study of hole drilling in Kevlar composites [J]. *Composites Science and Technology*, 1998, 58: 267–283.
- [62] 刘汉良, 张加波, 王震, 等. 碳纤维与芳纶纤维复合材料机械加工刀具选用[J]. *宇航材料工艺*, 2013(4): 95–98.
- [63] VANKANTI V K, GANTA V. Optimization of process parameters in drilling of GFRP composite using Taguchi method [J]. *Journal of Materials and Technology*, 2014, 3(1): 35–41.
- [64] ZITOUNE R, MANSORI M E, KRISHNARAJ V. Tribo-functional design of double cone drill implications in tool wear during drilling of copper mesh/CFRP/woven ply [J]. *Wear*, 2013, 302: 1560–1567.
- [65] ISBILIR O, GHASSEMIEH E. Numerical investigation of the effects of drill geometry on drilling induced delamination of carbon fiber reinforced composites [J]. *Composite Structures*, 2013, 105: 126–133.
- [66] TSAO C C, CHIU Y C. Evaluation of drilling parameters on thrust force in drilling carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composite laminates using compound core-special drills [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2011, 51: 740–744.
- [67] 李凤全. 碳纤维复合材料制孔缺陷及对策的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [68] 贺虎, 苏宏华, 陈燕, 等. 碳纤维复合材料钻削加工对比试验[J]. *航空制造技术*, 2011(14): 52–54.
- [69] MAKHDUM F, PHADNIS V A, ROY A. Effect of ultrasonically-assisted drilling on carbon-fibre-reinforced plastics [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2014, 333: 5939–5952.
- [70] 庄原. 芳纶纤维复合材料切磨复合加工技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [71] 王奔. 切削力和热对 C/E 复合材料制孔损伤的影响机理[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [72] LI N Y, LIN Y G, ZHOU J, et al. Drilling delamination and thermal damage of carbon nanotube/carbon fiber reinforced epoxy composites processed by microwave curing [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2015, 97: 11–17.
- [73] 蔡闻峰, 周惠群, 何颖, 等. 树脂基碳纤维复合材料制孔缺陷及其钻削工艺研究[J]. *工程塑料应用*, 2005, 33(10): 32–34.
- [74] 金浩, 程寓, 高超, 等. 玻璃钢复合材料夹层结构钻削试验研究[J]. *机械设计与制造*, 2011(4): 133–135.
- [75] KLOTZ S, GERSTENMEYER M, ZANGER F. Influence of clamping systems during drilling carbon fiber reinforced plastics [J]. *Procedia CIRP*, 2014(13): 208–213.