

碳纤维复合材料钻削加工分层缺陷研究进展

陈德雄, 林有希, 林华

福州大学

摘要: 碳纤维复合材料(CFRP)因良好的性能被广泛应用于诸多领域,但它本身所特有的层间结构易导致在钻削加工过程中产生缺陷。分层缺陷是钻削加工过程中产生的主要缺陷之一,对复合材料结构件的承载能力和疲劳强度有很大影响。本文主要从分层缺陷的产生机理、影响因素和检测等方面对国内外目前的研究现状进行综述,并分析了未来的研究发展趋势。

关键词: 碳纤维复合材料;钻削;分层;机理

中图分类号: TG52;TH145

文献标志码: A

Research Progress of Delamination in Drilling Process of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites

Chen Dexiong, Lin Youxi, Lin Hua

Abstract: Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites are widely used in many fields due to its good properties. But it is the unique layer structure of its own that can lead to defects in drilling process. Delamination defect is one of the main defects in the drilling process and it has a great influence on the bearing capacity and fatigue strength of composite materials. In this paper, the formation mechanism, influence factors and detection of the delamination are summarized. The future research and development trends of delamination are analyzed.

Keywords: carbon fiber reinforced polymer composites; drilling; delamination; mechanism

1 引言

碳纤维复合材料(CFRP)由于具有高强度、高模量、低密度、耐高温、耐腐蚀、耐摩擦、抗疲劳等优异的性能,广泛应用于航空航天、国防军事、汽车飞机构件等领域^[1]。以空客 A380 为例,碳纤维复合材料的用量已经达到 32t 左右,占机构总量的 15%,再加上其他种类的复合材料,估计总用量可达结构总重的 25% 左右^[2]。钻削加工是碳纤维复合材料最常见的二次加工方式之一,由于碳纤维复合材料具有各向异性和非均匀性、层间结合强度低、受温度影响大等特点,在钻削制孔过程中极易产生分层、毛刺和撕裂等缺陷,属于典型的难加工材料^[3]。

在碳纤维复合材料常见的制孔缺陷中,分层缺陷对复合材料结构件的承载能力和疲劳强度影响最大,本文主要研究钻削加工过程中分层缺陷的产生机理、影响因素和检测等。

2 CFRP 的机理分析

由于 CFRP 力学性能的特殊性和内部结构的多样性,在切削过程中,材料的变形过程远比金属材料

复杂得多,这不仅与刀具形状及工艺参数等传统因素有关,还受纤维和基体属性以及纤维铺层方向的直接影响^[4]。

2.1 CFRP 的切削机理

1983 年, Koplev 等^[5]对碳纤维切削过程进行试验研究,指出 CFRP 切屑主要是由材料的脆性断裂形成的。D. H. Wang 等^[6,7]对单向和多向碳纤维复合材料进行正交切削试验,研究了不同的纤维方向对切屑形成机制的影响。由于碳纤维复合材料由脆性的碳纤维和韧性的树脂基体组成,两者强度极限相差很大,前者是后者的若干倍,因此张厚江等^[8]认为在切削过程中可以将其简化地看成只是对碳纤维的切削,而忽略对树脂基体的切削。

文献[8]对一些典型的纤维铺层方向进行研究,总结碳纤维复合材料在不同的纤维方向角 θ 下切屑的形成形式(见图 1)。

当 $\theta = 0^\circ$ 时,切屑的形成是刀具通过不断地将切削层材料与基体材料分离而实现的。这种切削变形形式称为层间分离型。

当 $0^\circ < \theta \leq 90^\circ$ 时,以图 1 中 $\theta = 45^\circ$ 和 $\theta = 90^\circ$ 为代表,刀具切削刃对碳纤维复合材料的推挤作用在纤维内部形成垂直于纤维自身轴线的剪切应力。当剪切应力超过纤维剪切强度极限时,纤维被切断。

切断后的纤维在刀具前刀面的推挤作用下,沿纤维方向产生滑移。当滑移引起的纤维界面间的剪切应力超过基体树脂材料的剪切强度极限时,被切断纤维与其他纤维分离,形成切屑。这种切削变形形式称为纤维切断型。

当 $90^\circ < \theta < 180^\circ$ 时,以图 1 中 $\theta = 135^\circ$ 为代表,刀具对前端材料的推挤作用导致复合材料间的层间分离。刀具前端材料在刀具作用下发生弯曲,当弯曲应力超过碳纤维复合材料的弯曲强度极限时,底部发生断裂。刀具继续前进,刀具对其前端材料推挤作用加强,当前端材料底部断裂点处的剪切应力超过材料剪切强度极限时,发生剪切断裂,形成切屑。这种切削变形形式称为弯曲剪切型。

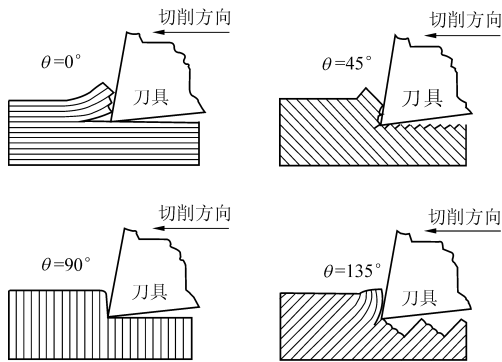


图 1 不同纤维方向角 θ 下的切削过程^[8]

2.2 分层产生机理分析

分层是指由层间应力或制造缺陷等引起的复合材料铺层之间的脱胶分离破坏现象。研究表明,钻削碳纤维复合材料过程中的分层缺陷可以分为两种损伤机制:入口剥离分层和出口顶出分层(见图 2)^[9]。

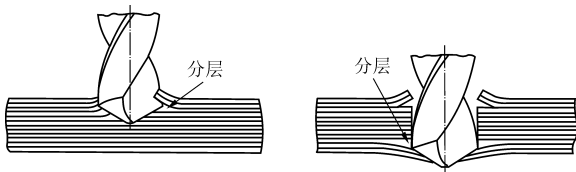


图 2 钻削 CFRP 时孔出入口的分层机制示意图

在钻削过程中,一方面,当钻头横刃开始接触材料而主切削刃未完全切入材料时,切削力会将切除的材料推入螺旋槽。这些材料在切断之前会沿着螺旋槽表面上升,产生向上的剥离力。剥离力会使上层未切除的区域产生分离,即为剥离分层。另一方面,当钻头的横刃即将钻出材料时,由于材料剩余未切除的材料层数越来越少,在轴向力超过材料的层间结合强度时,出口周边的铺层之间发生脱粘现象而造成顶出分层缺陷。顶出分层发生在层间区

域,因此它不仅取决于纤维的性质,而且和树脂的性质有关^[10]。

对于分层的产生机理,张厚江等^[11]通过声学显微镜分析指出,CFRP 板材钻削孔入口侧和出口侧都有分层,入口侧分层为圆形,出口侧表层分层为椭圆形,深层分层为圆环型;同一孔出口侧的分层远远大于入口侧的分层。分层因子表征^[12]见图 3。

目前,国内外学者普遍采用分层因子(F_d)^[12]对分层程度进行数值表征。将分层因子定义为

$$F_d = \frac{D_{\max}}{D}$$

式中, D_{\max} 为分层区域的最大直径; D 为孔的名义尺寸。

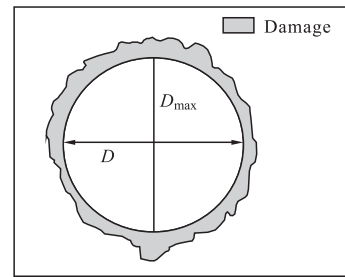


图 3 分层因子表征示意图

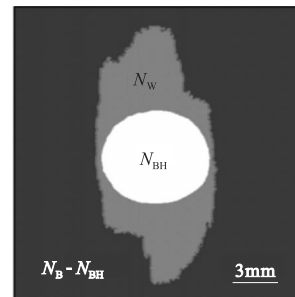


图 4 面积法分层因子表征示意图

然而,Vaibhav 等^[13]指出这种分层因子表征方法有一种内在缺陷:把分层区域的最大直径所包括的非损伤区域也考虑在内。因此,他们提出用损伤区域的面积来表征分层缺陷,将分层因子定义为

$$F_d = \frac{\text{损伤区域面积}}{\text{完好区域总面积}} = \frac{N_w}{N_w + N_B - N_{BH}}$$

式中, N_w 为损伤区域面积, $(N_w + N_B - N_{BH})$ 为完好区域总面积(见图 4)。Luís Miguel P. Durão 等^[14]也采用了面积法对分层缺陷程度进行表征。

3 分层的影响因素分析

目前,国内外学者研究较多的是切削参数与刀具对分层缺陷的影响。研究表明,钻削过程中的轴向力是导致分层缺陷的最主要原因^[15]。在钻削加

工过程中,当轴向力超过一个阈值时,分层缺陷就会发生。其中,横刃对轴向力的贡献约占60%左右。对于分层缺陷发生的轴向力阈值,H. Hocheng 和 C. C. Tsao^[16]通过力学模型和能量方程分析了不同钻头的轴向力阈值。

麻花钻

$$F_{\text{crit}} = 8\pi \left[\frac{2G_{\text{IC}}D}{1 - (D'/8D)} \right]^{1/2}$$

锯齿钻

$$F_{\text{crit}} = \pi \left[\frac{32G_{\text{IC}}M}{1 - 2s^2 + s^4} \right]^{1/2}$$

烛形钻

$$F_{\text{crit}} = \pi(1 + \alpha) \left[\frac{32G_{\text{IC}}M}{1 + \alpha^2(1 - 2s^2 + s^4)} \right]^{1/2}$$

套料钻

$$F_{\text{crit}} = \pi\beta(2 - \beta) \left[\frac{32G_{\text{IC}}M}{1 - (1 - \beta)^4 - (1/2)s^2(1 - (1 - \beta)^6)} \right]^{1/2}$$

阶梯钻

$$(F_{\text{crit}})_i = \pi[1 - (i\xi)^2] \left[\frac{32G_{\text{IC}}M}{\{[1 - (i\xi)^4 - (1/2)s^2[1 - (i\xi)^6]]\}} \right]^{1/2} \quad (i = 1 - n)$$

3.1 切削参数影响

切削速度和进给量是钻削加工过程中的两个主要参数变量。研究表明,进给量对分层缺陷的影响大于切削速度。António T. Marques 等^[17]采用4种不同钻头研究了其在不同切削参数下的切削加工性能。试验表明,合理选择切削参数可以减小轴向力,进而减小分层缺陷影响。试验研究指出以0.025mm/r的进给速度和53m/min的切削速度切削材料可以使轴向力和分层因子达到最小,分层因子下降约4%~5%。

V. N. Gaitonde 等^[18]用硬质合金钻头(K20)对碳纤维复合材料进行钻削加工试验研究,结果表明分层趋势随着切削速度的增加而减小,并且采用低进给量和顶角可以减小分层因子。

张厚江等^[19]采用YG6X整体硬质合金四面钻头钻削CFRP时,发现进给量对各层间分层的影响呈上凹曲线。在进给量很小($f < 5\mu\text{m}/\text{r}$)时,进给量增大分层尺寸降低;当进给量超过 $5\mu\text{m}/\text{r}$ 时,进给量增大,各层间分层尺寸上升。 $f = 5\mu\text{m}/\text{r}$ 是产生最小分层的进给量的临界值。

Vijayan Krishnaraj 等^[20]采用K20硬质合金钻头在不同主轴转速和进给量的情况下研究碳纤维复合材料的切削加工性能。试验表明,入口侧剥离分

层因子与进给速率之间并没有明显的规律,但是从总体上看,低进给速率的分层因子小于高进给速率的分层因子。出口侧顶出分层因子随着进给速率和主轴速率的增加而增大。进给速率是出口侧顶出分层因子的主要影响因素。进给速率的贡献率是51.4%,而主轴转速的贡献率是35.42%。试验还给出了最优的进给速率和主轴转速,分别为0.137mm/r和12000rpm。

3.2 刀具的影响

碳纤维复合材料钻孔属于半封闭加工,切削加工过程中产生的大量热不易被切屑和刀具带走,容易导致刀具磨损。刀具的磨损不仅影响制孔质量而且也会影响制孔效率和增加加工成本。

由于导致分层缺陷的临界轴向力受切削刀的影响,因此刀具几何结构对于减小分层缺陷有着重要的作用。Luís Miguel P. Durão 等^[21]研究了五种刀具:120°顶角麻花钻、85°顶角麻花钻、锯齿钻、匕首钻、阶梯钻。研究表明,120°顶角麻花钻的分层因子最小,阶梯钻的分层因子次之,且与120°顶角麻花钻的分层因子相差不大。分层因子最大的为锯齿钻,达到了1.23左右。因此,该试验条件下最佳的刀具为120°顶角麻花钻,阶梯钻次之。

硬质合金涂层刀具常用的主要有普通涂层(如AlTiN)和金刚石涂层等。Xin Wang 等^[22]对比研究了三种不同的刀具:未涂层硬质合金钻头、金刚石涂层硬质合金钻头和AlTiN涂层硬质合金钻头。试验结果表明,金刚石涂层可以显著减少刀具的磨损,而AlTiN涂层硬质合金钻头由于在钻削过程中出现氧化现象而未能有效降低刀具磨损速率。Redouane Zitoune^[23]等采用纳米涂层硬质合金钻头对碳纤维和铝合金叠层材料进行钻削加工。他们指出,在钻削CFRP过程中,采用纳米涂层硬质合金钻头可以显著降低粗糙度和轴向力。轴向力的降低可以有效预防钻削过程中的分层缺陷。

3.3 其他影响因素

影响分层缺陷的因素很多,除切削参数和刀具外,还有其他重要的影响因素,如材料的预浸渍方式、导孔的影响、垫板的影响以及新工艺等。Islam Shyha^[24]等对比分析了3种类型预浸渍材料(977-2/HTS AC,8552/AS4 AC,MTM44-1/HTS OC)对钻削过程的影响。研究表明在入口侧分层缺陷,预浸渍方式的贡献率为12%;而在出口侧分层缺陷,预浸渍方式的贡献率已经高达38.5%。另外,8552/AS4 AC预浸材料的分层因子较大,特别是在高进给

速度(0.4mm/r)的情况下,该现象更为明显。C. C. Tsao 和 H. Hocheng^[25]研究了导孔对分层缺陷的影响,其中导孔的直径与套料钻的内径相等。试验结果表明,虽然分层临界轴向力由于导孔而降低,但是钻削过程中的轴向力也由于切屑的去除而大大降低。控制预制备导孔直径与钻孔直径的比值,可以在较大进给量情况下钻削加工碳纤维复合材料而不出现分层缺陷。C. C. Tsao 和 H. Hocheng^[26]通过在被加工材料底部安装垫板,研究其对分层缺陷的影响。他们首先推导出锯齿钻和套料钻带垫板钻削的分层临界轴向力模型公式,随后进行了试验验证。研究表明,安装垫板可以较未安装垫板获得更好的钻孔质量。

本文以螺旋铣削制孔技术和缝合技术为例进行研究。在螺旋铣削过程中,通过改变刀具与孔轴线之间的偏心距而得到不同的孔径,因此可以实现同一刀具针对不同孔径的制孔及镗窝加工,从而降低了加工成本,提高了加工效率^[27]。王奔等^[27]以传统钻削加工为参照,分别利用螺旋铣削及传统钻削两种方法对 C/E 复合材料进行制孔试验,并对螺旋铣削与传统钻削刀具的运动轨迹进行分析。结果表明,切削温度是影响 C/E 复合材料制孔质量的重要因素。螺旋铣削制孔时的切削温度较传统钻削时降低 69℃ 以上,降幅大于 36%,因此有效避免了制孔出口处的撕裂及分层现象。

缝合技术作为一种复合材料液体成型预制体的有效连接增强的方法,其原理是通过缝合手段,使复合材料在垂直于铺层平面的方向得到增强,从而提高材料层间损伤容限,穿过增强织物厚度方向的缝线可以大大改善复合材料的层间性能^[28]。Yosra Turki 等^[29]试验研究了缝合与未缝合复合材料的钻削加工性能。结果表明,缝合材料在表面质量和缺陷减少方面比未缝合材料有很大的改进。缝合线使层间产生压缩效应并且在钻头的推进过程中,阻碍其分离。因此,缝合技术可以减少由轴向力导致的分层缺陷和基质破裂。K. T. Tan 等^[30]还研究了缝合密度和缝合线厚度对碳纤维复合材料的破坏形式和失效特性的影响。

4 分层缺陷的检测

为了检测分层缺陷的程度,国内外科研人员研究试验了许多种方法。张厚江等^[19]较早采用氯化金渗透液检测法对碳纤维复合材料钻削制孔分层缺陷进行检测。检测试验中发现,分层缺陷的形状主

要有近似椭圆形和近似圆形两种,两者的中心都与孔中心重合。文献[11]采用声学显微镜对碳纤维复合材料钻孔分层缺陷进行检测,根据检测试验结果及分析,总结出了立体分层模型,并对分层形成机理进行了探讨。

为避免对材料产生人为损伤,无损检测技术在分层缺陷检测方面得到广泛运用。目前无损检测技术主要包括声学显微镜、超声 C 扫描、X 射线电脑断层摄影技术以及增强射线照相法等。周正干等^[31]基于激光超声技术对复合材料紧固孔分层进行量化表征试验;基于穿透法和脉冲反射法进行激光超声 C 扫描检测,得到紧固孔区域分层缺陷的形状、尺寸和位置特征。研究表明,利用激光超声技术的非接触式激发、接收和高分辨力特点,可以准确测得紧固孔区域分层缺陷导致的波反射和衰减,有效表征飞机复合材料结构的紧固孔分层缺陷。

C. C. Tsao 和 H. Hocheng^[32]采用 X 射线电脑断层摄影和超声 C 扫描这两种无损检测技术对分层缺陷进行检测。试验结果表明,X 射线电脑断层摄影技术和超声 C 扫描技术测得的结果很接近,这两项技术都可以揭示不同刀具分层发生的临界轴向力。X 射线电脑断层摄影技术对于检测分层缺陷更加灵活和有效。

5 结语

分层作为钻削制孔过程中的主要缺陷之一,国内外学者已经对其产生机理和影响因素进行了深入研究。通过优化合理选择切削参数、采用不同几何形状和涂层的刀具是目前减少分层缺陷的有效途径。通过对国内外碳纤维复合材料分层缺陷的研究现状进行综述,今后可从以下方面加大对碳纤维复合材料制孔分层缺陷的研究:继续研究新的刀具及优化刀具几何结构参数以提高其切削性能;对复合材料进行深入研究,改善制造工艺,提高材料性能;建立完善、合理的仿真模型,以期达到对分层缺陷更准确的预测。

参考文献

- [1] 马刚峰,李峰,徐泽夕,等. 聚丙烯腈基碳纤维研究进展[J]. 现代纺织技术,2011(3):58-64.
- [2] 陈绍杰. 复合材料与 A380 客机[J]. 航空制造技术,2002(9):27-29.
- [3] 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[J]. 复合材料学报,2014,31(1):9-17.

- [4] 陈燕,葛恩德,傅玉灿,等. 碳纤维增强树脂基复合材料制孔技术研究现状与展望[J]. 复合材料学报,2015,32(2):301-316.
- [5] Koplev A, Lystrup A, Vorm T. The cutting process chips and cutting forces in machining CFRP[J]. Composites, 1983, 14(4):371-376.
- [6] D H Wang, M Ramulu, D Arola. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part II undirectional laminate[J]. Tools Manufact, 1995, 35(12):1623-1638.
- [7] D H Wang, M Ramulu, D Arola. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part II multi-directional laminate [J]. Tools Manufact, 1995, 35(12):1637-1648.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Luís Miguel P Durão, Daniel J S Goncalves, João Manuel R S Tavares. Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates [J]. Composite Structures, 2010, 92:1545-1550.
- [11] 张厚江,陈五一,陈鼎昌. 声学显微镜用于碳纤维复合材料钻孔分层检测的研究[J]. 复合材料学报,1998,15(3):62-65.
- [12] Tom Sunnya, J Babua, Jose Philip. Experimental studies on effect of process parameters on delamination in drilling GFRP composites using Taguchi method[J]. Procedia Materials Science, 2014, 6:1131-1142.
- [13] Vaibhav A Phadnis, Farrukh Makhdam, Anish Roy. Drilling in carbon/epoxy composites: experimental investigations and finite element implementation[J]. Composites: Part A, 2013, 47:41-51.
- [14] Luís Miguel P Durão, João Manuel R S Tavares, Victor Hugo C de Albuquerque. Damage evaluation of drilled carbon/epoxy laminates based on area assessment methods [J]. Composite Structures, 2013, 96:576-583.
- [15] Jin Pyo Jung, Geun Woo Kim, Kang Yong Lee. Critical thrust force at delamination propagation during drilling of angleply laminates [J]. Composite Structures, 2005, 68(4):391-397.
- [16] H Hocheng, C C Tsao. Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140(1-3):335-339.
- [17] António T Marques, Luís M Durão, António G Magalhães. Delamination analysis of carbon fibre reinforced laminates: Evaluation of a special step drill[J]. Composites Science and Technology, 2009, 69:2376-2382.
- [18] V N Gaitonde, S R Karnik, J Campos Rubio. Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 203:431-438.
- [19] 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,2003,14(22):1978-1980.
- [20] Vijayan Krishnaraj, A Prabukarthi, Arun Ramanathan, et al. Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates[J]. Composites: Part B, 2012, 43:1791-1799.
- [21] Luís Miguel P Durão, Daniel J S Goncalves, João Manuel R S Tavares. Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates [J]. Composite Structures, 2010, 92:1545-1550.
- [22] Xin Wang, Parick Y Kwon, Caleb Sturtevant. Tool wear of coated drills in drilling CFRP[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2013, 15:127-135.
- [23] Redouane Zitoune, Vijayan Krishnara, Belkacem Sofiane Albouacif. Influence of machining parameters and new nano-coated tool on drilling performance of CFRP/Aluminum sandwich [J]. Composites: Part B, 2012, 43:1480-1488.
- [24] Islam Shyha, Sein Leung Soo, David Aspinwall. Effect of laminate configuration and feed rate on cutting performance when drilling holes in carbon fibre reinforced plastic composites [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210:1023-1034.
- [25] C C Tsao, H Hocheng. The effect of pilot hole on delamination when core drill drilling composite materials[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43:1087-1092.
- [26] C C Tsao, H Hocheng. Effects of exit back-up on delamination in drilling composite materials using a saw drill and a core drill[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 45:1261-1270.
- [27] 王奔,高航,毕铭智,等. C/E 复合材料螺旋铣削制孔方法抑制缺陷产生的机理[J]. 机械工程学报,2012,48(15):173-181.
- [28] 吴刚,赵龙,高艳秋,等. 缝合技术在复合材料液体成型预制体中的应用研究[J]. 航空制造技术,2012(23):70-72.
- [29] Yosra Turki, Malek Habak, Raphaël Velasco. Experimental investigation of drilling damage and stitching effects on the mechanical behavior of carbon/epoxy composites[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2014, 87:61-72.

电解射流加工研究现状与进展

张成光^{1,2},熊毅¹,张勇²,张飞虎²

¹河南工业职业技术学院;²哈尔滨工业大学

摘要: 综述了电解射流加工的国内外研究现状,介绍了国内外电解射流加工以及电解射流复合加工的研究进展,详细阐述了电解射流加工工艺模型、激光电解射流复合加工以及磨料电解射流复合加工技术,并对其前景进行了展望,提出了今后的重点研究方向。

关键词: 电解射流加工;复合加工;激光;磨料

中图分类号: TG662; TH161

文献标志码: A

Progress of Electrochemical Jet Machining

Zhang Chengguang, Xiong Yi, Zhang Yong, Zhang Feihu

Abstract: In this article, research present situation of Electrochemical Jet Machining (ECJM) was summarized in the domestic and foreign, and emphasizing the research progress of ECJM and complex machining technology, elaborating ECJM process model, laser electrochemical jet composite processing and abrasive electrochemical jet composite processing, forecasting to its prospect, and putting forward the next key research direction.

Keywords: ECJM; complex machining; laser; abrasive

1 引言

电解射流加工 (Electrochemical Jet Machining, ECJM, 电液束加工或喷射电解加工) 不需要采用与加工工件形状一样的成型阴极电极工具, 对阴极工具没有磨损和损耗, 具有很好的灵活性和方便性, 可以实现难加工材料、复杂三维型面的加工, 加工后工件表面几乎不存在缺陷且表面光滑、没有毛刺, 已广泛应用于飞机涡轮叶片和微电子仪器等的小直径孔和复杂形状孔的加工^[1-3]。

2 国内外电解射流加工研究现状与进展

电解射流加工是将电解加工技术与水射流加工技术相结合的一种复合加工方法, 其原理是将具有一定压力的电解液通过喷嘴向金属工件表面喷射, 使其在电解液与工件界面发生阳极溶解而去除的一种加工方法。20世纪90年代, J. Kozak等^[4]对电解射流加工进行了深入研究, 建立了电解射流加工的数学模型, 确立了加工速度与加工工艺参数之间的关系, 并通过电解射流加工试验研究了主要工艺参数对电解射流加工的影响。电解射流加工原理见图1。

Mohan Sen等^[5]采用混合神经网络和遗传算法方法对电解射流加工进行了研究, 并研制了电解射流加工设备(见图2)。首先采用神经网络模型来预

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2011CB013200); 国家自然科学基金(51275116); 航空科学基金(2012EE77010); 黑龙江省博士后启动基金(LBH-Q11090)

收稿日期: 2015年11月

[30] K T Tan, A Yoshimura, N Watanabe. Effect of stitch density and stitch thread thickness on damage progression and failure characteristics of stitched composites under out-of-plane loading [J]. *Composites Science and Technology*, 2013, 74: 194-204.

[31] 周正干, 孙广开, 陈秀成, 等. 复合材料紧固孔分层激光超声量化表征试验[J]. *航空学报*, 2014, 35(8): 2348-2354.

[32] C C Tsao, H Hocheng. Computerized tomography and C-scan for measuring delamination in the drilling of composite materials using various drills [J]. *International Journal of*

Machine Tools & Manufacture, 2005, 45: 1282-1287.

第一作者: 陈德雄, 硕士研究生, 福州大学机械工程及自动化学院, 350002 福州市

First Author: Chen Dexiong, Postgraduate, College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China

通信作者: 林有希, 教授, 博士生导师, 福州大学机械工程及自动化学院, 350002 福州市

Corresponding Author: Lin Youxi, Professor, Doctoral Tutor, College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China