

CFRP螺旋铣孔加工中的轴向力抑制方法*

董志刚,张博,康仁科,杨国林,鲍岩

(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室,大连 116024)

[摘要] 在碳纤维增强树脂基复合材料(Carbon Fibre Reinforced Polymer, CFRP)螺旋铣孔加工过程中,刀具端刃所产生的轴向力过大会造成制孔出口分层、撕裂、毛刺等缺陷问题。为减小CFRP螺旋铣孔加工中的轴向力,从运动学原理上分析了刀具端齿隙角与未变形切屑的关系,提出了使刀具切削线速度较低的中心区域不参与切削的方法;进一步推导出了使刀具中心不参与切削的条件,并对不同端齿隙角和导程组合下的未变形切屑形状进行了模拟;最后在CFRP上进行了螺旋铣孔试验验证。结果表明,通过增大刀具端齿隙角和减小导程,可以使螺旋铣孔加工中端刃中心区域不参与切削,从而有效减小CFRP螺旋铣孔中的轴向力。

关键词: 螺旋铣孔;碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP);分层;轴向力;端齿隙角;未变形切屑

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.17.014



董志刚

副教授、博士生导师,大连理工大学高性能精密制造创新团队成员,主要研究方向为难加工材料高效加工技术与装备、精密/超精密加工技术与装备;获国家技术发明二等奖1项、教育部技术发明一等奖1项、中国机械工业科学技术一等奖1项,通过省部级科技成果鉴定8项。

碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)由碳纤维增强体和树脂基体构成,具有比强度和比模量高、耐腐蚀性强、抗疲劳性好等优点,被广泛应用于航空领域^[1-2]。据统计,CFRP在波音787和空客A350-XWB大型客机中的用量分别达到了50%和53%^[3]。

CFRP构件在飞机的制造、装配过程中,需要加工大量的铆钉孔和螺栓孔,一架大型飞机需要的制孔数量通常在数百万以上^[4]。飞机装配制孔的精度、质量要求都较高,不仅要保证足够高的尺寸精度、表面质量与位置精度,还必须有效抑制加工缺陷的产生^[5]。

CFRP特殊的铺层结构导致其层间结合强度低,制孔时出口易产生分

层、撕裂和毛刺等加工缺陷^[6-7]。其中分层会导致孔的强度降低,是最严重的缺陷形式之一。据统计,在飞机装配中,孔出口分层导致的零件报废量占报废总量的60%^[8]。大量研究指出,制孔过程中作用在未切除材料上的轴向力是导致CFRP分层产生的主要原因^[9-11]。Tsao^[12]及付饶等^[13]分析了CFRP制孔时的分层机理:CFRP层间结合强度低,在制孔时,轴向载荷导致出口附近的材料发生变形,当力无法继续向下传递时,则聚集于出口处,而若轴向力大于碳纤维的层间结合力,纤维层之间的树脂基体会受拉应力作用而产生破坏,进而形成分层缺陷。避免CFRP分层的关键是使加工中的轴向力小于碳纤维的层间结合力,基于此原理,国内外学者进

* 基金项目:国家重点研发计划课题(2017YFB1301701);上海飞机制造有限公司委托课题(COMAC-SFGS-2018-2783)。

行了大量研究,如通过优化刀具几何参数^[14-15]、工艺参数^[16-18]及叠加超声振动^[19]来减小轴向力。

近年来,为了抑制 CFRP 出口缺陷,一种“以铣代钻”的高效制孔方式——螺旋铣孔,被应用于复合材料制孔中。螺旋铣孔时刀具高速自转,同时沿着螺旋线轨迹进给,在材料上加工出一个直径大于刀具自身直径的圆孔^[20]。现有研究表明,螺旋铣孔具有轴向力小^[21]、孔壁表面质量好^[22]、制孔效率高^[5]、切削区域不封闭易于排屑、散热性好、刀具寿命长^[21]等优点。上述优势使得螺旋铣孔成为抑制 CFRP 制孔出口分层的有效方法之一,并在航空结构件装配制孔中具有较好的应用前景。

但需要指出的是,尽管采用螺旋铣孔可减小轴向力,但在加工过程中仍存在轴向力,因此若工艺参数和刀具选择不当,仍有导致 CFRP 出口处出现分层、撕裂、毛刺等加工缺陷的可能^[6]。在现有研究中,一些学者也在 CFRP 螺旋铣孔试验中发现制孔出口仍有撕裂、毛刺和分层现象^[23-25]。为提高螺旋铣孔加工 CFRP 的出口质量、抑制出口分层,并促进螺旋铣孔技术在飞机装配制孔中的实际应用,仍需进一步减小 CFRP 螺旋铣孔加工中的轴向切削力。

螺旋铣孔具有复杂的运动学原理,因此可以通过进一步优化工艺参数和刀具形状来减小轴向切削力。本文首先分析了螺旋铣孔加工过程中轴向切削力的主要来源;然后考虑刀具端齿隙角对螺旋铣孔材料去除过程的影响,进行了运动学分析,提出了一种通过让刀具中心线速度较低的区域不参与切削来抑制螺旋铣孔中轴向力的方法,并推导了使刀具中心不参与切削的条件;最后仿真了不同工艺参数下的未变形切屑形状并在 CFRP 上进行螺旋铣孔试验验证。

螺旋铣孔加工中的轴向力分析

螺旋铣孔原理如图 1 所示,在加工过程中,刀具绕自身轴线高速自转,同时绕着孔轴线作螺旋进给。其中刀具轴线相对于孔轴线的偏心量为 e , mm; 刀具自转转速为 n , r/min; 螺旋进给运动由公转运动和轴向进给运动合成,公转转速为 n_p , r/min; 轴向进给速度为 V_{fa} , mm/min; 螺旋轨迹导程为 a_p , mm。

螺旋铣孔特殊的进给运动使刀具周刃和端刃同时参与切削,其中周刃断续切削,切削方式为铣削,而端刃连续切削,切削方式类似于钻削^[20]。图 2 (a) 所示为螺旋铣孔未变形切屑,其中, D_t 为刀具直径, mm; f_{z1} 和 f_{z2} 分别为周向每齿进给量和轴向每齿进给量, mm/齿,其表达式分别为:

$$f_{z1} = \frac{2\pi e \cdot V_{fa}}{n \cdot N \cdot a_p} \quad (1)$$

$$f_{z2} = \frac{V_{fa}}{n \cdot N} \quad (2)$$

式中, N 为刀具齿数。

如图 2 (b) 所示,由于周刃具有一定的螺旋角度,其轴线方向的切削

分力指向刀具上方;而端刃产生的轴向切削分力则指向刀具下方。如图 2 (c) 所示,在 CFRP 螺旋铣孔过程中,端刃产生的向下的轴向力作用在底层未切除材料上,导致 CFRP 出口处产生分层;且在此过程中,周刃所产生的向上的轴向力并未作用在底层未切除材料上,因此不会对 CFRP 出口分层产生影响,故本文不对其进行研究,重点研究端刃产生的轴向切削力。

在螺旋铣孔加工过程中,刀具中

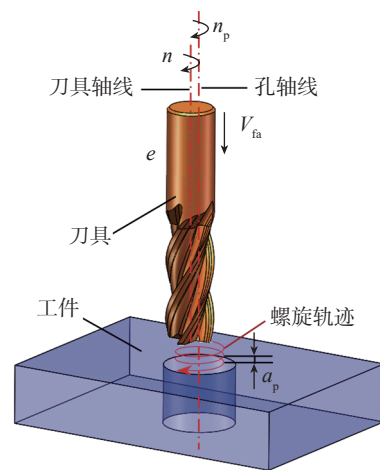


图1 螺旋铣孔原理
Fig.1 Principle of helical milling

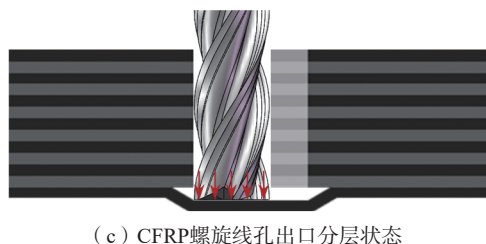
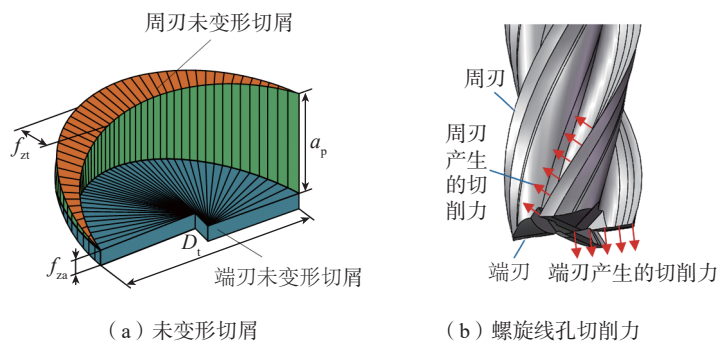


图2 未变形切屑与螺旋铣孔切削力
Fig.2 Undeformed chip and cutting force of helical milling

心的线速度较低,对材料主要表现为挤压作用而非切削作用,是导致产生较大轴向力的主要原因之一^[26];尽管螺旋铣孔的公转运动使中心线速度不为0,但工程上偏心量 e 的取值一般很小,故刀具中心相比于外缘线速度仍然较低,因此端刃中心对材料的挤压作用仍是螺旋铣孔中产生较大轴向力并导致CFRP出口分层的重要原因之一^[27]。故若可以让端刃中心区域不参与切削,则可有效减小轴向力。

考虑刀具端齿隙角的螺旋铣孔端刃切削状态分析

普通立铣刀端刃通常不与刀具轴线垂直,并形成一个特定角度的内凹角,使得刀尖处高于刀具中心。如图3所示,定义在刀尖与刀具轴线所构成的平面内,垂直于刀具轴线的水平线与端刃投影线的夹角 α 为立铣刀端齿隙角,也被称为“碟心角”^[28]。现有的研究中一般不考虑端齿隙角的影响,认为端刃全部参与切削且所产生的未变形切屑厚度一致^[20,29],均为轴向每齿进给量 f_{za} 。但在螺旋铣孔过程中,由于其特殊的螺旋进给运动,材料去除过程十分复杂,因此端齿隙角对未变形切屑的影响作用是不应该被忽略的。

进一步分析端齿隙角对端刃切削状态的影响,如图4所示。其中, α 为刀具端齿隙角; β 为螺旋升角,其表示式为:

$$\beta = \arctan\left(\frac{a_p}{2\pi e}\right) \quad (3)$$

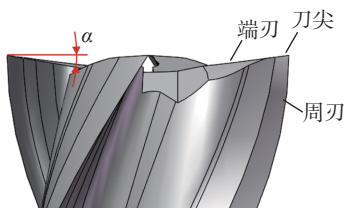


图3 立铣刀端齿隙角
Fig.3 End clearance angle of end milling cutter

由图4(a)可知,当端齿隙角 α 小于螺旋升角 β 时,刀具端刃全部参与切削,虽然端刃处径向不同位置的切削厚度不同,但此时仍为连续切削。由图4(b)可知,当端齿隙角 α 大于螺旋升角 β 时,刀具中心不参与切削,且此时刀具只有一侧参与切削,即为断续切削。

由图4可进一步推导出使刀具中心不参与切削的条件: $\alpha > \beta$ 。为便于描述,定义系数 E_t ,表达式为:

$$E_t = \frac{a_p}{2\pi e \cdot \tan(\alpha)} \quad (4)$$

由式(3)和(4)可知,当 $E_t < 1$ 时,刀具中心不参与切削;且刀具中心是否参与切削只与端齿隙角 α 、导程 a_p 和偏心量 e 有关;而在实际加工中,孔径和刀具直径往往在加工前就已经确定,即偏心量 e 是确定的,则端齿隙角 α 和导程 a_p 是刀具中心是否参与切削的决定性工艺参数。

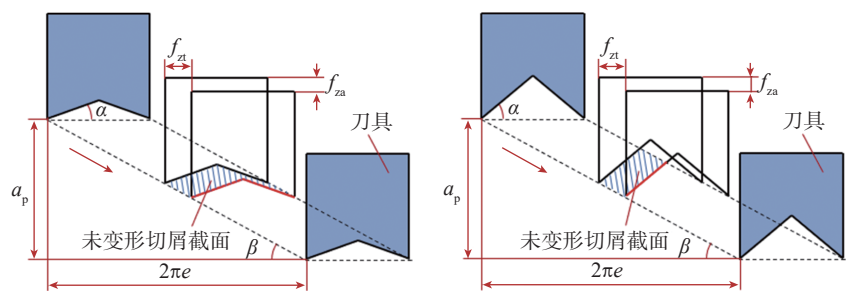
根据上述研究,本文提出一种抑制螺旋铣孔轴向力的方法:通过控制刀具端齿隙角 α 和导程 a_p 使刀具

中心不参与切削,从而避免刀具中心区域对材料的挤压作用,达到减小CFRP螺旋铣孔轴向力的目的。

考虑刀具端齿隙角的未变形切屑仿真

为了进一步研究 E_t 与未变形切屑形状的关系,定义了一种存在端齿隙角的螺旋铣孔刀具,刀具截面如图5(a)所示,其中, R 为刀具刀尖圆弧半径,且 $R=0.5\text{mm}$, $D_t=8\text{mm}$ 。利用SolidWorks三维建模软件对存在端齿隙角的刀具产生的未变形切屑进行仿真,各切削刃所成未变形切屑如图5(b)所示。由图5(b)可知,刀具顺时针旋转,端刃从 oa 位置切入材料,从 ob 位置切出材料,端刃参与切削的角度范围为 φ_1 ,在 φ_2 的角度范围为空程状态,此时端刃不切削去除材料,且刀具端刃中心直径 D 范围内的切削刃始终不切削材料,从而避免了刀具中心线速度较低的区域对材料的挤压作用。

进一步对端齿隙角 α 和导程



(a) 端齿隙角 α <螺旋升角 β (b) 端齿隙角 α >螺旋升角 β

图4 端齿隙角 α 与螺旋升角 β 的关系

Fig.4 Relationship between end backlash angle α and helix angle β

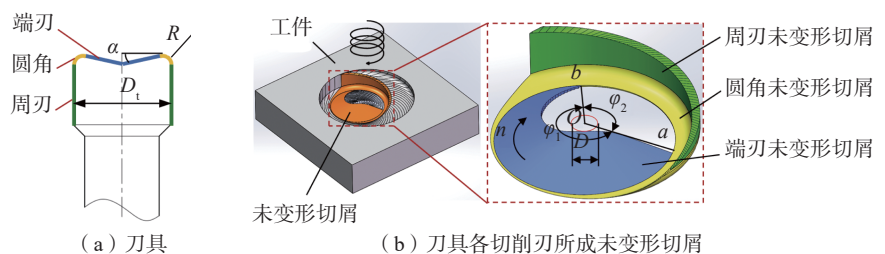


图5 刀具及其各切削刃所成未变形切屑

Fig.5 Tool and undeformed chips formed by each cutting edge

a_p 的不同组合所形成的未变形切屑进行仿真,以验证式(4)的正确性。仿真时,确定参数 $n=3000\text{r/min}$, $V_{fa}=15\text{mm/min}$, $D_t=8\text{mm}$, $e=2\text{mm}$; 令 α 和 a_p 呈等差数列变化,得到不同组合的未变形切屑如图6所示。可知,当 E_t 值大于1时,未变形切屑形状连续,此时刀具中心参与切削,刀具端刃为连续切削;当 E_t 值小于1时,未变形切屑形状不连续,此时刀具中心不参与切削,刀具端刃为断续切削。而且 E_t 值越小,刀具中心不参与切削的范围越大。

进一步,分别令 $E_t=0.3、0.5、0.7$, 对不同 α 和 a_p 组合下的未变形切屑进行仿真,结果如图7所示 ($n=3000\text{r/min}$, $V_{fa}=15\text{mm/min}$, $D_t=8\text{mm}$, $e=2\text{mm}$)。可知,当 E_t 值相同时,不同 α 和 a_p 组合下端刃所产生的未变形切屑形状基本一致,且中心区域不参与切削的范围大小也基本一致,由此可知, E_t 是影响端刃未变形切屑形状的关键变量。

试验设计

在科德 KMC600S 数控加工中心上进行 CFRP 螺旋铣孔测力试验,试验现场布置如图8所示。采用 kistler 9139AA 型测力仪采集轴向力数据,测得的信号经过电荷放大器 kistler 5080A 处理后,利用数据采集卡 kistler 5697A 进行数据采集,并储存在计算机中。刀具端刃磨损情况通过 INSIZE ISM-DL301-Y 显微镜进行观测。

CFRP 尺寸规格为 $300\text{mm}\times 200\text{mm}\times 5.5\text{mm}$, 碳纤维丝牌号为 T800, 铺层方式为 $[-45^\circ/0^\circ/45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]_{s2}$ 。

试验采用端齿隙角分别为 $2^\circ、6^\circ、10^\circ$ 的螺旋铣孔特制刀具,如图9所示。试验中所有刀具均为硬质合金刀具,刀具表面为金刚石涂层,刀具直径 $D_t=8\text{mm}$, 刀尖圆弧半径 $R=0.5\text{mm}$; 为保证试验的对比性,

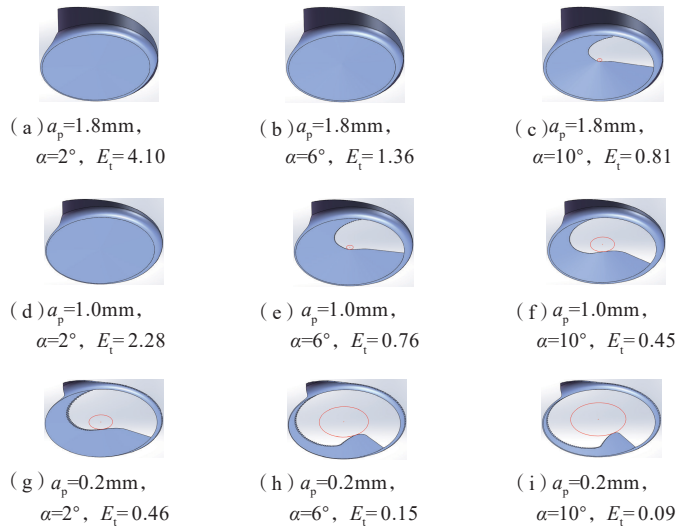


图6 不同参数组合下的未变形切屑
Fig.6 Undeformed chips under different parameter combinations

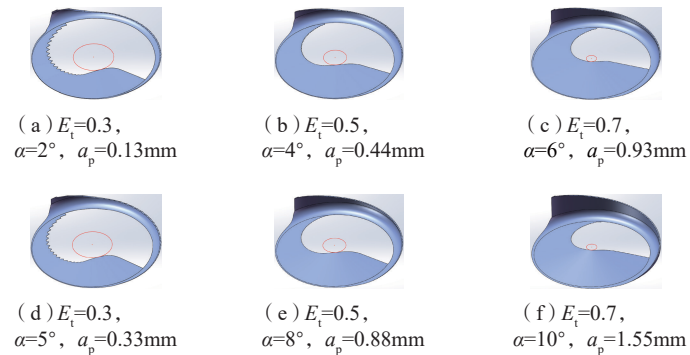


图7 E_t 值相同时的未变形切屑
Fig.7 Undeformed chips with the same E_t value

3种刀具除端齿隙角值不同外,其余刀具参数均保持一致。

试验中工艺参数为: 主轴转速 $n=3000\text{r/min}$, 轴向进给速度 $V_{fa}=15\text{mm/min}$, 偏心量 $e=2\text{mm}$ 。试验在干切削条件下进行,加工中通过吸尘器吸除 CFRP 切屑。

试验结果与讨论

试验中共使用了6把刀具,其中刀具A、B端齿隙角为 2° , 刀具C、D端齿隙角为 6° , 刀具E、F端齿隙角为 10° 。在 $a_p=0.8\text{mm}$ 的条件下,分别使用刀具A、C、E进行了加工试验,试验结果如图10(a)所示。可知,刀具A的 E_t 值为1.82, 计算平均轴向力为 57.87N ; 刀具C

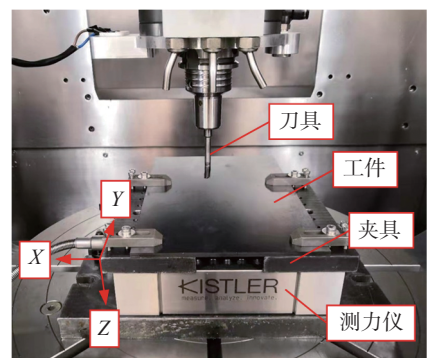


图8 试验现场布置
Fig.8 Layout of test site



图9 刀具实物
Fig.9 Tool entity

的 E_t 值为 0.61, 计算平均轴向力为 43.68N; 刀具 E 的 E_t 值为 0.36, 计算平均轴向力为 39.22N, 轴向力关系为: 刀具 $E < 刀具 C < 刀具 A$ 。3 把刀具在显微镜中均可观察到明显的刀具磨损, 且刀具 A 的端刃各位置均有磨损现象, 可推断出端刃全部参与切削; 而刀具 C 、 E 的端刃只有外缘有磨损现象, 中心区域无明显磨损, 且刀具 C 的外缘磨损范围大于刀具 E , 可推断出端刃中心区域未参与切削。

为进一步验证, 在 $a_p=0.4\text{mm}$ 条件下使用刀具 B 、 D 、 F 又进行了两组试验, 结果如图 10 (b) 所示。可知, 刀具 B 的 E_t 值为 0.91, 计算平均轴向力为 53.16N; 刀具 D 的 E_t 值为 0.30, 计算平均轴向力为 41.86N; 刀具 F 的 E_t 值为 0.18, 计算平均轴向力为 32.32N, 轴向力关系为: 刀具 $F < 刀具 D < 刀具 B$ 。3 把刀具均只有外缘有磨损现象, 可推断出 3 把刀具中心均未参与切削, 且刀具中心不参与切削的范围关系为: 刀具 $F > 刀具 D > 刀具 B$ 。

结果表明: E_t 值小于 1 时, 可以使刀具中心区域不参与切削, 并且有效降低 CFRP 螺旋铣孔加工中的轴向切削力; 且 E_t 值越小, 刀具端刃中心不参与切削的范围越大, 轴向力减小越明显。

进一步用端齿隙角为 6° 的刀具进行试验, 可得到 E_t 值对轴向力的影响规律, 如图 11 所示。

由图 11 可知, 随着 E_t 值的减小, 刀具中心不参与切削的范围增大, 刀具挤压作用减少, 材料更多地被切削线速度较高的刀具外缘去除, 使轴向力随 E_t 值的减小而减小。

结论

(1) 螺旋铣孔过程中, 端齿隙角 α 是不可忽略的工艺参数, 其大小会影响端刃在加工中的切削状态和未变形切屑形状。

(2) 在孔径和刀具直径确定的

加工条件下, E_t 由端齿隙角 α 和导程 a_p 共同决定。当 E_t 值小于 1 时, 端刃产生的未变形切屑不连续, 此时刀具中心不参与切削。 E_t 值越小, 刀具中心不参与切削的范围越大; E_t 值相同时, 不同 α 和 a_p 组合下端刃产生的未变形切屑形状基本一致, 刀具中心不参与切削的范围基

本相同。

(3) 当 E_t 值小于 1 时, 刀具线速度较低的中心区域不参与切削, 从而避免了刀具中心对材料的挤压作用, 可以有效减小 CFRP 螺旋铣孔加工中的轴向力; 且在合理的参数条件下, 螺旋铣孔轴向力随 E_t 值的增大而减小。

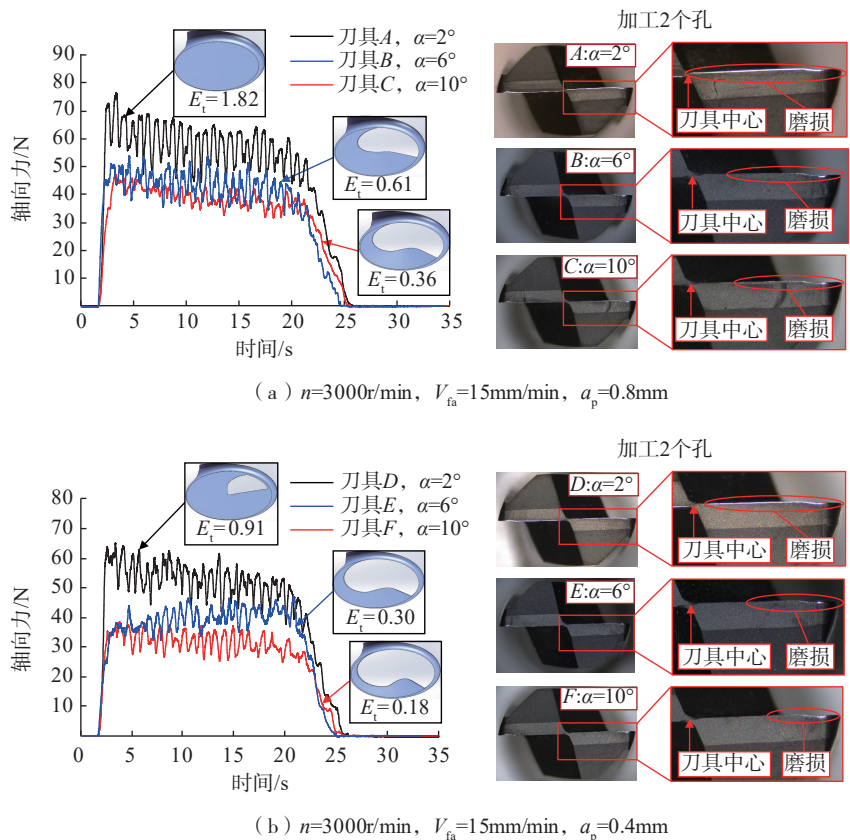


图10 不同加工参数下的特制刀具轴向力与端刃磨损情况对比
Fig.10 Comparison of axial force and end edge wear of special tool under different machining parameters

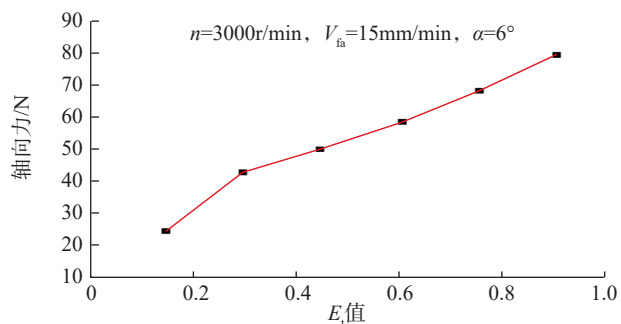


图11 E_t 值对轴向力的影响规律
Fig.11 Impact of E_t value on axial force

参考文献

- [1] 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.
- CHEN Yan, GE Ende, FU Yucan, et al. Review and prospect of drilling technologies for carbon fiber reinforced polymer[J]. Acta Materialia Compositae Sinica, 2015, 32(2): 301-316.
- [2] 谢海龙, 董志刚, 康仁科, 等. C/E 复合材料螺旋铣孔切屑形状与切削温度研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2017(2): 328-334.
- XIE Hailong, DONG Zhigang, KANG Renke, et al. Chip shape and cutting temperature of helical milling of C/E composites[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017(2): 328-334.
- [3] 范玉青, 张丽华. 超大型复合材料机体部件应用技术的进展—飞机制造技术的新跨越[J]. 航空学报, 2009, 30(3): 534-543.
- FAN Yuqing, ZHANG Lihua. New development of extra large composite aircraft components application technology: advance of aircraft manufacture technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(3): 534-543.
- [4] 杨国林, 董志刚, 康仁科, 等. 螺旋铣孔技术研究进展[J/OL]. 航空学报, (2019-10-18) [2019-12-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20191018.1314.018.html>.
- YANG Guolin, DONG Zhigang, KANG Renke, et al. Research progress of helical milling[J/OL]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, (2019-10-18) [2019-12-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20191018.1314.018.html>.
- [5] 康仁科, 杨国林, 董志刚, 等. 飞机装配中的先进制孔技术与装备[J]. 航空制造技术, 2016, 59(10): 16-24.
- KANG Renke, YANG Guolin, DONG Zhigang, et al. Advanced hold machining technology and equipment for aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(10): 16-24.
- [6] QIN X D, WANG B, WANG G F, et al. Delamination analysis of the helical milling of carbon fiber-reinforced plastics by using the artificial neural network model[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(2): 713-719.
- [7] XU J, ZHU X L, KANG R K, et al. Study on machining damage of helical milling for C/E composites[J]. Applied Mechanics and Materials, 2017, 872: 49-55.
- [8] STONE R S, KRISHNAMURTHY K. A neural network thrust force controller to minimize delamination during drilling of graphite-epoxy laminates[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1996, 36(9): 985-1003.
- [9] SADEK A, MESHREKI M, ATTIA M H. Characterization and optimization of orbital drilling of woven carbon fiber reinforced epoxy laminates[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2012, 61(1): 123-126.
- [10] 孟庆勋, 姜寿山, 刘书暖, 等. CFRP 层合板制孔周期内轴向力分布规律研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(11): 110-120.
- MENG Qingxun, JIANG Shoushan, LIU Shunuan, et al. Study of thrust force distribution in a drilling cycle during drilling of CFRP laminates[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(11): 110-120.
- [11] TETI R. Machining of composite materials[J]. CIRP Annals, 2002, 51(2): 611-634.
- [12] TSAO C C, CHEN W C. Prediction of the location of delamination in the drilling of composite laminates[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 70: 185-189.
- [13] 付饶. CFRP 低损伤钻削制孔关键技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- FU Rao. Research of key technologies for low-damage drilling CFRP composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [14] 刘刚, 王亚飞, 张恒, 等. 基于分屑原理的螺旋铣孔专用刀具研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(9): 176, 182-184.
- LIU Gang, WANG Yafei, ZHANG Heng, et al. Research on helical milling specialized tool based on chip-splitting principle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(9): 176, 182-184.
- [15] HOCHENG H, TSAO C C. Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(12): 1403-1416.
- [16] KRISHNARAJ V, PRABUKARTHI A, RAMANATHAN A, et al. Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates[J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(4): 1791-1799.
- [17] CHEN W C. Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1997, 37(8): 1097-1108.
- [18] TSAO C C, HOCHENG H. Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44(10): 1085-1090.
- [19] MAKHDUM F, PHADNIS V A, ROY A, et al. Effect of ultrasonically-assisted drilling on carbon-fibre-reinforced plastics[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(23): 5939-5952.
- [20] DENKENA B, BOEHNKE D, DEGE J. Helical milling of CFRP-titanium layer compounds[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2008, 1(2): 64-69.
- [21] BRINKSMIEIER E, FANGMANN S, RENTSCH R. Drilling of composites and resulting surface integrity[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 57-60.
- [22] RASTI A, SADEGHI M H, FARSHI S S. An investigation into the effect of surface integrity on the fatigue failure of AISI 4340 steel in different drilling strategies[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 95: 66-81.
- [23] 刘刚, 张恒, 王亚飞, 等. 碳纤维增强复合材料螺旋铣孔切削力及加工质量研究[J]. 复合材料学报, 2014, 31(5): 1292-1299.
- LIU Gang, ZHANG Heng, WANG Yafei, et al. Study on cutting force and machining quality of orbital drilling for CFRP[J]. Acta Materialia Compositae Sinica, 2014, 31(5): 1292-1299.
- [24] 王共冬, 李映池, 彭天, 等. 碳纤维复合材料大直径孔制孔方法的研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(6): 48-53, 10.
- WANG Gongdong, LI Yingchi, PENG Tian, et al. Research on large diameter hole

drilling method of the carbon fiber reinforced plastics[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2018(6): 48–53, 10.

[25] WANG G D, MELLY S K, LI N, et al. Research on milling strategies to reduce delamination damage during machining of holes in CFRP/Ti stack[J]. *Composite Structures*, 2018, 200: 679–688.

[26] 张厚江, 陈五一, 陈鼎昌. 碳纤维复合材料(CFRP)钻孔出口缺陷的研究[J]. *机械工程学报*, 2004, 40(7): 150–155.

ZHANG Houjiang, CHEN Wuyi, CHEN Dingchang. Investigation of the exit defects in

drilling carbon fibre-reinforced plastic plates[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(7): 150–155.

[27] 王春浩, 李鹏南, 李树健, 等. CFRP 钻削加工过程的分层缺陷研究进展[J]. *兵器材料科学与工程*, 2019, 42(6): 109–115.

WANG Chunhao, LI Pengnan, LI Shujian, et al. Research progress on delamination defect in CFRP cutting process[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2019, 42(6): 109–115.

[28] 杨晓. 数控铣刀选用全图解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 76–77.

YANG Xiao. Selection of CNC milling

cutter[M]. Beijing: China Machine Press. 2015: 76–77.

[29] LIU C Y, WANG G, DARGUSCH M S. Modelling, simulation and experimental investigation of cutting forces during helical milling operations[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 63(9–12): 839–850.

通讯作者: 康仁科, 教授、博士生导师, 研究方向为超精密与特种加工技术、难加工材料高效加工技术、计算机辅助设计与制造, E-mail: kangrk@dlut.edu.cn。

A Method for Restraining Axial Force in Process of Helical Milling of CFRP

DONG Zhigang, ZHANG Bo, KANG Renke, YANG Guolin, BAO Yan

(Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

[ABSTRACT] In the process of helical milling of carbon fiber reinforced polymer (CFRP), defects such as delamination, tearing and burr at the hole making outlet are caused by excessive axial force produced by the end edge of the tool. In order to reduce the axial force in the helical milling of CFRP, the relationship between the tool end backlash angle and the undeformed chip was analyzed based on the kinematic principle, thus a method was proposed to make the center area with low cutting line speed not participate in the cutting. Furthermore, the condition that the tool center does not participate in cutting was deduced, and the shape of undeformed chip under different combination of end backlash angle and lead is simulated. Finally, the helical milling test was carried out on CFRP. The results show that by increasing the tool end backlash angle and reducing the lead, the center area of the end edge in the helical milling can do not participate in the cutting, so as to reduce the axial force in the helical milling of CFRP effectively.

Keywords: Helical milling; Carbon fiber reinforced polymer (CFRP); Delamination; Axial force; End clearance angle; Undeformed chip

(责编 逸飞)