

# CFRP 钻削过程的切削热研究进展

邹 适 李树健 李鹏南 邱新义 王春浩

(湖南科技大学机电工程学院, 湘潭 411201)

**文 摘** 以CFRP钻削加工过程的切削热和切削温度为研究对象,从其形成机理、产生的影响以及影响切削热的因素和控制切削热的方法四个方面进行了系统综述,对存在的问题进行了综合分析,并对今后研究方向进行了展望。

**关键词** CFRP, 钻削加工, 切削热, 研究进展, 加工质量

中图分类号: TG501.4

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2020.04.003

## Research Progress of Cutting Heat in Drilling Process of CFRP

ZOU Shi LI Shujian LI Pengnan QIU Xinyi WANG Chunhao

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201)

**Abstract** The cutting heat and cutting temperature in the drilling process of CFRP are studied. The formation mechanism, the influence and the factors relating to the cutting heat and the methods to control the cutting heat are systematically reviewed. The existing problems are comprehensively analyzed and future research directions are prospected.

**Key words** CFRP, Drilling process, Cutting heat, Research progress, Machining quality

### 0 引言

随着我国武器装备领域飞速发展,对轻量化、高强度结构件的需求急剧增加。钢铁、铝合金、钛合金等传统金属材料已难以满足高端技术驱动带来的迫切需求,成为制约我国尖端领域发展的技术瓶颈。碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)作为一种以树脂为基体、碳纤维为增强相的新型复合材料,具有轻质、高强、耐腐蚀、抗疲劳、性能可设计等优异性能,在军工国防等领域得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。飞行器翼梁、中央翼盒等关键承力部位,如F-22隐身战机前机身、垂尾、平尾和机翼等部位,都采用了CFRP结构件。

为满足构件连接、装配等工艺条件,CFRP构件在成型后往往还需进行二次机械加工,尤其是钻削加工,几乎占构件二次机械加工的50%<sup>[3-4]</sup>。以生产一架飞机为例,其连接孔多达三百万个<sup>[5]</sup>。随着大型武器装备对整体结构件服役性能要求的不断提高,连接孔的加工质量直接关系到飞行器装配质量和服役寿命。因此,严格控制CFRP构件的制孔质量是确

保飞行器运行可靠及安全服役的关键。然而,由于CFRP非均质各向异性,层间性能相对薄弱,且碳纤维硬度高、材料整体导热性差,在制孔时易产生分层、孔壁损伤、烧蚀等加工缺陷<sup>[6]</sup>,对CFRP的广泛应用形成了严峻挑战。

研究表明,CFRP切削加工缺陷的形成主要与切削力和切削热有关。近年来,国内外对CFRP切削加工的研究多聚焦于切削力上,对切削热的研究相对薄弱。在CFRP钻削加工过程中,由于材料的导热性较差,随着钻削深度的增加,热量不断积聚且很难快速向外进行热传递,易导致工件材料烧蚀、刀具热疲劳磨损等问题,进而影响工件的加工质量和刀具的使用寿命。因此,切削热对CFRP切削加工质量的影响不可忽视。

本文在对国内外相关研究进行系统整理与分析的基础上,针对CFRP钻削过程的切削热,从其形成机理、产生的影响以及影响切削热的因素和控制切削热的方法四个方面进行综述,并对存在的问题及今后研究方向进行分析和探讨。

收稿日期:2019-12-09

基金项目:国家自然科学基金(No. 51775184, No51975208)

第一作者简介:邹适,1996年出生,硕士研究生,主要研究方向为纤维复合材料切削加工。E-mail:bwxs2020@163.com

通信作者:李树健,讲师,研究方向为纤维复合材料成型与切削加工。E-mail:smart0110@126.com

## 1 切削热的形成机理

在CFRP切削加工过程中,纤维不仅受切削力作用产生变形和断裂,还会因自身极强的磨蚀性在与刀具接触时产生大量切削热<sup>[7]</sup>。切削热作为一个不可忽视的物理因素,在CFRP切削加工时参与整个切削过程。

在CFRP切削加工过程中,切削热主要产生于三个区域:(1)切削层在刀具作用下发生弹性变形和塑性变形所消耗变形功的第1变形区;(2)前刀面与切屑摩擦所消耗摩擦功的第2变形区;(3)后刀面与工件表面摩擦所消耗摩擦功的第3变形区,如图1所示。由于CFRP为脆性材料,在切削加工过程中,纤维受到压缩、弯曲、剪切之后发生脆性断裂,形成粉末状切屑。因此,在CFRP切削过程由塑性变形产生的切削热可忽略不计。由于后刀面与工件表面的摩擦最为强烈,因而切削热大部分来自于第三变形区。根据材料切削加工的特点,切削过程产生的切削热主要通过工件、切屑、刀具和介质等途径散出,因此CFRP热导率、刀具热导率、切屑形态和介质成分都会对切削热传递产生一定影响<sup>[8]</sup>。

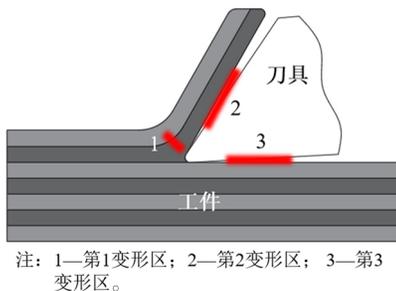


图1 CFRP切削热来源示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cutting heat source of CFRP

基于能量守恒定律,切削过程中产生的切削热能可表示为传入刀具、切屑和工件的热能总和<sup>[9]</sup>,即:

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{CFRP}} + Q_{\text{tool}} + Q_{\text{chip}} \quad (1)$$

式中, $Q_{\text{total}}$ 为接触区的总热能, $Q_{\text{CFRP}}$ 为传入CFRP工件的热能, $Q_{\text{tool}}$ 为传入刀具的热能, $Q_{\text{chip}}$ 为传入切屑的热能。

CFRP切削加工过程中大部分切屑都没有完全从工件表面去除,加工过程的切削热主要向刀具和工件传递。因此,切削热的分配比可表示为:

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1 \quad (2)$$

式中, $\lambda_1$ 为刀具中热能的分配比, $\lambda_2$ 为CFRP工件中热能的分配比。

假设刀具周围绝缘,热量只沿一个方向传导到刀具<sup>[10-11]</sup>,且在正交切削过程中,接触区产生的切削热可视为水平切削力 $F_x$ 做的功<sup>[12]</sup>。因此,CFRP切削过程中刀具的热分配比为<sup>[9]</sup>:

$$\lambda_1 = \frac{k \cdot b}{F_x V_c - G_c \cdot b \cdot V_c} \cdot \frac{\Delta T}{l} \left[ \frac{90^\circ - \alpha_0 + \gamma_0}{180^\circ} \pi R_c + \frac{1}{\sin \alpha_0} \left( \frac{3F_y}{4E^* \sqrt{R_c}} \right)^{2/3} \right] \quad (3)$$

式中, $k, l$ 为常数, $G_c$ 为描述材料断裂韧性参数, $b$ 为工件厚度, $V_c$ 为切削速度, $\Delta T$ 由热电偶测得, $F_x$ 为水平切削力, $\alpha_0$ 为刀具间隙角, $\gamma_0$ 为刀具前角, $R_c$ 为刀具刀口半径, $E^*$ 为等效弹性模量, $F_y$ 为法向切削力。

## 2 切削热对CFRP加工质量的影响

与传统金属材料相比,CFRP切削过程中切削热和切削温度并不高。但由于CFRP的树脂基体是一种对温度敏感的热固性高分子材料( $T_g$ 约为180℃),温度过高会使树脂基体发生玻璃化转变,出现基体变软、碳化等不可逆转化学变化<sup>[7]</sup>,严重影响工件加工质量。而出现这些现象的原因在于:CFRP中树脂及树脂/纤维界面热导率较低(仅为45#钢的1/16),切削过程中热量分配及散热量的不合理,易产生热累积现象,从而使得切削区温度远高于其他区域。而由于热量累积导致切削温度超过树脂基体 $T_g$ 时,加工表面或表面层内树脂会发生降解,使碳纤维失去基体约束与保护作用<sup>[13]</sup>。此时,CFRP材料强度降低,增加了同等加工条件下加工缺陷产生的可能性。另外,碳纤维硬颗粒与刀具产生剧烈摩擦,会产生大量切削热,引起切削温度迅速升高,进一步增加了刀具磨损、毛刺和撕裂损伤的产生<sup>[14]</sup>。

PECAT等<sup>[15]</sup>讨论了在加工不同碳纤维方向的CFRP工件时,切削温度对加工质量的影响。结果表明,在热机械负荷作用下,高速切削会导致靠近加工表面纤维向切削方向弯曲,如图2所示。

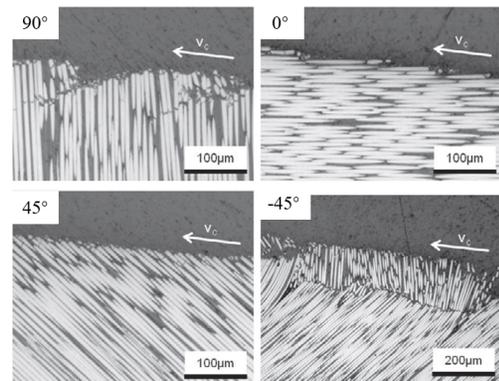


图2 切削热对加工表面不同方向纤维的影响<sup>[15]</sup>

Fig. 2 The influence of cutting heat on fibers in different directions<sup>[15]</sup>

鲍永杰<sup>[16]</sup>通过建立三维CFRP制孔温度场模型,研究了切削热对加工缺陷的影响,但模型的建立是基于外部加热,与实际加工中的温度场尚存在差异。

BRINKSMEIER<sup>[17]</sup>采用热电偶测温法,测得CFRP-Al-Ti叠层材料的钻削温度和螺旋铣孔温度,通过对比不同切削温度加工后的表面质量,得到切削温度是影响CFRP表面质量重要因素的结论。EL-HOFY<sup>[18]</sup>发现对CFRP进行切削加工时,大部分切削功转换为热量,约50%的切削热被刀具吸收,远大于金属材料的18%,且切削温度会直接影响刀具的磨损和使用寿命。CFRP的切削过程中,切削刃的磨粒磨损是致使切削温度上升的一个重要原因<sup>[19]</sup>。因此,切削热会对CFRP加工质量产生一定影响。

综上所述,切削热是除切削力外影响工件切削加工质量的另一重要因素。尤其对于CFRP这类导热性差,但对热敏感性较强的材料,其切削加工过程的热问题更不容忽视。从相关研究文献来看,目前针对切削热对CFRP加工质量的影响研究还主要停留在表层现象上,缺乏从深层次进一步揭示切削热对材料损伤机理的研究。此外,针对CFRP切削热的建模研究,目前多集中于整体结构的热传导建模,还缺乏从材料多尺度角度建立材料与工件、介质间的理论模型研究。

### 3 CFRP切削热的影响因素

#### 3.1 工件因素

由于CFRP为脆性材料,在切削加工过程中材料的破坏主要为脆性断裂,由塑性变形所产生的热量较少,因此CFRP整体切削热较低。但CFRP比热容较大,切削过程中由切削区产生的切削热传入工件的速度比传入刀具的速度更快,导致大部分切削热传入工件内部。此外,纤维热导率也存在各向异性,使得CFRP切削加工时不同纤维方向角的热量分配比也不同<sup>[9]</sup>。

蔡晓江<sup>[7]</sup>研究了CFRP正交切削时不同纤维角( $\theta$ )对切削温度的影响, $\theta < 90^\circ$ 时,切削温度随纤维方向角增大呈线性增长,当 $\theta > 90^\circ$ 时,切削温度随纤维方向角增大总体呈下降趋势,但在纤维方向角为 $165^\circ$ 时略有上升。GHAFARIZADEH<sup>[20]</sup>研究发现,纤维方向和切削速度是影响切削温度的主要因素,当纤维方向角为 $90^\circ$ 时切削温度最高。MERINO-PÉREZ<sup>[21]</sup>采用热成像技术研究发现,具有更高交联密度和更紧密堆积的分子网络树脂,散热性和热稳定性更好,玻璃化转变温度更高。KERRIGAN<sup>[22]</sup>指出,在铣削过程中,CFRP工件厚度和切削深度对切削温度具有显著影响。QUAN<sup>[23]</sup>通过对CFRP材料钻削加工,发现工件厚度对钻孔温度有显著影响,随着工件厚度增加,刀具与工件之间摩擦距离增加,产生的切削热量也越多,散热越困难,切削温度显著增加。

实际上,CFRP材料自身的热物理性质(比热容、纤维热导率等)也受温度影响<sup>[24]</sup>。在CFRP切削加工过程中,随切削温度的增加,材料的热物性参数并非一成不变。切削加工中的热物性参数动态变化,必然会对加工中的工件温度场产生影响,进而影响基体树脂对纤维的约束和支撑作用。另外,CFRP在成型过程中所形成的固化缺陷也会对切削热的形成与分布产生影响。因此,今后对CFRP切削热的研究,在工件因素方面还应考虑材料的热物性参数及固化缺陷的影响。

#### 3.2 加工工艺因素

切削速度、进给速度等工艺参量直接参与工件加工的整个过程,同样会通过影响切削热或切削温度而间接影响最终切削加工质量。WANG<sup>[13]</sup>研究指出,CFRP切削过程中,切削速度是影响切削温度的关键参数,其次是进给速度和径向切削深度。HA<sup>[25]</sup>通过对CFRP进行干式切削试验得出,切削温度随着切削速度增加而增加,但随切削深度增加,切削温度上升的趋势较为缓慢,由于深抗力的影响,当 $V_c > 200$  m/min时切削温度上升趋势相比 $V_c < 200$  m/min时缓慢<sup>[7]</sup>。针对CFRP钻削加工过程, MERINO-PÉREZ<sup>[21]</sup>通过切削速度对CFRP钻削过程散热性能的影响发现,与低切削速度相比,高切削速度导致更严重的基体开裂和孔进/出口裂缝,但未观察到基体明显烧蚀或热解等损伤,这表明基体的热损伤需要在切削温度高于基体分解温度时才会产生。QUAN<sup>[23]</sup>研究指出,钻削温度取决于材料去除率和切削时间;当进给速度较低时,增加转速或进给量会导致钻孔温度上升,而当进给速度超过一定值时,随着转速或进给量增加钻削温度则会降低。SORRENTINO等<sup>[26]</sup>利用新开发的温度测量方法测得CFRP钻削的温度历程,通过实时温度分析获得了切削温度随切削速度和进给速度的变化趋势。结果表明,刀具的最高温度随切削速度的增加而增大,随进给速度的增加而减小。而对于相应的工件,当进行低速钻削时,在距离工件孔表面1和3 mm处的切削温度随进给速率的增加而减小,但在高切削速度下切削温度几乎恒定。

由此可以看出,切削热或切削温度与切削工艺参量之间的关联机制不是单纯的线性关系,其对加工质量的影响更不是简单的线性叠加。因此,准确表征CFRP切削工艺参量与切削热或切削温度的关联关系,还需要进行更为系统和深入的研究。

#### 3.3 刀具因素

作为外部载荷作用的直接载体,切削刀具直接参与与工件材料的接触和摩擦,因此刀具自身(包

括刀具材料和结构)都会对切削温度的形成产生显著影响。在进行CFRP切削加工时,所使用刀具参数不同,对切削温度的影响程度也存在差异。

在刀具材料方面,王奔<sup>[27]</sup>通过对比硬质合金、金刚石涂层、PCD三种不同材料刀具钻削CFRP的过程,发现金刚石涂层刀具能使切削温度降低40%,PCD刀具能使切削温度降低52%。通过对比硬质合金钻头与高速钢钻头的钻削CFRP的过程,发现硬质合金钻头产生的钻削温度低于高速钢钻头<sup>[23]</sup>。

在刀具结构方面,相关研究表明<sup>[7]</sup>,增大刀具前角 $\gamma_0$ 能够降低CFRP材料的切削温度,但达到一定程度后若继续增大 $\gamma_0$ ,会由于散热体积减小而导致切削温度不降反升。由于CFRP存在各向异性,因此在相同前角的情况下,前角 $\gamma_0$ 对 $\theta=0^\circ$ 方向切削温度的影响大于 $\theta=90^\circ$ 方向。同时由于更大的后角 $\alpha_0$ 能有效地缓解工件回弹后工件表面与后刀面的摩擦,因此,更大的刀具后角,切削温度较低。文献[9]发现刀具几何参数对CFRP不同纤维方向角的接触面积存在影响,而接触面积的增大会使工件的热量分配比下降。CHANG<sup>[28]</sup>通过使用9种不同刀尖半径的硬质合金刀具对CFRP材料进行切削来研究切削温度,结果表明刀尖半径 $r=0.3\text{ mm}$ 时,产生的切削温度最低。

通过相关研究不难发现,切削刀具是产生切削热并进一步影响工件加工质量的重要因素,而切削热的产生进一步增加了切削刀具的热磨损等损伤的产生趋势。尤其对于CFRP这类对加工温度更为敏感的复合材料,刀具的热磨损、工件材料的热烧蚀以及纤维/基体界面因材料软化而导致的纤维支撑失稳等问题必须引起高度重视。因此,无论从刀具材料上还是其结构特征上,厘清切削热与切削刀具的内在影响机制,是进行加工质量控制的前提和基础。

#### 4 切削热控制策略

为抑制CFRP切削加工过程切削热的产生,降低切削温度对工件和刀具的热影响,提高工件加工质量,学者们尝试从开发新工艺方面开展了大量工作。殷俊伟<sup>[9]</sup>使用外部喷冷空气冷却的加工方法降低加工过程中工件累积的热量来抑制加工损伤的产生。王福吉<sup>[29]</sup>通过减少单次切削厚度的方法(小齿进给)对CFRP进行切削加工,结果表明该方法可降低材料热软化率和切削热对加工过程的影响。HA<sup>[25]</sup>等利用涡流管和具有干冰作为制冷剂的热交换器进行低温切削加工,发现在低温条件下进行高速加工可有效降低切削温度、切削阻力以及工件表面的加工缺陷。XIA<sup>[30]</sup>指出深冷有助于提高刀具的耐磨性能,在CFRP钻孔加工时使用低温冷却能提高钻孔质量。

除采用低温方式来控制切削热外,学者们针对超声振动抑制切削热产生的方法也进行了系列研究。XU<sup>[31]</sup>对比有无超声波辅助CFRP切削过程,发现在无超声辅助时,工件在切削一段时间后切削温度不断上升并超过基体 $T_g$ ;在利用超声辅助切削时,由于刀具高频运动,导致刀具与工件的相互作用时间减小以及切屑去除效率增加,从而大大降低了工件升温速率,进而使切削热最小化,工件和刀具的系统温度始终保持在树脂 $T_g$ 以下,确保材料在脆性模式下进行切削来获得较好的加工质量。XU<sup>[32]</sup>研究同样发现通过超声高频振动可快速排屑、降低CFRP工件升温速率和热量积聚,并指出对刀具进行结构优化设计,有助于排屑和加快散热速率。

虽然学者们通过开发各类新型工艺来抑制CFRP切削加工过程的切削热产生做出了许多大胆的尝试,也取得了一定的成果,但由于实施环境、应用场合、加工效率以及工艺成本等问题,现有新型工艺方法还未能广泛推广。因此,面向CFRP低切削热、高品质切削加工的切削热抑制策略和新型工艺开发仍然任重道远。

#### 5 展望

(1)在CFRP切削热的形成机理研究方面,现有关于切削热在加工系统中的分配研究局限性较大,且针对切削热在工件中分布的研究较少。为准确表征切削热的分配机制,今后有必要从力热耦合角度来进一步建立切削热理论模型。

(2)在切削热对CFRP加工质量影响方面的研究还主要停留在表层直观现象上,缺乏更深层次切削热对工件产生损伤的机理研究,特别是刀具疲劳磨损产生热损伤的机理,还需深入研究。而针对这一部分的模型大多为整体热传导,缺少从多尺度方面建立考虑材料热物性参数的切削热理论模型。

(3)在CFRP切削热影响因素研究方面,各因素对加工质量的影响不是简单的线性叠加,尚需在现有研究基础上,进一步厘清与表征各影响因素与切削热的内在关联。

(4)在CFRP切削热控制策略方面,学者们尝试从开发新工艺方面开展了大量研究,但受于多种局限性,现有新型工艺方法还未能普及和推广,因而切削热的控制策略及新型工艺开发仍任重道远。

#### 参考文献

[1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.

DU S Y. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12.

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2020年 第4期

- [2] LI S J, ZHAN L H, CHANG T F. Numerical simulation and experimental studies of mandrel effect on flow compaction behavior of CFRP hat shaped structure during curing process[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2018, 18(4): 1386-1400.
- [3] 邱新义, 李鹏南, 陈安华, 等. 三种钻头钻削 CFRP 轴向力的时变曲线及预测[J]. 宇航材料工艺, 2018, 48(6): 63-67.
- QIU X Y, LI P N, CHEN A H, et al. Thrust force versus time curves and their prediction in drilling CFRP with three kinds of drills [J]. Aerospace Materials & Technology, 2018, 48(6): 63-67.
- [4] XU J, LI C, DANG J, et al. A study on drilling high strength CFRP laminates: frictional heat and cutting temperature [J]. Materials, 2018, 11(12):2366.
- [5] 明伟伟, 王昌赢, 魏莹莹, 等. 纤维增强复合材料制孔刀具技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2013, 434(14):34-37.
- MING W W, WANG C Y, WEI Y Y, et al. Research progress of hole making cutting tool on fiber reinforced plastic [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 434(14): 34-37.
- [6] 王志超, 林有希, 林华. 碳纤维复合材料孔加工缺陷的研究进展[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(1):7-9.
- WANG Z C, LIN Y X, LIN H. Research progress on CFRP hole drilling defects[J]. Machine Building & Automation, 2018, 47(1):7-9.
- [7] 蔡晓江. 基于复合材料各向异性的切削力热变化规律和表面质量评价试验研究[D]. 上海:上海交通大学, 2014.
- CAI X J. Experimental study on cutting force and heat variation and surface quality evaluation based on anisotropy of composites[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [8] 贾振元, 毕广健, 王福吉, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料切削机理研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(23): 199-208.
- JIA Z Y, BI G J, WANG F J, et al. The research of machining mechanism of carbon fiber reinforced plastic [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(23):199-208.
- [9] 殷俊伟. CFRP 切削加工损伤成因及其评价方法[D]. 大连:大连理工大学, 2018.
- YIN J W. Mechanism of damage formation and damage evaluation method in machining of CFRP composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [10] ZITOUNE R, COLLOMBET F, LACHAUD F, et al. Experiment calculation comparison of the cutting conditions representative of the long fiber composite drilling phase [J]. Composites Science & Technology, 2005, 65(3-4):455-466.
- [11] MKADDEM A, BEN S A, EL M M. Wear resistance of CVD and PVD multilayer coatings when dry cutting fiber reinforced polymers (FRP)[J]. Wear, 2013, 302(1-2):946-954.
- [12] CHARDON G, KLINKOVA O, RECH J, et al. Characterization of friction properties at the work material/cutting tool interface during the machining of randomly structured carbon fibers reinforced polymer with poly crystalline diamond tool under dry conditions [J]. Tribology International, 2015, 81: 300-308.
- [13] WANG H, SUN J, LI J, et al. Evaluation of cutting force and cutting temperature in milling carbon fiber reinforced polymer composites [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(9-12):1517-1525.
- [14] 焦锋, 王东. CFRP/钛合金叠层材料制孔技术的现状与展望[J]. 宇航材料工艺, 2018, 48(6):10-19.
- JIAO F, WANG D. Recent advances and prospects in hole making for CFRP/Ti composite [J]. Aerospace Materials & Technology, 2018, 48(06):10-19.
- [15] PECAT O, RENTSCH R, BRINKSMEIER E. Influence of milling process parameters on the surface integrity of CFRP[J]. Procedia CIRP, 2012(1):466-470.
- [16] 鲍永杰, 高航, 马海龙, 等. 单向 C/E 复合材料磨削制孔温度场模型的研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(1): 169-176.
- BAO Y J, GAO H, MA H L, et al. Research on temperature field model during grinding drilling of unidirectional carbon/epoxy composites [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(1):169-176.
- [17] BRINKSMEIER E, FANGMANN S, RENTSCH R. Drilling of composites and resulting surface integrity [J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2011, 60(1):57-60.
- [18] EL-HOFY M H, SOO S L, ASPINWALL D K, et al. Tool temperature in slotting of CFRP composites [J]. Procedia Manufacturing, 2017(10):371-381.
- [19] 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.
- [20] GHAFARIZADEH S, LEBRUN G. CHATELAIN J-F. Experimental investigation of the cutting temperature and surface quality during milling of unidirectional carbon fiber reinforced plastic [J]. Journal of Composite Materials, 2015, 50(8): 1059-1071.
- [21] MERINO-PEREZ J L, ROYER R, AYVAR-SOBERANIS S, et al. On the temperatures developed in CFRP drilling using uncoated WC-Co tools part I: workpiece constituents, cutting speed and heat dissipation [J]. Composite Structures, 2015, 123:161-168.
- [22] KERRIGAN K, THIL J, HEWISON R, et al. An integrated telemetric thermocouple sensor for process monitoring of CFRP milling operations [J]. Procedia Cirp, 2012(1): 449-454.
- [23] QUAN Y, SUN L. Experimental investigation on drilling temperature of composites [J]. International Journal of Machining and Machinability of Materials, 2008, 3(3/4):

356-363.

[24] 王晓霞. 热固性树脂基复合材料的固化变形数值模拟[D]. 济南:山东大学,2012.

WANG X X. Numerical simulation of curing deformation of thermosetting resin matrix composites [D]. Jinan: Shandong University,2012.

[25] HA S J, KIM K B, YANG J K, et al. Influence of cutting temperature on carbon fiber reinforced plastic composites in high-speed machining[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2017,31(4):1861-1867.

[26] SORRENTINO L, TURCHETTA S, BELLINI C. In process monitoring of cutting temperature during the drilling of FRP laminate[J]. Composite Structures,2017,168:549-561.

[27] 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.

WANG B. Influence mechanism of cutting force & heat on hole making damage of C/E composites [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2014.

[28] CHANG S C. A study of cutting temperatures in turning carbon fiber reinforced plastic (CRFP) composites with

nose radius tools [J]. Key Engineering Materials, 2015, 649: 38-45.

[29] 王福吉,殷俊伟,贾振元,等. CFRP复合材料铣削力、温度及表层损伤分析[J]. 机械工程学报,2018,54(3):186-195.

WANG F J, YIN J W, JIA Z Y, et al. Measurement and analysis of cutting force, temperature and cutting induced top layer damage in edge trimming of CFRPs [J]. Journal of Mechanical Engineering,2018,54(3):186-195.

[30] XIA T, KAYNAK Y, ARVIN C, et al. Cryogenic cooling-induced process performance and surface integrity in drilling CFRP composite material [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2015,82(1-4):605-616.

[31] XU W, ZHANG L. Heat effect on the material removal in the machining of fibre reinforced polymer composites [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2019, 140:1-11.

[32] XU J, LI C, MANSORI M E, et al. Study on the frictional heat at tool work interface when drilling CFRP composites[J]. Procedia Manufacturing,2018,26:415-423.