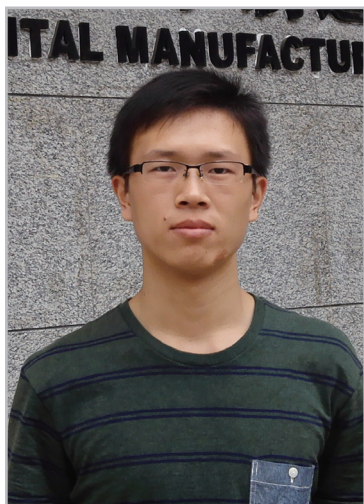


碳纤维增强复合材料加工技术 研究进展*

Research Progress on Machining Technology of Carbon Fiber Reinforced Plastic

武汉理工大学机电工程学院 刘树良 陈涛 魏宇祥
华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室 吴超群



刘树良
博士研究生,从事数字制造研究。

通过 4 部分综合阐述 CFRP 的加工技术:(1)CFRP 切削理论,强调对 CFRP 加工要从机械性能结构角度深入理解;(2)CFRP 传统加工方法;(3)超声振动加工 CFRP 的应用;(4)有关 CFRP 加工的数值模拟仿真研究,旨在用更加有效的方法理解和预测加工过程。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.14.081

碳纤维增强复合材料(CFRP)是一种基于碳/石墨纤维的纤维增强聚合物,耐热性能好,具有高强度质量比、高模量质量比(E/ρ)、高阻尼能力、较好的尺寸稳定性、出色的损伤容限以及良好的耐腐蚀和抗疲劳性能。因此,CFRP 现在被广泛应用于航空航天、机器人、制造业、化工机

械、医疗和军工领域^[1-2]。

CFRP 在加工过程中,基体和纤维复杂的相互作用使材料的物理特性与传统的金属有很大不同。由于 CFRP 的不均匀性和各向异性,加工时会导致纤维的拉出和基质纤维的脱离;CFRP 具有较高耐热性和耐磨损性,使刀具磨损严重且切削热较大。此外,随着应用领域的不断增加和对材料使用性能要求的不断提高,CFRP 的加工变得越来越困难,质量难以保证,加工成本很高,所以有关 CFRP 加工技术的研究也显得越来越重要^[3-4]。

目前关于 CFRP 加工技术的综述和研究鲜见报道,现有文献中关于 CFRP 加工技术的研究和所遇到

的问题也缺少全面、详细的阐述和研究。本文主要通过 4 部分综合阐述 CFRP 的加工技术:(1)CFRP 切削理论,强调对 CFRP 加工要从机械性能结构角度深入理解;(2)CFRP 传统加工方法;(3)超声振动加工 CFRP 的应用;(4)有关 CFRP 加工的数值模拟仿真研究,旨在用更加有效的方法理解和预测加工过程。

CFRP 切削理论

CFRP 的不均匀性和各向异性,导致工件和刀具的相互作用与切削金属时刀具-工件接触面的相互作用有着显著差异。通过对 CFRP 加工过程中切屑形成和材料去除原理的研究,可以更加深入地了解 CFRP

* 湖北省科技计划项目(2015BAA022)及数字制造装备与技术国家重点实验室开放课题(DMETKF2015014)资助。

切削理论的发展状况。此外,对加工过程经过特定的假设和简化,基于现有完善的切削理论,可以通过试验对切削力及产生的切削热进行预测,研究加工参数对工件加工表面质量的影响,并且有利于工艺参数优化和工具改进。回顾和比较包括 CFRP 切屑形成原理与其加工中工件和刀具相互作用在内的切削理论,并对加工过程中所产生的切削热作简要分析。

1 纤维取向

纤维取向在 CFRP 工件和刀具接触面的相互作用中会产生重大影响,因此在 CFRP 加工时,有必要明确描述出不同纤维取向。图 1 显示了在正交切削 CFRP 时刀具切削方向和纤维方向间的关系,纤维取向范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。

在 CFRP 切削过程中,切屑形成和纤维取向密切相关, Koplev 等^[5]率先通过试验研究了 CFRP 切削时的切屑形成,结果显示: CFRP 工件和刀具接触面的断裂是由刀尖所施加的压力导致的。在多种纤维取向方面,共有 3 种切削机理:(1) 纤维的断裂沿着纤维和基体接触面的方向,即纤维取向是 0° ; (2) 刀具剪切时方向垂直于纤维轴,纤维取向为 75° ; (3) 纤维取向为 90° 甚至负角度,具体如图 2 所示。

Henerichs 等^[6]提出纤维方向角度 30° 、 60° 、 90° 是最关键的方向,它们会导致大的切削力和集中磨损及工件破坏,通过增加刀具后角值可以有效地减小进给推力;与前角相比,后角对切削力的影响更大;使用具有小的楔角尤其是具有较大的后角刀具,能获得较低的切削力。纤维方向的不同会影响工件的表面质量:当纤维方向为 0° 时,工件表面纤维断裂较少且粗糙度低,不发生分层;当纤维方向为 30° 、 60° 、 90° 时,工件表面会随着后角的增大而有少量回弹,并由此引发复合基材料溢出现象。

2 切削热

在工件和刀具的接触面,刀具常常会经历高温并引起热软化,甚至是刀具材料的降解。而 CFRP 的切削过程是碳纤维断裂和基体材料去除的复杂过程,并且由于其导热性能比传统金属材料差,多数情况下切削过程中不允许使用冷却液,切削热无法快速散出,而是主要传导到刀具和工件上^[7]。受切削热的作用,工件表面热影响加剧,破坏复合材料的表面质量,从而影响其使用性能;另外,大量的切削热使得刀具温度升高,加剧了刀具磨损,降低了其使用寿命。复合材料切削热的研究主要集中在切削温度的测量方法上,国内外很多学者采用红外测温仪、热像仪或者埋入热电偶等方式对碳纤维复合材料的切削温度进行测量研究。

Sreejith 等^[8]研究发现,进给速度和切削速度的增大都会使切削区

域的温度稳步升高。Keizo 等^[9]发现,在 CFRP 钻孔加工中,当进给速度很低时温度却反常地升高,有人认为这是由于切削刃有很高的温度,导致环氧基体局部损伤而造成的。

北京航空航天大学复合材料加工技术研究课题组用埋入人工热电偶的方法测量到钻头切削部分靠近中心和最外侧两点的温度,结果表明:树脂基碳纤维复合材料的钻削加工温度一般不超过 $1500 \sim 2000^\circ\text{C}$ 。

李伟^[10]等研究碳纤维/树脂复合材料的结构特性,建立了磨削温度场数学模型;并开发建立碳纤维/树脂复合材料的磨削测温系统,研究磨削加工中磨削温升的特点;建立磨削温度的经验公式,分析碳纤维/树脂复合材料磨削温度、磨削力的特点及对工件加工质量的影响,优化了工艺参数;分析研究了刀具钻削温升的特点及对刀具磨损的影响。

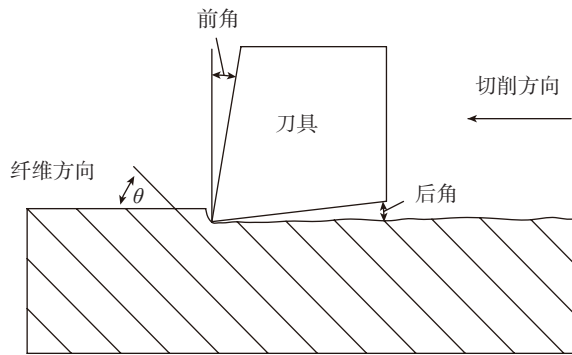


图1 刀具切削方向和纤维方向间的关系

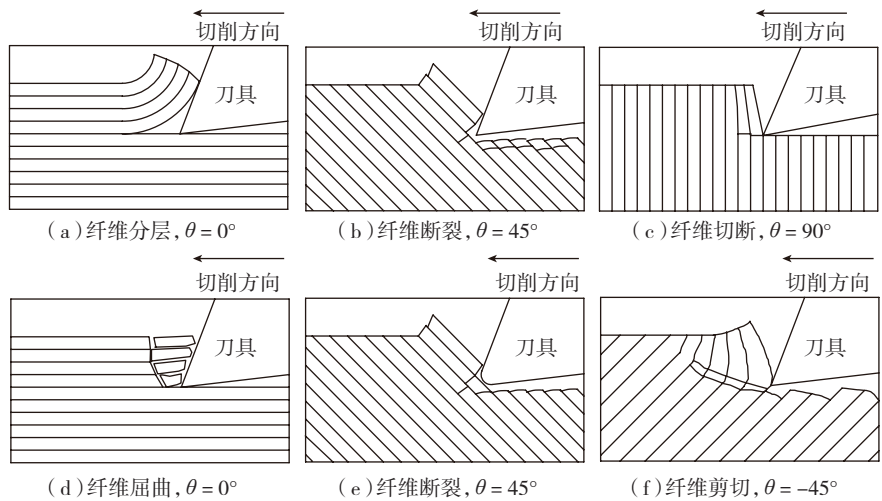


图2 不同纤维方向角度下的切削机理

3 刀具磨损机理

CFRP 归结为难加工材料的原因之一就是刀具磨损严重,其加工过程中刀具的机械磨损机理可以定义为:在刀具和工件接触面,由于磨损、加工影响或振动等因素,使刀具硬质颗粒从刀具表面剥离。CFRP 加工中刀具磨损的主要类型有:刀具破坏和磨损。考虑到磨损发生的不同位置,磨损现象包括刀尖磨损、刀具侧面磨损、刀具边缘破坏和边缘磨损^[11]。

影响刀具磨损的因素有很多,主要包含:加工工艺参数、刀具几何形状和材料等。在 CFRP 切削过程中,工艺参数(如切削速度、进给速度、纤维取向等)会显著地影响刀具磨损。一般而言,切削速度增加会加剧侧面磨损。刀具几何形状和材料对加工表面、切屑形成、切削力和刀具磨损有着显著的影响^[12]。

CFRP 传统加工

CFRP 有很多机械加工方法,传统的方法如车削、磨削、钻孔等,非传统方法如超声振动切削加工等。本节描述几种重要的传统加工过程和其相应的功能,并阐述 CFRP 加工的技术背景,进一步探讨工艺参数对切削性能和加工表面质量的影响。

1 车削加工

车削是在 CFRP 加工中应用最广泛的加工方法之一,主要用于实现圆柱表面预定的尺寸公差。适用于 CFRP 车削的可行刀具材料有:陶瓷、硬质合金、立方氮化硼(CBN)和聚晶金刚石(PCD)。切削加工表面质量和刀具使用寿命是研究关注的焦点,因为这两个特征受工艺参数的影响较大,如进给速度、切削深度、切削速度等,同时还要考虑刀具特征,如刀具几何形状和材料等。

Santhanakrishnan 等^[13]使用硬质合金刀具进行切削试验,用以观察切削现象和刀具性能,同时考虑切削力变化、刀具磨损、表面粗糙度和切

屑成型等因素,得出:用硬质合金工具可以加工出一致的表面纹理,但前提是能够防止或者减少侧面磨损。之后, Kim 等^[14]分析了表面粗糙度的数学表达式,揭示了进给速度和刀具几何形状对表面质量的重要影响。Rajasekaran 等^[15]使用立方氮化硼工具加工 CFRP 时,利用模糊逻辑算法来预测表面粗糙度与进给速度、切削速度、切削深度的关系,发现进给速度是影响表面粗糙度的最大因素。

2 铣削加工

铣削通常用于 CFRP 工件的精确尺寸和复杂形状的加工。铣削加工可看作是一种修正操作,能得到预期要求的较高质量加工表面。在加工过程中,由于端铣刀和 CFRP 之间的复杂的相互作用,CFRP 工件分层和未切断的纤维纱线毛边的现象时有发生。为减少纤维分层现象和毛边的产生,进行了大量的尝试和探索。在加工过程中,对推力和轴向切削力进行准确预测,会成为控制工艺参数的良好指标,可以避免纤维分层并减少毛刺的形成;合理设计和控制刀具路径也可以有效地减少毛刺的形成和纤维分层^[16]。主要的工艺参数,如纤维取向、轴向和切向进给速度、切削速度等,都会对工件表面粗糙度产生显著影响。

3 钻孔加工

在组件进行螺栓或铆接装配前均需要钻孔操作。在 CFRP 钻孔过程中存在的主要问题有:材料层离现象、刀具磨损以及孔内表面加工质量等。通过试验可知,切削参数、钻头几何形状、切削力对分层现象和表面质量均有影响。Chen^[17]定义了分层因子,即损伤区最大直径和孔直径比率,用于分析分层现象,分层因子越大,表明分层现象越严重;另外,通过试验可知,切削推力和分层因素是有相互关系的,可利用切削推力表征分层程度。对于同样的钻孔材料,切削速度对切削力影响并不大,而且

从中可以得出,降低出口的进给速度,会使分层因子减小。

Tsao 等^[18]通过研究得出了切削参数和钻头几何形状对 CFRP 分层的影响。在同一切削参数下,与麻花钻头相比,参数对复合型特殊钻头分层影响较低。对于特殊几何特征的钻头,较大的进给速度和钻头直径可以减少分层,并且不同直径比钻孔切削力会随着直径比的减小而增大,随着进给速度的增大而增大。

4 磨削加工

在船舶、航天航空等领域,对 CFRP 的加工精度要求极为苛刻,需利用磨削加工实现较高加工表面质量。然而,磨削加工 CFRP 要比金属困难和复杂得多,国内外学者也进行了相关研究。

Hu^[19-20]和 Soo 等^[21]分别以多向和单向 CFRP 为对象,重点研究纤维方向和磨削深度对磨削力和表面完整度的影响,并初步探讨磨削加工 CFRP 的切削机理。结果显示:在同一磨削条件下,磨削加工多向 CFRP 时,切削力随磨削深度增加呈线性增加趋势,且大于加工单向 CFRP 时的切削力;而对于单向 CFRP 工件加工,表面完整性受纤维方向影响较大。

盛贤君等^[22]针对传统的 CFRP 钻孔加工易产生缺陷的问题,开展“以磨代钻”新工艺的研究,并研制了新型电镀超硬磨料刀具,实现对 CFRP 构件数控钻磨工艺装备的控制,得出:“以磨代钻”新工艺的钻磨装备可获得较高的加工精度及表面质量,满足当前 CFRP 构件孔加工的工业要求。

Sasahara 等^[23]设计了一种杯形砂轮,在其内部提供冷却液对 CFRP 进行磨削加工,比较了干式磨削、外部冷却液磨削和内部冷却液磨削 3 种加工方式,结果显示:内部冷却液磨削方式加工过程中,附着于砂轮上的基体树脂明显减少,砂轮中的磨粒

能更有效地磨削纤维且在材料表面不会产生层离或毛刺现象;这种砂轮内部提供冷却液的方法展示出了更强的冷却效果,能显著降低磨削温度,同时有利于切屑的排出。

CFRP 超声振动和特种加工技术

1 超声振动加工技术

超声振动加工技术是在传统机械加工中刀具与工件相对运动的基础上,对刀具或工件施加超声振动,以获得更好加工性能的一种复合型加工方法。该技术可以明显提高加工表面质量,显著降低表面粗糙度和切削温度,并减少裂纹生成,同时降低加工成本,为 CFRP 等难加工材料的广泛应用提供了技术途径。由于超声振动的引入,改变了材料去除机理,降低工具与工件之间的摩擦力,减小工具与工件的作用时间,增强工具对工件的切削去除作用,从而有效提高材料去除率,减小切削力,降低切削热,减少刀具磨损,改善加工精度和质量^[24]。

2 CFRP 超声振动加工技术研究现状

将超声辅助加工技术用于复合材料加工方面的研究较早的是日本学者 Takeyama,他在 1988 年采用直角切削的方式研究了超声辅助切削加工不同角度玻璃纤维增强树脂基复合材料的切削力、表面质量和切屑形成等,研究结果表明超声辅助切削加工在切削力和表面质量方面是有显著效果的,证明采用超声辅助切削加工复合材料是一种可行的方法。随后 Kirn 等在不同加工参数条件下对 CFRP 进行超声辅助车削加工试验,试验结果表明在极限切削速度以下,相对于普通车削加工,超声辅助车削加工可以获得更高质量的加工表面。

(1) 超声振动钻孔加工。

超声振动钻孔加工是一种非传

统的加工方法,在高效钻削加工复合材料方面具有很大发展潜能,其主要优点包括:减小切削力和力矩;提高加工表面质量,减少毛刺;避免分层现象发生等。

Cong 等^[25]研究以金刚石磨粒旋转超声振动钻孔加工 CFRP,旋转超声钻孔加工如图 3 所示。对 CFRP 的机理分析表明:CFRP 的材料去除机理更适用于脆性断裂而不是塑性变形,建立切削力模型用于预测加工参数和加工环境对切削力影响的关系,并通过试验验证了该力学模型的准确性。

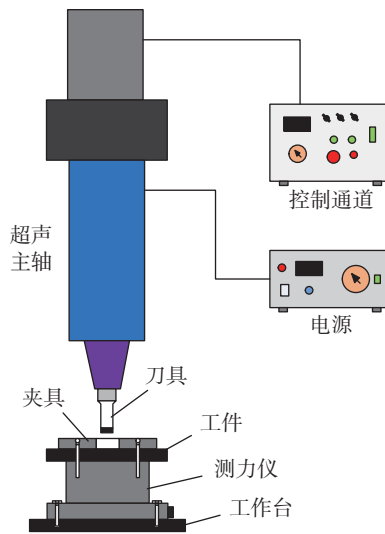


图3 旋转超声钻孔加工示意图

Feng 等^[26]研究旋转超声钻孔加工 CFRP 材料,通过试验获取切屑、切屑边缘形态、表面粗糙度、刀具磨损和切削力及力矩等参数,研究旋转超声加工参数(主轴转速、振动幅值、进给速度)对切削力和表面粗糙度的影响。试验结果表明:当超声波功率越大、主轴转速越高且进给速度越低时,切削力就越小;通过测量加工孔进出口处的表面粗糙度得出进出口处的表面质量高;观察刀具磨损情况,得出刀具端面有显著的磨损,而刀具端面磨损较少。

Liu 等^[27]研究旋转超声椭圆钻孔加工 CFRP。结合空心钻和椭圆工件振动加工的优点,可获取高质量无

层离的自由孔。分析了超声椭圆振动加工的切削力模型和切屑去除现象,并通过试验验证旋转超声椭圆加工 CFRP 的可行性。结果显示:与传统钻孔加工相比,切屑去除率增加且刀具磨损减小,孔的加工精度和表面质量都得到了提高,且无层离现象,切削力减小。

(2) 超声振动磨削加工。

超声振动磨削加工结合了金刚石磨削加工材料去除机理和具有超声加工特点的复合式磨削加工技术。其优点主要有:可产生切削力减小和切屑减薄的效果;改善工件表面精度和形状精度;提高材料去除率,延长工具的寿命;提高脆性与延性域发生转变的临界切削深度,实现脆性材料的延性域加工。

任宇江^[28]等设计超声辅助磨削试验平台,进行超声辅助磨削和普通磨削加工中的磨削力对比试验,研究磨削力随参数(超声振幅、主轴转速、进给速度和切削深度)的变化规律。对比结果表明:超声辅助磨削的磨削力最大可降低约 50%,工件表面粗糙度值降低约为 10%~30%;并探讨了超声辅助磨削的加工机理,观察工具堵塞、表面形貌和碎屑形态,进行工艺试验研究,优化加工参数。

马付建^[29]等根据纵向振动的力学理论和薄圆盘振动理论,建立超声辅助车削变幅杆以及采用小工具和大工具的超声辅助磨削变幅杆的设计方法,研制出适用于旋转超声辅助加工的非接触式电能传输单元,并对三维编织 C/C 复合材料进行超声振动加工试验。与普通车削对比结果表明:超声辅助磨削 C/C 复合材料可以显著提高表面质量,降低切削力、切削温度和刀具磨损等,并且超声振动还可以降低刀具与工件材料间的摩擦系数,减少砂轮表面堵塞并获得较好的表面质量。

(3) 超声振动铣削加工。

王晓博^[30]等基于波动理论设

计适用于高速加工中心的专用超声纵向铣削声学系统和对工件施加二维超声振动的平面振动系统;研究 CFRP 铣削机理,建立超声振动铣削 CFRP 平均切削力模型;分析材料表面缺陷产生的机理及刀具失效形式和磨损机理。结果表明:超声振动的引入可以降低铣削力;主轴转速提高,切削力减小;轴向切深、径向切深和进给速度增大,切削力增大;在高速切削时,为了减小切削力,应选取高转速、小切深、多次走刀的方式进行切削加工。

(4) 超声振动切削加工。

Xu 等^[31-32]设计了一种新型的工于反谐振频率的振动器,用于实现稳定和快速变化的超声振动模式,并研究该模式下椭圆振动切削 CFRP 的去除机理。结果显示:超声振动的应用能有效降低切削力并减小工具的亚表面损伤;沿切削方向的振动能更有效地减小切削力,而垂直于切削方向的振动更有利于切屑的排出;结合两者的优点,椭圆振动切削是一种更有效的加工 CFRP 的方法。而后,进一步建立了椭圆振动加工单向 CFRP 的力学模型,该模型综合考虑了纤维变形和破坏及纤维基体弯曲的影响,揭示材料去除机理,并通过试验校核验证。

3 其他常见特种加工方法

为了适应 CFRP 性能和加工要求不断提高的需求,传统机械加工技术发展的同时,一些特种加工技术也被用于复合材料的加工,包括激光加工、电火花加工和高压水射流加工等在复合材料加工中有着独特的特点和优越性。

激光辅助加工是利用激光能量使材料瞬间熔化或蒸发去除材料实现加工,并能够结合数字控制实现复杂路径和复杂形貌的加工。由于激光辅助加工特有的优点,且能对难加工材料进行加工,不仅减少切削力和刀具磨损,而且能提高刀具寿命,因

此激光辅助加工是一种很有前景的加工 CFRP 的方法。

电火花加工主要利用放电时产生的局部高温、高压蚀除材料达到一定加工效果,可以通过控制放电能量的大小,实现快速加工或高质量加工。电火花加工技术能以较软的工具电极材料加工任何硬度的导电性材料,加工时几乎没有宏观作用力,不受加工对象材料硬度、脆性等综合机械性能的影响,被认为是解决 CFRP 加工的有效途径。

高压水射流加工是利用高压水或磨料的冲击作用实现材料的去除。高压水射流加工具有较小的材料敏感性和压力负载、不产生热效应、高度的灵活性等特点;同时,由于其加工深度较小,且随着加工深度的增大,其加工切缝易出现分布不均的现象,因此主要用于薄板类复合材料切割和孔的加工等。因此,关注并设法解决水射流加工存在的不足有利于其在 CFRP 加工方面的广泛使用。

CFRP 数值仿真研究

在 CFRP 加工过程中,刀具磨损严重,加工表面质量不高,试验测试和研究成本较高,数值仿真技术不仅能节省试验费用,而且可模拟切削加工过程,对揭示切削过程中材料的微观变化及其切削机理有着指导意义。

采用数值模拟方法进行切削过程建模时,必须考虑切削过程中的各种物理关系,包括材料模型、传热模型、摩擦接触模型、切屑分离模型、刀具磨损模型、表面形貌及表面层形成等。

基于叠层复合材料的铺层方式和强度理论,李桂玉^[33]建立了叠层复合材料拉伸仿真模型,采用 Hashin Damage 失效模型定义材料断裂准则,建立叠层复合材料三维钻削仿真模型,研究钻削过程中的切削力特征及不同加工参数对切削力的影响规律。李志凯^[34]采用试验与有限元方

法相结合的手段对 CFRP 切削机理进行研究,分析切削过程中的切削力、基体破坏、工件损伤、工件亚表面损伤及加工表面质量,仿真与试验结果对比验证了仿真模型的准确性。佟沐霖^[35]以单向 CFRP 直角切削为对象,基于有限元技术和切削过程的力学特性,模拟 CFRP 的钻削过程,分析钻削过程中轴向切削力的变化特征。

为了研究超声振动钻孔加工 CFRP 过程中产生的局部性的冲击振动特性,Phadnis 等^[36-38]对超声振动钻孔加工 CFRP 进行非线性动力学仿真,进而研究钻孔加工过程中 CFRP 的体积和热软化现象。得出结论:超声振动钻孔加工 CFRP 时,在一定的振动强度范围,工件发生塑性变形导致局部热软化;另外,工件表面温度经常超过热固性环氧基的玻璃转变温度(170~190℃)。

结束语

主要阐述了 CFRP 加工技术现状,包括:CFRP 加工工艺条件、特点和切削理论,CFRP 传统加工技术、超声振动加工技术,以及 CFRP 加工过程仿真等。

(1) CFRP 材料有着一系列优良的机械性能,如比强度、比模量、阻尼容量高,尺寸稳定性好等,因而在各个工业领域,如航空业、建筑业、运输业等得到广泛的应用。

(2) 基于工业需求和学术研究的热点,介绍了 CFRP 加工中的机加工过程,包括传统加工方法和超声振动加工技术的应用,并简要介绍了几种特种加工技术。

(3) 陈述了包括切屑形成和材料去除机理在内的切削理论,并进行比较,从而易于理解 CFRP 和刀具之间的复杂的相互作用。

(4) 数值仿真研究能够深入理解 CFRP 和刀具之间的相互作用,同时也综述了有效的过程优化准则,可

以准确地预测 CFRP 加工中的切屑形成及材料破坏形式。

参考文献

- [1] 王春净,代云霏. 碳纤维复合材料在航空领域的应用. 机电产品开发与创新, 2010, 23(2):14-15.
- [2] 李威,郭权锋. 碳纤维复合材料在航天领域的应用. 中国光学, 2011(3):201-212.
- [3] 苏小萍. 碳纤维增强复合材料的应用现状. 高科技纤维与应用, 2004, 129(5): 34-36.
- [4] 杨小平, 黄智彬, 张志勇, 等. 实现节能减排的碳纤维复合材料的应用进展. 材料导报, 2010(2):1-10.
- [5] Koplev A, Lystrup A, Vorm T. The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP. *Composites*, 1983, 14(83):371-376.
- [6] Henerichs M, VoB R, Kuster F, et al. Machining of carbon fiber reinforced plastics: influence of tool geometry and fiber orientation on the machining forces. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2015,9:132-45.
- [7] Liu J, Chen G, Ji C, et al. An investigation of workpiece temperature variation of helical milling for carbon fiber reinforced plastics (CFRP). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, 86(11):89-103.
- [8] Sreejith P S, Krishnamurthy R, Malhotra S K, et al. Evaluation of PCD tool performance during machining of carbon/phenolic ablative composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 104(1/2):53-58.
- [9] Keizo S, Masafumi S. Tool wear in cutting glass-fiber-reinforced-plastics: The relation between cutting temperature and tool wear. *Bulletin of JSME*, 1981, 24(190):748-755.
- [10] 李伟. 碳纤维复合材料磨削温度理论分析与试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [11] Mkaddem A, Soussia A B, Mansori M E. Wear resistance of CVD and PVD multilayer coatings when dry cutting fiber reinforced polymers (FRP). *Wear*, 2013, 302:946-954.
- [12] Hong H C. *Machining technology for composite materials: principles and practice*. Philadelphia: Woodhead Publishing Limited, 2012.
- [13] Santhanakrishnan G, Krishnamurthy R, Malhotra S K. Investigation into the machining of carbon-fibre-reinforced plastics with cemented carbides. *Journal of Materials Processing Technology*, 1992, 30:263-275.
- [14] Kim K S, Lee D G, Namgung Y. Machinability of carbon fiber-epoxy composite materials in turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 1992, 32(3):553-570.
- [15] Rajasekaran T, Palanikumar K, Vinayagam B K, et al. Application of fuzzy logic for modeling surface roughness in turning CFRP composites using CBN tool. *Production Engineering*, 2011, 5(2):191-199.
- [16] Ishida T, Noma K, Kakinuma Y, et al. Helical milling of carbon fiber reinforced plastics using ultrasonic vibration and liquid nitrogen. *Procedia CIRP*, 2014,24:13-18.
- [17] Chen W. Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates. *International Journal of Machine Tools And Manufacture*, 1997, 37(8):1097-1108.
- [18] Tsao C, Hong H C. Taguchi Analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, 44(10):1085-1090.
- [19] Hu N S, Zhang L C. A study on the grindability of multidirectional carbon fibre-reinforced plastics. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 140(19):152-156.
- [20] Hu N S, Zhang L C. Some observations in grinding unidirectional carbon fibre-reinforced plastics. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 152(3):333-338.
- [21] Soo S L, Shyha I S, Barnett T, et al. Grinding performance and workpiece integrity when superabrasive edge routing carbon fibre reinforced plastic (CFRP) composites. *CIRP Annals- Manufacturing Technology*, 2012, 61(1):295-298.
- [22] 盛贤君,刘勇,王克欣,等. 碳纤维复合材料数控钻磨工艺及装备研究. 制造技术与机床, 2008(8):92-94.
- [23] Sasahara H, Kikuma T, Koyasu R, et al. Surface grinding of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) with an internal coolant supplied through grinding wheel. *Precision Engineering*, 2014, 38(4):775-782.
- [24] Zemann R, Kain L, Bleicher F. Vibration assisted machining of carbon fibre reinforced polymers. *Procedia Engineering*, 2014, 69:536-543.
- [25] Cong W L, Pei Z J, Sun X, et al. Rotary ultrasonic machining of CFRP: A Mechanistic Predictive Model for Cutting Force. *Ultrasonics*, 2014, 54(2):663-675.
- [26] Feng Q, Cong W L, Pei C J, et al. Rotary ultrasonic machining of carbon fiber-reinforced polymer: feasibility study. *Machining Science and Technology*, 2012, 16(3):380-398.
- [27] Liu J, Zhang D, Qin L, et al. Feasibility study of the rotary ultrasonic elliptical machining of carbon fiber reinforced plastics (CFRP). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 53(1):141-150.
- [28] 任宇江. 碳纤维复合材料的超声辅助切削加工技术研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [29] 马付建. 超声辅助加工系统研发及其在复合材料加工中的应用 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [30] 王晓博. 碳纤维复合材料超声高速铣削技术研究 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2012.
- [31] Xu W, Zhang L C, Wu Y. Elliptic vibration-assisted cutting of fibre-reinforced polymer composites: understanding the material removal mechanisms. *Composites Science and Technology*, 2014, 92(3):103-111.
- [32] Xu W, Zhang L C. On the mechanics and material removal mechanisms of vibration-assisted cutting of unidirectional fibre-reinforced polymer composites. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, 80-81:1-10.
- [33] 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.
- [34] 李志凯. 碳纤维增强复合材料切削实验与仿真研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2014.
- [35] 佟沐霖. 碳纤维复合材料钻削过程仿真与实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
- [36] Phadnis V A, Roy A, Silberschmidt V V. A finite element model of ultrasonically assisted drilling in carbon/epoxy composites. *Procedia CIRP*, 2013,8:141-146.
- [37] Phadnis V A, Makhdum F, Roy A, et al. Experimental and numerical investigations in conventional and ultrasonically assisted drilling of CFRP laminate. *Procedia CIRP*, 2012, 1:455-459.
- [38] Phadnis V A, Makhdum F, Roy A, et al. Drilling in carbon/epoxy composites: experimental investigations and finite element implementation. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, 47(3):41-51.

(责编 谷雨)