

碳纤维增强复合材料铣削和钻孔 技术研究进展*

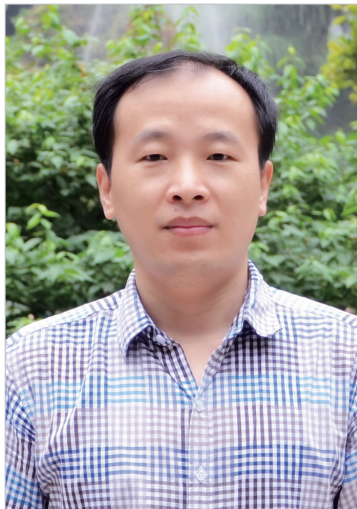
单晨伟, 吕晓波

(西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072)

[摘要] 碳纤维增强复合材料(特别是碳纤维增强树脂基复合材料和碳/碳复合材料)具有比强度和比模量高、耐高温、抗腐蚀等特点,被广泛应用于航空航天等领域。由于碳纤维增强复合材料硬度高、脆性大、层间剪切强度低等特点,使其在加工中容易出现毛刺、分层、撕裂等加工缺陷,并且刀具磨损快、耐用度低。针对碳纤维增强树脂基复合材料和碳/碳复合材料的加工问题,从铣削和钻削两个方面讨论了加工参数、加工刀具、切削力预测以及超声振动钻孔和螺旋铣孔等方面的技术,总结了目前提高碳纤维增强复合材料加工质量的工艺方法。

关键词: 碳纤维增强复合材料; 铣削; 钻孔; 加工参数; 切削力

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.15.034



单晨伟

工学博士,西北工业大学副教授、硕士生导师。主要研究方向为C/C复合材料数控铣削机理及加工技术、多轴数控编程理论和方法及薄壁曲面类零件数控铣削加工变形预测与控制。主持完成国家自然科学基金青年项目1项,先后参与面上项目2项、国家科技重大专项2项,负责完成了其中的2项子课题。此外,还先后参加和主持了多项航空发动机整体叶盘和叶片的预研攻关项目。

*基金项目: 国家自然科学基金项目(51105312)。

碳纤维增强复合材料 性能及应用

碳纤维增强复合材料是目前最先进的复合材料之一,与金属材料相比,它具有比强度和比模量高、耐高温、抗腐蚀、热膨胀系数低等优良特点。目前在航空航天领域应用较为广泛的碳纤维增强复合材料主要有碳纤维增强树脂基复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer,简称CFRP)、碳/碳复合材料(Carbon-Carbon Composites,简称C/C复合材料)等。图1(a)为叠层CFRP,图1(b)为准三维编织C/C复合材料。

CFRP设计自由度大,成型容易,

多用于制作结构件,有专家预测未来航空航天飞行器中将有50%以上的结构件由CFRP制造^[1],而目前据公开资料显示,波音787的复合材料使用率已经达到了50%。CFRP是由碳纤维增强体以及树脂基体两种材料复合而成,其中基体较软且粘性大,碳纤维强度高且硬度大。目前CFRP多为层合板形式,层间剪切强度低,因此在加工时容易出现刀具磨损严重、加工表面质量差(易产生撕裂、毛刺、表面粗糙度差等加工缺陷)、工艺参数难控制等难题。

C/C复合材料以其耐高温、抗烧蚀、重量轻、耐磨损以及抗腐蚀等优良特性,主要作为高温结构件,广泛



(a) CFRP



(b) C/C 复合材料

图1 碳纤维增强复合材料

Fig.1 Carbon fiber reinforced composites

应用于固体火箭尾喷管、飞机刹车片、导弹天线罩等航空航天领域^[2]。C/C复合材料多为编织结构,在网胎层与碳布层之间用针刺纤维结合在一起以增强材料的层间强度。C/C复合材料具有比刚度高、脆性大、各向异性明显等特点,也是一种典型的难加工材料,其组织结构如图2所示。因为有纵向针刺纤维的存在,C/C复合材料在切削加工中减少了分层的产生,但仍然容易出现撕裂、毛刺等缺陷,刀具磨损也快;同时,由于碳基体的存在,加工中会产生大量的粉末和粉尘,有可能进入机床主轴、导轨或附着在刀具上,对机床以及已加工表面产生损害。

碳纤维增强复合材料 铣削加工技术

1 铣削加工试验研究

碳纤维增强复合材料铣削加工表面质量的好坏直接影响工件的耐磨性、抗腐蚀性、抗疲劳能力以及零件的装配精度。影响CFRP加工表面质量的因素主要有工件材料纤维方向角、加工参数和刀具材料等。

(1) 纤维方向角。

纤维方向角对层合板形式的CFRP铣削加工质量有重要的影响,研究发现纤维方向角在 $0\sim 45^\circ$ 之间,表面质量较好,其中 45° 时最优,超过 45° 表面质量较差^[3-4]。苏飞等^[5]通过试验发现在铣削CFRP时,纤维层方向与切削方向夹角在 $90^\circ\sim 180^\circ$ 之间时容易产生毛刺缺陷。因此,在加工层合板形式的CFRP时,应尽量使

切削方向顺着纤维铺层方向,避免逆切现象,以此获得良好的铣削加工表面质量并降低刀具磨损。

(2) 加工参数和刀具材料。

CFRP铣削加工表面质量的主要影响因素除了纤维方向角外还有工艺参数和刀具材料。加工参数对表面粗糙度的影响规律为:一般随着进给速度增大而增大,随着切削速度增大而减小,随着切削深度的增加而降低^[4,6]。使用硬质合金刀具时切削速度不宜过大,速度太大易产生大量的切削热,加速刀具磨损,一般切削速度选择为 $40\sim 80\text{m}/\text{min}$,每齿进给量应小于 $0.04\text{mm}/\text{z}$ (齿)比较合理^[7]。龚佑宏等^[3]通过立铣刀铣削表面铜网结构CFRP时发现,当每齿进给量大于 $0.033\text{mm}/\text{z}$ 时,材料极易出现毛刺和撕裂,而每齿进给量低于 $0.033\text{mm}/\text{z}$ 时,材料基本无毛刺与撕裂。使用金刚石涂层刀具可以适当提高切削速度及进给速度,提高加工质量的同时也能提高加工效率。韩胜超^[8]总结了直径 10mm 金刚石涂层铣刀侧铣CFRP时的切削参数优选范围: $n=5000\text{r}/\text{min}$,每齿进给量应小于 $0.03\text{mm}/\text{z}$ 。

由此可见,如何选择合适的加工参数对提高加工表面质量尤为重要,需要研究人员通过大量试验总结适用于不同条件下的工艺参数。

碳纤维增强复合材料切削过程多为干切削,无法像金属切削过程中使用切削液进行冷却,因此铣削中产生的大量切削热无法扩散,使得刀具磨损严重,一些学者不断尝试在气冷

切削条件下进行切削试验,可有效降低刀具磨损并提高加工质量^[9-10]。

同样,加工参数和刀具材料也是影响C/C复合材料加工表面质量的主要因素。因为C/C复合材料是通过编制预制体制备的,且很多结构件需要从多个方向进行加工,所以在加工时无法选择与纤维方向有关的切削方法。作者通过试验发现,采用硬质合金刀具加工C/C复合材料时,切削速度范围在 $40\sim 60\text{m}/\text{min}$,进给量为 $0.05\sim 0.2\text{mm}/\text{z}$,切削深度为 $0.5\sim 1\text{mm}$ 时比较合理,能够实现正常切削^[11-12];当切削深度达到 2mm 时,切削困难,且刀具磨损很快,短时间内就会出现崩刃现象;如果加工参数和走刀方向不合适,加工C/C复合材料时容易在棱边处和尖角处发生崩碎脱落现象,如图3所示。一个比较好的解决办法是尽量采用顺铣,并先加工边缘,然后再加工其他部位,但是这必然要大大增加数控编程人员的工作量,使用现有的数控编程软件无法自动完成,需要很多辅助操作。因此,开发出适用于复合材料加工的编程软件也是值得考虑的一个研究方向。

2 铣削刀具研究

因碳纤维增强复合材料切削加工时无法进行切削液冷却,所以导致切削区温度高,直接影响刀具的寿命

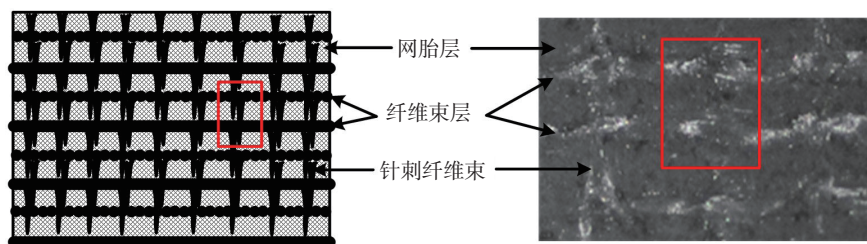


图2 C/C复合材料微观组织结构
Fig.2 Microstructure of C/C composites

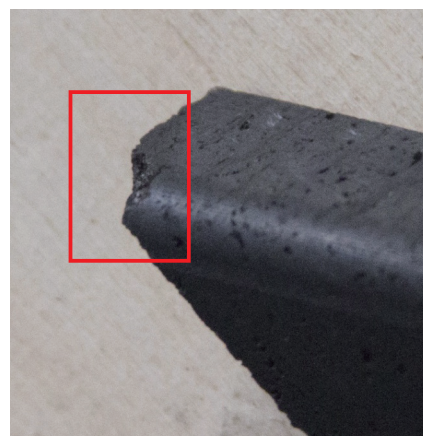


图3 C/C复合材加工时的棱边崩碎现象
Fig.3 Edge collapse phenomenon in processing of C/C composites

和工件的加工精度及表面质量。因此在加工碳纤维增强复合材料时,刀具材料不但要有硬度高、耐磨性强和低摩擦系数等特性,而且刃口需要锋利以便在切削过程中能快速切断纤维,减少毛刺、分层和崩边等加工缺陷的产生。

目前,碳纤维增强复合材料铣削刀具多为硬质合金,涂层多为低压化学气相沉积(CVD)金刚石涂层、聚晶金刚石(PCD)涂层和立方氮化硼(CBN)涂层等超硬材料。为了能够获得更好的加工质量,一些研究人员发明了适用于碳纤维增强复合材料铣削的专用刀具,如左右旋交错多齿铣刀(鲨鱼齿、鱼鳞齿或菱齿等)等特殊刀具^[13-15],图4所示为SECO公司的鲨鱼齿铣刀。López等^[14]采用自己设计的左右旋交错多齿铣刀进行了CFRP加工试验,试验结果表明 $4\mu\text{m}$ 是比较良好的涂层厚度;但因价格太高,PCD涂层刀具达不到理想的经济性要求。鄢国洪^[15]选用不同涂层的硬质合金菱齿铣刀铣削CFRP,通过对比得出金刚石涂层刀具具有更高的硬度和耐磨性,使用寿命是未涂层铣刀的15倍,是TiAlCrN/TiSiN涂层的6倍。叶衔真等^[16]通过试验发现在铣削碳纤维增强复合材料时,未涂层硬质合金铣刀的磨耗量是CVD金刚石薄膜涂层硬质合金铣刀的2.3~3.8倍,并认为选择大于刃宽的背吃刀量、与刀具材料特性相匹配的合理进给量和切削速度可减少刀具后刀面磨损并可提高加工效率。



图4 SECO公司的鲨鱼齿铣刀
Fig.4 Shark tooth milling cutter of SECO company

由此可见,尽管不同的研究人员得出的结论略有差异,但金刚石涂层刀具在耐磨性方面要优于其他涂层材料或不加涂层材料的刀具,但从加工成本的经济性方面考虑,金刚石刀具不一定是最佳选择。在加工CFRP时,左右旋交错多齿铣刀得到了研究人员的推荐,有利于减小毛刺、分层、撕裂等缺陷,被认为是一种加工CFRP最好的刀具。

3 铣削力研究

建立准确可靠的铣削力模型可以有效地预测铣削力,以便选取适当的切削参数,从而可以有效地控制铣削碳纤维增强复合材料的加工质量。为了预测碳纤维增强复合材料铣削力,研究人员主要采用了经验建模法、解析法和有限元法。

(1) 经验建模法^[11-12, 17]。

该方法主要基于试验数据建立经验模型。这种方法虽然具有一定的实用价值,但需要做大量的试验,一旦切削条件发生改变,经验公式可能就不再适用,必须重新进行试验。徐宏海等^[17]利用多元线性回归方法建立了CFRP高速铣削力经验公式,并通过方差检验表明铣削力经验公式可靠性较好。作者团队^[11-12]进行了大量球头刀铣削C/C复合材料试验,并根据试验数据分别建立了较大切深与较小切深条件下的铣削力经验公式,误差约在10%以内。

(2) 解析法^[18-22]。

该方法通过对发生在铣削过程中的物理机理进行建模,以此来对铣削力进行预测。但是建模过程中的种种假设,难以保证模型的精度。张厚江^[22]在研究单向碳纤维增强复合材料切削时,把切削区域分为3个变形区,分别建立了这3个变形区的切削力模型,综合计算出了二维直角切削单向CFRP时总的切削力模型。Karpát等^[19]基于铣削金属力学模型建立了铣削单向CFRP层合板的铣削力模型,与金属力学模型不同

的是其径向和切向的切削力系数表达为关于纤维切削角正弦函数的公式;通过试验验证得知此模型试验数据与理论数据具有很好的一致性,预测误差大致为 $\pm 12.5\%$ 。作者团队^[21]建立了球头刀铣削2.5D C/C复合材料铣削力解析模型,基于试验数据采用线性回归方法计算出了铣削力系数,理论与试验结果误差不超过10%。尽管该方法需要试验数据,但可有效预测铣削C/C复合材料铣削力。

(3) 有限元法^[23-25]。

用有限元法在计算机上对碳纤维增强复合材料的铣削加工过程进行模拟研究,避免了对复合材料多次切削加工试验以及购买特殊刀具等带来的高昂成本。Mahdi等^[23]建立了CFRP正交切削有限元模型,考虑了CFRP材料的各向异性,提出了平面应变状态下均质各向异性弹性材料的本构模型,并建立了切削过程中的接触模型,通过试验验证了模型的合理性。秦旭达等^[25]基于Hashin失效准则,建立了碳纤维增强复合材料单向碳纤维铺层二维正交切削宏观模型,研究不同铺层方向下纤维和基体的破坏机理,并通过平面铣削试验验证了模型的合理性。

目前对于碳纤维增强复合材料的有限元仿真还处在起步阶段,大多集中在二维正交切削和钻削方面,三维铣削有限元仿真的研究较少,特别是C/C复合材料的有限元铣削仿真更是鲜有报道。铣削加工有限元仿真要实现工程应用,仍需在材料模型与几何模型的构建、切屑分离准则的确定和刀-屑接触的定义等关键技术方面进行大量研究。

碳纤维增强复合材料传统钻孔加工技术

1 铣削试验研究

碳纤维增强复合材料钻削过程中,钻削工艺参数会直接影响制孔质

量, 钻削参数不合理时很容易出现出入口分层、撕裂和毛刺等缺陷, 而且难以控制^[26]。众多研究表明, 在高转速、低进给条件下可提高钻孔质量^[27-29]。但转速不宜过高, 因切削温度随转速的增加也在增加, 这会使得刀具磨损加快, 并且对机床刚度要求也高^[30]。

张厚江等^[31]通过高速钻削 CFRP 试验研究认为, 切削速度、进给速度之比范围 3000~4000 是对钻削力产生影响的阈值, 并通过分析 CFRP 钻削加工过程中分层和撕裂缺陷产生的机理, 提出了相应的解决办法, 该研究成果为提高碳纤维增强复合材料钻孔质量的研究提供了理论参考。另外, 很多研究人员^[29, 32-33]根据试验数据建立了缺陷因子与轴向力以及钻削参数之间的经验公式, 以便能更好地控制工艺参数, 减少缺陷产生。Krishnaraj 等^[33]根据试验数据运用遗传算法优化高速钻削 CFRP 工艺参数, 建立了撕裂、分层缺陷因子与轴向力、进给速度的经验模型, 试验误差在 10% 以内。

C/C 复合材料多为编织结构, 层间强度比较高, 因此钻削 C/C 复合材料时减少了分层缺陷的产生, 但毛刺与撕裂缺陷仍然比较严重, 如图 5 所示。作者对 C/C 复合材料钻削形成过程进行了分析, 运用材料力学理

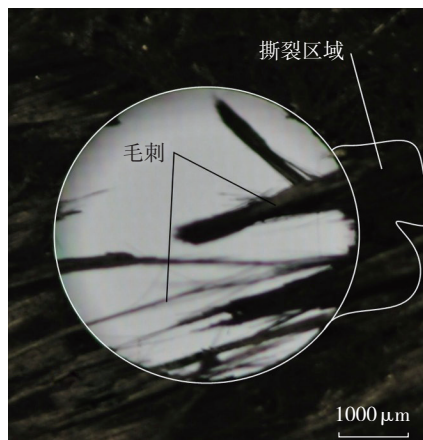


图5 C/C复合材料钻孔出口缺陷
Fig.5 Outlet defects of C/C composite drilling

论建立了 C/C 复合材料的钻孔受力模型, 对钻削出口层受力变形进行计算, 并结合材料的结构特点分析了撕裂、毛刺和分层缺陷产生的原因, 提出了钻孔缺陷因子的计算方法; 作者根据钻削参数对钻孔缺陷因子的影响关系选择了保证钻削质量和效率的最佳切削参数选择区域; 进给速度 80~100mm/min、切削速度 56.55~75.4m/min^[34]。

通过试验方法研究总结提高钻孔质量的钻削工艺参数范围, 建立合理的钻孔缺陷因子与工艺参数之间的经验公式, 对复合材料加工不但具有一定的指导意义, 还具有较高的可靠性。此外, 钻削碳纤维复合材料时, 可在工件底部加一支撑垫板, 如塑料板或铝板, 可以减少分层、撕裂和毛刺的产生。若底部缺少支撑, 由于材料层间强度低, 在轴向力的推挤作用下, 出口层材料不能抵抗缺陷的产生和扩散; 若加上支撑垫板, 则可降低缺陷的产生。

2 钻削刀具研究

为提高钻孔表面质量和刀具寿命, 研究人员针对无涂层、金刚石涂层和 AlTiN 涂层进行了试验研究, 结果表明金刚石涂层刀具耐磨性最好, 一支刀具最多可以加工 180 个孔, 还能减少分层, 而 AlTiN 涂层效果不明显, 与无涂层刀具的寿命相当^[35-36]。而 Zitoune 等^[37]采用纳米复合材料涂层 nc-CrAlN/a-Si₃N₄ 与无涂层的刀具进行了 CFRP/Al 叠层构件钻削试验, 结果表明涂层钻头加工质量要明显好于无涂层刀具, 其中孔壁表面粗糙度可降低 30% 左右, 轴向力可减少 27% 左右。鲍永杰等^[38]通过钻削 CFRP 试验发现, 与硬质合金钻头相比, 电镀 CBN 钻头、螺旋面钻头以及 PCD 钻头可以获得更理想的钻孔质量, 孔出口无毛刺、孔形完整。如图 6 所示为 SANDVIK (山特维克) 公司针对 CFRP 复合材料钻孔的烧结 PCD 复合刀具。此外, 为了提高

刀具的硬度和耐磨性, 除了在普通钻头表面增加涂层, 提高耐磨性和刀具寿命, 有些研究人员还开发了适用于碳纤维增强复合材料钻孔的专用刀具, 例如“以磨代钻”的套料钻、W 形钻头、阶梯钻等新的钻孔刀具和方法^[27, 39]。

贺虎等^[40]通过 CFRP 材料的钻孔试验发现, 与硬质合金钻头相比, 如图 7 所示的钎焊金刚石套料钻具有更高的加工效率和更强的耐磨性。杨小璠等^[41]采用“先切后推”的新型钻削工艺, 在加工 CFRP 时, 采用 W 形状的钻头可以将已剪切完的柱状纤维板完整推出, 副切削刃对已形成的孔具有修正作用, 且能将毛刺切断, 从而减少缺陷的产生。Tsao^[42]通过试验发现, 采用钻磨一体套料阶梯钻在高直径比(0.7mm/mm)、低进给速度以及高转速的切削条件下钻削 CFRP 能得到更好的效果, 并给出了此类钻头切削时轴向力与切削参数的半经验公式。

由此可见, 采用 PCD 刀具、优化



图6 SANDVIK公司的烧结PCD复合刀具
Fig.6 Sintered PCD composite tool of SANDVIK corporation

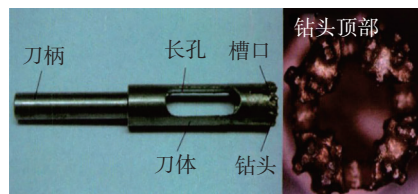


图7 钎焊金刚石套料钻
Fig.7 Brazing diamond drill

和改进钻削刀具几何参数和刀具结构,采用“以磨代钻工艺”,不仅可有效提高钻孔质量,而且可增强刀具的耐磨性,提高刀具耐用度。

3 钻削力研究

钻削轴向力是影响制孔缺陷的主要因素,研究发现轴向力是导致CFRP分层的主要因素,与分层因子呈线性关系,轴向力越大分层缺陷越严重。通过建立合理的轴向力预测模型,降低钻孔缺陷是众多学者的研究热点问题。与铣削力建模方法相似,钻削力建模主要有经验建模法、解析法、有限元方法。

(1) 经验建模法^[43-44]。

Langella等^[43]在直角切削假设的基础上,建立了考虑刀具几何参数、只含有两个半经验系数的钻削力半经验公式,试验结果与模型预测值误差不超过8%。作者团队^[44]采用刀具直径6mm的硬质合金钻头进行了准三维编织C/C复合材料的钻孔试验,建立了主轴转速3000~6000r/min和进给速度30~120mm/min范围内的轴向力预测经验模型,采用同类型其他直径钻头验证发现其预测误差在20%以内。

(2) 解析法^[45-48]。

Zhang等^[45]在线弹性断裂力学、经典薄板弯曲理论以及复合材料力学的基础上,建立了预测钻削单向或多向CFRP分层的临界轴向力模型,理论预测结果与试验结果具有良好的 consistency。任书楠等^[48]完善并应用多层复合材料切削模型,建立了钻削CFRP时主切削刃的宏观轴向力与切削用量的关系模型,但此模型未考虑横刃产生的轴向力作用。

(3) 有限元方法^[49-51]。

钻削仿真是研究刀具几何参数、切削参数对复合材料加工质量和刀具磨损影响的一种有效方法。国内外很多研究者对钻削加工过程进行了有限元分析研究。Usui等^[50]建立了钻削CFRP的有限元模型,提出了

CFRP正交切削过程中的失效形式与损伤类型,该模型可预测钻削过程中的扭矩与钻削力,试验结果验证了其模型的准确性。Feito等^[51]通过有限元方法模拟了钻削CFRP时不同钻头结构对轴向力和制孔分层损伤的影响及刀具磨损情况,轴向力和分层损伤的预测结果误差分别在11.3%和3.5%之内。

目前针对复合材料钻削加工的仿真多集中在复合材料层合板(如CFRP)上,对于三维编织结构或针刺2.5D结构的C/C复合材料切削仿真还未见到有关论文发表。在复合材料钻削损伤研究方面,目前对于毛刺、撕裂和分层等各种损伤形式相互之间的联系和形成机理还有待深入研究。这些损伤形式除了与刀具材料、刀具几何形状、材料构造形式以及工艺参数有关,还与反映系统加工动态特性的轴向力和扭矩有关。

经验建模法虽然具有一定的实用价值,但需要做大量的试验,一旦切削条件发生改变,经验公式可能就不再适用,必须重新进行试验;解析方法由于建模过程假设太多,难以保证模型的精度;有限元方法计算过程复杂而且时间长,目前建立的模型可靠性仍然不够高;因此,如何建立准确可靠的钻削力模型,还需要学者们不断深入的研究。

碳纤维增强复合材料非传统钻孔技术

1 超声振动钻孔技术

超声振动加工技术是一种周期性的脉冲切削而非连续性切削,是结合超声波加工技术与机械加工技术于一体的新型切削技术^[52]。超声辅助钻孔技术是在传统钻削机床的加工运动基础上,在旋转的钻削工具上施加超声振动,实现超声辅助钻削。

Cong等^[53-54]采用金刚石套料钻头进行了CFRP的超声辅助钻孔试验研究,结果表明采用超声钻孔技

术能明显降低钻削力和表面粗糙度,减少CFRP的分层和毛刺等缺陷,并能提高刀具寿命,且发现采用气冷的方式能取得更好的加工效果;之后Cong等还建立了金刚石套料钻的超声钻削CFRP切削力模型。Liu等^[55]通过CFRP的超声椭圆钻削与普通钻削的对比试验发现,超声辅助钻削能有效减少钻孔出口处的分层和撕裂现象,提高加工质量,并能减少刀具磨损。

Yuan等^[56]在硬脆材料去除机理的基础上,建立了超声钻削CFRP-T700的切削力模型,误差在10%以内;并发现采用高转速、高进给速度方式进行CFRP-T700材料的超声钻削时,不仅可有效降低切削力,还可以提高加工效率。

由于超声振动钻孔技术是断续切削,与传统钻孔加工方法相比,超声振动钻孔技术排屑及时,可以有效降低切削力和切削温度,减少对工件表面的损伤,并能明显改善加工质量以及提高刀具耐用度。

2 螺旋铣孔技术

螺旋铣孔是一种新的孔加工技术,加工时刀具自转的同时绕孔中心轴线做公转运动并沿轴向进给,刀具中心的运动轨迹是一条螺旋线。与传统钻孔方式相比,该技术具有很多优势,如可以降低切削力,能够及时散热和排屑,并能实现一把刀具加工不同直径的孔,能够充分利用刀具并降低生产成本^[57]。

复合材料螺旋铣孔的研究尚处于起步阶段,近年来许多学者对碳纤维增强复合材料螺旋铣孔进行了大量的研究。朱春燕等^[58]通过试验对比发现,相比传统钻孔,螺旋铣孔切削力能降低一半左右,钻孔质量更高,而且效率高,加工时间能缩短50%。为优化螺旋铣孔的切削力,Wang等^[59-60]建立了考虑纤维方向的切削力机械模型,并用响应曲面方法计算了切削力系数,试验结

果与理论仿真结果误差最大在 15% 左右。He 等^[61]采用螺旋铣孔方法加工 CFRP 和钛合金叠层材料时,在 CFRP 层与钛合金层分别给出了适用各自材料属性的切削参数,结果表明采用变工艺参数不仅能降低切削力,还能提高制孔精度及制孔质量。Shan 等^[62]提出了一种大螺距螺旋铣孔工艺,通过对比试验发现,大螺距铣孔轴向力远小于普通钻孔轴向力,而且加工精度与孔壁质量均好于普通钻孔;通过建立的大螺距螺旋铣孔切削力预测模型,优化了切削工艺参数,降低了切削力,提高了制孔质量。

螺旋铣孔在大直径的孔加工中具有一定的技术优势,容易实现,而且可降低轴向力,获得了良好的孔加工质量,并能提高加工效率。但是对于小直径孔的加工非常困难,因刀具直径过小容易导致刀具断裂。

结束语

CFRP 和 C/C 复合材料是航空航天领域常用的两种碳纤维增强复合材料,其加工质量的好坏直接影响着航空器和航天器的飞行安全。为提高碳纤维增强复合材料的加工质量,国内外很多学者开展了大量有价值的研究工作。

(1) 切削加工参数直接影响碳纤维增强复合材料的切削力及加工质量,无论是钻削还是铣削,切削速度和进给速度影响较大。研究发现通过选择合适的加工参数范围能明显提高加工质量。

(2) 通过建立准确、可靠的切削力模型可以有效地控制和预测切削力,从而可为减少加工缺陷提供理论支持。尽管目前已经有研究人员初步建立了 CFRP 和 C/C 复合材料的切削力模型,但尚不成熟,且无法在企业中推广应用。因此,建立准确可靠的碳纤维增强复合材料切削力模型是今后科研人员努力的方向。

(3) 鉴于碳纤维增强复合材料的各向异性、高硬度等特点,在选用刀具时需以耐磨性强、切削刃锋利为原则;基于“以磨代钻”理念设计更适合碳纤维增强复合材料的切削刀具也是以后发展的重要方向。

(4) 超声振动、螺旋铣孔等新型钻孔方法具有显著降低切削力、及时分散切削热、减少刀具磨损以及提高表面加工质量等优点,有助于减少碳纤维增强复合材料钻孔中的毛刺、分层和撕裂等缺陷。目前已有国内航空企业开展了这方面的应用,且收到了良好的效果。

参考文献

- [1] SOUTIS C. Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, 412(1): 171-176.
- [2] SAVAGE E. Carbon-carbon composites[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012: 323-357.
- [3] 龚佑宏,韩舒,杨霓虹,等. 纤维方向对碳纤维复合材料加工性能的影响[J]. *航空制造技术*, 2013(23/24): 137-140.
- [4] GONG Youhong, HAN Shu, Yang Nihong, et al. Effect of fiber orientation on machining performance of carbon fiber-reinforced plastics[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2013(23/24): 137-140.
- [5] YASHIRO T, OGAWA T, SASAHARA H. Temperature measurement of cutting tool and machined surface layer in milling of CFRP[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, 70(4): 63-69.
- [6] 苏飞,袁军堂,于斌斌,等. 碳纤维增强复合材料的铣削实验和微观形貌分析[J]. *兵工学报*, 2014, 35(4): 531-539.
- [7] SU Fei, YUAN Juntang, YU Binbin, et al. Research on milling of plain-woven fiber-reinforced composites[J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(4): 531-539.
- [8] DAVIM J, REIS P. Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 160(2): 160-167.
- [9] UCAR M, WANG Y. End-milling machinability of a carbon fiber reinforced laminated composite[J]. *Journal of Advanced Materials*, 2005, 37(4): 46-52.
- [10] 韩胜超. CFRP 侧铣加工工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [11] HAN Shengchao. Research on side milling process of CFRP[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [12] KHAIRUSSALEH N K M, HARON C H C, GHANI J A, et al. Study on wear mechanism of solid carbide cutting tool in milling CFRP[J/OL]. *Journal of Materials Research*, 2016. <http://dx.doi.org/10.1557/jmr.2016.21>.
- [13] CONG W L, FENG Q, PEI Z J, et al. Rotary ultrasonic machining of carbon fiber-reinforced plastic composites: using cutting fluid vs. cold air as coolant[J]. *Journal of Composite Materials*, 2012, 46(14): 1745-1753.
- [14] SHAN C W, LIN X, CUI D, et al. Experimental study on end milling of C/C composite[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 664: 584-589.
- [15] SHAN C W, ZHAO Y, CUI D. Experimental study on ball-end milling of C/C composite[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 650: 139-144.
- [16] 唐臣升. 复合材料高效加工刀具技术[J]. *航空制造技术*, 2013(6): 47-51.
- [17] TANG Chensheng. High-efficiency cutting tool technology for composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2013(6): 47-51.
- [18] LÓPEZ DE LACALLE N, LAMIKIZ A, CAMPA F J, et al. Design and test of a multitooth tool for CFRP milling[J]. *Journal of Composite Materials*, 2009, 43(26): 3275-3290.
- [19] 鄢国洪. 不同涂层的硬质合金菱齿立铣刀铣削 CFRP 的性能研究[J]. *工具技术*, 2015, 49(10): 32-35.
- [20] YAN Guohong. Research on performance of milling carbon fiber-reinforced plastics with different coated fine-cross-nick router[J]. *Tool Engineering*, 2015, 49(10): 32-35.
- [21] 叶衔真,王大镇,刘菊东,等. 铣削碳纤维复合材料刀具磨损试验研究[J]. *机电技术*, 2014(3): 75-77.
- [22] YE Xianzhen, WANG Dazhen, LIU Judong, et al. Research on the tool wear in milling of carbon fiber-reinforced plastics[J]. *Mechanical & Electrical Technology*, 2014(3): 75-77.
- [23] 徐宏海,徐倩,刘东. 碳纤维复合材料高速铣削实验研究[J]. *机械设计与制造*, 2009(12): 167-169.
- [24] XU Honghai, XU Qian, LIU Dong. Experimental study on the high speed milling of carbon fiber reinforced polymer[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2009(12): 167-169.

- [18] KALLA D, SHEIKH-AHMAD J, TWOMEY J. Prediction of cutting forces in helical end milling fiber reinforced polymers[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010, 50(10): 882-891.
- [19] KARPAT Y, BAHTIYAR O, DEĞER B. Mechanistic force modeling for milling of unidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 56(2): 79-93.
- [20] 韩胜超, 陈燕, 徐九华, 等. 多齿铣刀侧铣加工多层 CFRP 铣削力的建模与仿真[J]. 复合材料学报, 2014, 31(5): 1375-1381.
- HAN Shengchao, CHEN Yan, XU Jiuhua, et al. Modeling and simulation of milling forces in side milling multi-layer CFRP with multitooth cutter[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(5): 1375-1381.
- [21] SHAN C W, WANG X, YANG X X, et al. Prediction of cutting forces in ball-end milling of 2.5D C/C composites[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29(3): 824-830
- [22] 张厚江. 单向碳纤维复合材料直角自由切削力的研究[J]. 航空学报, 2005, 26(5): 604-609.
- ZHANG Houjiang. Study on cutting forces of unidirectional carbon fiber reinforced plastics under orthogonal cutting[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(5): 604-609.
- [23] MAHDI M, ZHANG L. A finite element model for the orthogonal cutting of fiber-reinforced composite materials[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 113(1): 373-377.
- [24] 路冬, 李志凯, 融亦鸣, 等. 基于宏观各向异性碳纤维增强树脂基复合材料的切削仿真[J]. 复合材料学报, 2014, 31(3): 584-590.
- LU Dong, LI Zhikai, RONG Yiming, et al. Cutting simulation of carbon fiber reinforced resin matrix composite material based on macroscopic anisotropy[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(3): 584-590.
- [25] 秦旭达, 李永行, 王斌, 等. CFRP 纤维方向对切削过程影响规律的仿真研究[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(3): 472-476.
- QIN Xuda, LI Yonghang, WANG Bin, et al. Simulation of effect of fiber direction on cutting forces of CFRP[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016, 35(3): 472-476.
- [26] RAHME P, LANDON Y, LACHAUD F, et al. Delamination-free drilling of thick composite materials[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 72: 148-159.
- [27] DAVIM J, REIS P. Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave—experimental and statistical study[J]. Materials & Design, 2003, 24(5): 315-324.
- [28] SARDINAS R, SANTANA M, BRINDIS E. Genetic algorithm-based multi-objective optimization of cutting parameters in turning processes[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2006, 19(2): 127-133.
- [29] GAITONDE V, KARNIK S, RUBIO J, et al. Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 203(1): 431-438.
- [30] 于晓江, 曹增强, 蒋红宇, 等. 碳纤维增强复合材料结构钻削工艺[J]. 航空制造技术, 2010(15): 66-70.
- YU Xiaojiang, CAO Zengqiang, JIANG Hongyu, et al. Drilling process for carbon fiber reinforced plastics structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(15): 66-70.
- [31] 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.
- ZHANG Houjiang, FAN Rui, CHEN Wuyi, et al. Investigation of cutting force for high speed drilling carbon fiber composite[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006(12): 76-79.
- [32] SHAHRAJABIAN H, FARAHNAKIAN M. Modeling and multi-constrained optimization in drilling process of carbon fiber reinforced epoxy composite[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2013, 14(10): 1829-1837.
- [33] 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.
- [34] SHAN C, LIN X, WANG X, et al. Defect analysis in drilling needle-punched carbon-carbon composites perpendicular to nonwoven fabrics[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(8): 1-11.
- [35] WANG X, KWON P Y, STURTEVANT C, et al. Tool wear of coated drills in drilling CFRP[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2013, 15(1): 127-135.
- [36] 刘姿, 张霖, 田威, 等. 三尖钻钻削 CFRP/Al 叠层构件的表面质量研究[J]. 机械制造, 2015, 53(4): 36-39.
- LIU Zi, ZHANG Lin, TIAN Wei, et al. Experimental study on the drilling process for CFRP/Al laminated material by 3-point twist drill with diamond coating[J]. Machinery, 2015, 53(4): 36-39.
- [37] ZITOUNE R, KRISHNARAJ V, ALMABOUACIF B S, et al. Influence of machining parameters and new nano-coated tool on drilling performance of CFRP/Aluminium sandwich[J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(3): 1480-1488.
- [38] 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(S2): 254-259.
- BAO Yongjie, GAO Hang. Drilling disfigurements formation analysis and solution of CFRP[J]. Journal of Materials Engineering, 2009, (S2): 254-259.
- [39] FERREIRA J, COPPINI N, MIRANDA G. Machining optimisation in carbon fibre reinforced composite materials[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 92-93: 135-140.
- [40] 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.
- HE Hu, SU Honghua, CHEN Yan, et al. Drilling contrast experiment of carbon fiber reinforced plastics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(14): 52-54.
- [41] 杨小璠, 李友生, 鄢国洪, 等. 新型刀具钻削碳纤维复合材料的可行性研究[J]. 制造技术与机床, 2014(12): 165-167.
- YANG Xiaofan, LI Yousheng, YAN Guohong, et al. Research on drilling feasibility of new-type cutting tool for carbon fiber-reinforced plastics[J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2014(12): 165-167.
- [42] TSAO C. Experimental study of drilling composite materials with step-core drill[J]. Materials & Design, 2008, 29(9): 1740-1744.
- [43] LANGELLA A, NELE L, MAIO A. A torque and thrust prediction model for drilling of composite materials[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, 36(1): 83-93.
- [44] 蔺小军, 崔栋鹏, 单晨伟, 等. C/C 复合材料钻削轴向力研究[J]. 航空制造技术, 2015(15): 60-64.
- LIN Xiaojun, CUI Dongpeng, SHAN Chenwei, et al. Experimental study on thrust force in drilling carbon/carbon composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(15): 60-64.
- [45] ZHANG L, WANG L, LIU X.

A mechanical model for predicting critical thrust forces in drilling composite laminates[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2001, 215(2): 135-146.

[46] HOCHENG H, TSAO C. The path towards delamination-free drilling of composite materials[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167(2): 251-264.

[47] TSAO C. Investigation into the effects of drilling parameters on delamination by various step-core drills[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 206(1): 405-411.

[48] 任书楠, 吴丹, 陈恳. 钻削碳纤维增强型复合材料的主切削刃轴向力[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(4): 487-492.

REN Shunan, WU Dan, CHEN Ken. Thrust force on the main cutting edge when cutting carbon fiber reinforced plastics[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2013, 53(4): 487-492.

[49] 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.

[50] USUI S, WADELL J, MARUSICH T. Finite element modeling of carbon fiber composite orthogonal cutting and drilling[J]. Procedia CIRP, 2014, 14:211-216.

[51] FEITO N, DIAZ-ÁLVAREZ J, LÓPEZ-PUENTE J, et al. Numerical analysis of the influence of tool wear and special cutting geometry when drilling woven CFRPs[J]. Composite Structures, 2016, 138:285-294.

[52] WANG X, WANG L, TAO J. Investigation on thrust in vibration drilling of fiber-reinforced plastics[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 148(2): 239-244.

[53] CONG W, PEI Z, FENG Q, et al. Rotary ultrasonic machining of CFRP: a comparison with twist drilling[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2012, 31(5): 313-321.

[54] CONG W, PEI Z, SUN X, et al. Rotary ultrasonic machining of CFRP: A mechanistic predictive model for cutting force[J]. Ultrasonics, 2014, 54(2): 663-675.

[55] LIU J, ZHANG D, QIN L, et al. Feasibility study of the rotary ultrasonic elliptical machining of carbon fiber reinforced plastics (CFRP)[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 53(1): 141-150.

[56] YUAN S, ZHANG C, AMIN M, et al. Development of a cutting force prediction model based on brittle fracture for carbon fiber reinforced polymers for rotary ultrasonic drilling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(5-8): 1223-1231.

[57] 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 Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(5): 1292-1299.

[58] 朱春燕, 蒋红宇, 张洪洲. 飞机装配铣削制孔和钻孔技术对比分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(S1):37-41.

ZHU Chunyan, JIANG Hongyu, ZHANG Hongzhou. Comparing analysis of milling and drilling holes for aircraft assembly[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(S1): 37-41.

[59] WANG H, QIN X, REN C, et al. Prediction of cutting forces in helical milling process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(9): 849-859.

[60] WANG H, QIN X. A mechanistic model for cutting force in helical milling of carbon fiber-reinforced polymers[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(9):1485-1494.

[61] HE G, LI H, JIANG Y, et al. Helical milling of CFRP/Ti-6Al-4V stacks with varying machining parameters[J]. Transactions of Tianjin University, 2015, 21(1):56-63.

[62] SHAN Y C, LI L, HE N, et al. Predictive modeling and parameter optimization of cutting forces during orbital drilling[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 31(5): 521-529.

Research Progress on Milling and Drilling of Carbon Fiber Reinforced Composites

SHAN Chenwei, LÜ Xiaobo

(Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology of Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] Carbon fiber reinforced composites (CFRCs), such as carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and carbon/carbon (C/C) composites, are widely used in the fields of aeronautics and astronautics due to their superior properties, such as high specific strength, high specific modulus, withstanding high temperatures and high resistance to corrosion. However, CFRCs is difficult to machine due to the high specific stiffness, brittleness, and low shear strength between layers, which can result in burr, delamination, tear and rapid wear of cutters. This paper is aimed to solve the milling and drilling problems of CFRP and C/C composites, and the technologies such as machining parameters, tool materials and geometry, prediction of cutting force, ultrasonic vibration machining and helical milling holes have been reviewed. This review paper also summarizes the processing methods of improving the quality of CFRCs.

Keywords: Carbon fiber reinforced composite material; Milling; Drilling; Machining parameter; Cutting force

(责编 谷雨)