



纤维增强复合材料制孔 刀具技术研究进展*

Research Progress of Hole-Making Cutting Tool on Fiber Reinforced Plastic

上海交通大学 明伟伟 王昌赢 魏莹莹 安庆龙 陈 明



明伟伟

上海交通大学机械制造及自动化系博士研究生,主要从事难加工材料高效精密加工刀具和工艺优化、高效切削加工数据系统的建立和切削加工基础数据库研究。

纤维增强复合材料(FRP)将是21世纪应用最为广泛的材料之一,其高效高质量加工仍然需要不断研发新型专用刀具和改善加工工艺来实现。专用FRP制孔刀具的设计、制造,刀具材料和涂层匹配,加工工艺优化是FRP加工的关键技术。

纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Plastic, FRP),如碳纤维增强复合材料(CFRP)、玻璃纤维增强复合材料(GFRP)和凯夫拉(Kevlar)纤维增强复合材料,以其质量轻、比强度高、比刚度大、减振和抗疲劳性能好、耐腐蚀等诸多优越性能,广泛应用于航空航天、交通运输、生物医药及体育用品等领域^[1-3]。制孔是纤维增强复合材料制造过程中最重要的加工工序之一,在纤维增强复合材料应用广泛的民用大型客机上,制孔工序占复合材料加工工作量的80%

以上,一架波音747客机需要完成300多万个连接孔的加工^[4]。因此,制孔质量和效率直接关系到纤维增强复合材料零件的使用性能、生产周期和生产成本。

由于FRP是由质软而粘性大的基体材料和强度高、硬度大的纤维增强材料混合而成的二相或多相结构材料,其各向异性、低热传导率、低层间结合强度使其成为典型的难加工材料^[5]。因此,在FRP制孔过程中,除传统金属材料制孔缺陷(尺寸误差、圆度误差、位置误差和垂直度误

* 国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项课题:航空航天用复合材料系列化刀具开发(2012ZX04003-031)。

差等)外,还表现为分层、出入口撕裂与毛刺、孔壁表面纤维拔出等。由于纤维硬度高,刀具在切削时极易受到基体中硬质点的刻划而产生磨损,并且由于切削热在切削刃附近积聚,使刀具磨损加剧^[6-7]。在飞机制造领域的最终装配环节,由钻削分层缺陷导致的复合材料叠层零件报废的比例高达60%^[8]。研究表明,复材钻削分层和刀具磨损已成为纤维增强复合材料钻削加工中最具挑战性的两大难题^[9]。随着刀具制造技术的快速发展,优化的刀具结构设计、先进刀具材料和涂层技术成为解决针对上述问题的重要支撑。针对刀具快速磨损的问题,复材加工刀具需选择耐磨性好的刀具材料和涂层来防止刀具快速磨损,延长刀具寿命。针对复材钻削分层,可以通过优化刀具结构设计和优化加工工艺来控制分层缺陷。因此,先进刀具材料和涂层技术、优化的刀具结构设计和加工工艺成为解决复合材料高效高质量制孔加工的核心技术。

本课题组长期致力于复合材料专用刀具设计,先进刀具材料和涂层在复材制孔中的应用研究。本文综述了纤维增强复合材料制孔过程中,不同刀具材料和涂层对复材制孔刀具寿命的影响,分析了不同刀具结构在复材制孔中的切削性能和制孔质量,为纤维增强复合材料专用制孔刀具的设计和制造研究提供了发展方向。

制孔刀具材料和涂层

1 制孔刀具材料

由于纤维增强复合材料是典型的难加工材料,因此复材加工刀具材料必须具有良好的抗磨损性能。大量试验研究表明,钻削纤维增强复合材料时,刀具后刀面磨粒磨损是刀具最主要的磨损形式^[6-7,10-11]。刀具磨损后,在制孔过程中钻削轴向力增

大,钻削温度快速上升,导致复材分层,纤维抽出等制孔缺陷的出现^[12],影响加工质量。因此,目前用于复材制孔的刀具材料以硬质合金、聚晶金刚石(Polycrystalline diamond, PCD)为主。硬质合金制孔刀具可以通过刃磨形成各种几何结构,有利于控制切削力分布,减小轴向力,加大钻削扭矩,防止分层并快速切断纤维,但是硬质合金刀具的抗磨损性能在复材制孔的过程中仍然不足,刃口磨损钝化将造成制孔质量下降,因此如何保持硬质合金刃口的锋利度成为制约其应用的主要因素。如图1所示PCD刀具,通过与硬质合金整体烧结后,再进行刃磨,可获得非常锋利的刃口,同时具有非常低的表面摩擦系数以及超高的硬度和强度,在制孔过程中可以很好地切断纤维,获得良好的制孔质量,而刀具寿命取决于工艺参数和加工过程,这是因为PCD刀具抗冲击性能较差,容易产生崩刃。另外,PCD刀具价格远高于硬质合金刀具,其使用成本和性价比也需要进一步评估。因此,硬质合金材料目前依然是应用最为广泛的制孔刀具材料。

2 刀具涂层的选择及其对制孔过程的影响

为了改善硬质合金刀具的耐磨性,可以在刀具表面添加涂层。随着涂层技术的发展,目前80%以上的刀具均为涂层刀具,不同涂层材料和结构在加工过程中所发挥的作用不

同。化学气相沉积(Chemical Vapor Deposition, CVD)金刚石薄膜具有接近天然金刚石的硬度、高的弹性模量、极高的热导率、良好的自润滑性和化学稳定性等优异性能,非常适合用于纤维增强复合材料的加工。金刚石涂层可以大幅提高硬质合金制孔刀具的抗磨损性能,其极低的摩擦系数也使加工过程中的摩擦力减小,摩擦温度降低。而金刚石涂层硬质合金刀具综合了硬质合金材料和PCD材料的优点,在大幅提升抗磨损性能的同时保持了硬质合金刀具抗冲击性能的优点,而在刀具生产制造成本上又远低于PCD刀具,已成为专用复材制孔刀具最具潜力的刀具材料形式。

本课题组长期致力于微、纳米金刚石涂层技术的应用研究,目前已针对纤维增强复合材料开发了梯度纳米金刚石涂层,并与优化刀具结构相结合,形成专用复合材料制孔刀具,如图2所示。经过试验验证,采用纳米金刚石涂层硬质合金钻头钻削时轴向力比无涂层硬质合金钻头减小30%,如图3所示。因此,采用金刚石涂层钻头有利于减少复材制孔过程中分层等损伤,增强了刀具的抗磨损性能,大大增加了硬质合金钻头的

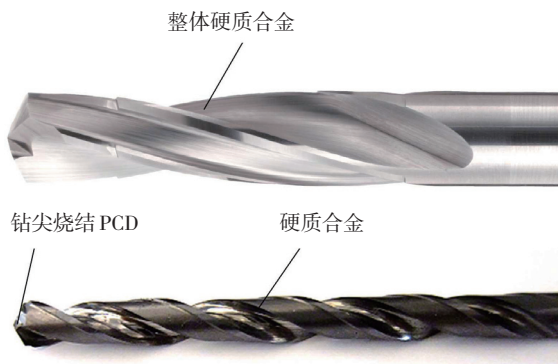
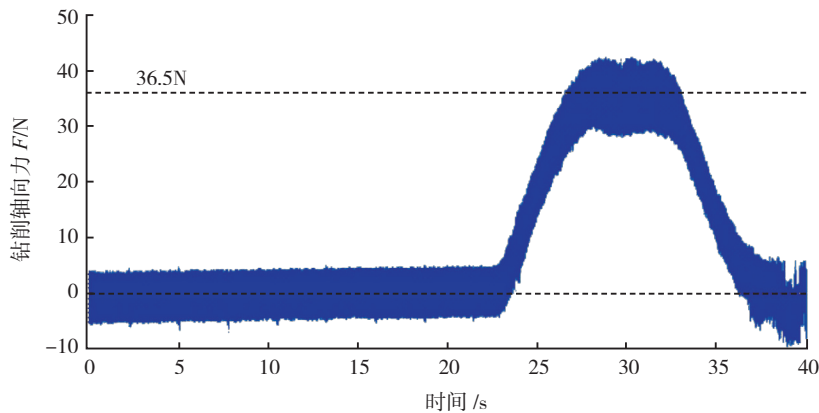


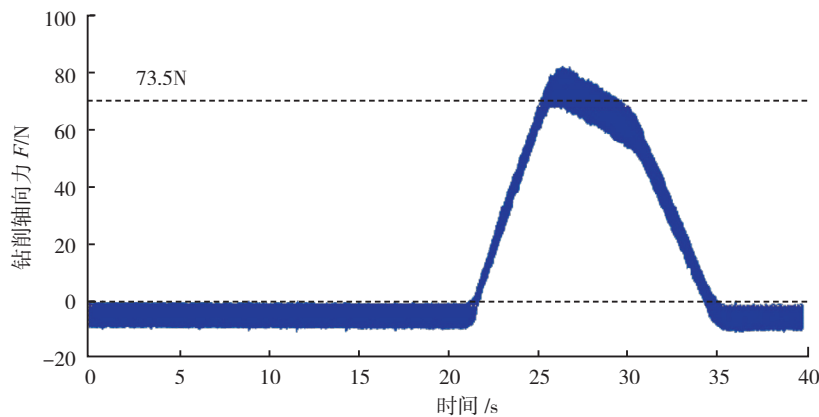
图1 整体硬质合金钻头和整体烧结PCD钻头



图2 复材专用纳米金刚石涂层钻头



(a) 金刚石涂层硬质合金钻头



(b) 无涂层硬质合金钻头

图3 钻削轴向力对比 (钻头直径4.75mm, 孔深12mm)

加工性能的主要几何参数有: 横刃长度、gash 前角、后角、钻头形貌和螺旋角等。在所有几何参数中, 横刃和钻头角对钻削轴向力的影响最大, 而钻削轴向力的增大将直接导致钻削分层的发生^[13]。在钻削过程中, 保持其他加工参数不变, 横刃越长钻削轴向力越大。这是因为: 在横刃区, 切削刃负前角很大而切削速度却很小, 使得横刃在钻削时会对复合材料产生较大的挤压作用, 如图 5 (a) 所示。研究表明, 钻削过程中有 60% 的钻削轴向力来自横刃^[15]。当钻削轴向力超出复合材料出口层间结合强度时, 就会发生出口分层。相对于较钝的钻头, 锋利的钻头可以在很小的面积上钻穿最后一层复合材料。Gaitonde 等^[16-17]通过在低速和高速钻削 CFRP 发现, 当钻头角增大时, 分层系数 F_d (描述复合材料层间分层大小的指标) 也随之增大, 如图 6 所示。

另外, 剥离现象常发生在钻头钻入复合材料时, 如图 5 (b) 所示。在钻头的切削刃接触到复合材料层压板时, 钻头切削刃会对入口处的复合材料作用一个轴向拉力, 使得入口处的上层材料与受轴向推力的未切削层材料发生分离, 从而形成入口剥离现象。这种入口剥离缺陷会随钻头实际前角的增大而增加^[18]。为了减小或消除这种入口剥离缺陷, 通常采

使用寿命。

复材专用制孔刀具几何结构

FRP 由于其特有的机械性能和物理性能, 其制孔刀具和一般金属制孔刀具在几何结构上有很大改进。为了改善复材制孔的质量和效率, 一

系列专用的 FRP 制孔刀具得到了开发和应用, 如八面钻 (Eight-facet drill bits)、双导向阶梯钻 (Double-margin piloted step drill bits)、匕首钻 (Dragger drill bits)、烛芯钻 (Candle stick drill bits) 等, 如图 4 所示。

在 FRP 钻削加工中, 影响钻头



图4 复材专用制孔刀具几何结构

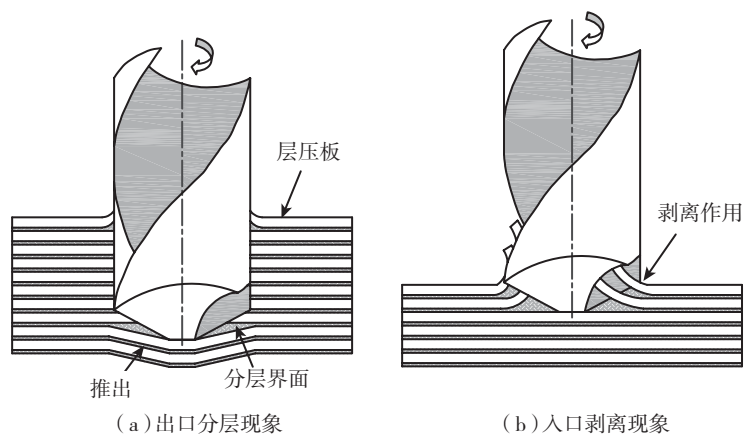


图5 分层作用机制^[14]

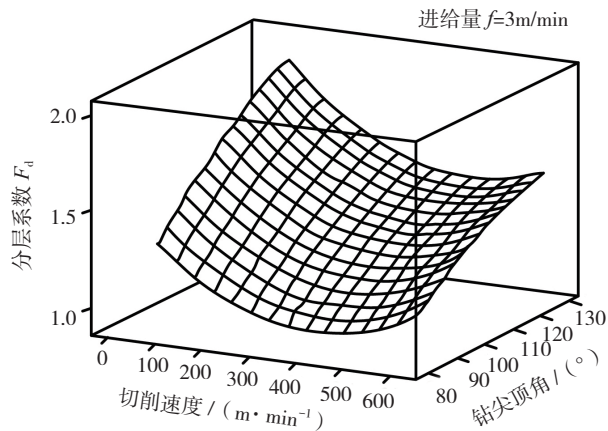


图6 分层系数随切削速度和钻尖顶角的变化关系^[19]

用较小的钻头前角,一般推荐选用小于 6° 的前角。

若钻削轴向力能够沿圆周分布,那么出口部位的分层现象将会得到很大的改善。锯钻(Saw drill bits)、烛芯钻(Candle stick drill bits)、套料钻(Core drill bits)和阶梯钻(Step drill bits)等专用钻头都符合这一特性,与传统麻花钻相比,采用专用钻头能获得更小的临界推力值(复合材料不发生分层所需的最小钻削轴向力值)。这些专用钻头的优点在理论与实际应用中都已得到了验证,其钻削轴向力会向钻头圆周分散而不是集中在中心,在不引起分层的情况下可以采用更高的进给速率^[19]。

锯钻利用向外围分配推力的方法进行复合材料层压板制孔。当分层尺寸在钻头半径范围内时不需要予以关注,因为分层部位处的材料最终会被钻除掉。当分层尺寸超出钻头半径范围时,由于锯钻在材料上施加的圆周力,它与施加集中力的麻花钻相比,能够保证不引起分层的情况下获得更大的钻削轴向力。

烛芯钻加工时的钻削轴向力可以分解为一个集中的载荷与外围的圆周载荷之和。由于大部分推力载荷分布在钻头外围,因此此类钻头在分层开始时允许更大的临界推力值。烛芯钻可以看作是介于麻花钻与锯钻的中间类型,但烛芯钻的横刃

比麻花钻的横刃要短得多,因此它可以从很小的面积上钻穿最后一层复合材料。这样最后一层复合材料所受到的弯曲力较小,从而保证了更好的孔加工质量。

套料钻加工时钻削轴向力均匀地分布在一个环形区域,而不是集中在中心。这样在分层开始时可以获得较大的临界推力值。

在套料钻的刀具参数中,金刚石磨粒的粒度是影响其钻削轴向力的最重要因素,而钻尖厚度的影响相对较小^[20]。

阶梯钻可以认为是主阶梯和次阶梯复合而成。主阶梯部分减小了对中心材料的去除,特别是抵消了横刃对推力的影响。

研究表明^[19-20],当进给量小于 0.010mm/rev 时,采用烛芯钻可以获得更小的钻削轴向力;而阶梯钻则能在进给量大于 0.010mm/rev 时获得更小的钻削轴向力。相比于烛芯钻和阶梯钻,套料钻和锯钻的钻削轴向力依次增大,而麻花钻相比于其他4种类型的钻头钻削轴向力明显偏大。

结束语

纤维增强复合材料(FRP)是21世纪应用最为广泛的材料之一,其高效高质量加工仍然需要不断研发新型专用刀具和改善加工工艺来实现。专用FRP制孔刀具的设计、制造,刀具材料和涂层匹配,加工工艺优化是FRP加工的关键技术。本文通过对研究成果的总结,指出金刚石涂层硬质合金刀具在FRP制孔过程中的良好性能,从钻削轴向力、分层损伤等因素对多种形式的钻头进行了对比分析,为专用FRP制孔刀具进一步研发指明了方向。

参考文献

- [1] Shyha I, Soo S L, Aspinwall D, et al. Effect of laminate configuration and feed rate on cutting performance when drilling holes in carbon fiber reinforced plastic composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(8): 1023-1034.
- [2] Tsao C C. Investigation into the effects of drilling parameters on delamination by various step-core drills. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 206(1): 405-411.
- [3] Abrao A M, Faria P E, Rubio J C, et al. Drilling of fiber reinforced plastics: A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 186(1): 1-7.
- [4] Wang Y Q, Bao Y J, Gao H. Studies on disfigurement-fee technology of drilling carbon fiber reinforced plastics. *Advanced Materials Research*, 2007, 24: 125-132.
- [5] 徐锦泐. 高强度型碳纤维增强复合材料 T800S/250F 的钻削制孔研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [6] 孟宪超. 碳纤维复合材料钻孔加工工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [7] Chen W C. 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.
- [8] Stone R, Krishnamurthy K. A neural network thrust force controller to minimize delamination during drilling of graphite-epoxy laminates. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1996, 36(9): 985-1003.
- [9] 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.
- [10] Rawat S, Attia H. Wear mechanisms and tool life management of WC-Co drill during dry high speed drilling of woven carbon fiber composites. *Wear*, 2009, 267(5): 1022-1030.
- [11] Iliescu D, Gehin D, Gutierrez M E, et al. Modeling and tool wear in drilling of CFRP. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, 50(2): 204-213.

本文共有参考文献 20 篇,因篇幅所限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 良辰)