

航空用CFRP/Ti叠层材料制孔工艺综述

■ 南昌航空大学航空制造工程学院 (江西 330034) 蒲景威 高延峰

摘要: 文章基于CFRP/Ti叠层材料构件的加工特性, 综述了CFRP/Ti叠层构件制孔工艺的研究现状。



蒲景威

随着航空技术的发展, 对制造飞行器所需材料的综合性能要求越来越高, 并且对飞行器总体也追求轻型化。然而常规的航空材料很难满足这些要求, 因此必须研究性能优越的航空材料。碳纤维增强复合材料(CFRP)比强度高、比模量高、耐腐蚀、抗疲劳性强、具有设计性、成形性强且质量轻等优点, 在航空制造业中使用比例越来越高, 被大量应用在航空工业中。在航空器装配过程中复合材料常与金属材料装配在一起形成叠层构件, 这种叠层材料构件的好处是增强材料特有性能的同时又不增加构件质量。基于这一优势, 这种构件在航空领域迅速发展, 并且碳纤维复合材料/钛合金(CFRP/Ti)的用量已成为衡量航空事业先进性的

的重要指标之一。

叠层构件的优越性能确保了其在制造大型商用飞机中关键承载部件中的应用, 并且这种构件成功的制造了可承受高热机械应力的飞机结构, 新一代的波音787的机翼与机身的连接就是一种典型的应用。在航空制造业中此类构件主要采用铆接和螺栓联接, 为了保证构件中两种材料孔的同轴度和加工效率, CFRP/Ti叠层构件在装配过程中的联接孔通常采用一体化加工方式, 一次性钻削联接孔。现代航空组件在装配复合材料与钛合金时需要加工大量联接孔, 因此制孔的精度和品质对飞机的可靠性和寿命起着决定性作用。

1. CFRP/Ti叠层材料制孔的特点

CFRP是以碳纤维或碳纤维织物为增强体, 以树脂、陶瓷、金属、水泥、碳质或橡胶等为基体形成, 而现代航空器上使用最多的是以环氧树脂或酚醛树脂基为基体的碳纤维复合材料。由于碳纤维脆性大、硬度高、表面光滑与树脂结合能力差, 因此其形成的复合材料层间强度低、抗冲击

能力差。CFRP由于硬度高、耐磨性好, 在钻削加工时易导致刀具磨损严重, 另外因复合材料树脂基体相质较软, 加工过程中温度过高容易导致其基体融化变质。还有就是CFRP层间强度低, 在轴向力作用下易诱发分层、撕裂等损伤。因钛合金弹性模量低, 加工过程中在切削力作用下易发生变形。因导热率小, 加工时导致切削温度升高, 高温下刀具易磨损, 且高温下金属化学反应活泼易发生熔焊粘结现象, 损坏刀具。钛合金在加工过程中弹性恢复大, 导致其钻削性差, 加工尺寸不稳定。一般加工钛合金采用低转速适量进给并使用切削液, 而加工复合材料时一般采用高转速和小进给量且不使用切削液。为确保构件孔加工精度, 航空制造业需采用一体化加工方式一次性钻削联接孔, 因此导致CFRP/Ti叠层构件成为航空领域难加工材料之一。如图1所示叠层材料钻削示意图。

2. CFRP/Ti叠层材料钻削机理

CFRP/Ti叠层材料多层复杂的加工环境, 决定了其加工机理与单一材料不同, 因各层结构性

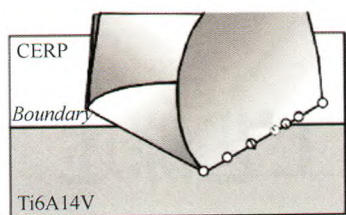


图1 叠层材料钻削示意图

质不同,使得加工过程中存在不同的切屑分离模式及在交界面的不同磨损形态。相互关联的交界面的切削机理,对叠层材料加工孔表面质量起着至关重要的作用。因此探究叠层材料钻削机理,可为其切削参数的优化提供有益的指导。在探究叠层材料钻削构成时存在两种不同的叠层方式即Ti/CFRP和CFRP/Ti。之所以选择CFRP/Ti这种叠层方式是因为在切削过程中钛合金可以起到支撑作用,防止构件弯曲和抑制复合材料钻出时的出口分层,提高刀具使用寿命。如图2所示。

钻削复合材料层时由于复合材料的脆性和各向异性的纤维基体,材料在切屑去除时因剪切破坏会产生一系列断裂,且复合材料切屑的产生形式为粉末状。在交界面时刀具经历双料加工,涉及机械、物理等多方面材料去除过程,且该区域最容易受到损伤而产生缺陷。刀具到达CFRP/Ti界面,不连续的工件相互作用使得交界面加工难度加大。在交界面同时发生纤维脆性断裂和金属塑性变形,刀具切削刃经历不同的热、机械影响,刀具也会因为同时加工两种材质而产生剧烈颤动,致使加工系统不稳定触发加工孔形成损伤。在此加工过程中刀具磨损加快,刀具使用寿命急

剧缩短。针对这种复杂交界面加工环境,有学者在理论上推断减小钻头直径、提高主轴转速或进给速度以及减少在交界面加工时间,可以减少交界面处加工损伤以达到理想的钻孔结果。当刀具完全加工到钛层时,在此主要发生弹性塑性变形。一方面钛合金因其导热性差和化学亲和力强,往往导致刀具基体表面积聚大量切削热,造成刀具表面严重烧伤且产生熔焊等现象。另一方面在刀具与切屑从底层钻出前加工钛合金产生的热及连续的切屑,也极大的损害复合材料加工的孔。这也是叠层材料制孔有待解决的难题之一,目前有关此问题的研究成果并不明显。

研究叠层材料钻削机理时钻削力也是加工过程中重要的物理量,力通常由两部分组成即轴向力和转矩。刀具前刀面上产生的可变切屑是影响叠层钻孔转矩的关键因素,而刀具侧面和孔壁表面的相互作用是影响轴向力的关键因素。根据钻削力产生的因素Ozden I和Ghassemieh E,在对CFRP/Ti叠层材料钻削力研究中得出主轴转速和进给速度对钻削力有显著的影响,随着进给速度的微量递增钻削力也在不断变大。因此钻削力的研究对优化刀具参数和改善刀具结构有着重要

的应用价值。

3. CFRP/Ti叠层材料制孔时引起的损伤

CFRP/Ti叠层材料制孔缺陷是影响叠层构件使用性、安全性和使用寿命的重要因素。钻削CFRP/Ti叠层时制孔缺陷主要存在于三个方面。

首先,发生在CFRP层的制孔缺陷主要包括:刀具几何缺陷、与温度相关的损伤以及在入口和出口的分层。刀具几何损伤与复合材料纤维取向和刀具切削刃间的角度有关。与温度相关的损伤主要包括复合材料微裂纹、树脂损坏和基体退化等,通常是由加工时孔壁表面产生的热效应引起的。在复合材料加工时复合材料分层是损伤中最主要的也是严重的,因为一旦发生分层材料将无法修复,构件也就直接报废,造成巨大损失。CFRP在钻孔加工时的分层示意图(见图3、图4)。CFRP质量入口处存在明显的毛刺、撕裂现象,出口孔口有明显的分层、撕裂现象(见图5)。

其次,CFRP/Ti叠层构件两种材料的交界面是构件最容易受到损害的区域,原因在于刀具从一种材料进入另一种材料时,刀具与工件的相互作用产生极大的变化。在交界面刀尖与刀刃会受到严重的冲击与振动,并且交界

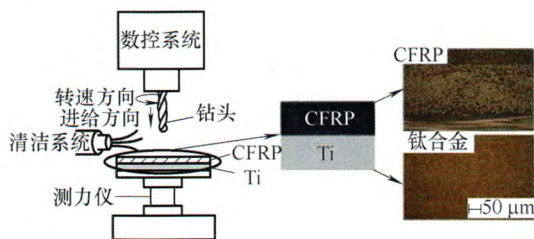


图2 叠层材料构成方式在钻削中的应用

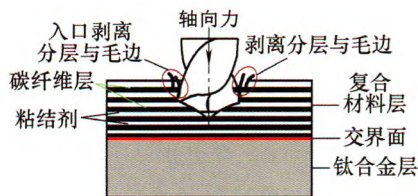


图3 CFRP/Ti在钻入口分层示意图

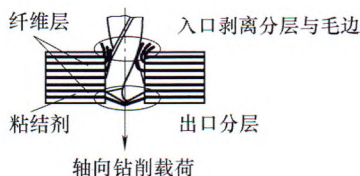


图4 CFRP在入口和出口分层示意图

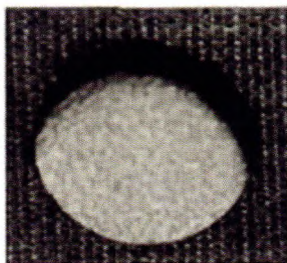


图5 叠层材料中CFRP在加工时入口与出口孔口形貌

面还存在不同材质与形状的切屑，这种情况加剧了制孔的难度，并且由于这种特殊的物理环境，叠层材料的交界面容易出现微裂纹且构件在装配过程中产生疲劳断裂，如图6所示。另外研究发现由于钛合金独特的物理性质使得交界面局部热量难以耗散，致使交界面积集大量切削热而出现软化、退化现象，严重时出现积屑瘤与刀具熔焊等现象。

最后，钛层制孔时主要的损伤来自温度。由于钛合金导热系数差且钻削叠层材料一般采用干加工，所以切削钛层时切削温度高导致出口处产生毛刺、烧伤等损害，如图7所示。另外就是加工到钛层时钛合金切屑在排除过程中划伤复合材料孔壁。

4. CFRP/Ti叠层材料制孔行为的研究现状

近年来随着CFRP、钛合金在航空领域的广泛应用，各国学者针对CFRP/Ti叠层材料制孔出现的各种损伤进行一系列的研究且已取得一定的成果。下面主要从

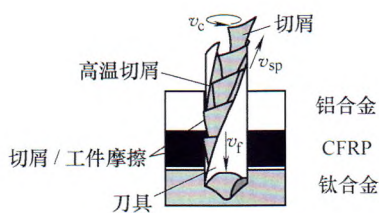


图6 叠层构件制孔排屑问题



图7 钛合金制孔缺陷

刀具、钻削力和温度及工艺参数等方面对CFRP/Ti叠层的研究现状进行简要阐述。

(1) CFRP/Ti叠层材料制孔刀具的研究：材料加工刀具的选择至关重要，现代航空工业对CFRP/Ti叠层材料制孔主要以麻花钻制孔方式。Park K H等采用WC（乌碳钢）钻头和PCD涂层钻头研究了钻削CFRP/Ti叠层时刀具的磨损机理，通过测试加工时的转矩、轴向力及刀具表面



-凯姆勒-
来自德国的高精度刀柄



全方位的机械加工工具
制造商和供应商



中国区办事处
电话：+86-512-68130878
邮箱：Vikings-KEMMLER@vikingstools.com
网页：www.vikingstools.com

北方联络处
电话：+86-010-65008538
传真：+86-010-65005216
邮箱：Vikings-North@vikingstools.com

南方联络处
电话：+86-512-87811663
传真：+86-512-67686803
邮箱：Vikings-South@vikingstools.com

Visit us:
hall 5 – stand E34



◆广告 查询编号：3090

info@vikingstools.com

磨损等分析刀具磨损机理。结果表明对于WC刀具,钛合金的粘结是刀具磨损的一个主要因素,另外对于PCD刀具,钻削钛合金时没有表现出大量的粘结但刀具具有崩刃现象。结果还表明钻削CFRP/Ti叠层材料时主轴转速越高,转矩和轴向力越大,钻削时钻削温度增加刀具磨损则加重。

Zitoune R等采用纳米涂层刀具和无涂层刀具中的不同直径的刀具对CFRP/Ti叠层材料进行钻削实验,从切削参数、切屑形成及刀具磨损等方面对实验进行分析。实验表明采用有涂层刀具钻削孔的质量比无涂层刀具钻削孔的质量要好并且采用纳米涂层刀具钻削叠层材料可以明显降低轴力和孔表面粗糙度值。

天津大学采用CVD金刚石涂层刀具研究CFRP、钛合金铣削过程,从切削力、制孔质量和磨损机理方面来评价采用CVD金刚石刀具加工的可行性。

(2) CFRP/Ti叠层构件钻削时对力和温度的研究:由于CFRP/Ti两者材料的特性在钻削CFRP/Ti叠层构件时力的大小也是影响加工孔质量的重要因素之一,所以在加工CFRP/Ti叠层构件时对力的研究是很有必要的。Matsumura T等针对CFRP/Ti叠层制孔过程建立了钻削力的分析预测模型,通过正交试验数据对比准确的预测了制孔过程中钻削力的变化规律。在钻削叠层材料过程中温度的变化往往与钻削力的大小成正比,力越大温度越高,而温度的高低直接影响工件的力学性能,并且温度对刀具磨损有着直接的影响。所以在钻削叠层

材料时对温度的预测是必不可少的。Montoya M等利用有限元软件对叠层构件钻削过程中温度场的分布进行数值模拟,有效的得出温度场分布的规律。

(3) CFRP/Ti叠层材料工艺参数的研究现状:Li B等运用有限元仿真软件对CFRP/Ti叠层构件进行仿真分析,研究了工艺参数对材料钻削的影响并得出进给速度、钻削力和转矩等对工件影响的关系。南成根等设计正交试验分析了切削参数对制孔的影响。大进给量的条件下,高温、高硬度的钛合金切屑会对CFRP产生严重的侵蚀,低转速不利于切削CFRP。应使用小进给量钻削钛合金,大切削速度钻削CFRP层。

Senthilkumar M等利用遗传算法对钻削CFRP/Ti叠层材料的参数进行了优化。大连理工采用PCD刀具对CFRP/Ti叠层材料进行研究,综合分析CFRP和钛金属材料钻削的最优工艺参数,提出叠层构件钻削的缺陷模型,并进一步提出了基于变工艺参数策略的刀具钻削叠层构件新工艺,还分别探究了变工艺参数钻削工艺路径的优化、叠层板钻削变工艺参数位置的确定、变工艺参数钻削切削力典型特征、刀具使用寿命和叠层板制孔出口质量等。

5. CFRP/Ti叠层材料加工新方法及发展趋势

传统钻削方法存在很多弊端,不管是使用不同材料刀具还是改变工艺参数,传统钻削方法加工的孔的质量并不能满足现代航空工业的要求,因此从改变加工方法角度入手来研究CFRP/Ti叠层构件已达到预期效果。

现在研究较为广泛的新加工方法是螺旋铣削CFRP/Ti叠层构件代替传统钻孔加工方法。Wangyang N提出了用于加工CFRP/Ti叠层材料螺旋铣孔技术的概念。朱春燕等对比铣削与钻削制孔技术,提出对于5mm以上的孔,螺旋铣孔技术比钻孔技术有优势。王海燕就螺旋铣削CFRP/Ti材料技术进行了较为全面的研究。Hocheng H等首次引用超声钻孔技术加工叠层材料。另外还有学者提出以磨代钻、磨钻组合和激光等新的加工技术。

由此可见,未来在研究CFRP/Ti叠层材料构件时传统加工方法逐渐会被新型加工方法所取代。未来研究方向主要是探索新的加工方式,在此基础上再对叠层材料进行基础研究包括刀具、参数优化等。

6. 结语

随着社会的快速发展CFRP/Ti叠层材料构件的应用将会越来越广,复合材料金属叠层制孔技术的高低将直接影响一个国家在航空领域的先进性,国外在该技术上已有所突破并积累了大量宝贵经验,而我国在航空领域起步较晚,目前我国在叠层材料制孔技术方面还有所欠缺,在这一领域我们还有很大的进步空间,因此研究叠层材料制孔技术对推进航空工业精密加工的进步有着重要的作用。

参考文献:

- [1] 张选龙. 碳纤维复合材料/钛合金叠层装配制孔技术研究[D]. 大连理工大学, 2010.

MW (收稿日期: 20170710)