

引文格式: 白大山, 陈五一, 陈雪梅. 碳纤维增强复合材料/轻合金叠层结构制孔技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(9): 82-88.

BAI Dashan, CHEN Wuyi, CHEN Xuemei. Research advances in hole making technology of carbon fiber reinforced plastics/light alloy laminated structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(9): 82-88.

碳纤维增强复合材料/轻合金叠层结构制孔技术研究进展

白大山¹, 陈五一², 陈雪梅¹

(1. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092;

2. 北京航空航天大学, 北京 100191)

[摘要] 碳纤维增强复合材料/轻合金叠层结构已经被广泛地应用于航空航天及相关的工程领域。阐述了近年来国内外碳纤维增强复合材料/轻合金叠层结构制孔技术的研究进展与发展方向, 重点剖析了叠层结构钻削机理、制孔缺陷、制孔质量影响要素等方面。为实现碳纤维增强复合材料/轻合金叠层结构优质高效制孔加工, 提出叠层结构制孔切削热建模仿真、制孔缺陷预测与制孔过程智能控制等未来研究方向。叠层结构制孔研究的现状分析与展望将会对航空装配领域的技术进步起到重要的指导作用。

关键词: 碳纤维增强复合材料(CFRP); 轻合金; 叠层结构; 钻削机理; 制孔缺陷; 制孔质量

Research Advances in Hole Making Technology of Carbon Fiber Reinforced Plastics/Light Alloy Laminated Structure

BAI Dashan¹, CHEN Wuyi², CHEN Xuemei¹

(1. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China;

2. Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] Carbon fiber reinforced plastics/light alloy laminated structure has been extensively used in aerospace and related engineering fields. The research advances and development trends at home and abroad in hole making technology of carbon fiber reinforced plastics/light alloy laminated structure were reviewed, mainly analyzing laminated structure drilling mechanisms, drilling-induced defects and influence factor of hole making quality. In order to realize the high-quality and high-efficient hole making of carbon fiber reinforced plastics/light alloy laminated structure, the future study directions such as the modeling and simulation of cutting heat, prediction for hole making defects as well as intelligent control of drilling process are proposed. The current situation analysis and prospection of hole making research of laminated structure will contribute to the advances in technology in the field of aircraft assembly.

Keywords: Carbon fiber reinforced plastics (CFRP); Light alloy; Laminated structure; Drilling mechanism; Drilling defects; Drilling quality

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.09.082

碳纤维增强复合材料(Carbon fiber reinforced plastics, CFRP)因具有比强度高、比刚度高、耐疲劳性好等优异特性, 被广泛应用于航空航天领域, 而钛和铝等轻合金材料也由于质量轻、比强度高、耐腐蚀性好等特点, 在相关的工业部门得到大量应用^[1-4]。在航空制造业中, 通常将CFRP与钛、铝等轻合金材料组合成叠

层结构, 综合不同材料优点, 减轻结构重量, 提高整体性能。叠层材料一般通过螺接或铆接的方式组成装配件, 其制孔质量在一定程度上决定着飞机部件的装配质量。随着飞机数字化装配技术的发展, 在制造装配过程中, 为了提高加工质量、保证装配精度, 经常会使用一把刀具对CFRP/轻合金叠层结构进行制孔加工, 这样刀

具会先后与 CFRP 和轻合金互相作用。由于两类材料具有完全不同的物理力学性能,使得叠层结构的制孔困难,刀具磨损快速且严重,孔的加工质量和加工效率不能得到保障,为其更为广泛的工程化应用带来了极大阻力。因此,对于叠层结构制孔技术的深入研究十分迫切,是提高飞机安全性和经济性的必要保证。

1 CFRP/轻合金叠层结构钻削机理研究

CFRP/轻合金叠层结构的钻削过程主要包括 CFRP 层切削、CFRP/轻合金界面层切削以及轻合金层切削。在 CFRP 层的切削过程中,刀具与纤维铺叠方向不同的复合材料相互作用,高硬度的碳纤维会发生脆性断裂,

形成粉末状切屑,刀具在切削过程中会发生磨粒磨损。刀具切削至 CFRP/轻合金界面时,与 CFRP、轻合金同时作用,CFRP 层出现脆性断裂,轻合金层则会发生弹塑性变形,从而切削叠层结构界面处时刀具振动剧烈,制孔质量不稳定。随着钻削过程的进行,刀具运动至轻合金层,此时在弹塑性变形下材料形成连续切屑。总体来说,叠层结构的钻削机理有异于单一材料,钻削过程中会涉及复杂的热-力耦合效应。因此,叠层结构的优质高效制孔难度极大。

为了可以实现高质量、高效率、低成本的制孔加工,国内外诸多专家学者对 CFRP/轻合金叠层结构制孔开展了相关的研究工作,取得了一定的研究成果,如表 1

表 1 CFRP/轻合金叠层结构制孔研究进展
Table 1 Research advances in hole making of CFRP/light alloy laminated structure

叠层结构		切削刀具	切削参数	研究重点	文献
组成	厚度				
CFRP/ Ti 合金	2mm/2mm	硬质合金麻花钻: 顶角 100°; 螺旋角 30°; 直径 6mm	转速: 2000r/min、3000r/min、4000r/min、5000r/min; 进给速度: 150mm/min、180mm/min、210mm/min	轴向力、制孔质量	刘俊义等 ^[5]
	6mm/6mm	硬质合金麻花钻: 顶角 105°、115°、125°、135°; 螺旋角 20°、25°、30°、35°; 直径 6mm	CFRP 层转速 2500r/min, 进给量 0.01mm/r; Ti 合金层转速 550r/min, 进给量 0.08mm/r	刀具几何参数优选、切削参数优化	刘军杰 ^[6]
	9.5mm/7.5mm	硬质合金麻花钻: 顶角 140°; 螺旋角 35°; 直径 6.35mm	转速: 500r/min; 进给量: 0.06mm/r	刀具磨损	邹凡等 ^[7]
	5.3mm/6.35mm	硬质合金内冷钻头: 顶角 140°; 螺旋角 30°; 直径 6.35mm	切削速度: 10m/min、20m/min、30m/min、40m/min; 进给量: 0.03mm/r、0.06mm/r、0.09mm/r、0.12mm/r	损伤机理、制孔精度	王昌赢 ^[8]
	5mm/5mm	硬质合金麻花钻: 顶角 130°; 螺旋角 30°; 直径 5mm	转速: 600r/min; 进给量: 0.04r/min; 超声纵振振幅和频率: 5.5μm、25kHz; 低频振幅和频率: 0.1mm、35Hz	轴向力、制孔质量	张世杰等 ^[10]
	2.3mm/2mm	硬质合金钻头: 顶角 118°; 螺旋角 30°; 直径 5mm	转速: 1000r/min; 进给量: 0.025mm/r、0.05mm/r、0.1mm/r	轴向力、分层损伤	Luo 等 ^[11]
	7.54mm/6.73mm	PCD 钻头: 顶角 135°; 螺旋角 28°; 直径 9.525mm	CFRP 层转速 6000r/min、2000 r/min, 进给量 0.08mm/r; Ti 合金层转速 500r/min、300r/min, 进给量 0.05mm/r	轴向力、扭矩、孔径精度、制孔缺陷	Dave 等 ^[12]
	9mm/8mm	TiN-TiAlN 涂层硬质合金钻头: 顶角 140°; 螺旋角 30°; 直径 10mm	切削速度: 15m/min、40m/min、65m/min; 进给量: 0.02mm/r、0.05mm/r、0.08mm/r	孔径精度、制孔质量	Kolesnyk 等 ^[13]
	5mm/3mm	硬质合金麻花钻: 顶角 130°; 螺旋角 30°; 直径 6mm	转速: 1500r/min; 进给速度: 25mm/min	轴向力、刀具磨损	Wang 等 ^[14]
	10mm/10mm	硬质合金麻花钻: 顶角 128°/155°; 螺旋角 16°; 直径 7.938mm	CFRP 层, 切削速度: 120m/min; 进给量 0.06mm/r Ti 合金层, 切削速度: 20m/min, 进给量: 0.05mm/r; 振幅: 0.06mm; 频转比: 2.5osc/r	轴向力、刀具磨损	Yang 等 ^[15]
4mm/4mm	硬质合金麻花钻、TiAlN 涂层麻花钻: 顶角 135°、140°; 螺旋角 20°、27.2°; 直径 6.35mm	切削速度: 15m/min、30m/min、45m/min、60m/min; 进给量: 0.03mm/r、0.06mm/r、0.09mm/r、0.12mm/r、0.15mm/r	轴向力、制孔质量、制孔精度	Xu 等 ^[16]	
CFRP/ Al 合金	3mm/4mm	硬质合金麻花钻: 顶角 118°; 直径 4mm	转速: 2000r/min、3000r/min、4000r/min、5000r/min、6000r/min; 进给速度: 10mm/min、15mm/min、20mm/min、25mm/min	轴向力、制孔质量	李万平 ^[17]
	—	硬质合金麻花钻: 顶角 118°; 螺旋角 20°; 直径 5mm	转速: 1000r/min、2000r/min; 进给量: 0.05mm/r、0.1mm/r	轴向力	于海夫等 ^[18]
	—	硬质合金麻花钻: 直径 6mm	转速: 4300r/min、4500r/min、9700r/min; 进给速度: 85mm/min、80mm/min、650mm/min、480mm/min	切削参数优化	郑璐晗等 ^[19]
Ti 合金/ CFRP	7.54mm/6.73mm	金刚石涂层钻头: 顶角 140°; 螺旋角 30°; 直径 6.38mm	Ti 合金层切削速度 30m/min, 进给量 0.08mm/r; CFRP 层切削速度 120m/min, 进给量 0.15mm/r	轴向力、扭矩、刀具磨损、制孔精度、制孔缺陷	Kuo 等 ^[20]

所示。分析表明,当前,国外针对 CFRP/ 轻合金叠层结构的制孔研究主要聚焦于 CFRP 分层缺陷与切削力之间的建模分析、轻合金切屑形成及其对制孔质量的影响,以及叠层结构制孔建模仿真等方面。比较而言,国内研究则致力于叠层结构制孔精度、制孔质量以及刀具磨损等方向。清华大学的南成根等^[21]通过 CFRP/ 钛合金叠层结构的制孔试验研究了切削参数、钛合金切屑对 CFRP 制孔质量的影响。张选龙^[22]则对 CFRP/ 钛合金叠层结构制孔时刀具的磨损机理进行分析,研制出适用于叠层结构制孔加工的高品质刀具。通过对前期研究情况的分析总结可以得出,目前对于叠层结构制孔质量的提升主要是通过切削参数优化与刀具材料及结构优选优化来调控切削过程中的热-力耦合作用,减小钻削轴向力,提高轻合金金属排屑效果,以实现抑制制孔缺陷的目的。

2 CFRP/ 轻合金叠层结构制孔缺陷研究

CFRP/ 轻合金叠层结构通常是由 CFRP 和钛或铝等轻合金组合而成的,不同的材料之间存在间隙,钻削时会产生毛刺,使结构件间形成应力集中,降低疲劳强度,同时 CFRP 层间的结合强度较低,制孔过程中还会出现分层和撕裂等缺陷,影响结构件的装配质量和使用性能。因此,叠层结构制孔缺陷的形成与抑制是重点研究内容。

CFRP/ 轻合金叠层结构制孔过程中,缺陷主要发生在 CFRP 层及 CFRP/ 轻合金界面处。CFRP 层切屑的形成过程与纤维切削角密切相关,具体的形成方式及加工表面形貌如图 1 所示。当纤维切削角为 0° 时,碳纤维在刀具的挤压作用下与基体相发生剥离去除,形成切屑;当 $0^\circ < \text{纤维切削角} \leq 90^\circ$ 时,碳纤维受到剪切应力

作用,当剪切应力大于碳纤维强度时,碳纤维发生断裂形成切屑;当 $90^\circ < \text{纤维切削角} < 180^\circ$ 时,碳纤维在刀具的挤压作用下产生弯曲应力,当弯曲应力超过碳纤维强度时,碳纤维则会发生弯曲断裂从而形成切屑。CFRP 层的材料去除会伴随着不断变化的脆性断裂过程,各向异性的不均匀特性使其在制孔过程中容易产生毛刺、分层、撕裂、基体剥落及纤维拔出等缺陷。基于钻削加工中的毛刺形成模型,对毛刺生成和变化进行的试验研究及理论分析可得,影响毛刺形成的主要因素包括钻头几何参数和钻削加工参数等,通过对几何参数、加工参数的优选优化可以减少制孔过程中的毛刺产生^[23]。叠层结构钻削层间毛刺试验研究则表明,叠层顺序、钻削参数对层间毛刺的影响显著,预加载压紧力的施加可以有效抑制层间毛刺的产生和大小^[24]。通过 CFRP/Al 叠层结构制孔缺陷的研究可以得出包括 CFRP 层的撕裂、分层及毛刺缺陷的特征和形成机理,分析得到横刃对于碳纤维的拉伸是形成撕裂的主要原因,毛刺则主要产生在切削碳纤维时处于拉伸状态的区域,铝合金切屑对 CFRP 的表面划伤也会对毛刺形成产生一定作用,该种叠层结构制孔时分层缺陷最为显著^[25]。针对钻削复合材料时临界轴向力的研究分析则表明,当钻削轴向力小于复合材料临界轴向力时,可以避免复合材料出现分层损伤^[26]。

在钻削 CFRP/ 轻合金叠层结构界面时,同时产生 CFRP 的脆性断裂及轻合金金属材料的弹塑性变形,此时刀具因与不同类型的材料之间发生强烈作用而产生磨粒磨损与黏结磨损,使刀具的振动加剧,导致叠层结构界面处的制孔精度较差。与此同时,轻合金金属层的切屑还会伴随着钻削过程的进行,对叠层结构界面处进行刮擦,造成孔壁的损伤。较早开展的 CFRP/ 钛合金叠层结构钻削研究表明,钛合金的低导热率引起钻削温

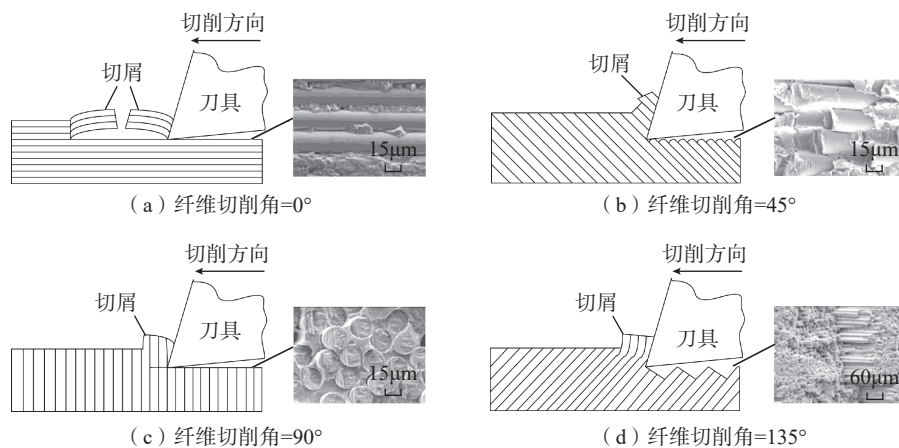


图 1 CFRP 层切屑形成方式及加工表面形貌

Fig.1 Chip formation of CFRP layer and machined surface topography

度过高,在叠层结构的结合面处造成 CFRP 孔出口的热损伤^[27]。针对叠层结构加工中 CFRP 的制孔缺陷分析发现,钻削时钛合金切屑的排出会划伤 CFRP 孔壁,导致界面缺陷产生^[28]。Pecat 等^[29]也通过试验进一步证实了钛合金切屑对叠层结构界面处的机械侵蚀作用。

CFRP/轻合金叠层结构由于不同材料之间具有性能差异,使得制孔过程中产生各种缺陷,严重影响加工质量。为满足航空结构材料高质量、高性能的制孔要求,对于叠层结构制孔中产生的缺陷问题仍需不断探索,尤其是对制孔缺陷的预测与控制,这对于实际制孔过程有着重要的指导意义。

3 CFRP/轻合金叠层结构制孔质量影响因素研究

3.1 制孔刀具

利用同一把刀具对 CFRP/轻合金构成的叠层结构进行制孔时,刀具作为切削加工过程的直接参与要素,需要应对因不同材料的物理力学性能差异所引起的难加工问题。选择合适的刀具材料、刀具几何角度及了解刀具的磨损情况对制孔质量的提升起着关键性作用,是保证加工顺利完成的前提。不同刀具材料对 CFRP/轻合金叠层结构进行的制孔加工已经被广泛开展。高速钢及硬质合金刀具钻削 CFRP/Ti 合金叠层板构件的研究发现,碳纤维的硬度接近于高速钢,因而高速钢刀具不适合加工 CFRP,相较于高速钢,硬质合金刀具具有更长的使用寿命^[27-30]。此外,可以将刀具表面涂覆一层耐磨材料制成涂层刀具,并将其用于叠层结构制孔。天津大学孙晓太^[31]和南京航空航天大学杨旭^[32]等分别采用以硬质合金为基体的 TiAlN 涂层刀具和 TiSiC 涂层刀具对 CFRP/Ti 合金、CFRP/Al 合金叠层结构进行制孔加工,研究结果表明,涂层刀具适合于叠层结构制孔,加工时可减小钻削轴向力,提高刀具寿命。近年来,叠层结构制孔过程中 PCD 刀具的使用也开始变得广泛,PCD 刀具和硬质合金刀具钻削 CFRP/Al 叠层结构的对比分析发现,PCD 刀具进行制孔时,刀具磨损更小^[33]。PCD 刀具钻削 CFRP/轻合金叠层结构时能有效延长刀具的使用寿命,同时可以获得良好的加工效果,目前已经成为叠层结构制孔的最佳刀具,其中刀具耐用度最好的为中晶粒尺寸 PCD 刀具,加工表面质量最好的为细晶粒 PCD 刀具。

刀具几何角度的变化会对 CFRP/轻合金叠层结构制孔加工产生一定的影响。以刀具几何角度(包括螺旋角、顶角和外缘后角等)为对象来研究 CFRP/Ti 合金叠层结构的钻削加工,得出该叠层结构制孔的最佳几何角度约为螺旋角 25°、顶角 140°、外缘后角 12°^[34]。对

CFRP/钛合金叠层振动制孔刀具几何参数优化的结果表明,螺旋角 25°、顶角 120°、后角 20° 时较为适合制孔加工,在该参数下钻削轴向力减小,钻削温度降低^[35]。不同结构的刀具也成为了研究重点,其中最具典型代表的即为钻-扩复合刀具。不莱梅大学的 Brinksmeler 等^[28]就利用钻-扩复合钻头对铝合金、CFRP 和钛合金组成的叠层板进行钻削试验研究,得到了钻-扩复合钻的制孔加工显著优于普通麻花钻。与此同时,南京航空航天大学杨凯等^[36]也对新型钻-扩复合钻头钻削 CFRP/钛合金叠层结构进行了研究,分析得出该结构钻头制孔时可以有效降低轴向力和钻削温度,提高刀具寿命。面向刀具几何参数等因素建立刀具结构的数学模型,以提高 CFRP/钛合金叠层结构制孔的刀具设计技术也开始被广泛研究^[37]。

CFRP/轻合金叠层结构制孔时,刀具始终与工件接触,排屑空间小,切屑排出困难,散热条件差,导致大量的切削热积累在切削区域,刀具磨损严重。TiN 涂层硬质合金刀具钻削 CFRP/Ti 合金叠层结构的过程中,在加工钛合金层时,刀具以黏结磨损为主,而对于 CFRP 层,刀具后刀面的磨粒磨损则是主要的磨损形式^[38]。Faraz 等^[39]研究发现,无论是使用 AlTiN 涂层刀具还是未涂层整体硬质合金刀具,在加工叠层结构的钛合金层时,刀具后刀面黏结有大量的切屑,易产生黏结磨损,当加工到 CFRP 层时,后刀面则会产生磨粒磨损。钻削叠层结构的钛合金层硬质合金刀具发生崩刃,随着加工进行到 CFRP 层,碳纤维摩擦刀具表面,使其变得光滑,阻止了崩刃的进一步发生^[40]。此外,CFRP/Ti 合金叠层板的钻削试验研究还表明,刀具的前刀面磨损不明显,主要磨损区域为横刃和后刀面^[41]。

针对 CFRP/轻合金叠层结构制孔加工,使用最为广泛的是硬质合金刀具、涂层刀具和 PCD 刀具,而其中加工效果最好的为 PCD 刀具。同时,要使刀具更加适应叠层结构的加工,还需要对刀具的几何参数和结构不断进行优化。当前,研制高性能刀具材料、优化刀具几何参数及结构是实现 CFRP/轻合金叠层结构高效精密制孔的重要途径。

3.2 切削参数

CFRP/轻合金叠层结构制孔时,主轴转速、进给量等切削参数是影响制孔质量的重要因素,叠层结构制孔时的切削参数一直是国内外关注的焦点并进行了广泛研究。当前,对于钻削 CFRP/轻合金叠层结构时选取固定不变的切削参数并不合适,根据叠层结构中不同的材料特性选择合理的切削参数是一种非常有效的优化方法。CFRP/Ti 合金叠层结构的切削参数探索表明,不同的材料层应选取相应的加工参数。多参数变换和啄

式变制孔切削参数的方法则被用于 CFRP/Al 叠层结构的制孔加工^[42-43]。Rahme 等^[44]分析了钻削 CFRP/Al 合金叠层结构时切削参数与轴向力的关系,得到了齿数为 2,直径为 2.5mm 的钻头制孔过程中 CFRP 不发生分层的临界每齿进给量为 0.1mm/tooth。

钻削 CFRP/Al 和 CFRP/Ti 时切削参数的变化会对钻削力和扭矩产生影响。钻削铝合金时轴向力和扭矩要比钻削 CFRP 时高。钻削 CFRP 过程中,随着进给量的增加,轴向力和扭矩都会增大,低进给、高转速更适合于 CFRP 的高质量制孔^[45]。CFRP/Ti 叠层结构制孔主轴转速增加、进给速度减小时,CFRP 层的轴向力减小。钛合金由于导热系数低,轴向力会随着主轴转速的增加而增加,随着进给速度的减小而减小^[46]。与此同时,对于 CFRP/Ti 合金叠层制孔时发现,大进给条件下,高温、高硬度的钛合金切屑会对 CFRP 产生严重侵蚀,这是导致 CFRP 孔径超差的主要原因^[21]。低速不利于切削 CFRP,会加大入口撕裂程度。西北工业大学的王慧峰等^[47]分析了不同切削参数制孔时 CFRP 的分层情况,并利用多元线性回归,得到了分层与切削参数间的函数关系,从而便于选择合理的切削参数使制孔效果达到最佳。Ti/CFRP/Al 叠层结构制孔加工时,不同材料层孔的表面粗糙度均随着切削速度的增加而增大^[48]。高速钻削 CFRP/Ti 叠层时,大的后刀面磨损和边缘磨损造成孔径尺寸减小,界面处发生破坏。而在低速下,由于刃部圆化,刀具几何尺寸发生改变,导致 CFRP 孔表面的碳纤维被拔出^[49-50]。

3.3 制孔顺序

不同的制孔顺序同样是影响叠层结构制孔加工的重要因素。CFRP/Ti 合金叠层结构钻入方向的研究表明,从 CFRP 一侧钻入可以获得较好的出口质量^[51],分析认为主要是由于钛合金层对 CFRP 层起到了一定的支撑作用。但是,当钻削至轻合金层时,金属切屑会沿着刀具的排屑槽方向流出,对叠层结构界面及 CFRP 层进行刮擦,降低制孔质量。对 CFRP/Ti 合金叠层不同钻削顺序的分析得出,从 CFRP 到钛合金制孔时,钛合金的支撑作用可以减少 CFRP 分层缺陷,有利于该叠层结构的高质量制孔加工^[52]。西北工业大学的于晓江等^[53]对 CFRP/Ti 合金叠层结构制孔入钻侧的优选研究则得出从钛合金侧钻入,减小了钛合金切屑对于 CFRP 层的刮擦作用,可以有效提高孔径尺寸精度,并且想要获得高精度孔,还需要对叠层结构进行两次或多次铰孔。

综上所述,国内外的专家学者对于 CFRP/轻合金叠层结构制孔进行了大量研究,取得了丰富的科研成果。当下,叠层结构的制孔研究主要聚焦于钻削机理,制孔缺陷,制孔刀具、切削参数、制孔顺序等要素对于制孔质

量的影响等方向,而针对 CFRP/轻合金叠层结构制孔时界面处的温度-应力分布及其变化规律、热-力耦合效应以及制孔过程的智能控制等方面仍缺乏深入系统的理论、建模仿真及试验研究。

4 结论

飞机装配领域中 CFRP/轻合金叠层结构的应用广泛,其制孔效率和质量直接关系到航空制造业的整体水平。国内外对于叠层结构制孔技术已经进行了大量研究,得到了一定的研究成果,但在叠层结构制孔方面仍有许多不足之处,例如制孔过程中温度、应力及刀具磨损等关键要素的实时智能精准监测等。未来,针对 CFRP/轻合金叠层结构优质高效制孔可以从以下 3 个方面进行重点研究。

(1) 叠层结构制孔切削热建模仿真。CFRP/轻合金叠层结构制孔过程中产生的大量切削热是造成制孔质量差、刀具磨损严重的主要原因,钻削过程属于封闭式加工过程,加工区域温度的实时精准监测极难实现。因此,基于建模仿真对钻削过程中切削热及其变化规律进行分析,对于减小叠层结构的热损伤、提升制孔质量具有重要意义。

(2) 叠层结构制孔缺陷预测。叠层结构制孔时容易产生毛刺、分层、撕裂、纤维拔出等形式的缺陷,严重影响飞机装配质量。通过叠层结构钻削过程热-力耦合本构模型的构建,利用有限元仿真对叠层结构的制孔缺陷进行模型建立与剖析,可以实现制孔缺陷的有效预测与控制。

(3) 叠层结构制孔过程智能控制。基于智能化感知技术,可以实现对叠层结构制孔过程的智能控制,对于叠层结构中不同物理力学性能的材料层智能推选出最优的加工条件,并对制孔过程中的关键特性指标进行监测与反馈,形成精确的闭环控制系统。叠层结构智能制孔将是未来发展的重要方向。

参考文献

- [1] 郭玉琴,孙民航,杨艳,等. 不同态碳纤维复合材料冲裁断裂行为[J]. 材料科学与工程学报, 2015, 33(3): 362-367.
- [2] GUO Yuqin, SUN Minhang, YANG Yan, et al. Deformation and fracture behaviors of different status CFRP during cutting[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2015, 33(3): 362-367.
- [3] ALBERDI A, ARTAZA T, SUÁREZ A, et al. An experimental study on abrasive water jet cutting of CFRP/Ti6Al4V stacks for drilling operations[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(1-4): 691-704.
- [4] PRAMANIK A, LITTLEFAIR G. Machining of titanium alloy(Ti-6Al-4V)—theory to application[J]. Machining Science and Technology, 2015, 19(1): 1-49.

- [4] READ N, WANG W, ESSA K, et al. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development[J]. *Materials & Design* (1980-2015), 2015, 65: 417-424.
- [5] 刘俊义, 孙会来, 聂晓菊, 等. 碳纤维复合材料/钛合金叠层钻孔工艺优化[J]. *宇航材料工艺*, 2018, 48(2): 78-81.
- LIU Junyi, SUN Huilai, NIE Xiaojie, et al. Process optimization for drilling of laminated carbon fiber reinforced plastic and titanium alloy materials[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2018, 48(2): 78-81.
- [6] 刘军杰. Ti-CFRP-Ti 叠层材料制孔工艺参数优化[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- LIU Junjie. Optimization of drilling processing parameters for Ti-CFRP-Ti laminated material[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
- [7] 邹凡, 王贤锋, 周磊, 等. 刀具磨损对 CFRP/Ti 叠层制孔精度影响的试验研究[J]. *工具技术*, 2020, 54(11): 18-21.
- ZOU Fan, WANG Xianfeng, ZHOU Lei, et al. Experimental study on influence of tool wear on precision of CFRP/Ti stacks drilling[J]. *Tool Engineering*, 2020, 54(11): 18-21.
- [8] 王昌赢. CFRP/Ti 叠层结构钻削损伤对孔壁质量和制孔精度作用机理与损伤抑制技术[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- WANG Changying. Drilling damage mechanism of CFRP/Ti stacks based on hole wall quality and accuracy and damage suppression technology[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
- [9] AN Q L, DANG J Q, LI J L, et al. Investigation on the cutting responses of CFRP/Ti stacks: With special emphasis on the effects of drilling sequences[J]. *Composite Structures*, 2020, 253: 112794.
- [10] 张世杰, 焦锋, 李远霄, 等. 碳纤维复合材料/钛合金叠层结构高低频复合振动钻削试验[J]. *机械设计与研究*, 2020, 36(6): 120-124, 129.
- ZHANG Shijie, JIAO Feng, LI Yuanxiao, et al. Experimental study on high and low frequency compound vibration drilling of carbon fiber reinforced plastic/titanium alloy laminated structure[J]. *Machine Design & Research*, 2020, 36(6): 120-124, 129.
- [11] LUO B, ZHANG K F, LIU S N, et al. Investigation on the interface damage in drilling low-stiffness CFRP/Ti stacks[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 32(9): 2211-2221.
- [12] DAVE K, AARON B, KIWEON K, et al. Hole quality assessment of drilled CFRP and CFRP-Ti stacks holes using polycrystalline diamond (PCD) tools[J]. *Carbon Letters*, 2017, 23(1): 1-8.
- [13] KOLESNYK V, PETERKA J, KURUC M, et al. Experimental study of drilling temperature, geometrical errors and thermal expansion of drill on hole accuracy when drilling CFRP/Ti alloy stacks[J]. *Materials* (Basel, Switzerland), 2020, 13(14): 3232.
- [14] WANG B, YIN W D, WANG M H, et al. Edge chipping mechanism and failure time prediction on carbide cemented tool during drilling of CFRP/Ti stack[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 91(9-12): 3015-3024.
- [15] YANG H J, CHEN Y, XU J H, et al. Tool wear mechanism in low-frequency vibration-assisted drilling of CFRP/Ti stacks and its individual layer[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104(5-8): 2539-2551.
- [16] XU J Y, EL MANSORI M. Experimental study on drilling mechanisms and strategies of hybrid CFRP/Ti stacks[J]. *Composite Structures*, 2016, 157: 461-482.
- [17] 李万平. CFRP/铝合金叠层构件制孔工艺与连接性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- LI Wanping. Investigation on hole making process and connection performance of CFRP/aluminum alloy laminated components[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [18] 于海夫, 薛惠峰. CFRP/铝合金叠层结构动态钻削力预测研究[J]. *机械科学与技术*, 2017, 36(1): 68-73.
- YU Haifu, XUE Huifeng. Prediction of dynamic thrust force in drilling of CFRP/aluminum-alloy stacks[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2017, 36(1): 68-73.
- [19] 郑璐晗, 杜兆才, 姚艳彬. 机器人制孔系统与制孔工艺参数优化方法研究[J]. *装备制造技术*, 2020(2): 6-15, 20.
- ZHENG Luhan, DU Zhao'ai, YAO Yanbin. Research on robotic drilling system and process parameter optimization method[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2020(2): 6-15, 20.
- [20] KUO C L, SOO S L, ASPINWALL D K, et al. Tool wear and hole quality when single-shot drilling of metallic-composite stacks with diamond-coated tools[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2014, 228(10): 1314-1322.
- [21] 南成根, 吴丹, 马信国, 等. 碳纤维复合材料/钛合金叠层钻孔质量研究[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(11): 177-185.
- NAN Chenggen, WU Dan, MA Xinguo, et al. Study on the drilling quality of carbon fiber reinforced plastic and titanium stacks[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(11): 177-185.
- [22] 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: 大连理工大学, 2010.
- ZHANG Xuanlong. Research on drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) and titanium alloy stacks[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [23] WANG G C, ZHANG C Y. Formation and control of drilling burrs[J]. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2001, 17(2): 52-56.
- [24] 徐晓霞, 胡永祥, 姚振强. 层叠铝合金钻削层间毛刺试验研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2012(12): 109-112.
- XU Xiaoxia, HU Yongxiang, YAO Zhenqiang. Experimental studies of process parameters for interfacial burr in dry drilling of stacked aluminum alloy sheets[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2012(12): 109-112.
- [25] 黄树涛, 王浩涛, 张攀. CFRP/Al 叠层结构制孔缺陷的有限元仿真[J]. *材料科学与工程学报*, 2019, 37(3): 493-500, 504.
- HUANG Shutao, WANG Haotao, ZHANG Pan. Finite element analysis on drilling defects of carbon fiber reinforced plastic and aluminum stacks[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2019, 37(3): 493-500, 504.
- [26] HOCHENG H, TSAO C C. Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, 46(12-13): 1403-1416.
- [27] RAMULU M, BRANSON T, KIM D. A study on the drilling of composite and titanium stacks[J]. *Composite Structures*, 2001, 54(1): 67-77.
- [28] BRINKSMIEIER E, JANSSEN R. Drilling of multi-layer composite materials consisting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP), titanium and aluminum alloys[J]. *CIRP Annals*, 2002, 51(1): 87-90.

- [29] PECAT O, BRINKSMEIER E. Low damage drilling of CFRP/titanium compound materials for fastening[J]. Procedia CIRP, 2014, 13: 1-7.
- [30] KIM D, RAMULU M. Drilling process optimization for graphite/bismaleimide-titanium alloy stacks[J]. Composite Structures, 2004, 63(1): 101-114.
- [31] 孙晓太. CFRP/钛合金螺旋铣孔专用刀具优化与试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- SUN Xiaotai. Optimization and experimental research of helical milling special tool for CFRP/titanium alloy[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [32] 杨旭, 卢文壮, 杨斌, 等. TiSiC 涂层钻头钻削 CFRP/TC4 钛合金叠层材料的研究 [J]. 工具技术, 2017, 51(7): 12-15.
- YANG Xu, LU Wenzhuang, YANG Bin, et al. Study on TiSiC coated drill in drilling CFRP/TC4 titanium alloy stacks[J]. Tool Engineering, 2017, 51(7): 12-15.
- [33] 王华, 陈燕, 唐文亮, 等. PCD 与硬质合金钻头钻削 CFRP/Al 叠层材料对比研究 [J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(1): 23-25, 54.
- WANG Hua, CHEN Yan, TANG Wenliang et al. Comparative study of drilling CFRP/Al stacks with PCD and carbide drills[J]. Machine Building & Automation, 2019, 48(1): 23-25, 54.
- [34] 金晓波, 康万军, 曹军, 等. 钻头几何角度对 CFRP 和钛合金叠层制孔的影响 [J]. 工具技术, 2016, 50(11): 76-79.
- JIN Xiaobo, KANG Wanjun, CAO Jun, et al. Effect of drill geometric angle on carbon fiber reinforced composite and titanium alloy laminated structure[J]. Tool Engineering, 2016, 50(11): 76-79.
- [35] 姚琦威, 陈燕, 杨浩骏, 等. 钻头几何参数对低频振动钻削 CFRP/钛合金叠层材料钻削轴向力及温度的影响 [J]. 工具技术, 2019, 53(3): 28-32.
- YAO Qiwei, CHEN Yan, YANG Haojun, et al. Effect of drill geometry parameters on axial force and drilling temperature of low frequency vibration drilling CFRP/titanium alloy stack materials[J]. Tool Engineering, 2019, 53(3): 28-32.
- [36] 杨凯, 卢文壮, 张吴晖. 阶梯钻头钻削 CFRP/TC4 钛合金叠层材料研究 [J]. 工具技术, 2018, 52(8): 19-22.
- YANG Kai, LU Wenzhuang, ZHANG Wuhui. Study on CFRP/TC4 titanium alloy laminated material with step drill bit drilling[J]. Tool Engineering, 2018, 52(8): 19-22.
- [37] 唐臣升, 王巍. 复合材料叠层结构制孔技术 [J]. 工具技术, 2017, 51(4): 83-86.
- TANG Chensheng, WANG Wei. Hole making technology of composite laminated structure[J]. Tool Engineering, 2017, 51(4): 83-86.
- [38] CANTERO J L, TARDÍO M M, CANTELI J A, et al. Dry drilling of alloy Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(11): 1246-1255.
- [39] FARAZ A, BIERMANN D, WEINERT K. Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(15): 1185-1196.
- [40] WANG X, KWON P Y, STURTEVANT C, et al. Comparative tool wear study based on drilling experiments on CFRP/Ti stack and its individual layers[J]. Wear, 2014, 317(1-2): 265-276.
- [41] 胡立湘, 李鹏南, 牛秋林, 等. CFRP/TC4 叠层板的钻削实验 [J]. 宇航材料工艺, 2016, 46(6): 86-90.
- HU Lixiang, LI Pengnan, NIU Qiulin, et al. Study of drilling CFRP/TC4 stacks[J]. Aerospace Materials & Technology, 2016, 46(6): 86-90.
- [42] ZITOUNE R, KRISHNARAJ V, SOFIANE ALMABOUACIF B, 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.
- [43] 王共冬, 周丽, 种强, 等. 碳纤维复合材料 / 铝合金叠层制孔工艺研究 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17(6): 152-157.
- WANG Gongdong, ZHOU Li, ZHONG Qiang, et al. Technical investigation on drilling of CFRP/aluminum stack[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(6): 152-157.
- [44] RAHME P, LANDON Y, LACHAUD F, et al. Drilling of thick composite material with a small-diameter twist drill[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(9-12): 1543-1553.
- [45] LI B, LIU S N, TIAN X T, et al. Drilling simulation on carbon fiber reinforced plastics and aluminum laminated composite[J]. Advanced Materials Research, 2012, 490-495: 3281-3285.
- [46] 金晓波, 康万军, 曹军, 等. 碳纤维复合材料 / 钛合金叠层板钻孔有限元仿真研究 [J]. 工具技术, 2015, 49(1): 24-28.
- JIN Xiaobo, KANG Wanjun, CAO Jun, et al. Finite element analysis of drilling of carbon fiber reinforced plastics and titanium stack[J]. Tool Engineering, 2015, 49(1): 24-28.
- [47] 王慧锋, 曹增强. 复合材料制孔分层试验研究分析 [J]. 现代制造工程, 2008(7): 60-62.
- WANG Huifeng, CAO Zengqiang. Drilling carbon fiber reinforced plastics experimental and statistical study[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2008(7): 60-62.
- [48] KUO C L, SOO S L, ASPINWALL D K, et al. The effect of cutting speed and feed rate on hole surface integrity in single-shot drilling of metallic-composite stacks[J]. Procedia CIRP, 2014, 13: 405-410.
- [49] KIM D, RAMULU M. Study on the drilling of titanium/graphite hybrid composites[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2007, 129(3): 390-396.
- [50] KIM D, BEAL A, KWON P. Effect of tool wear on hole quality in drilling of carbon fiber reinforced plastic-titanium stacks using tungsten carbide and PCD tools[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2016, 138(3): 1-11.
- [51] 陆翠. CFRP/Ti-6Al-4V 叠层结构螺旋铣孔过程工艺优化研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- LU Cui. The optimization research on helical milling of CFRP/Ti-6Al-4V stacks[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [52] XU J Y, MANSORI M E. Finite element analysis when orthogonal cutting of hybrid composite CFRP/Ti[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2015, 87: 012059.
- [53] 于晓江, 曹增强, 蒋红宇, 等. 碳纤维复合材料与钛合金结构制孔工艺研究 [J]. 航空制造技术, 2011, 54(3): 95-97.
- YU Xiaojiang, CAO Zengqiang, JIANG Hongyu, et al. Investigation of drilling process for carbon fibre reinforced plastic(CFRP) and titanium sandwich structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(3): 95-97.

通讯作者: 白大山, 工程师。

(责编 古京)