

表面铜网结构 CFRP 铣削加工性能研究*

Experimental Study on Machining Performance of CFRP Laminate With Copper Mesh

上海飞机制造有限公司航空制造技术研究所先进复合材料制造中心 龚佑宏 韩舒 杨霓虹
 南京航空航天大学机电学院 韩胜超 周井文 陈燕

[摘要] 表面铜网结构碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)作为防雷击材料在飞机制造等领域广泛应用,但铜网的加入对其加工性能产生一定的影响。通过铣削表面铜网结构CFRP试验探究了不同切削参数对铣削力和切口粗糙度的影响并观察分析了刀具的磨损形式,初步得到了其铣削加工性能评价。

关键词: CFRP 加工性能 切削力 表面质量 刀具磨损

[ABSTRACT] CFRP laminates with copper mesh are widely used in aircraft manufacturing because of its good performance in lightning proof, while copper influences the machining performance of CFRP. Milling experiments were conducted to identify the influence of cutting parameters on cutting force and surface roughness. Tool wear was also analyzed.

Keywords: CFRP Machining performance Cutting force Surface finish Tool wear

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.19.040

随着碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)性能的不断提高,其在飞机结构上的应用也越来越广泛。由于CFRP导电性能比金属差,当飞机遭到雷击时,难以将高能量的电流传导出,从而导致大能量的聚集,破坏材料结构进而影响飞机的安全性能,因此必须对飞机复合材料部件进行有效的雷击防护^[1]。

表面铜网结构CFRP是一种新型防雷击材料,它将表面胶膜和导电金属网结合为一体,使用中将其铺设在有防雷击要求的CFRP外表面,通过导电金属网将雷击电流传递到机体放电部位即可达到良好雷击防护效果。目前,CFRP制件的成形主要运用近净成形技术,但为了装配等需要成形后仍需进行2次机械加工,如铣边、钻孔等^[2]。由于CFRP属于非金属材料,铜网结构中金属材料的加入一定程度上改变了其切削加工性能。国内外学者已在CFRP切削性能方面做了一些研

究,但对此种新型表面铜网CFRP的切削加工性能研究却非常有限。Redouane Zitoune等研究了表面铜网结构CFRP的钻削加工性能,发现相比于普通CFRP,表面铜网结构CFRP更不易产生分层缺陷^[3]。

为了探究表面铜网结构CFRP的铣削加工性能,设计并进行了一组两因素三水平的全因素试验,通过试验得到了主轴转速和进给速度对切削力和切削质量的影响规律,对刀具的磨损形式进行了分析。

1 试验方案

试验在DMG HSC 20 linear 超声辅助五轴精密加工中心上进行,该机床最大主轴转速42000r/min,最大进给速度5m/min。试验用表面铜网结构CFRP和金刚石涂层硬质合金立铣刀如图1所示,CFRP的性能参数见表1。测力系统为Kistler 9272测力计和5070A电荷放大器,加工表面粗糙度测量采用Mahr M1型便携式粗糙度测量仪,测量方向为材料的厚度方向。试验系统搭建如图2所示,工件装夹如图3所示。

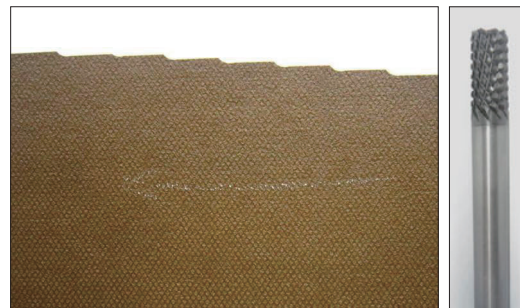


图1 表面铜网结构CFRP试验件和加工用立铣刀
 Fig.1 CFRP with copper mesh and tools

表1 CFRP层合板的规格和参数

材料类型	碳纤维含量/%	铺层方式	铺层数	尺寸/mm
高强中模表面铜网结构碳纤维复合材料	65	[(45° /0° /-45° /90°)6] _s +单面铜网胶膜	49	150×200

试验模拟生产中的铣边加工、铣削方式为顺铣。切削参数中,轴向切深 a_p 定为CFRP的材料厚度,考虑到CFRP的铣边操作多属于精加工,材料去除量较少,因此

* 基金项目:国家自然科学基金项目(51075210);“高档数控机床与基础制造装备”国家科技重大专项课题(2012ZX040003031);南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(KFJJ20110222)。

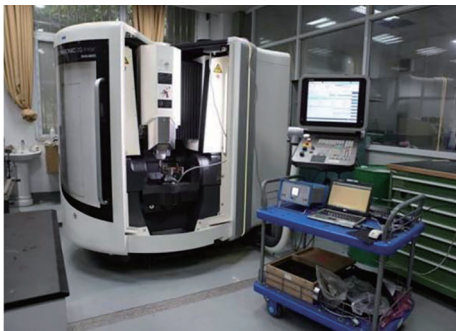


图2 试验加工和检测系统
Fig.2 Experimental Equipments

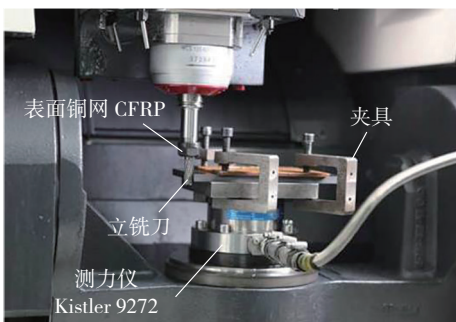


图3 工件装夹图
Fig.3 Fixation of the composites

其径向切深 a_e 定为 1mm。为探究主轴转速和进给速度对其加工质量的影响,设计了 1 组两因素三水平的全因素试验。试验因素水平表如表 2 所示。

表2 侧铣性能全因素试验水平因素表

水平	因素	
	主轴转 / ($r \cdot \min^{-1}$)	进给速度 / ($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)
1	4000	1000
2	8000	1800
3	12000	2600

2 试验结果与分析

2.1 切削力分析

根据试验数据得到的切削力随切削参数变化趋势,如图 4 所示。由图 4 可知,在主轴转速 12000r/min、进给速度 2600mm/min 以内,主切削力最大值随转速增大而减小,随进给速度增大而增大,这与传统金属切削中切削力的变化规律相同。当转速增大时,切削温度增高导致树脂软化,使材料更容易切削,切削力随之减小,转速增大时材料和刀具之间的摩擦系数也会减小,从而进一步减小切削力。此外,从图 4 还可看出,进给速度越大,其切削力随转速的变化幅度也越大,这是由于在相同的转速改变量下,进给速度大的与对应的每齿进给量改变越大,每齿切削面积变化量也越大,故切削力的变

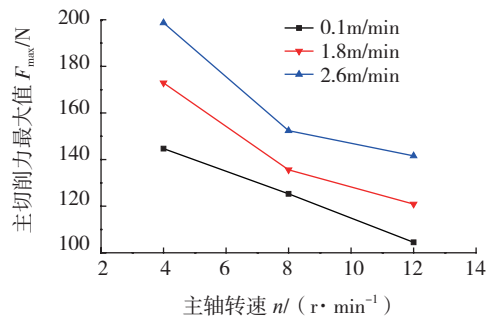
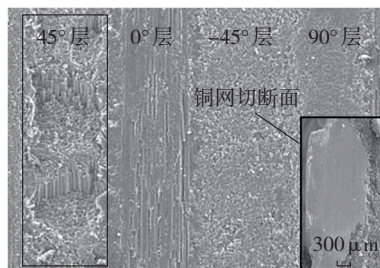


图4 表面铜网结构CFRP切削力随切削参数变化图
Fig.4 Variation of the cutting forces with spindle speed and feed speed

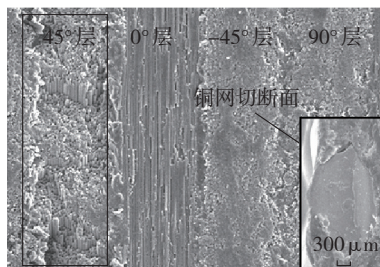
化幅度也更大。

2.2 加工表面质量分析

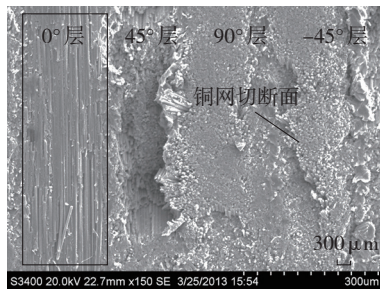
通过目视观察各参数下表面铜网结构 CFRP 的铣削加工表面,发现在部分参数下出现了毛刺和撕裂等缺陷,再通过扫描电子显微镜观察得到其表面显微照片,如图 5 所示。从图 5 可看出,不同参数下的铜网断面都



(a) 切削参数 4000r/min、1800mm/min



(b) 切削参数 8000r/min、1800mm/min



(c) 切削参数 8000r/min、2600mm/min

图5 不同参数下加工表面的电镜照片
Fig.5 SEM images of machined surfaces under different cutting parameters

较为整齐,因此表面铜网结构的加入对 CFRP 铣削表面的加工质量没有明显影响。在构成 CFRP 加工表面的各向纤维层断面中,45° 纤维层破坏最为严重,随机分布许多因纤维束折断或拔出而形成的空洞。主轴转速增大时,空洞的数量增加但深度变浅,且加工表面树脂涂覆增多,这是由于高转速时切削速度很大,45° 纤维被快速挤压并切断,且每次切削的纤维量较少,变形量较小,导致形成的空洞多而浅。此外,高转速导致切削液不能较好进入切削区域,引起散热不良,树脂软化并涂覆在切口表面。然而随着进给速度增大,散热和排屑条件变得更好,加工表面树脂涂覆也随之减少,层间分界更加清晰。当进给速度增大时,45° 纤维层的破坏也逐渐加重,空洞由浅而小变为深而广,这是由于进给速度增大时刀具每齿切削的纤维数增多,纤维束变形量增大,故空洞加深变广^[4]。

图 6 为加工表面粗糙度值随切削参数的变化规律,其中 3 条曲线分别表示进给速度为 1m/min、1.8m/min 和 2.6m/min 3 种情况下加工表面粗糙度随主轴转速地变化趋势。从图中可看出,在试验参数范围内,加工表面粗糙度值随着转速增大呈减小趋势,随进给速度增大呈增大趋势,这与电镜照片中观察到的加工表面形貌随切削参数的变化规律相吻合。当主轴转速高于 8000r/min 时,加工表面粗糙度值显著降低并维持在一个相对稳定的水平,此时主轴转速对切口粗糙度值的影响减弱,进给速度决定了粗糙度值的大小,因此表面铜网结构 CFRP 的铣削加工表面粗糙度是受主轴转速和进给速度的交互综合影响的。

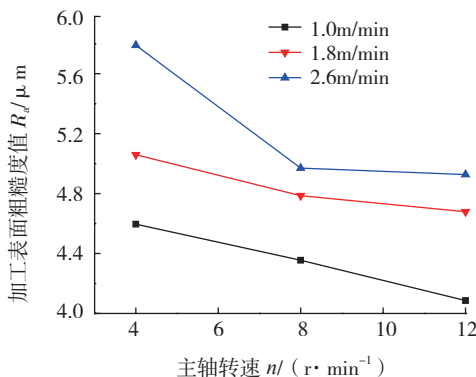


图6 表面铜网结构CFRP加工表面粗糙度值随切削参数变化规律
Fig.6 Variation of the surface roughness with spindle speed and feed speed

通过试验数据分析发现,毛刺缺陷的形成与每转进给量的大小有密切关系。试验参数中当每齿进给量大于 0.033mm/z 时,材料极易出现毛刺和撕裂;而低于这个值时,材料基本无毛刺与撕裂,这是由于每齿进给量决定了切削面积,而切削力的大小主要受切削面积的影响,

当切削力大于材料基体对表层纤维的结合力时,毛刺撕裂等缺陷就很容易产生^[5]。

由于铜有一定塑性,当铜网在上表面进行铣边加工时,右旋刀具产生向上的轴向力将铜网拉离基体,导致铜网不易被切断或在产生塑性变形后再被切断,从而形成毛刺,造成质量缺陷。为抑制毛刺的产生,将铜网面置于下方进行加工,此时轴向力将铜网向 CFRP 基体侧压迫,能够较好地切断铜网结构,断面整齐,无质量缺陷。

2.3 刀具磨损分析

由于碳纤维硬度很高,切削过程中形成的硬质粉末状切屑对刀具具有很强的磨损作用,因此生产中通常使用 PCD 刀具或者金刚石涂层刀具加工 CFRP。通过三维视频显微镜观察使用后刀具的磨损情况如图 7 所示。由图 7 可见,刀具的磨损形式主要为涂层磨穿、基体磨钝,且由于铜网结构质地较软容易切削,对刀具的磨损作用比碳纤维小,因此在刀具上形成了非均匀磨损现象,即刀具切削碳纤维的部分磨损量较大,切削铜网部分磨损较小。初始切削时,金刚石涂层保护刀具刃口,磨损较为缓慢,随着切削长度增加,涂层逐渐磨损变薄直至磨穿,此时硬质合金基体失去保护,刀具进入较快磨损阶段。从图 7 中可看到硬质合金基体上产生了明显的沟状磨痕,这是高硬度的碳纤维切屑和回弹的已加工面对刀具造成的磨料磨损。此外,由于金刚石涂层与硬质合金基体的热胀系数不同,当刀具在切削热的作用下发生热胀时二者的变形量不同,从而使涂层与基体剥离,涂层在切削力的作用下最终破碎。

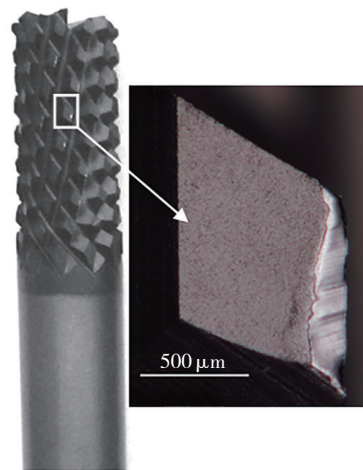


图7 刀具磨损显微照片
Fig.7 Micrograph of tool wear

3 结论

- (1) 铣削表面铜网结构 CFRP 的主切削力最大值随 (下转第 87 页)

棱管和方管的破坏模式来看,其在准静态压溃和重寄压溃载荷下,都会在棱边产生较大裂纹并迅速逐渐扩展,形成规则的层束,所以二者在准静态压溃和冲击压溃中的比吸能差别较小。

4 结论

本文对圆形、正六边形、正方形截面复合材料管在不同压溃载荷下的破坏吸能特性进行了数值分析。首先,与文献[9]中的准静态压溃试验进行对比,验证了建模方法的准确性;然后建立了具有几何等效结构的六棱管和方管有限元模型,并对3种类型复合材料管在准静态和冲击压溃下的破坏吸能特性进行了数值分析。结果显示,复合材料管的截面形状会直接影响其破坏失效模式,加载条件的不同也会在一定程度上影响复合材料管的吸能特性。在3种复合材料管中,圆管的吸能能力最强,但其压溃载荷峰值较大,而六棱管在压溃过程中表现出较高的比吸能和较低的载荷,具有较好的综合吸能性能。

参考文献

[1] 冯振宇,邹田春. 复合材料飞机结构合格审定. 北京: 航空工业出版社,2012.

[2] 范金娟,程小全,陶春虎. 聚合物基复合材料构件失效分析基础. 北京: 国防工业出版社,2011.

[3] 杜星文,宋宏伟. 圆柱壳冲击动力学及耐撞性设计. 北京: 科学出版社,2004.

[4] 李喆,孙凌玉. 复合材料薄壁管冲击断裂分析与吸能特性优化. 复合材料学报,2011,28(4): 212-218.

[5] Paolo F, Bonnie W, Francesco D, et al. LS-DYNA MAT54 modeling of the axial crushing of a composite tape sinusoidal specimen. Composites: Part A,2011,42: 1809-1825.

[6] Francesco D, Bonnie W, Paolo F. Crushing of composite structures: experiment and simulation. 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Palm Springs, California,2009.

[7] Joosten M W, Dutton S, Kelly D, et al. Experimental and numerical investigation of the crushing response of an open section composite energy absorbing element. Composite Structures,2011,93: 682-689.

[8] Hamidreza Z, Matthias K, Henrik A. An experimental and numerical crashworthiness investigation of thermoplastic composite crash boxes. Composite Structures,2008,85(3): 245-257.

[9] HUANG J C, WANG X W. Numerical and experimental investigations on the axial crushing response of composite tubes. Composite Structures,2009,91: 222-228.

[10] LS-DYNA keyword user's manual, Version 971, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, USA,2006.

[11] 陈永刚,益小苏,许亚洪,等. Carbon-Epoxy 圆管件的静态吸能特征. 航空学报,2005,26(2): 246-249.

(责编 玲犀)

(上接第 42 页)

转速增大而减小,随进给速度增大而增大。此外,进给速度越大,切削力随转速的变化幅度越大

(2) 铜网结构的加入对 CFRP 加工表面质量没有明显影响。随着转速增大,45° 纤维层上空洞数量增加,深度减小且表面树脂涂覆逐渐增多;随着进给速度增大,45° 纤维层上的空洞变深变广,树脂涂覆减少,层间分界更加清晰,加工表面粗糙度值随着转速增大呈减小趋势,随进给速度增大呈增大趋势。

(3) 铜网结构与碳纤维对刀具的磨损作用不同,导致了刀具上非均匀磨损的出现。金刚石涂层硬质合金刀具铣削加工表面铜网结构 CFRP 时的磨损形式主要为涂层磨穿、基体磨钝。

参考文献

[1] 张元卿,刘兴宇. 新型复合材料结构防雷击胶膜性能验证及应用. 科技创新导报,2012(27): 41-42.

[2] 王巍,陈燕,牟娟,等. 钎焊金刚石工具磨削 CFRP 的试验研究. 金刚石与磨料磨具工程,2012,32(1): 15-18.

[3] Zitoun R, El Mansori M, Krishnaraj V. Tribo-functional design of double cone drill implications in tool wear during drilling of copper mesh/CFRP/woven ply. Wear,2013.

[4] El-Hofy M H, Soo S L, Aspinwall D K. Factors affecting workpiece surface integrity in slotting of CFRP. Procedia Engineering,2011(19):94-99.

[5] 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]. 山东: 山东大学,2011.

(责编 古京)

(上接第 46 页)

当视觉传感器系统与运动控制系统间信息接口相容、信息协议一致、信息时序匹配、彼此对于信息交换可进行自主编程时,其信息融合可按图 9(a)所示的方式进行。该方式通常适用于 2 个系统的信息特征,都为可自主再造的情况。对于 2 个完全独立且非自主研发的系统,彼此间的信息特征是很难实现无条件匹配的,对此可采用图 9(b)所示的系统信息融合方式,该方式的特点是在视觉传感器系统与运动控制系统之间置入了一套嵌入式系统,以完成测量与控制间 2 种信息特征的转换,从而使信息在接口形式、协议组合、时序特点等方面相互匹配,实现测量和控制信息的无缝融合,尽管在结构上较复杂,但其适用性更为广泛。

综上所述,通过测量与控制的多源信息共享,使测量与控制的多系统软、硬件得以相互关联,从而使这一非接触测量借助系统控制得以正确进行,同时系统的运动控制也使测量数据结果得以在线验证。

(责编 古京)