

碳纤维与芳纶纤维复合材料机械加工刀具选用

刘汉良 张加波 王震 张佳朋 李光

(北京卫星制造厂,北京 100094)

文 摘 通过对复合材料特性和加工机理的分析,论述了复合材料机械加工对刀具材质、结构和几何参数的要求,介绍了几种适合于碳纤维和芳纶纤维复合材料机械加工的钻削和铣削刀具。

关键词 碳纤维复合材料,芳纶纤维复合材料,刀具材料,刀具结构,几何参数

Cutting Tool Selection in CFRP and AFRP Machining

Liu Hanliang Zhang Jiabo Wang Zhen Zhang Jiapeng Li Guang

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100094)

Abstract Cutting tool plays an significant role in composite machining. In this paper the special property of composite and its machining mechanism is analyzed, the requirement of cutting tool materials, structure and geometrical parameters for composite machining is discussed. Several kinds of drilling and milling tools which are fit for carbon fiber reinforced plastic (CFRP) and aramid fiber reinforced plastic (AFRP) are introduced.

Key words CFRP, AFRP, Cutting tool material, Tool structure, Geometric parameters

0 引言

碳纤维复合材料与芳纶纤维复合材料具有轻质、高强、高韧、抗冲击、抗疲劳、耐高温、耐腐蚀等一系列优良性能,在国防科技领域取得了日益广泛的应用。在航天器结构中,碳纤维复合材料可以制成各种杆件、支架、加筋板壳、夹层板壳等主要或次要承力结构件,如太阳翼基板、天线反射器等^[1];芳纶纤维复合材料则主要应用于航天器中的天线结构和隔热结构中^[2-4],对各种航天器的轻量化、小型化、高性能化起到了至关重要的作用。

在各种复合材料结构零件的制造过程中,材料成形后通常还需要进行二次加工,以获得高质量和高精度的装配孔、定位孔和边缘轮廓^[5],工艺方法以钻削加工和铣削加工为主。由于复合材料切削加工机理不同于金属切削,采用传统金属切削的加工方法表现出极大的难加工性,要获得良好的加工质量,复合材料刀具的选用显得尤为重要。本文主要介绍了几种适合于碳纤维和芳纶纤维复合材料机械加工的钻削和铣削刀具。

1 复合材料加工对刀具的要求

1.1 复合材料性能与加工机理分析

复合材料结构与金属材料结构的区别导致了切削加工机理的不同。在切削加工过程中,金属材料被认为是一种均匀材料,而复合材料则为各向异性的非均匀材料,纤维的纵向强度和横向强度差异性较大,层合板材料的层内强度和层间强度差异性也很大^[6-10]。在金属切削中,材料的去除是通过塑性变形、流动并以金属切屑的形式被剪切下来。区别于金属切削机理,碳纤维复合材料中由于纤维具有硬而脆的特性,材料的去除是通过一系列脆性断裂来实现的,切屑表现为粉末状;而芳纶纤维复合材料中的芳纶纤维表现为高韧性,在切削过程中则表现为芳纶纤维材料的拉断和基体材料的脆性断裂,切屑表现为絮状。

复合材料加工切削热的转移方式也不同于金属切削。在理想的金属切削过程中,切削区产生的大部分热量都被切屑带走;而在复合材料切削过程中,一方面由于复合材料的导热性很差,切削热无法及时转移,会导致热量积聚在刀具中,另一方面由于航天产品材料的加工过程中不允许使用冷却液,因为冷却液可能会通过毛细作用渗入和损坏层压材料^[11],从而使刀具的切削热问题进一步加剧,温度过高还有可能

收稿日期:2013-06-04

作者简介:刘汉良,1983年出生,硕士,主要从事航天器结构产品加工工艺研究。E-mail:lewish@126.com

对复合材料中的树脂基体造成热损伤。

在复合材料机械加工时容易产生分层、撕裂、翻边、拉毛、树脂融化等加工缺陷,导致产品的加工质量难以保证。为减少加工缺陷的发生,改善加工质量,可以从刀具材料、结构形式及几何参数等方面有效减少和避免这些问题。

1.2 刀具材料

目前常用的刀具材料主要包括高速钢、硬质合金、陶瓷、立方氮化硼和金刚石等。对于复合材料的加工来说,高速钢无法满足对刀具寿命的要求;金刚石是最硬的刀具材料,具有极高的耐磨性,但由于其脆性和制造难度大,应用受到限制。

从刀具设计的角度而言,整体硬质合金刀具具有保证工件加工精度和表面粗糙度所必需的刚性和尺寸精度。整体硬质合金也使得切削几何结构优化成为可能,这样可以减小切削力、切削热,抑制分层、翻边、毛刺等问题以及可更好地控制切屑。因此,采用整体硬质合金为基体,薄的 PVD 金刚石涂层、钎焊 PCD 刀片或在切削刃处烧结 PCD,是目前复合材料切削的首选刀具解决方案。

1.3 刀具的刃形结构和几何参数

刀具刃形结构和几何参数对复合材料的加工质量与效率起着举足轻重的作用。合理的切削刃结构可以精确地将切削力传送到复合材料的纤维上,以脆性断裂模式切断这些纤维,就能成功实现纤维复合材料的有效切削。切削刃的前角和后角为刀具提供了适当的切入角度,并能防止会产生热量和导致刀具磨损的摩擦。

对于纤维增强复合材料,刀具刃形设计的重点在于减少刀具在切削加工过程中的轴向分力,抑制分层、翻边和毛刺等缺陷的产生,具体则可通过增大钻头的刀尖角,减小螺旋角,改变刀具刃形结构等方法来实现。

2 碳纤维复合材料加工刀具

碳纤维复合材料具有脆性大、硬度高特点,切削过程存在难成屑、导热慢、切削区域温度高,刀具易磨损等问题,加工后的产品则表现为分层、撕裂、翻边等缺陷,见图 1。

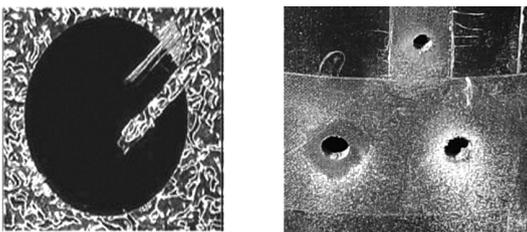


图 1 碳纤维复合材料加工缺陷

Fig. 1 Machining defects of CFRP

因此,要求刀具具有良好的耐磨性和散热性,并有抑制分层和撕裂的结构特点。

2.1 钻削刀具

麻花钻是最通用的金属切削孔加工刀具,但加工实践表明,通用的麻花钻加工芳纶纤维复合材料难以获得良好的加工质量。分析认为,由于芳纶纤维复合材料层合材料具有层内强度高、层间强度低的特点,麻花钻的中心钻尖产生的轴向力很容易导致孔加工时入口材料的翻边和出口材料的撕裂现象,如图 2 所示。

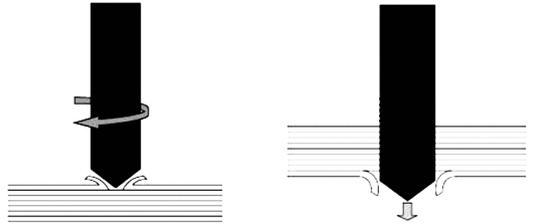


图 2 麻花钻加工效果示意图

Fig. 2 Schematics of twist drill machining composites

为获得较好的孔加工效果,在麻花钻的基础上进行改进和优化设计的孔加工刀具如下。

2.1.1 “群钻式”钻头

基于群钻的设计思想,在普通麻花钻的基础上对主切削刃、横刃进行修磨,使钻头的主切削刃呈内凹圆弧形,外刃刀尖角为锐角,形成一中心钻尖加两外缘刀尖的三尖两刃钻头。此类几何结构的钻头能保证纤维结构特别是纤维布结构的复合材料在钻孔时孔壁的质量。

钻尖与外刃边缘处刃尖的相对位置关系如图 3 所示。对于钻尖低于修磨切削刃外缘刀尖的钻头,能保证孔的入口与出口的孔壁表面粗糙度,但孔的位置精度略受影响;对于钻尖高于修磨切削刃外缘刀尖的钻头,适用于在已有预制孔的材料上钻孔,可以防止因加工过程中振颤而使钻头轴心偏斜。

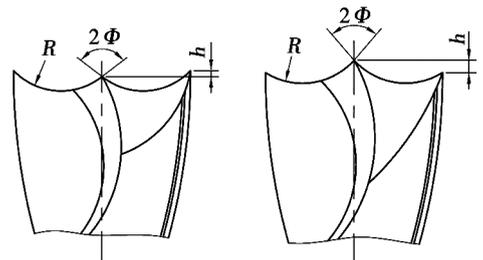


图 3 复合材料群钻式钻头

Fig. 3 Multi-facet drills of CFRP

2.1.2 PCD 8 面刃钻头

PCD 8 面刃钻头采用 8 面刃的钻尖设计(图 4),使得刀具能够更好的钻入和钻出增强型纤维复合材料,减少复合材料的分层趋势。为能够更好的切断纤维,该类刀具可采用在整体硬质合金钻头焊接 PCD 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2013 年 第 4 期

的切削刃方式制造,以获得更好的耐磨性能,能够在加工过程中长久的保持刀具的锋利性。

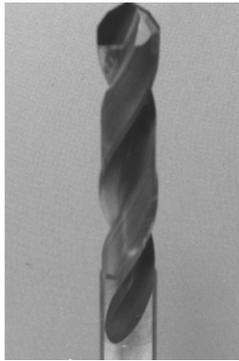


图4 PCD 8 面刃钻头
Fig.4 PCD 8 facet drill

2.2 铣削刀具

标准铣刀在铣削加工时对工件产生斜向上的切削力,由于纤维增强型复合材料的层间结合强度较低,在受到向上的轴向力时将很容易导致孔口出现纤维的分层、翻边等问题,原理见图5。

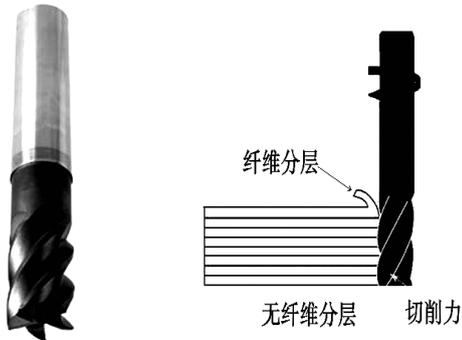


图5 标准铣刀及加工效果

Fig.5 Schematics of standard end mill and its machining effect

2.2.1 双刃压迫式立铣刀

双刃压迫式铣刀采用左、右螺旋刃的设计,锋利的切削刃同时具有上切和下切的螺旋槽,切削时平衡刀具上下轴向力,确保将切削力合力指向材料的内侧,以获得稳定的切削条件,可抑制材料分层现象的产生(图6)。该刀具适用于加工较厚的碳纤维层合材料或夹层材料。

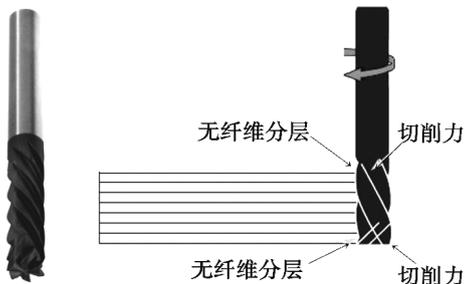


图6 双刃压迫式铣刀及加工效果

Fig.6 Schematics of compression end mill and its machining effect

2.2.2 小螺旋角铣刀

为避免铣削时出现纤维的分层、翻边缺陷,可使用较小螺旋角切削刃的铣刀(图7),可减小铣削过程中的轴向力,从而有效减小层合材料之间的分层趋势以及抑制工件上表面的翻边趋势,可获得良好的侧壁表面质量。



图7 小螺旋角铣刀(螺旋角 $\theta=10^\circ$)
Fig.7 Low helix end mill

2.2.3 “菠萝刀”铣铣刀

这种刀具的上切、下切菱型刃(图8)设计能有效切断纤维材料。同时较深的排屑槽在切削加工过程中能够通过切屑的排出带走大量的切削热,避免碳纤维复合材料机体的损伤。此外,带金刚石涂层的刀具表面能够提高刀具的耐磨性能,延长刀具的使用寿命。

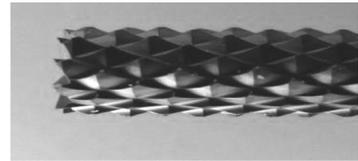


图8 “菠萝刀”铣铣刀
Fig.8 Router end mill

3 芳纶纤维复合材料加工刀具

芳纶纤维复合材料具有与碳纤维复合材料相似的结构和性能特点,因此大多数适用于碳纤维复合材料加工的刀具也可应用于芳纶纤维复合材料的加工。但与碳纤维复合材料相比,芳纶纤维复合材料的硬度低、韧性好、抗冲击,层间结合强度更低,导致在加工时容易出现分层、拉毛等缺陷^[12-14](图9)。因此要求加工刀具具有锋利的切削刃,具备快速切断纤维并抑制分层和拉毛的能力。

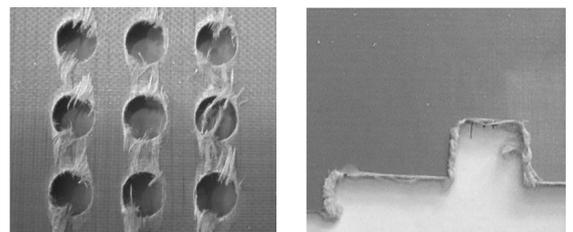


图9 芳纶纤维复合材料加工缺陷
Fig.9 Machining defects of AFRP

3.1 钻削刀具

3.1.1 空心套料式刀具

由于芳纶纤维复合材料具有材质软、硬度低的特点,可采用空心结构进行套料加工(图10),依靠刀具锋利的外圆周刃切断工件材料,再将材料整体从孔中心套取出来,此刀具在对芳纶纤维复合材料薄板开孔

时可以取得较好的加工效果。

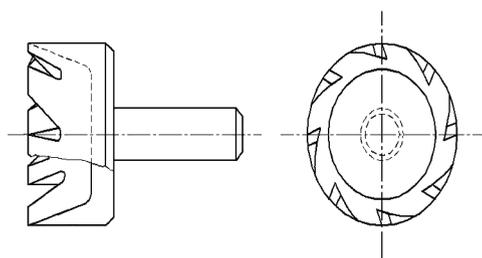


图 10 空心套料式刀具

Fig. 10 Hollow nesting drill for AFRP

3.1.2 芳纶纤维“三尖两刃”钻头

芳纶纤维“三尖两刃”钻头具有一个非标的“三尖两刃”结构(图 11),在钻削的过程中,中心钻尖起到定中心的作用,钻头两侧锋利的钻尖能够在切削过程中划断纤维,可以消除纤维须和分层,特别是在钻入、钻出复合材料过程中,能够获得良好的入口和出

口质量。



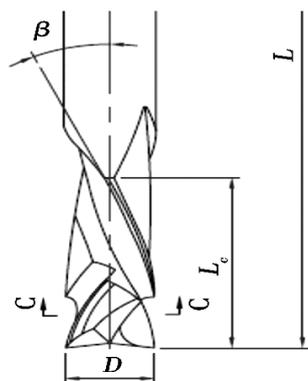
图 11 芳纶纤维复合材料专用钻头

Fig. 11 Special drill for AFRP

3.2 铣削刀具

3.2.1 芳纶纤维双刃压迫式立铣刀

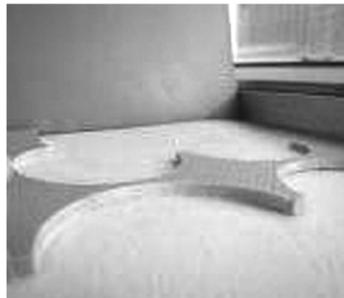
图 12 为根据芳纶纤维复合材料加工特点设计的双刃压迫式立铣刀,结构借鉴碳纤维复合材料的双刃压迫式刀具,但刀具刃形更锋利,刀具的切削刃分为上下两个部分,近柄部刃采用左螺旋的形式,近端部刃采用右螺旋的形式。加工时使工件材料处于上下两刃的中间区域,通过平衡复合材料上下轴向力,可大大抑制芳纶纤维的分层趋势。



(a) 刀具示意图



(b) 刀具正面图



(c) 加工效果图

图 12 芳纶纤维复合材料双刃压迫式铣刀

Fig. 12 Compression end mill for AFRP

3.2.2 芳纶纤维专用立铣刀

图 13 为专门针对芳纶纤维复合材料铣削加工而设计的刀具,特殊的排屑槽设计可以很好切断纤维,从而避免产生材料分层毛刺以及脱丝和拉毛现象,获得很好的加工表面质量。



图 13 芳纶纤维复合材料专用立铣刀

Fig. 13 Special end mill for AFRP

4 结语

在复合材料的机械加工中,刀具发挥着非常关键的作用。复合材料加工刀具的选用应从复合材料结构性能特点和加工机理出发,合理选择及优化刀具材质、结构形式和几何参数,使之与复合材料的性能特点相匹配。

目前刀具市场上拥有多种类型的复合材料加工刀具,但由于复合材料的种类和性能存在差异,适用范围有限,实际选用时仍然需要根据材料的特性和工况进行刀具结构的优化设计以及工艺试验的验证和筛选。

参考文献

[1] 陈烈民. 航天器结构与机构[M]. 北京:中国科学技术出版社,2005

[2] 赖娘珍,王耀先. 芳纶纤维增强复合材料研究进展[C]//第十八届玻璃钢/复合材料学术年会论文集,2010:164-168

[3] 马立,鲁烈峰,白仲安,等. 芳纶纤维增强复合材料的机械加工[J]. 航天制造技术,2007(6):28-30

[4] 靳武刚. 芳纶纤维复合材料在天线工程中的应用[J]. 电子机械工程,2003,19(1):36-40

[5] 张菊霞,田卫. 碳纤维、芳纶纤维、蜂窝芯零件数控加工刀具的选用[J]. 航空制造技术,2010(15):71-73

(下转第 117 页)