

复合材料的切割

Cutting of Composites

西北工业大学机电学院 曹增强 于晓江
上海飞机制造有限公司 蒋红宇 龚佑宏 朱春燕



曹增强

博士,教授,博士生导师。1987年毕业于北京航空航天大学飞行器制造工程专业,获学士学位,1990年3月毕业于北航航空宇航制造工程专业,获硕士学位。2000年3月在西北工业大学航空宇航制造工程专业获博士学位。主要从事飞机装配与先进连接技术、复合材料结构制造技术、钣金成形工艺与模拟等方向的研究。目前主持总装十一五预研项目1项,负责某重点型号攻关项目1项,某型号重点预研项目1项。获国防科技进步奖1项,授权发明专利3项,实用新型专利4项。

复合材料由于具有比强度、比刚度高,抗疲劳、抗腐蚀性能好,力学性能可优化设计及成型工艺性好等优点,近年来被各行各业普遍重视,尤

切割加工是复合材料制造工艺中一个重要环节。本文介绍了复合材料常用切割方法,对高压水切割、机械切割等切割方法的工艺参数进行了实验研究。从切口质量、切割效率、切割成本等方面对常用切割方法进行了对比,并分析了不同切割方法对材料的影响。

其在航空航天及兵器工业中,应用比例逐渐上升,已成为飞机结构最主要的材料之一。复合材料在使用过程中,多数情况下需要切割修整加工,而复合材料的加工性能差,给切割带来困难。

复合材料的机械切割

复合材料机械切割包括砂轮片切割、带锯切割和铣削。复合材料切割一般选用金刚石砂轮片,切割的工艺参数主要有主轴转速 n 和进给量 f 。 n 较低时,

刀具不易切断纤维,容易将纤维从基体中拉出; n 很高时,切削温度较高,易使基体熔化粘在刀具上,影响材料性能和切割质量。为保证切割表面的质量,进给量 f 不宜过大。试验表明,切割时选用如下工艺参数可

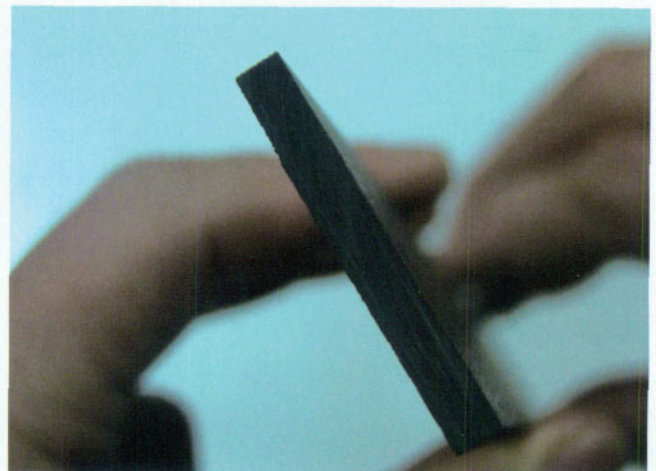


图1 砂轮片切割的切口



(a)带锯切割机



(b)带锯切割切口

图2 带锯切割机及切口

以较好地保证切割质量：砂轮转速为 $(1300\sim 1600)$ r/min；切割速度为 $(250\sim 300)$ mm/min。

图1为砂轮片切割的切口。可以看出，砂轮片切割时只要工艺参数选择合适，复合材料不会产生分层，切口质量较高。

带锯切割由于其切割效率较高，是目前航空企业中使用较多的一种切割方法。但带锯切割的切口质量较差，切口不平整，往往还会在出口边产生纤维毛刺，如图2所示。带锯切割一般只能用于粗加工。而切割复合材料时一般采用钨砂带锯条。

砂轮片切割和带锯切割一般只适合直边或圆形等简单形状的零件切割。对于复杂外形零件的切割可以采用铣削方法。复合材料铣削可采用普通铣床铣削和数控铣床铣削。

普通铣削的质量差，效率低，如图3所示。

在飞机制造行业中，复合材料的零件一般外形尺寸较大，形状结构比较复杂，并且要求高，因而往往采用数控加工。

常用的碳纤维复合材料零件硬度和强度都很高，切削过程中切削力较大，切削温度较高。为了防止影响零件的油污，加工过程中一般采用干切削，加工过程中零件易被烧伤或受热软化，而且刀具磨损严重。而飞机零件对制造精度及表面光洁度要求也很高，因此在加工过程中选择的刀具材料必须具有极高的红硬性和热韧性、良好的耐磨性、耐热性和抗粘结性等特点，在加工过程中需要选择合理的刀具几何参数和切削参数。

对于碳纤维复合材料，其切削力大，导热性差，刀具的前角应选用较小值，以增强切削刃强度和散热体积。但同时碳纤维复合材料具有较高的强度及韧性，切削刃应保持锋利。因此，前角又不宜过小，一般前角选用 $\gamma_0=(8\sim 12)^\circ$ ，后角取 $\alpha_0=(6\sim 13)^\circ$ ，选取齿数 $Z_e=3\sim 4$ ，螺旋角 $\beta=(35\sim 45)^\circ$ 。为保证加工面的表面质量，轴向采用不分层切削方式，切深 a_p 为零件缘条厚度，一般 $a_p=(1.5\sim 5)$ mm。为避免切削力过大，径向切深 a_r 不宜过大，可选 $a_r\leq 1/3 D$ (D 为刀具直径)。为了减小切削应力，提高零件表面质量及切削效率，采用高速切削方式，一般转速 $S=(17000\sim 20000)$ r/min，进给速度 $F=$

$(2500\sim 3000)$ mm/min^[1]。

数控切割对设备和刀具要求高，其切割成本远高于普通铣削。

高压水切割

在众多的切割方法中，只有水切割属于冷态切割，其直接利用高压水射流的动能对材料进行切削而达到切割目的，切割过程中无化学变化，具有对切割材质理化性能无影响、无热变形、切缝窄、精度高、切面光洁等优点。

高压水是一种冷态的单元动能能源，对材料具有极强的冲蚀作用，在冲蚀过程中不改变材料的力学、物理和化学性能，因此适于切割热敏、压敏、脆性、塑性和复合型等各种性质的材料。高压水切割的切割效率高，切割速度范围大： $(0.1\sim 7.62)$ m/min，切缝较窄（小于1mm），切割厚度可达200mm^[2]。

高压水切割的切割速度、压力等工艺参数对切割质量有较大影响。针对不同复合材料和厚度需要选取不同工艺参数。在一般的高压水切割设备的控制系统中，都带有工艺数据库，可以根据切割的材料及厚度系统自动选择工艺参数。

图4为高压水切割和数控切割切口质量对比，上半部分为数控高速切割，下半部分为高压水切割。可以看出数控切割的光洁度明显高于高压水切割。

高压水切割与常规切割方法相比，具有以下优点^[3]：

(1)可切割多种复合材料，如金



图3 普通铣床铣切的复合材料切口

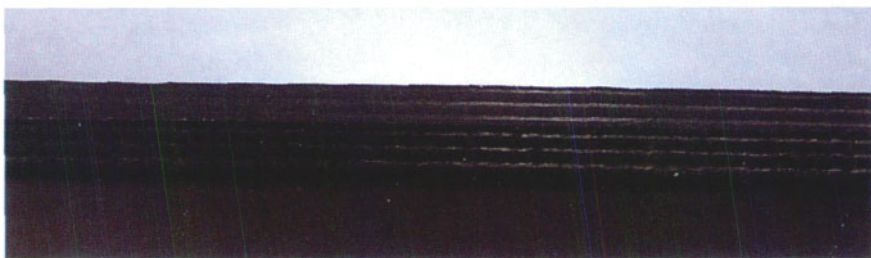


图4 数控切割和高压水切割的切口对比

属基复合材料、树脂基复合材料、高分子材料等。不论材料软硬、熔点高低都可切割，尤其对硬度大、质脆的复合材料更为适用。

(2)切缝表面质量高，边缘无毛刺和飞边，不会出现剥离和开裂现象，也不会由于水短暂暴露于边缘上而使材料性能下降。因此通常一次完成，不需要精加工。

(3)由于水本身就是切割工具，被切割材料不会受热变形，也不会产生磨损和卡刀现象。适合切割热敏材料，如环氧树脂。

(4)切割力小，尤其是沿进给方向和侧向的力小，从而避免了零件由于附加应力而变形，对薄壁零件的切割非常有利。

(5)加工效率高。

(6)经济效益好。高压水切割的切缝较窄，亦可进行套切，可节省材料，特别是它能切割难加工材料和复杂形状。目前航空企业广泛应用高压水切割钛合金材料，可以大幅度降低切割成本。

激光切割

激光切割的基本原理是将方向性和集聚性特强的单色光射到被加工材料的指定位置，并按一定的速度移动，被加工材料因吸收激光能而受热急剧升温，通过汽化蒸发和熔融溅出使材料去除，从而完成切割过程。

采用激光切割时，若提高功率，则切割深度增加，但同时由于热量增加，切口表面的质量会受到影响。而功率小时，则会产生不完全切割。

在激光切割中，有时由于热量消散不充分，会出现分层现象。激光切割具有以下优点：

(1)切缝窄，通常为 $0.1\text{mm}\sim 0.4\text{mm}$ ，材料利用率高。

(2)激光作用时间短，所以激光切割的热影响区小，约为 $0.06\text{mm}\sim 0.1\text{mm}$ 。

(3)激光切割的深宽比大，对于复合材料可达100以上。

(4)激光切割速度快，切割碳纤维复合材料的速度可达 $12\text{m}/\text{min}$ ；而切割丙烯板材时其切割速度为机械切割法的7倍。

(5)激光既能切割平面工件，又能切割以及加工立体工件。激光能量是无接触传送的，所以切割硬脆材料能防止其碎裂。用激光束可以较好地切割小于 0.5mm 厚的薄材。

(6)由于激光切割属于点切割，其加工灵活性好。可根据需要，从板材的任一点开始切割形状复杂和有尖角的零件。

(7)对环境无污染，切割时无振动、无噪声、无尘、烟雾少。

超声切割

随着纤维复合材料在航空航天领域愈来愈广泛的应用，传统的以高速铣钻为基础的切割技术已明显力不从心，而超声切割技术可以有效地应对所有类型的复合材料。超声切割技术的基本原理是利用一个电子超声发生器产生一定范围频率的超声波，然后通过置于超声切割头内的超声-机械转换器，将原本

振幅和能量都很小的超声振动转换成同频率的机械振动，再通过共振放大，得到足够大的、可以满足切割工件要求的振幅和能量(功率)，最后将这部分能量传导至超声切割头顶端的刀具上进行预浸带的切割加工。

典型的例子是对凯夫拉纤维的切割：用常规刀具几乎无法切断此类材料，而超声切割则很容易。另外，复合材料加工所要求的工效愈来愈高，而超声切割可以获得高达 $60\text{m}/\text{min}$ 的切割进给速度，加工效率高。传统高速加工方法在加工蜂窝材料时不可避免地要产生粉尘，对操作人员和工件本身造成污染，而且无法得到理想的表面和型面加工质量，而超声切割属于无切屑加工，可以完全避免对操作人员和工件的污染，并可显著地改善工件型面质量。如果采用其他方法(如高压水加工、激光切割等)，蜂窝工件会受潮或发生烧灼现象，而超声切割可以完全避免这些缺点。

由于超声切割工艺具有以上优点，国外主要飞机制造企业已经广泛采用。随着复合材料技术的发展及其在航空领域的广泛应用，超声切割技术正在大范围替代以往的高速铣削、高压水切割和激光切割工艺。

切口质量比较

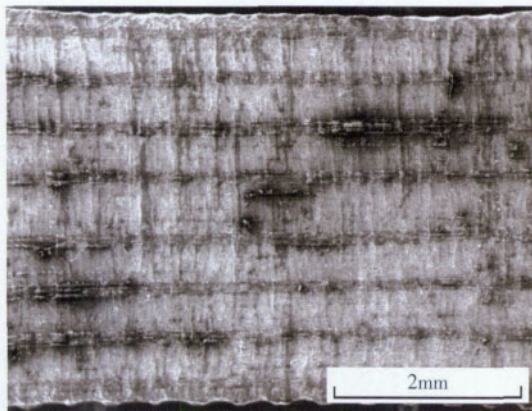
采用TR240便携式表面粗糙度仪对高压水切割、机械切割等不同加工方法的切口粗糙度进行了比较。测量结果见表1。

从表1可以看出，由于和复材切口的高速磨削，砂轮片切割和铣削方法的切口粗糙度都较低。为进一步分析切口的质量，对高压水切割、砂轮片切割的切口进行了微观分析。

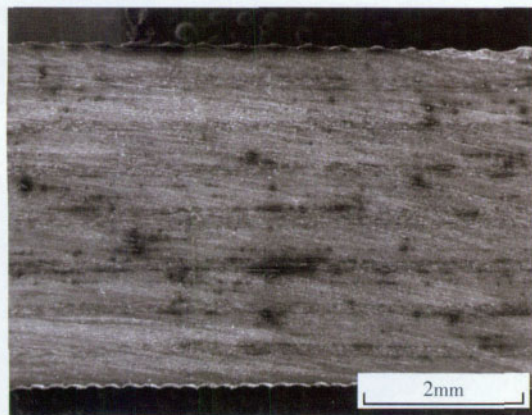
从图5可以看出高压水切割对材料的微观组织没有产生大的影

表1 粗糙度测量结果

方法	高压水切割			金刚石砂轮片切割			普通铣削	
	1#	2#	3#	1#	2#	3#	立铣	侧铣
Ra	4.204	4.532	4.641	1.822	1.448	1.429	0.564	1.963

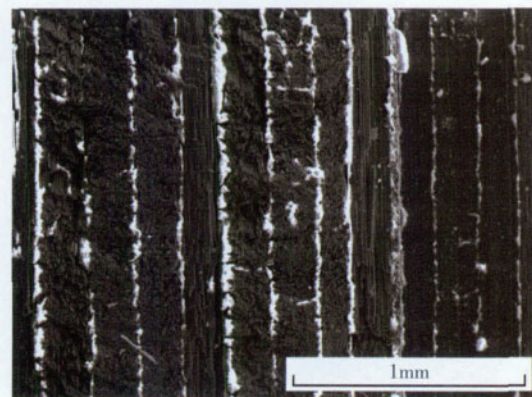


(a) 机械切割切口

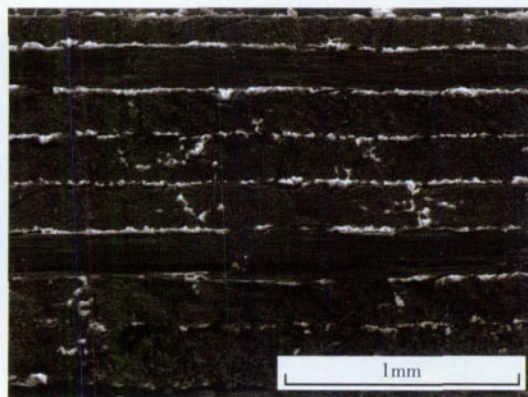


(b) 高压水切割切口

图5 切口对比



(a) 数控切割切口电镜扫描图



(b) 水切割切口电镜扫描图

图6 切口扫描电镜

响,纤维和树脂基体的界面比较清楚,而机械切割(砂轮切割)的切口,其纤维和树脂基体的界面完全被破坏。

进一步放大可以看出对于高压水切割,纤维和树脂基体基本上没有堆砌,而机械切割时有切屑堆砌现象,见图6。可以看出,机械切割由于有比较大的切削力,容易导致基体材料和纤维材料相互渗入,而高压水切割时,基体材料和纤维层的界面比较明显。

结束语

切割加工是复合材料制造工艺中一个重要环节。本文介绍了复合材料常用切割方法,对高压水切割、机械切割等切割方法的工艺参数进行了实验研究。从切口质量、切割

效率、切割成本等方面对常用切割方法进行了对比,并分析了不同切割方法对材料的影响,从而得出以下结论。

(1) 高压水切割,切割质量稳定,切割效率高。

(2) 当采用普通机械切割时,带锯切割切口光洁度差,只能进行粗加工;金刚石砂轮片切割的切口质量高,但切割时切割参数对切口质量有较大影响,一般建议较高的转速和较小的进给量。

(3) 水切割对切口材料微观组织基本没影响,机械切割时不仅切口有切屑堆积现象,而且纤维和树脂基体的界面会发生破坏。

(4) 数控切割质量好,但一般对设备和刀具的要求高,切割成本高。

(5) 激光切割比较适合玻璃纤维复合材料,尽管它有很多优点,但考虑到飞机制造所用的主要复合材料不是玻璃纤维的特点,该方法在我国航空企业还不会很快得到广泛应用。

(6) 超声切割是一种非常先进的切割方法,采用超声切割也是复合材料切割的未来趋势,其在国外航空企业已得到了推广应用,但在国内的广泛应用还需要一定的时间。

参考文献

[1] 龚清洪,林勇,夏雪梅,等. 碳纤维复合材料数控加工研究. 机械设计与制造,2008(12):176-178.

[2] 刘小剑. 复合材料的切割技术及实验比较. 山东轻工业学院学报,2004(3):22-25.

[3] 陈波. 超高压水切割的现状和发展. 航空制造技术,2009(6):66-68.

(责编 泰山)