

复合材料的切削加工技术

Cutting Technology for Composite

北京理工大学 于启勋



于启勋

北京理工大学教授。1952年毕业于清华大学机械工程系。多年从事机械制造和机械加工方面的教学与科研工作。现为全国高校切削与先进制造技术研究会名誉理事长。

复合材料在航空、航天等工业中得到越来越多的应用。复合材料的种类很多,基体材料分金属和非金属两大类,增强材料分纤维和颗粒两大类。对复合材料进行切削加工的难度较大,一般需采用超硬刀具。

复合材料的种类和性能

复合材料是由两种或两种以上

近年来,复合材料迅速发展,广泛应用于航空、航天及其他工业。纤维增强复合材料用得最多,颗粒增强的次之。经笔者试验证实,纤维增强树脂基复合材料的切削加工有一定难度,但难度尚不太大;硬颗粒增强金属基复合材料的切削加工难度很大。在刀具材料的选择上,最好用PCD金刚石,其次为PCBN。

的机械、物理和化学性质完全不同的物质,经人工合成制造出多相组成的固体材料,从而获得单一组成材料所不能具备的性能和功能。

现代工程结构所用的复合材料,按基体材料的类型可分为树脂基、金属基和陶瓷基这三大类;按增强相的形态可分为长纤维、短纤维、晶须、层叠和颗粒增强的复合材料等。

在航空、航天、汽车、石油化工等工业中,纤维增强复合材料用得较多,主要类型有:

(1) 玻璃纤维增强复合材料(Glass Fiber Reinforced Plastic, GFRP),主要由 SiO_2 玻璃熔体制成,某些性能接近于钢,可代替钢使用,故又称“玻璃钢”。现已成

为一种常用的工程结构材料。基体多为酚醛树脂或环氧树脂。

(2) 碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP),其性能优于玻璃钢,现已得到广泛应用。所用基体与“玻璃钢”相同。

(3) 硼纤维增强复合材料(Boron Fiber Reinforced Plastic, BFRP),应用起步稍晚,性能与CFRP接近。基体为树脂。

(4) 芳纶纤维增强复合材料(Kevlar Fiber Reinforced Plastic, KFRP),其增强纤维为芳香族聚酰胺纤维,又称“芳纶纤维”。它的基体也是树脂,性能亦佳。

常用纤维增强材料及其他增强材料的机械、物理性能见表1。

各种复合材料及钢、硬铝的机械、物理性能见表2。
上述纤维增强的树脂基复合材

减振能力和抗疲劳性能特佳,故首先在飞机结构上得到广泛应用。可使飞机重量减轻,加速快,转弯变向灵

大,长为18.2m,宽为4.6m;气瓶用KFRP制造;隔热瓦用CMC制造;框架用C/A1制造;发动机架用B/Ti制造;发动机喷管用C/C制造。树脂、金属和陶瓷这3种基体的复合材料都使用上了^[4]。

表1 常用增强材料的性能^[1]

纤维或颗粒名称	密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	抗拉强度 σ_b / GPa	弹性模量 E / GPa
玻璃纤维(高模量)	2.5 ~ 2.6	3.8 ~ 4.6	93 ~ 108
碳纤维(高模量)	1.75 ~ 1.95	2.3 ~ 2.9	275 ~ 304
硼纤维	2.5	2.8 ~ 3.1	383 ~ 392
芳纶纤维	1.43 ~ 1.46	5.0	134
Al ₂ O ₃ 纤维	3.97	2.1	167
SiC 纤维	3.18	3.4	412
SiC 晶须	3.19	3 ~ 14	490
Al ₂ O ₃ 颗粒	3.95	0.76 (σ_{bc})	400
SiC 颗粒	3.21	1.5 (σ_{bc})	365

表2 常用复合材料的性能^[2-3]

复合材料	密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	抗拉强度 σ_b / GPa	比强度 / ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)
GFRP	2.0	1.04	520
CFRP	1.6	1.5	937
BFRP	2.0	1.75	875
KFRP	1.4	1.4	1000
40CrNiMoA 钢	7.8	1.41	181
硬铝	2.8	0.49	175

料(FRP),多用于航空和其他方面的结构件,可代替铝合金和钛合金,甚至部分钢材,因为它们的机械性能好,且能减轻构件的重量。

此外,还有颗粒增强的铝基复合材料,如SiC_p/Al的耐磨性强,可用于耐磨件,对其加工很困难。

复合材料的应用

由于复合材料的抗拉强度高,弹性模量和耐热性较好,重量轻,韧性、

活,飞行高度高,航程加长,节省燃料。后来,在汽车、船舶、纺织机械、化工设备、建筑和体育器材上也得到了广泛应用。

近年来,在民用飞机B757、B767、B777、A300、A340上,复合材料用量已占飞机全部用料的11%~20%。商用飞机B787上大量使用CFRP,已占飞机体积的11%,占结构件重量的50%。B787每年所用的燃料费,比B767减少500万美元。A380上的机身、机翼板,用大量的复合材料制造。武装直升飞机AH-60、NH-90、V-22、RAH-66上,从整流罩、地板、壁板等次承力结构到旋翼框架等主承力结构上都使用复合材料,且高达飞机重量的50%^[3-4]。

例如一架哥伦比亚号航天飞机,飞机大部分均用复合材料制造。如,货舱门用CFRP制造,体积很

纤维加强复合材料的切削加工

复合材料的应用如此之广,对其部分产品或构件需要进行切削加工。因此,应认识和掌握复合材料切削加工的规律,正确选择刀具材料和切削用量,才能保证加工质量和较高的加工效率。一般情况下,树脂基的复合材料较易切削,金属基的稍难,陶瓷基的更难;纤维加强的复合材料较易切削,颗粒加强的很难切削。笔者针对有代表性的纤维增强和颗粒增强的复合材料,用不同的刀具进行了切削试验,得到了一些切削数据,为复合材料的切削加工提供了实践基础。

1 低速切削 GFRP 材料

试验选用一种酚醛树脂基玻璃纤维加强的复合材料GFRP,用硬质合金K10刀具及两种超硬刀具(人造金刚石PCD和立方氮化硼PCBN)进行车削。

•切削用量为:

切削深度 $a_p=0.3\text{mm}$,进给量 $f=0.1\text{mm/r}$,切削速度 $v=80\text{m/min}$ 。

•刀具几何参数为:

K10刀具: $\gamma_0=0^\circ$, $\alpha_0=8^\circ$, $K_r=45^\circ$, $\lambda_s=-4^\circ$, $r_e=1\text{mm}$ 。

PCD,PCBN刀具: $\gamma_0=0^\circ$, $\alpha_0=8^\circ$, $\gamma_{01}=-15^\circ$, $b_y=0.2\text{mm}$, $K_r=45^\circ$, $\lambda_s=0^\circ$, $r_e=0.5\text{mm}$,干切。

所得刀具磨损曲线见图1。

由图1可知,对GFRP加工有一定难度。用硬质合金K10刀具进行车削时,切削时间达30min时,刀具后刀面磨损量约为0.2mm。PCBN刀具切削50min时,磨损量约为0.16mm。PCD刀具耐用度最

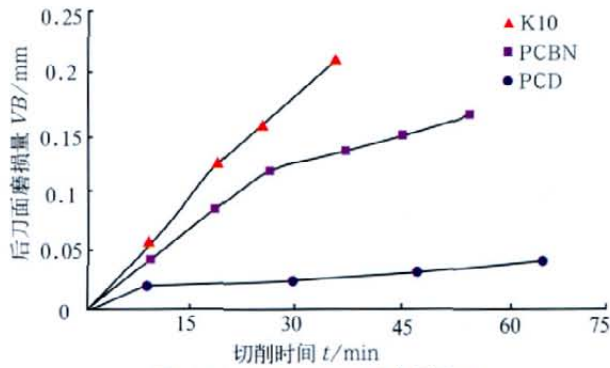


图1 PCD、PCBN、K10刀具车削GFRP

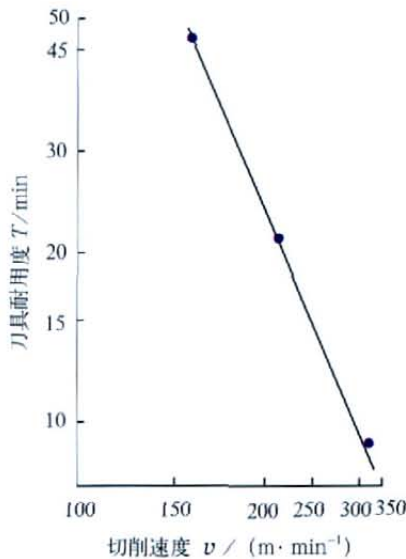


图2 PCD金刚石刀具车削GFRP

长,切削60min以上时,磨损量才达0.05mm。因此加工GFRP时,用PCD刀具最好。

笔者还用CVD涂层金钢石刀具和 C_3N_4 涂层超硬刀具,对GFRP进行过切削试验,效果接近PCD刀具。

加工树脂基的纤维加强复合材

料,还有一些共同特点为:

(1) 由于复合材料的导热系数低(仅为中碳钢的1/5~1/10),故切削温度高,基体容易软化或烧焦;

(2) 切削力比加工钢材时小,但切削深抗力 F_p 和进给抗力 F_f 常大于主切削力 F_c ;

(3) 纤维排列方向对切削力和加工表面粗糙度有较大影响,一般对纤维顺切时,切削力大,但表面粗糙度小;

(4) 因纤维的硬度较高,故对刀具切削刃具有擦伤作用,且在后刀面能形成沟槽磨损。

(5) 因金刚石刀具的硬度很高,且切削刃能够磨得很锋利,有利于割断纤维,故切削效果最好。

2 高速切削 GFRP 材料

再用PCD金刚石刀具车削GFRP。仍用 $\alpha_p=0.3mm, f=0.1mm/r$; 切削速度分3档, $v=150 \sim 315m/min$,并干切。取刀具磨钝标准为 $VB=0.05mm$,得到 $T-v$ 曲线如图2所示(此图为对数坐标,故 T 和 v 的数值不均匀分布)。

相应的泰勒(Taylor)方程为:

$$v=855/T^{0.454}$$

由此可见,PCD刀具可以对GFRP进行高速切削,当切削速度高于200m/min时,刀具耐用度仍可在

20min以上。

颗粒加强复合材料的切削加工

试验选用铝合金基、SiC颗粒增强的复合材料MMC,用硬质合金K15刀具及两种超硬刀具(PCD和PCBN)进行车削。

MMC的3种类型分别为:

- 1型: $SiC_p/ZL109$, SiC颗粒粒度为 $40 \sim 50\mu m$,质量分数为20%;

- 2型: $SiC_p/ZL109$, SiC颗粒粒度为 $34\mu m$,质量分数为20%;

- 3型: $SiC_p/ZL109$, SiC颗粒粒度为 $28\mu m$,质量分数为20%。

(1) 切削用量为:

$$a_p=0.3mm, f=0.1mm/r, v=75m/min, \text{干切。}$$

(2) 刀具几何参数为:

K15刀具: $\gamma_0=0^\circ, \alpha_0=8^\circ, \gamma_{01}=-10^\circ, b_v=0.2mm, k_r=45^\circ, \lambda_s=-4^\circ, \gamma_e=0.5mm$ 。

PCD, PCBN刀具: $\gamma_0=0^\circ, \alpha_0=8^\circ, \gamma_{01}=-15^\circ, b_v=0.2mm, k_r=45^\circ, \lambda_s=0^\circ, \gamma_e=0.5mm$ 。

用PCD车削3种类型的 $SiC_p/ZL109$,所得刀具磨损曲线见图3。

由图3可见,1型复合材料比较难加工,比2型和3型的切削时间要长得得多。这是因为1型材料的SiC颗粒大(为 $40 \sim 50\mu m$),故刀具磨损快。并且SiC的硬度很高,达HV3000~3500, SiC颗粒对刀

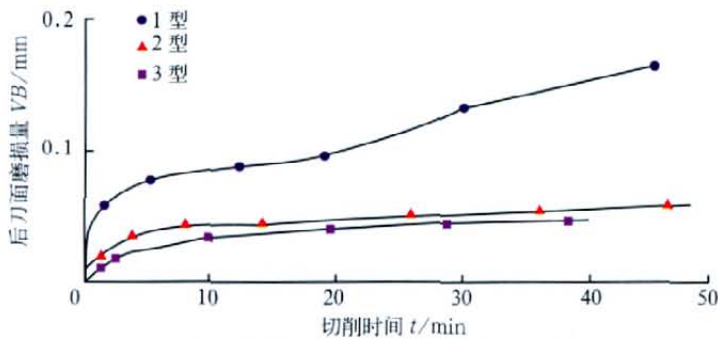


图3 PCD金刚石刀具车削3种类型复合材料

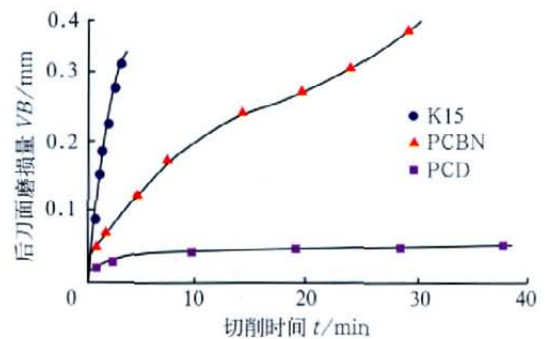


图4 PCD、PCBN、K15刀具车削3型复合材料

具切削刃既有刮擦作用,又有冲击作用,使切削刃较快地发生磨损或破损。可以推出,颗粒的硬度越高,颗粒尺寸越大,颗粒数量越多,则刀具磨损越快。

笔者用上述3种刀具材料(K15, PCD, PCBN)车削3型SiC颗粒增强复合材料,刀具磨损曲线如图4所示。切削用量和刀具几何参数同前文所述。可见PCD刀具性能最好;PCBN刀具不如PCD,但尚可使用;硬质合金刀具K15最差,不堪使用。

再用PCBN刀具车削3型复合材料,改变3档切削速度, $v=40\sim 160\text{m}/\text{min}$, a_p 与 f 同前。取刀具磨钝标准为 $VB=0.3\text{mm}$,干切。

得到 $T-v$ 曲线如图5所示(T 和 v 为不均匀分布,是对数坐标)。相应的泰勒(Taylor)方程为:

$$v=372/T^{0.554}$$

由此可见,PCBN可用于加工

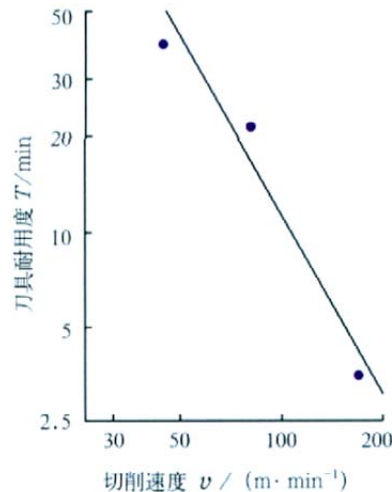


图5 PCBN刀具车削3型复合材料

SiC颗粒增强的复合材料,但PCD刀具更佳。

显然,切削速度提高,则颗粒对刀具的冲击次数多,冲击动能大,则刀具的磨损加快。只有两种超硬材料的刀具能够切削SiC颗粒增强的复合材料,其他刀具材料(如硬质合金、陶瓷等)都不能胜任。

结束语

近年来,复合材料迅速发展,广泛应用于航空、航天及其他工业。纤维增强复合材料用得最多,颗粒增强的次之。经笔者试验证实,纤维增强树脂基复合材料的切削加工有一定难度,但难度尚不太大;硬颗粒增强金属基复合材料的切削加工难度很大。在刀具材料的选择上,最好用PCD金刚石,其次为PCBN。

参考文献

- [1] 韩荣第,于启勋. 难加工材料切削加工. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [2] 沃丁柱. 复合材料大全. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [3] 益小苏. 先进复合材料的CAE虚拟技术. 航空制造技术, 2008(7): 34-35.
- [4] 姜澄宇, 王俊彪. 我国大型飞机研制中的关键制造技术. 航空制造技术, 2009(1): 28-29. (责编 阳光)



EASTWARD 伊斯沃公司

在各种产品、零件、整机上打
印中英文字符或图形标记
欢迎拨打免费热线电话: 800-807-6866

ISO9001质量管理体系认证和高新技术认定的外资企业
为用户设计订做各种工业专用标记机



▲ 气动标记打标机系列

- 气动标记打标机系列
- 无噪声气动标记刻印机
- 无噪声气动标记压印机
- 振镜扫描连续激光标记打标机
- X-Y扫描连续激光标记打标机
- X-Y扫描脉冲激光标记打标机

- VIN号数控压字机
- 喷砂标记打标机
- 半导体激光打标机系列
- 光纤激光打标机系列
- 汽车零部件专用打标机
- 智能卡激光专用打标机



▲ 激光标记打标机系列



▲ 光纤激光打标机系列



▲ 激光金属纸标签



▲ PMI54轿车底盘
VIN号数控压字机



▲ 压字机样品



▲ 压字机样品

品牌, 专业, 不打不相识, 伊斯沃为您解决一切标记问题

中国公司
地址: 重庆市渝北区花卉东路36号 邮编: 401147
电话: (023) 67610571 67607455
传真: (023) 67610577
网址: www.eastward.com.cn
E-mail: canada@eastward.com.cn

各地服务热线
华东服务热线: 13916137046
华南服务热线: 13452001577
华北服务热线: 13594322405
东北服务热线: 13883551512
重庆服务热线: 13808360345

广告索引号 09-123