

# 加工方法对超高模聚乙烯纤维增强 复合材料力学性能的影响

洗杏娟

罗信安 马玉勇

(中科院力学所 北京 100080)

(中国航天工业总公司 703 所 100076)

**文 摘** 本文研究了高压水切割、硬质合金刀片切割和普通机械锯切割等加工方法对超高模聚乙烯纤维增强环氧复合材料力学性能的影响。结果表明:高压水切割加工方法对材料性能的影响最小,是理想的加工方法;机械锯加工使材料切面受损伤且影响邻近区域的性质,因此力学性能有所劣化,不宜于加工此类耐热性差的材料;硬质合金刀片加工对性能的影响居中,加工方法比水切割方法经济;同时对激光加工作了初步分析。

**Abstract** The effects of machining methods such as high-speed water jet, carbide cutter, ordinary machine saw, etc. on the mechanical properties of UHMPE fiber reinforced epoxy composite are studied. The results show that the method of high-speed water jet affects the material's property the least and hence is an ideal machining method. Cutting by machine saw damages the cut surface, influences neighbouring areas, deteriorates the mechanical property of material being machined and thus is inadequate for machining this kind of materials which are poor in heat resistance. Carbide cutter shows an intermediate influence between that of the two above-mentioned methods and costs less than cutting by high-speed water jet, and therefore may be accepted as an option of potential machining methods. Meanwhile, a preliminary analysis is also given to laser cutting.

**关键词** 超高模聚乙烯纤维<sup>[1712]</sup>, 复合材料, 力学

## 1 前言

超高模聚乙烯(UHMPE)纤维是最新进入高性能纤维行列的一种纤维。它是由高分子量线性聚乙烯采用熔融高速拉伸方法制成的,分子链结构高度取向排列,具有很高的强度和刚度。其密度很小( $0.97\text{g}/\text{cm}^3$ ),所以 UHMPE 纤维的比拉伸强度和拉伸刚度高于玻璃纤维、芳纶纤维和一般的

碳纤维。UHMPE 纤维增强高聚物复合材料,压缩性能优于芳纶纤维复合材料。UHMPE 纤维,原材料来源丰富,价格比碳纤维、芳纶纤维便宜,同时还具有高的能量吸收性能、良好的耐磨性和化学稳定性。所以 UHMPE 纤维复合材料适用于防弹装置、装甲、雷达罩、压力容器和缆绳等。其缺点是界面粘结弱、压缩性能低、抗蠕变和耐

热性能差( $<150\text{C}$ )。

超高模聚乙烯纤维的玻璃化转变温度低,因此研究选择适当的加工方法,保证达到试件平滑及所要求的任何尺寸,不影响材料的性能,是很必要的。加工方法对先进复合材料(特别是 UHMPE 纤维、Kevlar 纤维复合材料)性能的影响,是当前重要的课题之一。

目前,加工复合材料的方法包括水冷金刚砂涂层的锯加工,水冷硬质合金刀片加工,高速水喷射切割加工和激光加工等。本工作研究不同加工方法对超高模聚乙烯纤维增强低密度聚乙烯复合材料和超高模聚乙烯纤维增强环氧基体复合材料力学性能的影响。结果表明:高速水喷射加工方法用于这类热塑性纤维最合适,所加工试件的性能最好。分析了加工方法对力学性能影响的微观机理。

## 2 试件材料

UHMPE 纤维是 Allied 公司的 spectra1000 纤维,抗拉模量达  $172\text{GPa}$ 、抗拉强度达  $30\text{GPa}$ ,然而耐热温度只有  $100\text{C}$ 。试件的增强纤维为 S1000 纤维,铺层方式为编织布。基体有两种:一种是低密度聚乙烯(LDPE),先制成预浸片,然后压制成名义厚度  $t=2\text{mm}$  的板,纤维含量  $V_f=80\%$ ;另一种基体是环氧,板材名义厚度  $t=6.5\text{mm}$  压板面积为  $200\text{mm}\times 300\text{mm}$ 。为了进行各项性能试验,需要将板切成不同几何尺寸的试验件。拉伸、弯曲、薄板压缩、层间剪切和断裂试件一般要求长矩形,长度不等( $38\sim 200\text{mm}$ )。在扫描电镜内进行加载试验的试件尺度更小。有的拉伸试件要求加工成哑铃形,断裂试件需要开缺口。

## 3 加工方法及试件外貌

### 3.1 水冷金刚砂涂层锯加工法

由于 UHMPE 的玻璃化转变温度低,切割出来的试件角边微卷,加工部位发乌,

试件外形不很符合要求。

### 3.2 水冷硬质合金薄刀片加工法

切割速度要慢,加工出来的试件外形较平整,但沿纤维方向 UHMPE 纤维有些绒毛皱起,加工效率低。在加工小尺寸(如  $3\text{mm}$  宽)试件时,由于 UHMPE 纤维与环氧基体的粘结不良,剪切强度差,试样经受不住刀具切削时的剪切力而发散开,所以不能加工小试件。

### 3.3 高速水喷射切割加工法

分为一般水切割和含磨料水喷射切割两种。本工作采用后者,是一种新发展的加工技术,也是本文着重阐述的加工方法。

我们在 Model 11x Mark II Intensifier pump 及配套加工设备对 S1000/EP 试件进行加工。

加工原理是:含金刚砂的高压水通过喷嘴以一定的压力和速度侵蚀或剪切材料,当水射流的剪切力超过材料的剪切强度时,引起材料局部变形达到破坏。该设备最高水压可达到  $414\text{MPa}$ ,加工精度为  $\pm 0.1\text{mm}$ 。采用含磨料水喷射切割出来的试件,表面光滑整齐,尺寸准确。此法也能加工小尺度的试件。

### 3.4 激光加工法

因加工区温度高,切口粗糙。要研究采用适当的加工能量、速度,才能达到较好的效果。对此,尚未进行系统研究。

## 4 加工方法对 UHMPE 纤维增强复合材料力学性能的影响

表 1 列出了不同加工方法切割 S1000/EP 试件和 S1000/LDPE 试件的弯曲、层间剪切和断裂性能测试结果。由表可见,采用高速水喷射切割加工的试件各项性能较好,因为试件材料是受含金刚砂的高速高压水的侵蚀而被切开,没有温度效应,加工表面质量好。采用硬质合金刀片以缓慢速度加工,因刀片薄而锋利,纤维基本被整齐切断,

宇航材料工艺 1994 年 第 4 期

只有极少量纤维起毛,加工中温升较小,然而切割面有些微不平滑,因此各项性能次于高压水喷射加工,而优于锯机械加工。由于锯不如刀片锋利,加工材料时阻力较大,引

起材料温度升高,又因聚乙烯的熔点低,因此引起加工边缘稍有卷起而且发黑,说明加工时产生一定的温度,此种方法加工的试件性能最差。

表 1 加工方法对 UHMPE 纤维增强复合材料力学性能的影响

试件材料	加工方法	弯曲性能		层间剪切强度 $\tau_{ilss}/\text{MPa}$	断裂韧性 $K/\text{kPa}\cdot\text{m}$
		强度 $\sigma_b/\text{MPa}$	模量 $E_b/\text{MPa}$		
S1000/EP ( $V_f=80\%$ )	锯机械加工	29.3 (76.1%)	1285 (75.6%)	2.16 (75%)	2355 (86%)
	薄刀片加工	37.2 (96.6%)	1540 (90.6%)	待补	2504 (91%)
	水喷射加工	38.5 (100%)	1700 (100%)	2.87 (100%)	2740 (100%)
S1000/LDPE ( $V_f=80\%$ )	水喷射加工	75 (100%)	9398 (100%)	7.13 (100%)	4295 (100%)
	薄刀片加工	31	7060 (75%)	待补	4222 (98%)

\* 括号中数字表示以水喷射加工试件的性能值为 100% 时,其他加工方法的百分数。

对 S1000UHMPE 纤维织物增强环氧复合材料,弯曲和短梁剪切性能用一般机械加工方法比高压水加工方法低 25%,薄刀片慢加工方法对弯曲性能的影响比高压水加工劣化在 10% 的范围内。由于 LDPE 的熔点比环氧低,因此以 LDPE 为基体的复合材料在机械加工中的受热影响比环氧大,用刀片机械加工比高压水加工的劣化程度更明显(如弯曲模量的劣化度为 25%)。加工方法对断裂韧性的影响较小;对 S1000/EP,锯条加工比高压水加工劣化 14%,而刀片加工只劣化 9%;对 S1000/LDPE,刀片加工方法只劣化了 2%。对断裂韧性的影响

主要是缺口附近区域的状况,而开缺口的方法都是一样的,因此加工表面状态对断裂韧性的影响不如对弯曲和层剪性能的影响大。

## 5 结论

S1000/EP 复合材料经高压水加工的切口表面较均匀,纤维未受损伤,因此性能未受影响;用硬质合金薄刀片加工的切口基体纤维受切变形,稍有损伤,因此力学性能稍低;钢锯加工切面不均匀,基体扯伤界面开裂,所以对力学性能影响较大;激光切割受温度影响,加工表面严重损坏,基体破坏,纤维断裂,因此,没有用此法加工试件。