

# 碳纤维特性对 C/C 复合材料界面性能的影响

白 侠<sup>1,2</sup> 唐 辉<sup>1,2</sup> 肖 春<sup>1,2</sup> 李冬娟<sup>1,2</sup>

(1 西安航天复合材料研究所,西安 710025)

(2 高性能碳纤维制造及应用国家地方联合工程研究中心,西安 710089)

**文 摘** 分别采用扫描电镜、比表面积与孔体积分析仪等手段对日丝(RS-C<sub>f</sub>)和美丝(MS-C<sub>f</sub>)两种碳纤维进行表面状态表征分析,通过纤维顶出试验、冲剪强度和弯曲强度对两种纤维制备的 C/C 复合材料界面性能进行了微观和宏观测试,研究了不同表观结构纤维对 C/C 复合材料界面性能的影响。纤维表面形貌观察结果表明:圆形 RS-C<sub>f</sub> 表面沟槽比腰果形 MS-C<sub>f</sub> 明显,但沟槽数量少于 MS-C<sub>f</sub>,而 MS-C<sub>f</sub> 的比表面积、孔体积和孔径均大于 RS-C<sub>f</sub>。RS-C/C、MS-C/C 复合材料界面强度分别为 2.98 和 3.80 MPa;RS-C/C 复合材料的弯曲和冲剪强度分别为 55.9 和 32.0 MPa,低于 MS-C/C 复合材料的 65.0 和 35.2 MPa,微观和宏观力学性能均表明 MS-C/C 复合材料的界面强度高于 RS-C/C 复合材料。

**关键词** RS-C<sub>f</sub>,MS-C<sub>f</sub>,C/C 复合材料,界面强度,弯曲强度,冲剪强度

中图分类号:TB3

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.03.012

## Effect of C<sub>f</sub> Characteristics on Interface Properties of C/C Composite

BAI Xia<sup>1,2</sup> TANG Hui<sup>1,2</sup> XIAO Chun<sup>1,2</sup> LI Dongjuan<sup>1,2</sup>

(1 Xi'an Aerospace Composites Research Institute, Xi'an 710025)

(2 National and Local Union Engineering Research Center of High-Performance Carbon Fiber Manufacture and Application, Xi'an 710089)

**Abstract** The surface characteristics of RS and MS carbon fibers were analyzed by using the scanning electron microscopy, specific surface area and pore volume test equipment. The interface properties of C/C composite were tested by carbon push down method, bend strength and impact shear strength. The results show that the section of RS-C<sub>f</sub> is circular and MS-C<sub>f</sub> is kidney. The surface groove of RS-C<sub>f</sub> fiber is clear, but obviously less than MS-C<sub>f</sub>. The special surface area and pore volume of MS-C<sub>f</sub> are more than RS-C<sub>f</sub>. The interface strength of MS-C/C composite is higher than that of RS-C/C composite, because the interface strength, bend strength and impact shear strength of MS-C/C composite are 3.80 MPa, 65.0 MPa and 35.2 MPa respectively, being higher than RS-C/C composite's 2.98 MPa, 55.9 MPa and 32.0 MPa.

**Key words** RS-C<sub>f</sub>,MS-C<sub>f</sub>,C/C composite, Interface strength, Bend strength, Impact shear

### 0 引言

C/C 复合材料界面是其应力和其他信息传递的“桥梁”,复合材料受载时,通过界面传递载荷,可以使碳纤维与基体碳形成一个有效发挥综合性能的整体<sup>[1-2]</sup>。

影响碳纤维/基体碳界面结合强度的因素很多,包括碳纤维的表面状况、基体碳的结构及成型工艺条件等。由于 C/C 复合材料成型工艺具有多样性及材料内部结构的复杂性,目前,国内外学者在碳纤维表

面状态对 C/C 复合材料界面影响方面的研究较少。本文通过对两种不同表面状态碳纤维进行微观形貌分析,结合 C/C 复合材料微观界面强度和宏观力学性能测试结果,探讨了碳纤维表观特性对 C/C 复合材料界面性能的影响。

### 1 实验

#### 1.1 原材料

日丝(RS-C<sub>f</sub>)和美丝(MS-C<sub>f</sub>)性能见表 1。

表 1 碳纤维性能参数

Tab.1 Performances and type of carbon fiber

纤维	密度/ g·cm <sup>-3</sup>	拉伸强度 /GPa	拉伸模量 /GPa	断裂延 伸率/%
RS-C <sub>f</sub>	1.76	3.433	210.0	1.50
MS-C <sub>f</sub>	1.77	3.387	225.0	1.40

1.2 仪器设备

S-2700 型扫描电镜 (SEM), 日本日立公司; Tristar-3020 型比表面积与孔体积测试分析仪 (BET), 美国麦克公司。

1.3 C/C 复合材料试样制备

对上述两种碳纤维通过编织制成 3D 结构预体, 然后经过高温处理、化学气相沉积和沥青浸渍碳化复合致密制备出密度 1.93 g/cm<sup>3</sup> 的 C/C 复合材料, 分别编号为 RS-C/C 和 MS-C/C, 最后对 C/C 复合材料试样进行微观纤维顶出试验和弯曲、冲剪强度测试。

1.4 测试及表征方法

1.4.1 碳纤维测试

对碳纤维的表面状况和断面形貌采用 SEM 进行分析和计算, 采用 BET 对碳纤维表面的比表面积、孔体积和平均孔径进行测试。

1.4.2 C/C 复合材料测试

采用纤维顶出法直接测试两种纤维制备的 C/C 复合材料与基体间的界面强度, 测试原理见图 1。

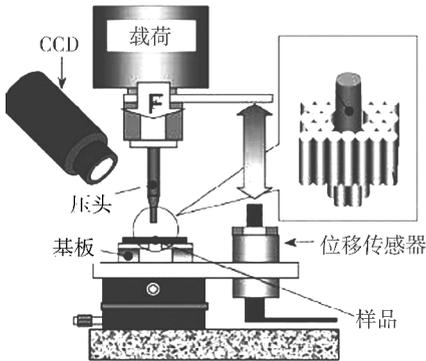


图 1 复合材料纤维顶出试验示意图

Fig.1 Fiber push down test of composite

弯曲强度测试按 Q/GB97A—2008 执行, 冲剪强度测试按照 Q/GB106—94 进行。

2 结果与讨论

2.1 碳纤维表面状态表征及分析

2.1.1 SEM 对碳纤维表面状态表征

首先使用 SEM 观察两种碳纤维的表面物理状态 (图 2)。可以看出, 两种纤维表面均存在沿纤维轴向排列的不规则沟槽和皱褶, MS-C<sub>f</sub> 的表面沟槽较细较浅, 且深度接近, 而 RS-C<sub>f</sub> 表面沟槽更深更粗一些。从碳纤维断面 SEM 照片可以看出, RS-C<sub>f</sub> 断面基本呈圆柱形, MS-C<sub>f</sub> 呈“腰果”状结构。徐志伟等人<sup>[4]</sup> 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014 年 第 3 期

认为腰果形等其他不规则的截面不仅有利于提高碳纤维比表面积, 而且还有利于提高复合材料界面处的机械啮合作用, 从而提高复合材料的弯曲和层间剪切强度。

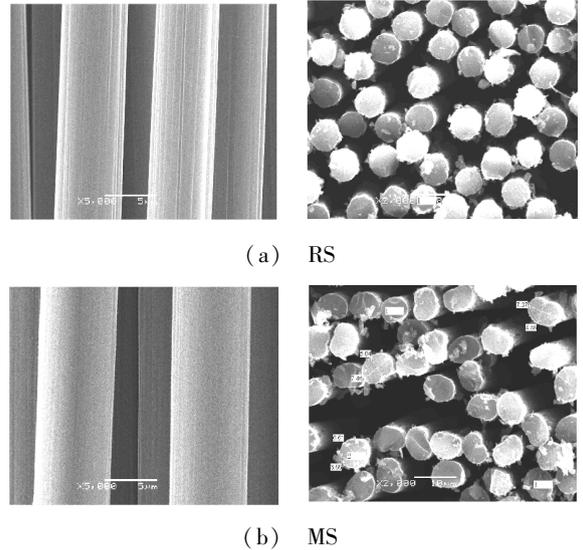


图 2 两种碳纤维表面及断面 SEM

Fig.2 SEM images of fiber surface and section

由统计法得到 RS-C<sub>f</sub> 和 MS-C<sub>f</sub> 的直径分别为 6.55 和 6.70 μm, 可看出, MS-C<sub>f</sub> 直径略粗, RS-C<sub>f</sub> 直径略细。

2.1.2 碳纤维比表面积和孔体积分析

两种碳纤维表面的比表面积和孔结构特征测试结果见表 2。可以看出, MS-C<sub>f</sub> 表面的比表面积略高于 RS-C<sub>f</sub>, 其原因可能是腰形截面碳纤维的截面是非规则形, 且表面沟槽虽比 RS-C<sub>f</sub> 浅, 但数量却非常多。MS-C<sub>f</sub> 的孔体积和平均孔径均高于 RS-C<sub>f</sub>, 这也有助于提高碳纤维与基体碳的界面性能。

表 2 碳纤维比表面积和孔体积

Tab.2 Specific surface area and pore volume of carbon fiber test

纤维类型	孔体积/mL·g <sup>-1</sup>	比表面积/m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>	平均孔径/nm
RS	0.002	2.53	3.5
MS	0.003	3.03	3.7

2.2 C/C 复合材料界面强度

2.2.1 微观界面强度

与复合材料宏观力学实验相比, 复合材料微观实验已经能够直接定量或半定量的测出界面强度<sup>[5]</sup>。碳纤维顶出试验可直接反映碳纤维与基体的界面粘接强度, 测试结果见图 3。图 3 表明, MS-C/C 复合材料的碳纤维与基体的界面强度 > RS-C/C 复合材料。虽然 RS-C<sub>f</sub> 的表面粗糙度较大, 表面沟槽和皱褶也比 MS-C<sub>f</sub> 明显, 但沟槽和皱褶的数量比 MS-C<sub>f</sub> 少, 且 MS-C<sub>f</sub> 比表面积也大于 RS-C<sub>f</sub>, MS-C<sub>f</sub> 单丝也较粗, 纤维与基体有更多的接触点, 且“腰果”形结构有

助于纤维与基体之间形成锚定作用,增加了界面的粘接强度。

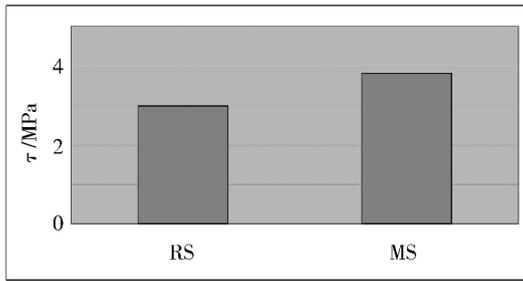


图3 C/C纤维顶出试验数据

Fig.3 Fiber push down of c/c composite

### 2.2.2 C/C宏观界面强度

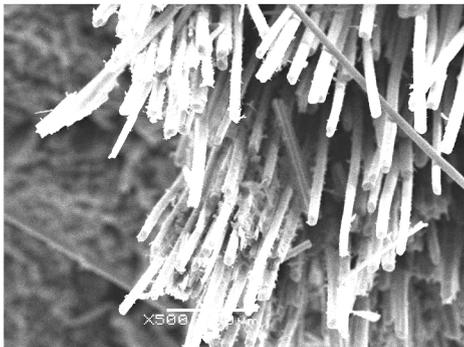
两种材料的弯曲与冲剪强度测试结果见表3。可以看出,MS-C/C复合材料的冲剪和弯曲强度,均比RS-C/C复合材料高,表明前者的界面结合力更大。

表3 C/C复合材料冲剪和弯曲强度

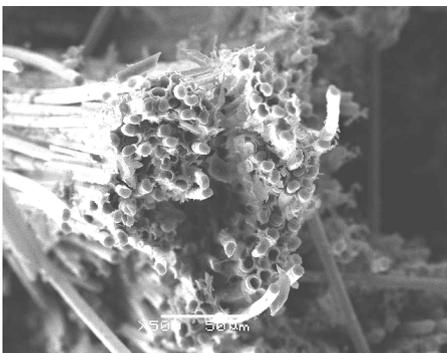
Tab.3 Punching shears and bending strength of C/C composites MPa

复合材料	弯曲强度	冲剪强度
RS-C/C	55.9	32.0
MS-C/C	65.0	35.2

两种C/C复合材料弯曲端口形貌见图4。



(a) RS



(b) MS

图4 弯曲试样断口SEM

Fig.4 SEM images of fracture surface after bending test

可看出,MS-C/C复合材料试样断口纤维拔出呈现束状,RS-C/C复合材料试样断口纤维拔出特征呈现单丝状,表明前者纤维与基体界面连接较强,单丝

纤维不易拔出。当C/C复合材料受力时,会产生两种极端破坏,一种是当纤维与基体碳界面粘接较差时,纤维被拉出,这时复合材料的剪切强度与纤维力学性能无关;另一种是当纤维与基体碳界面粘接较强时,基体将负荷传递给纤维直至断裂,形成纤维张力破坏,此时剪切强度与界面强度和纤维性能有关。但实际上,材料破坏一般介于两者之间<sup>[2,8]</sup>。从材料韧性角度讲,MS-C/C复合材料呈现为一种脆性断裂,而RS-C/C复合材料因界面未形成紧密结合,受力时,破坏方式先后出现基体开裂、纤维-基体脱粘、裂纹桥接及纤维摩阻、纤维断裂和拔出等过程,在该过程不仅要消耗或吸收能量,而且还可以消除裂纹尖端的应力集中,这些综合因素可增加材料的断裂韧性<sup>[9-10]</sup>。在制备C/C复合材料时,应选择合适的纤维和致密工艺,获得最佳界面强度。

### 3 结论

(1)通过SEM可以观察到,RS-C<sub>r</sub>断面为圆柱状,MS-C<sub>r</sub>为腰果状,MS-C<sub>r</sub>比表面积、孔体积和孔径均大于RS-C<sub>r</sub>。

(2)MS-C/C复合材料的界面强度是3.80 MPa,高于RS-C/C复合材料的2.98 MPa。

(3)MS-C/C复合材料的冲剪和弯曲强度为35.2和65.0 MPa,均大于RS-C/C复合材料的32.0和55.9 MPa。

### 参考文献

- [1] 吴人洁. 复合材料[M]. 天津:天津大学出版社, 2000:385-426
- [2] 崔红,苏君明,王俊. C/C复合材料界面及其对性能的影响[J]. 宇航材料工艺,1996(2):10-18
- [3] 徐志伟,黄玉东,刘丽,等. 不同界面碳纤维表面特性及其对复合材料界面粘接性能的影响[J]. 固体火箭技术, 2007,30(1):60-63
- [4] 郭慧. 碳纤维表面能、表面粗糙度及化学组成的表征[D]. 哈尔滨工业大学,2009
- [5] 赵学莹. 国产碳纤维组织结构及其复合材料界面结构与性能表征[D]. 哈尔滨工业大学,2010
- [6] 黄玉东,曹海琳,邵路,等. 碳纤维复合材料界面性能研究[J]. 宇航材料工艺,2002,32(1):19-24
- [7] 白淑贞,崔盛瑞. 用声发射研究碳纤维复合材料的破坏特征,复合材料研究[C]. 第一届全国复合材料学术会议论文选编,1981:289-295
- [8] 李崇俊,霍肖旭,金志浩. 编织销钉炭/炭复合材料界面微观结构探讨[J]. 新型炭材料,2000,15(2):43-46
- [9] Kamal Anand, Vijay Gupta. The effect of processing condition on the compressive and shear strength of 2D carbon-carbon laminates [J]. Carbon, 1995,33(6):739-748
- [10] Kazuhiro Fujita, Hiroyuki Sakai. Influence of heat treatment temperature on interfacial shear strength of C/C[J]. Composites, Part A, 1999,30:497-501

(编辑 吴坚)