

# 碳布铺层方式对 C/C-SiC 薄壁喉衬性能的影响

王玲玲<sup>1,2</sup> 嵇阿琳<sup>1,2</sup> 纪伶俐<sup>1,2</sup> 闫联生<sup>1,2</sup> 韩明<sup>3</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)

(3 中国人民解放军驻 210 所军事代表室, 西安 710000)

**文 摘** 通过 CVI+PIP 制备了准三维针刺 C/C-SiC 薄壁喉衬, 预制体碳布铺层方式分别采用与喉衬内型面形状相同的仿形铺层以及与喉衬入口端角度相同 30° 铺层。研究了两种铺层方式对最终构件层间弯曲性能、整体承压性能以及抗烧蚀抗冲刷的影响。结果表明, 构件的弯曲强度分别为 205 和 152 MPa; 水压爆破压力分别为 6.5 和 4.9 MPa。用与材料表面夹角为 30° 的氧乙炔气流考查材料的抗烧蚀及冲刷性能, 同角度铺层成型材料抗冲刷能力明显较好, 200 s 其线烧蚀率为仿形铺层成型材料的 70%。

**关键词** 针刺, 铺层方式, C/C-SiC 复合材料, 性能

中图分类号: TB332

DOI: 10.3969/j.issn.1007-2330.2014.03.013

## Effect of Carbon Cloth Spreading Means on Performance of C/C-SiC Thin-Wall Throat

WANG Lingling<sup>1,2</sup> JI Alin<sup>1,2</sup> JI Lingling<sup>1,2</sup> YAN Liansheng<sup>1,2</sup> HAN Ming<sup>3</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)

(3 210 Military Representative Room of Chinese People's Liberation Army, Xi'an 710000)

**Abstract** Quasi-three dimensional needled C/C-silicon carbide thin-wall throats were prepared by CVI+PIP combined process. The performs were spreading individually by carbon cloth layers which is copying the inner moulding surface of the throat and 30° carbon cloth layers which is the same as the entrance angle of the throat. The effect of the two carbon cloth spreading means on the bending performance, integral bearing performance and anti-ablative and erosion properties of C/C-SiC components are investigated. Results show that the bending intensity of the components is 205 MPa and 152 MPa and the hydraulic bursting pressure is 6.5 MPa and 4.9 MPa separately. The ablation properties are investigated using oxyacetylene ablation technique with the angle between the gas flow and material surface is 30°. The anti-ablative and anti-erosion properties of 30° carbon cloth spreading composites is excellent. The linear ablation rate is 70% compared to that of carbon cloth copying spreading composites after 200 s ablation time.

**Key words** Needling, Spreading means, C/C-SiC composites, Performance

### 0 引言

C/C-SiC 复合材料具有低密度、高强度、耐高温、抗烧蚀和抗冲刷等优异性能, 同时具有比 C/C 复合材料更好的抗氧化性, 在固体冲压发动机喷管喉衬上有广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。

制备 C/C-SiC 复合材料的增强体有多种, 如 2D 碳布叠层、2.5D、3D 编织结构以及多向编织结构等<sup>[4-6]</sup>。2D 碳布叠层的 C/C-SiC 复合材料具有较好的面内力学性能, 但其层间力学性能低、易分层的缺点限制了其应用范围。多维编织结构显著改善了复合材

修回日期: 2014-04-03

基金项目: 国防重大基础科研项目 (c0320110006)

作者简介: 王玲玲, 1985 年出生, 硕士, 工程师, 主要从事 C/SiC 复合材料性能研究。E-mail: 1985willzpz@sina.com

料的层间力学性能,也保留了面内力学性能优异的特点,但其编织工艺复杂、成本高,并且不适合制备壁厚不均匀的构件(如:喷管喉衬)<sup>[4]</sup>。准三维针刺 C/C-SiC 由于在厚度方向上引入了碳纤维,而具有较高的层间剪切强度,而且针刺工艺简单、易于实现自动化且成本低,并能制备厚度从 1~100 mm 的复杂构件,因此近年来已逐步应用于航空航天等领域,例如:重复使用飞行器热防护面板、固体火箭发动机喷管喉衬、高超声速冲压发动机燃烧室以及喷管延伸段等<sup>[7-10]</sup>。

准三维针刺 C/C-SiC 复合材料是由碳布层、短碳纤维胎网层以及针刺纤维束组成,碳布层中纤维方向会影响其力学性能。本文研究了碳布铺层方式对材料力学及抗烧蚀、冲刷性能的影响。

## 1 实验

### 1.1 主要原料及材料制备

日本东丽公司生产的 PAN 基碳纤维,采用 3K 斜纹碳布/碳纤维胎网制备了准三维针刺预制体,预制体碳布铺层方式分别采用与喉衬内型面形状相同的仿形铺层和与喉衬入口端角度相同 30°铺层,预制体中纤维体积分数为 40%~45%。以 C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> 为气源, N<sub>2</sub> 为稀释气体,采用 CVI 工艺对预制体进行增密,得到 C/C 多孔体,密度为 1.30 g/cm<sup>3</sup>。对多孔体进行高温处理后再通过 PIP 工艺以聚碳硅烷(国防科技大学 CFC 国家重点实验室制备)为前驱体对 C/C 多孔体进行增密,加压浸渍-裂解循环致密数周期得 C/C-SiC 喉衬,其密度为 1.80 g/cm<sup>3</sup>,最终喉衬内表面进行抗烧蚀涂层处理。两种铺层方式成型喉衬分别为 1<sup>#</sup>和 2<sup>#</sup>。

### 1.2 主要测试设备及方法

(1)采用 INSTRON4505 型电子万能试验机测定 C/C-SiC 材料的弯曲强度和模量,按 Q/GB97-92 测试力学性能。

(2)采用水压试验测试 C/C-SiC 构件的整体承压性能,水压试验装配示意图如图 1 所示,从注水口进水,直到水压环爆破为止。

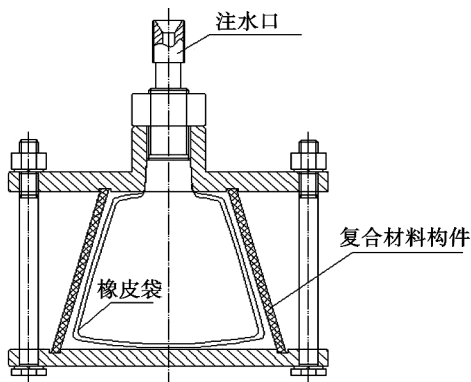


图 1 水压试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hydraulic bursting test device

(3)氧-乙炔火焰烧蚀试验,烧蚀条件:喷嘴直径为 2 mm,氧乙炔枪口到试样表面中心距离为 20 mm,夹角为 30°。氧气流量与乙炔流量之比为 2:1,烧蚀时间为 200 s。烧蚀试验前后,分别用千分表(分辨率:0.01 mm)和电子天平(分辨率:0.1 mg)测试试样的烧蚀中心厚度与质量,线烧蚀率和质量烧蚀率按照以下两式计算:

$$R_l = (l_0 - l_t) / t \quad (1)$$

$$R_m = (m_0 - m_t) / t \quad (2)$$

式中,  $l_0$  和  $l_t$  为烧蚀前后中心厚度,  $m_0$  和  $m_t$  是烧蚀前后试验质量,  $t$  为烧蚀时间。

## 2 结果与分析

### 2.1 预制体碳布铺层分析

预制体碳布铺层方向与制品内型面形状相同时见图 2, 该种仿形铺层方式制备的喉衬, 其制品整体承载能力较强。而根据喉衬工作特点其入口端角度为 30°, 设计碳布铺层角度与喉衬入口端角度保持一致, 碳布铺层方向与制品弧面段切线方向平行, 故设计碳布铺层方向也为 30°(图 3), 制品经机加后内型面碳布铺层方向与喉衬工作时高速气流方向夹角相同或较小, 喉衬内型面碳布抗剥层能力增强。

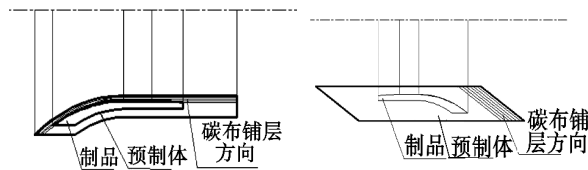
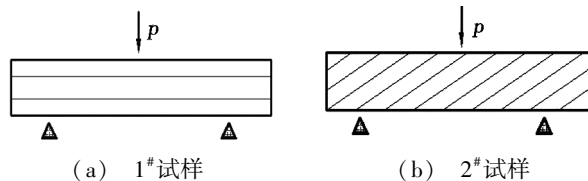


图 2 碳布仿形铺层(1<sup>#</sup>) 图 3 碳布铺层角度为 30°(2<sup>#</sup>)

Fig. 2 Carbon cloth layers copying Fig. 3 30° carbon cloth layers spreading

### 2.2 碳布铺层方式对材料力学性能的影响

采用三点弯曲法测得 1<sup>#</sup>喉衬的  $x$ - $y$  向弯曲强度为 205 MPa, 2<sup>#</sup>喉衬的  $x$ - $y$  向弯曲强度为 152 MPa。



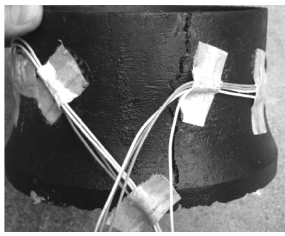
(a) 1<sup>#</sup>试样 (b) 2<sup>#</sup>试样

图 4 弯曲试样中碳布层纤维取向示意图

Fig. 4 Schematic illustration of orientation of fibers in carbon cloth layer for flexural sample

在复合材料构件胚体直接取样时, 试样中碳布纤维的取向如图 4 所示。可以看出, 2<sup>#</sup>试样中有效承载纤维长度明显变短, 使其强度略低。而 1<sup>#</sup>试样中有效承载纤维数量和长度明显增加, 弯曲强度明显增强。

将两种碳布铺层角度预制体成型喉衬进行水压爆破试验, 1<sup>#</sup>喉衬试验加载压力到达 6.5 MPa 时筒身段爆破, 2<sup>#</sup>喉衬试验加载压力到达 4.9 MPa 时筒身段爆破。水压爆破后产品照片见图 5。



(a) 1#喉衬

(b) 2#喉衬

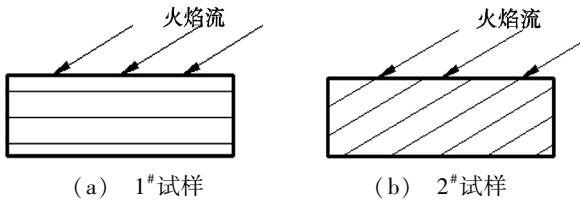
图5 喉衬水压爆破后照片

Fig. 5 Photographs of throats after hydraulic bursting throat after hydraulic bursting

1#喉衬在水压试验中仅有轴向裂纹,而2#喉衬在水压试验中出现环向和轴向两道裂纹。2#喉衬碳布铺层角度与喉衬入口端角度保持一致,纤维方向与在构件厚度方向存在一定的角度,使得构件环向约束较低,且喉衬出口端碳布纤维长度较短,一定程度影响该部位整体承载能力。而1#喉衬的碳布铺层方向与制品内型面平行,充分发挥了连续纤维在环向、轴向的增强作用,故其整体承压能力较好。

### 2.3 碳布铺层方式对材料抗烧蚀抗冲刷性能的影响

根据喉衬工作热气流冲刷特点及角度,采用与材料表面夹角为 $30^\circ$ 的氧乙炔气流考查材料的抗烧蚀和抗冲刷性能。烧蚀时火焰与试样方向见图6。



(a) 1#试样

(b) 2#试样

图6 氧乙炔火焰烧蚀示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the oxyacetylene ablation samples

表1给出了两种试样的烧蚀结果。

表1 两种试样的烧蚀率

Tab. 1 Ablative rate of the two samples

试样	烧蚀时间/s	线烧蚀率/ $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	烧蚀深度/mm
1#	200	6.1	1.22
2#	200	4.3	0.85

可以看出,200 s后2#试样线烧蚀率为1#的70%,2#试样的抗氧化冲刷能力较好。用氧乙炔焰流剧烈地冲击材料的表面,对材料表面冲刷力较强;材料与氧化性气氛(氧气与乙炔的流量比为2:1,因此火焰为氧化焰)反应<sup>[11]</sup>,材料中各基体将会发生了严重的氧化。当碳布铺层角度与喉衬入口端一致,制品经机加后,内型面碳布铺层方向与喉衬工作时高速气流方向基本相同,即与本实验的氧乙炔气流方向一致,喉衬碳布抗剥层能力增强;而仿形铺层成型材料在机加内型面过程中,部分碳布可能被切断,机加后宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014年 第3期

制品内型面碳布不连续,工作时高温高速气流直接冲刷碳布层间,其碳布抗剥层能力减弱。

### 3 结论

(1)准三维针刺预制体碳布铺层方式分别采用与喉衬内型面形状相同的仿形铺层和与喉衬入口端角度相同 $30^\circ$ 铺层。前者试样弯曲强度明显增强;而后者弯曲强度略低。

(2) $30^\circ$ 碳布铺层结构喉衬试爆破压力为4.9 MPa,碳布仿形铺层结构喉衬爆破压力为6.5 MPa。

(3)用与材料表面夹角为 $30^\circ$ 的氧乙炔气流考查材料的抗烧蚀和抗冲刷性能, $30^\circ$ 碳布铺层成型材料抗冲刷能力明显较好,其线烧蚀率是仿形铺层成型材料的70%。

### 参考文献

- [1] 曹运红,盛德林,邢娅. 超燃冲压发动机用复合材料技术的研究状况[J]. 飞航导弹,2005(6):54-58
- [2] 马彦,马青松,陈朝辉. 连续纤维增强陶瓷基复合材料国外应用研究进展[J]. 材料导报,2007,5(21):403-404
- [3] 张立同,成来飞. 连续纤维增强陶瓷基复合材料可持续发展战略探讨[J]. 复合材料学报,2007,24(2):1-6
- [4] Christin F. Design, fabrication, and application of thermo-structural composites (TSC) like C/C, C/SiC, and SiC/SiC composites[J]. Adv. Eng. Mater., 2002, 4(12):903-912
- [5] Ma J Q, Xu Y D, Zhang L T, et al. Microstructure characterization and tensile behavior of 2.5 D C/SiC composites fabricated by chemical vapor infiltration [J]. Scripta Mater, 2006, 54(11):1967-1971
- [6] Xu Y D, Zhang L T. Three-dimensional carbon/silicon carbide composites prepared by chemical vapor infiltration [J]. J Am. Ceram. Soc., 1997, 80(7):1897-1900
- [7] Schmidt S, Beyer S, Knabe H, et al. Advanced ceramic matrix composite materials for current and future propulsion technology applications [J]. Acta Astronaut., 2004, 55(3/9):409-420
- [8] Spriet P, Habarou G. Applications of CMCs to turbojet engines: overview of the SEP experience [J]. Key Eng. Mater., 1997, 127:1267-1275
- [9] Fan S, Zhang L, Xu Y, et al. Microstructure and tribological properties of advanced carbon/silicon carbide aircraft brake materials [J]. Compos. Sci. Technol., 2008, 68:3002-3009
- [10] Krenkel W, Berndt F. C/C-SiC composites for space applications and advanced friction systems [J]. Mater. Sci. Eng. A, 2005, 412(1/2):177-181
- [11] Fang Dan, Chen Zhaofeng, Song Yingdong, et al. Morphology and microstructure of 2.5 dimension C/SiC composites ablated by oxyacetylene torch [J]. Ceramics International, 2009, 35:1249-1253

(编辑 吴坚)