

不同针刺预制体结构对 C/C 复合材料力学性能的影响

郑蕊^{1,2} 徐征¹ 李旭嘉³ 嵇阿琳^{1,2} 李崇俊²

(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 重庆理工大学,重庆 400054)

文 摘 在斜纹碳布/碳纤维网胎、无纬布正交/碳纤维网胎针刺圆筒预制体的基础上,通过在其结构中增加角度缠绕连续纤维,设计和研制了新型结构针刺预制体,并对比研究了不同针刺预制体结构对圆筒 C/C 复合材料力学性能的影响。结果表明,无纬布正交铺层针刺 C/C 复合材料的层剪、轴向拉伸强度都高于斜纹碳布增强针刺 C/C 材料,其中轴向拉伸强度达到 157.0 MPa,提高了 83.0%;其层剪、轴向拉伸强度均有所提高,其最大分别可达到 11.68 和 179.0 MPa,分别提高了 22.6% 和 14%。

关键词 针刺预制体, C/C 复合材料, 层剪强度, 拉伸性能

Effect of Needled Preform Structure on Mechanical Properties of C/C Composite

Zheng Rui^{1,2} Xu Zheng¹ Li Xujia³ Ji Alin^{1,2} Li Chongjun²

(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 Chongqing University of Technology, Chongqing 400054)

Abstract A new needled cylindrical preform was designed and fabricated in this paper by means of angle plies of continuous wound carbon fibers with a twill fabric and non-woven tapes needled preform as basements. The effects of needled preform structures on the mechanical properties of C/C composites were compared and investigated. The results show that the orthogonal needled C/C composite with the non-woven tapes has higher interlaminar shear strength (ILSS), and a higher axial tensile strength of 157.0 MPa, being 83.0% higher than that of the twill fabric reinforced. The non-woven tapes reinforced cylindrical C/C composites with different angles have improved ILSS and axial tensile properties, the maximum ILSS and axial tensile strength reach 11.68 MPa and 179.0 MPa respectively, being 22.6% and 14%, respectively, higher than that of the orthogonal C/C composite.

Key words Needled preform, C/C composite, ILSS, Tensile property

0 引言

将针刺技术用于 C/C 复合材料增强预制体的成型源于纺织工业短切纤维毡的制备^[1], 针刺预制体成型工艺是以纤维网胎为针刺原料, 采用一种带倒向钩刺的特殊刺针进行针刺^[2-3], 形成平面和层间均有一定强度的准三维网状结构增强体。由于针刺碳布/网胎复合织物的特殊结构, 使其具有孔隙分布均匀, 易致密成型, 较高的面内和层间强度等特点。而固体火箭发动机喷管用轻质 C/C 扩张段是主承力热结构

部件, 它不仅要承受高温热燃气流的强力冲

刷和高温腐蚀, 同时也要承受一定的燃气内压, 若扩张段材料强度较低, 则可能在工作中断裂, 必将引起灾难性后果, 因此高的整体强度是确保其使用可靠性的关键。本文以新型针刺 C/C 复合材料及其在火箭发动机喷管扩张段上的应用为背景, 在斜纹碳布针刺 C/C 复合材料的基础上, 通过引入无纬布及斜向增强纤维, 研究、设计新型结构的增强骨架预制体, 制备高性能针刺 C/C 复合材料。

1 实验

1.1 原材料

无纬布采用 T700 12K 纤维、排纱密度为 (41 ± 2) 根/10 cm;斜纹布采用 T300 3K 纤维制成,经纬向排纱密度为 (70 ± 2) 根/10 cm;网胎采用碳纤维网胎,面密度为 44 g/cm^2 。

1.2 预制体铺层结构设计

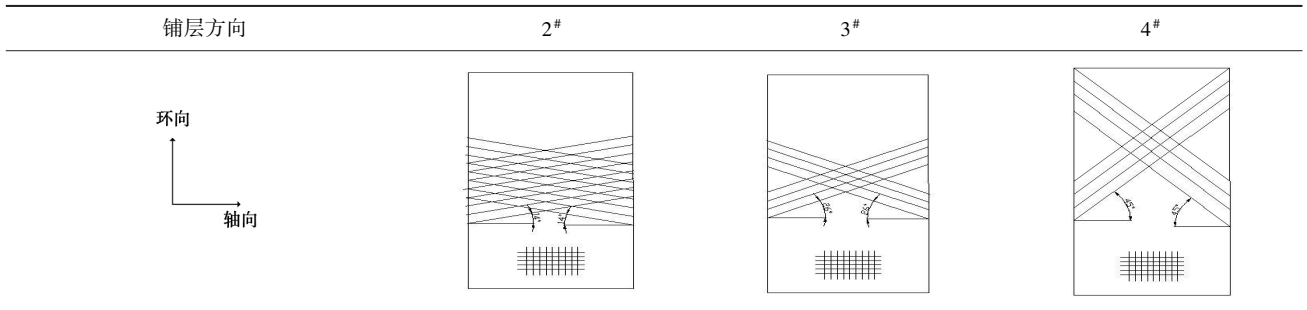
采用 XYJ-9216 铺层针刺机,针刺密度为 18 针/ cm^2 ,深度为 15 mm。按照表 1 的结构设计针刺成型尺寸为 $\Phi_{\text{外}}180 \text{ mm}$ 、 $\Phi_{\text{内}}150 \text{ mm} \times 260 \text{ mm}$ 的圆筒预制体,同时表 1 也列出了不同结构预制体的密度。其中 2[#]~4[#]预制体的具体铺层结构示意图见表 2。

表 1 预制体结构设计
Tab.1 Preform structures design

坯体名称	成型方法	预制体密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
A1 [#]	采用斜纹碳布/碳纤维网胎铺层→重复	0.36
1 [#]	轴向采用无纬布铺层+碳纤维网胎针刺→ 环向采用碳纤维连续缠绕+碳纤维网胎针刺→重复	0.48
2 [#]	轴向采用无纬布铺层+碳纤维网胎针刺→环向采用碳纤维连续缠绕 +碳纤维网胎针刺→斜向采用碳纤维 $\pm 14^\circ$ 连续缠绕+碳纤维网胎针刺→重复	0.49
3 [#]	轴向采用无纬布铺层+碳纤维网胎针刺→环向采用碳纤维连续缠绕+ 碳纤维网胎针刺→斜向采用碳纤维 $\pm 26^\circ$ 连续缠绕+碳纤维网胎针刺→重复	0.51
4 [#]	轴向采用无纬布铺层+碳纤维网胎针刺→环向采用碳纤维连续缠绕+ 碳纤维网胎针刺→斜向采用碳纤维 $\pm 45^\circ$ 连续缠绕+碳纤维网胎针刺→重复	0.52

表 2 不同预制体铺层结构示意图

Tab.2 Diagram of different preform structures



1.3 预制体致密

以丙烯为碳源气体,全程采用均热法 CVD 进行致密,当密度达到 1.60 g/cm^3 后,加工成拉伸试样。

1.4 性能测试

层剪强度试样尺寸为 $18 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,试样为 6 个,加载速率为 1 mm/min ,跨距为 16 mm,压头半径为 3 mm。

在 DSS-1T 岛津电子万能材料试验机上测试轴向拉伸强度,加载速率为 1 mm/min 。在 JSM-6460LV 型扫描电镜上观察 C/C 复合材料的拉伸断口形貌。

2 结果与讨论

2.1 剪切强度

5 种结构复合材料的剪切强度见表 3。可以看

出:在相同针刺及致密工艺下,5 种针刺 C/C 材料的剪切强度存在以下关系: $3^\# > 2^\# > (4^\# \approx 1^\#) > A1^\#$ 。其中 3[#]的层剪强度达到 11.68 MPa,较 1[#]提高了 22.6%,而较 A1[#]提高了 32.1%。由于 5 种材料均在 z 向上引入了一定数量的连续碳纤维,对层间剪切性能的影响很大,z 向纤维含量越高,剪切强度越高。在相同针刺工艺下,由于制品厚度相同,而斜纹布单元层较厚,最终铺层数最少,从而使得每层的实际最终针刺密度较小,因此引入的 z 向纤维含量较少;同时 A1[#]预制体密度低(表 1),层间较疏松,再加上斜纹碳布层间存在先天性孔洞缺陷,因此其剪切强度最低。而对于无纬布铺层制品来讲,当加入斜向缠绕纤维后改变了层间结构,纤维束之间因张力及基体碳的作用,相互锁住,摩擦阻力增大,机械锚合作用更大,因

而层间剪切强度提高。

表3 不同结构针刺 C/C 复合材料剪切强度

Tab.3 Interlaminar shear strength of needling C/C composites with different needled preform structures

试样名称	方向	剪切强度/MPa
A1#	x-y	8.84
1#	x-y	9.53
2#	x-y	11.20
3#	x-y	11.68
4#	x-y	9.55

2.2 轴向拉伸性能

不同铺层结构针刺 C/C 复合材料的轴向拉伸性能测试结果见表4。

表4 不同结构针刺 C/C 复合材料轴向拉伸性能

Tab.4 Axial tensile properties of needling C/C composites with different needled preform structures

试样	轴向连续纤维/vol%	拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /GPa	断裂应变 /%
A1#	8.59	85.8	39.4	0.22
1#	16.24	157.0	47.7	0.33
2#	16.99	168.3	54.6	0.31
3#	17.46	179.0	54.9	0.33
4#	17.47	163.5	49.6	0.33

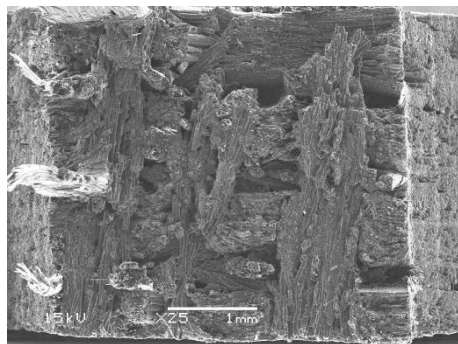
从表4中可以看出,1#的拉伸强度为157.0 MPa,较A1#提高了83.0%。原因在于两方面:(1)斜纹碳布本身在织造过程中纤维弯曲变形,并存在先天性架空孔洞的缺陷,强度损失比较大;而无纬布纤维平直,不经过织造过程,损伤小,强度高。(2)A1#的轴向纤维体积含量较低,只是1#轴向纤维含量的50%左右,因此轴向拉伸强度较低,也仅是1#轴向拉伸强度的50%左右。与1#试样相比,引入斜向纤维缠绕,能提高轴向连续纤维含量,从而提高材料的轴向拉伸强度,3#试样的轴向拉伸强度达到179.0 MPa,相对1#提高了14%,而相对于A1#提高了108.6%。由于纤维与受力方向的夹角超过一定角度后将不表现出对拉伸强度而是对剪切强度的贡献,因此即使4#和3#的轴向纤维含量基本相同,但缠绕角度增加,导致拉伸强度有所降低。

从表4还可以看出,相对A1#来讲,1#由于环向纤维的阻碍作用,限制了试样在受拉时的变形,使其模量相对较高。而在1#的基础上随着斜向交叉纤维的加入,拉伸模量也会相应地提高。在圆筒上($\pm\Phi$)交叉缠绕碳纤维,当CVD致密之后在圆筒上取样加工成拉伸试样后,($\pm\Phi$)交叉缠绕层可以等同成 $+\Phi$ 、 $-\Phi$ 单向板,在受到拉伸载荷时, $\pm\Phi$ 交叉铺层的两层板承受偏轴正应力 σ_x 的作用, $+\Phi$ 、 $-\Phi$ 单向板因附加应变系数大小相等,方向相反,单独变形时要产生方

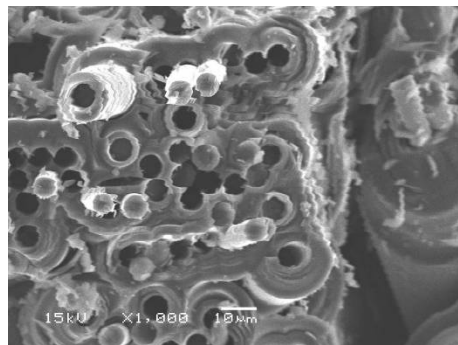
向相反,大小相等的附加剪应变,当复合在一起时,按变形一致原则,则会产生一对附加剪应力,剪应变相抵消,因此一致了试样的变形,提高了材料的模量。

2.3 预制体结构对破坏模式的影响

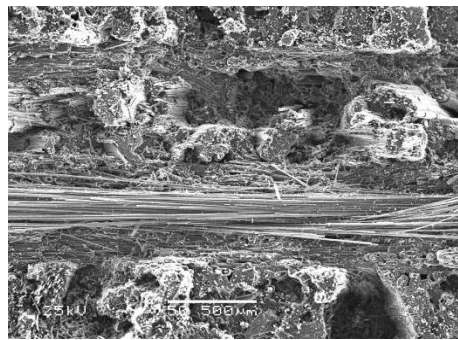
炭材料的变形主要是由内部孔隙的变化和纤维的拔出来进行。C/C复合材料中有较多孔隙,受拉伸时,孔隙在张应力的作用下极易张开,由于本身滑移系数少,应力集中得不到缓解,便产生新的裂纹来松弛应力。5种不同针刺C/C复合材料的拉伸断口形貌见图1。



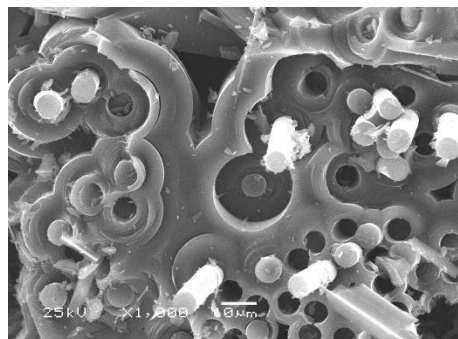
(a) A1# 25x



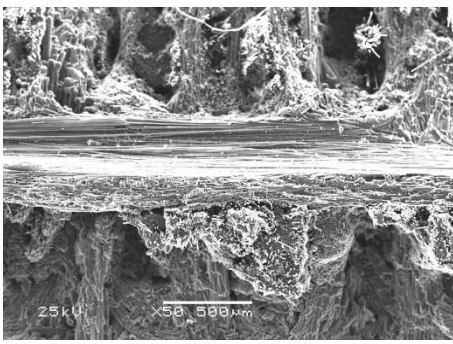
(b) A1# 1000x



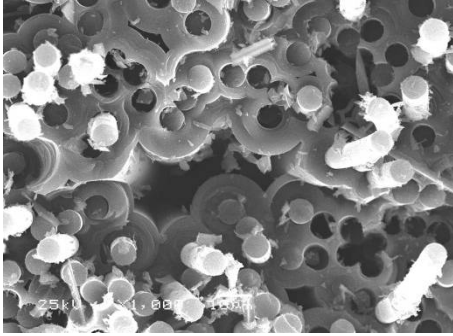
(c) 1# 50x



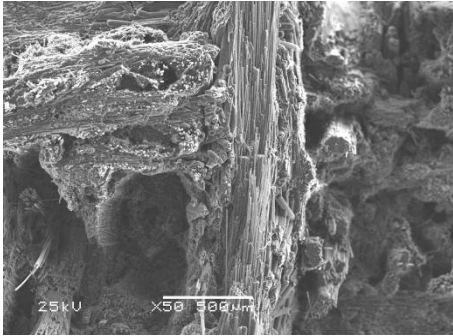
(d) 1# 1000x



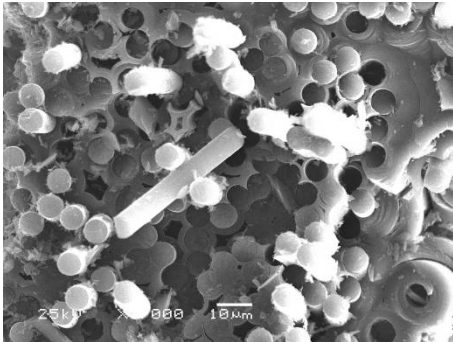
(e) 2# 50×



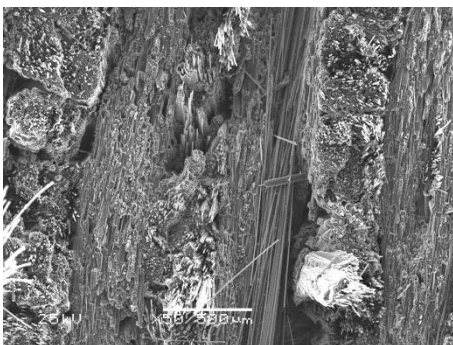
(f) 2# 1 000×



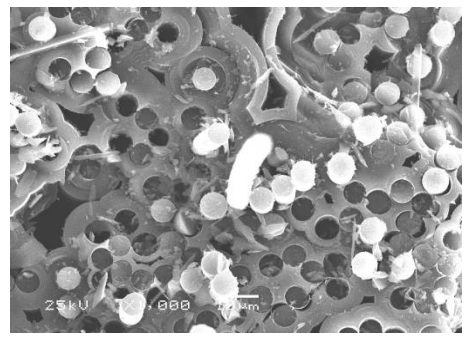
(g) 3# 50×



(h) 3# 1 000×



(i) 4# 50×



(j) 4# 1 000×

图1 不同针刺 C/C 复合材料 SEM 照片

Fig.1 SEM photographs of fracture surface of different needling C/C composites

A1#的断口比较平整,仅有少量的纤维拔出,并且纤维拔出极短,呈现明显的脆性断裂特征。相对A1#,由于环向纤维及斜向缠绕纤维的阻碍作用,使裂纹沿界面的扩展发生变形、分叉,吸收和分散大量的裂纹扩展能,从而使1#~4#表现出一定的韧性。从低倍照片上看,其他四种针刺 C/C 复合材料的断面有较明显的纤维拔出沟槽,断面相对粗糙。从高倍照片上看,断口纤维束及纤维的拔出较A1#明显,这与A1#断裂应变变最小的结果相吻合。但它们纤维拔出都较短,仍表现出脆性断裂。

3 结论

(1)无纬布正交针刺 C/C 材料的层剪强度高于斜纹碳布针刺 C/C 材料;而引入斜向角度纤维缠绕的针刺 C/C 材料的层剪强度最大到达 11.68 MPa,较斜纹碳布增强 C/C 材料提高了 32.1%,较无纬布正交 C/C 材料提高了 22.6%。

(2)斜纹碳布针刺圆筒 C/C 材料的轴向拉伸强度是 85.8 MPa,无纬布正交针刺 C/C 材料的拉伸强度为 157.0 MPa。而引入斜向角度缠绕纤维的针刺 C/C 材料的拉伸强度最大达到 179.0 MPa,相对斜纹碳布针刺圆筒 C/C 材料提高了 108.6%,相对无纬布正交 C/C 复合材料提高了 14%。

(3)预制体结构的改变并没有改变 C/C 材料脆性断裂的模式,但无纬布增强 C/C 材料的断裂韧性相对于斜纹碳布针刺 C/C 材料有所提高。

参考文献

- [1] 王忠. 针刺碳纤维毡生产工艺初探[J]. 新型炭材料, 1996,11(4):35-36
- [2] 刘建军,李铁虎,郝志彪,等. 针刺碳布/网胎复合织物的组分形态及性能研究[J]. 固体火箭技术,2005,28(4):299-303
- [3] 杨爱玉,王者辉. NOVOLTEX 碳/碳复合材料-固体火箭发动机喷管陈林的最佳选择[J]. 宇航材料工艺,1996(6):49-55

(编辑 任涛)