

文章编号: 1674-8190(2022)02-085-07

# 3D 针刺 C/SiC 断裂韧性缺口敏感性及其破坏研究

刘斌<sup>1</sup>, 安乾军<sup>1</sup>, 钟金桂<sup>1</sup>, 张毅<sup>2</sup>, 谭志勇<sup>3</sup>

(1. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

(2. 西北工业大学 超高温结构复合材料国防重点实验室, 西安 710072)

(3. 北京临近空间飞行器系统工程研究所, 北京 100076)

**摘要:** 碳化硅陶瓷基复合材料是超声速飞行器及高推重比发动机等发展所需的关键材料之一, 对冲击断裂韧性、缺陷及裂纹的敏感性有较高要求。采用夏比冲击试验测定 3D 针刺 C/SiC 复合材料的断裂韧性, 研究其处于 U 型、V 型缺口分别在针刺平行、垂直的不同分布方向时对冲击断裂韧性的影响, 并通过扫描式电子显微镜及光学显微镜等手段详细分析断口形貌。结果表明: U 型试样的断裂韧性较 V 型试样对缺口线与针刺相对位置更为敏感, 且缺口线与针刺纤维束平行时断裂韧性最差; 针刺纤维束与 0° 和 90° 经纬布铺层交叉部位相对薄弱, 原材料抗剪能力削弱。

**关键词:** 3D 针刺 C/SiC; 复合材料; 冲击; 断裂韧性; 缺口敏感性; 破坏

**中图分类号:** V25; TB332

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.02.13

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Study on Notch Sensitivity and Failure of 3D Needled C/SiC Fracture Toughness

LIU Bin<sup>1</sup>, AN Qianjun<sup>1</sup>, ZHONG Jingui<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>2</sup>, TAN Zhiyong<sup>3</sup>

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. National Key Laboratory of Thermostructure Composite Materials, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(3. Beijing Institute of Nearspace Vehicle's Systems, Beijing 100076, China)

**Abstract:** SiC ceramic matrix composites are one of the key materials for the development of hypersonic aircraft and engines with high thrust/weight ratio, which have high requirements for impact fracture toughness, defect and crack sensitivity. In this paper, Charpy impact test was used to measure the fracture toughness of 3D needled C/SiC composites. The effects of U-shaped notch and V-shaped notch on the impact fracture toughness were studied in different distribution directions parallel to and perpendicular to the needling, and the fracture morphology was analyzed in detail by means of scanning electron microscope and optical microscope. The results show that the fracture toughness of U-shaped specimen is more sensitive to the relative position of notch line and needle than that of V-shaped specimen, and the fracture toughness is the worst when the notch line is parallel to the needle fiber bundle. It is found that the intersection of needle fiber bundle and 0° and 90° non-woven cloth layup is relatively weak, and the shear resistance of raw materials is weakened.

**Key words:** 3D needled C/SiC; composite; impact; fracture toughness; notch sensitivity; damage

收稿日期: 2021-05-12; 修回日期: 2021-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(51902256); 航空科学基金(2020Z057053002); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(5000200389)

通信作者: 刘斌, binliu@nwpu.edu.cn

引用格式: 刘斌, 安乾军, 钟金桂, 等. 3D 针刺 C/SiC 断裂韧性缺口敏感性及其破坏研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(2): 85-91.

LIU Bin, AN Qianjun, ZHONG Jingui, et al. Study on notch sensitivity and failure of 3D needled C/SiC fracture toughness[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(2): 85-91. (in Chinese)

## 0 引言

目前,以耐高温复合材料为典型代表的复合材料作为结构、功能或结构功能一体化构件材料,在航天飞机、高超声速飞行器、航空发动机上均发挥着不可替代的作用。

热防护系统是航天飞行器发展的关键技术,美国航天飞机机头锥帽和机翼前缘使用的是耐高温复合材料,其使用温度高达  $1\ 650\ ^\circ\text{C}$ <sup>[1]</sup>。美国哥伦比亚号航天飞机失事就是其表面陶瓷隔热瓦受冲击剥落导致的<sup>[2]</sup>,其失事后,NASA 调查员为了验证泡沫塑料的破坏力,将其加速并撞击到隔热瓦上,结果证实,一块  $0.8\ \text{kg}$  的塑料泡沫在隔热瓦上留下了直径  $25\ \text{cm}$  的孔洞<sup>[3]</sup>。

高超声速飞行器作为目前各国关注和发展的一个重要领域,其气动加热剧烈,产生的高温对飞行器正常运行及安全带来严重影响,C/SiC 复合材料制备一体化热防护结构是近年来的研究趋势<sup>[4-6]</sup>。不仅如此,碳化硅陶瓷基复合材料因其优异性能被应用于固冲发动机燃烧室、冲压喷管、燃气流量调节装置等<sup>[7]</sup>。

陶瓷材料具有耐高温、低密度、高硬度、抗氧化、耐磨损等优良特性,但由于其脆性大和可靠性差的弱点,陶瓷材料在高温结构材料领域的应用受到制约。因此,发展陶瓷基复合材料是改善陶瓷材料强韧性的有效途径<sup>[8]</sup>,其中陶瓷增韧技术是陶瓷材料研究领域的重要问题。碳纤维增韧陶瓷基复合材料因其低密度、高比模量和抗热冲击性能好等优点快速发展<sup>[9]</sup>。目前,C/SiC 复合材料是制作载人飞船表面隔热板的较佳候选材料之一。

3D 针刺 C/SiC 复合材料相较于二维预制体承载纤维的方向更多,因而具有更高的承载性能,受到广泛重视<sup>[10]</sup>。尽管 3D 针刺 C/SiC 复合材料提高了层间性能,但在航空航天器服役期间,不可避免会受到来自空中与地面物理冲击,并带来毁灭性的灾难,故其冲击断裂韧性仍需关注与增强,其中针刺纤维束对断裂韧性的影响、缺口形状及缺口方向对断裂韧性的影响均需研究。

3D 针刺 C/SiC 复合材料中针刺预制体的力学性能主要取决于其工艺参数和纤维结构<sup>[11-13]</sup>。碳纤维布和网胎铺层的损伤评估可以通过试验观测并分析针刺过程后纤维的几何形态的方式进行<sup>[14-15]</sup>。另外,通过拉伸、弯曲、冲击等工况下的试

验研究,可以描述和揭示 3D 针刺 C/SiC 复合材料的损伤模式及力学行为。

严科飞等<sup>[16]</sup>研究了 C/C 和 C/SiC 两种复合材料的抗冲击能力与密度的关系,得出其夏比冲击能量随密度的增大呈线性减小的趋势;郑金煌等<sup>[17]</sup>研究了针刺密度、针刺深度、网胎面密度等预制体成型工艺参数对 C/C 复合材料力学性能的影响,得出只改变针刺密度、针刺深度、网胎面密度其中一个成型参数时,拉伸强度和层间剪切强度受预制体密度影响显著;Fan S W 等<sup>[18]</sup>对刹车片 3D 针刺 C/SiC 复合材料进行了微观构造和三点弯曲试验研究,发现材料在破坏之前表现出显著的非线性力学行为,其层间结合作用使得试样在破坏之后没有分层;邓娟利等<sup>[19]</sup>研究了 3D 针刺 C/SiC 复合材料无纬布纤维方向对材料力学性能的影响,认为面内剪切强度和冲击韧性随无纬布纤维方向与试样长度方向的夹角  $\theta(0^\circ\sim 45^\circ)$  增大而增大;樊凯等<sup>[20]</sup>研究了针刺密度对三维碳毡增强树脂碳复合材料力学性能的影响;高晓菊等<sup>[21]</sup>研究了制备工艺对三维针刺 C/SiC 复合材料层向压缩力学性能的影响。目前,缺少针对 3D 针刺 C/SiC 复合材料缺口形式及缺口与针刺分布方向对冲击断裂韧性影响的分析。

本文采用夏比冲击试验测定 3D 针刺 C/SiC 复合材料的断裂韧性,研究其处于 U 型、V 型缺口分别在针刺平行、垂直的不同分布方向时对冲击断裂韧性的影响,并通过扫描式电子显微镜及光学显微镜等手段详细分析断口形貌。

## 1 试验材料及试验方法

### 1.1 试验材料与试样

3D 针刺 C/SiC 复合材料是由  $0^\circ$  无纬布纤维铺层、 $90^\circ$  无纬布纤维铺层、短切纤维网胎以及针刺纤维束组成。无纬布铺层中纤维是主承力单元,短切纤维网胎层中纤维含量低而且由杂乱无章的短纤维组成,几乎无承载能力<sup>[19]</sup>。本文中的 3D 针刺 C/SiC 复合材料的预制体是准三维 PAN 基 T700 碳纤维针刺整体毡,其结构如图 1 所示。3D 针刺 C/SiC 复合材料利用化学气相渗透法 (Chemical Vapor Infiltration, 简称 CVI) 制备。首先将预制体的碳纤维表面先沉积一层热解炭,然后以甲基三氯硅烷  $\text{CH}_3\text{SiCl}_3$  为气源,以  $\text{H}_2$  和 Ar 作为稀释气和

载气,在900~1200℃,几至几百千帕的气压下沉积SiC<sup>[22-23]</sup>。

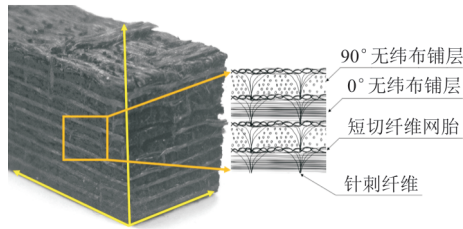
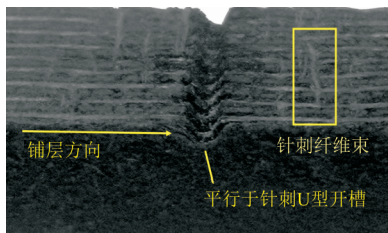
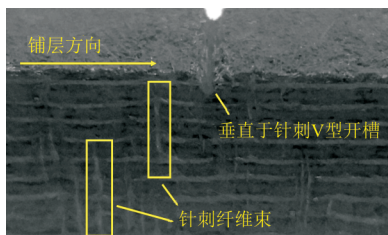


图1 3D针刺C/SiC复合材料结构示意图  
Fig. 1 3D needle C/SiC composite structure diagram

制备好3D针刺C/SiC复合材料毛坯后,将复合材料切割为尺寸为55 mm×10 mm×10 mm的试样,并在试样中间部位开槽,包括V型和U型,如图2所示。依据GB/T 229的规定,在试样的中间段作U形及V形缺口,V形缺口应有45°夹角,其深度为2 mm,底部曲率半径为0.25 mm;U形缺口深度为2 mm,底部曲率半径为1 mm<sup>[24]</sup>。其中,又分为开槽方向平行、垂直于法向针刺纤维两种,因此针对3D针刺C/SiC复合材料共计4种不同缺口的敏感性试验。以法向针刺纤维的方向为基准,定义缺口在平行于针刺纤维方向的试样为平行试样(V//,U//),垂直于针刺纤维方向的试样为垂直试样(V⊥,U⊥)。



(a) 平行试样



(b) 垂直试样

图2 平行试样与垂直试样示意图  
Fig. 2 Parallel and vertical patterns

## 1.2 试验方法

采用夏比冲击试验(Charpy Impact Test)测定

3D针刺复合材料抗缺口敏感性(韧性)的试验。使用SANS ZBC-4B型夏比摆锤冲击试验机进行试验,如图3所示。摆锤刀口以5.2~5.4 m/s线速率沿缺口方向冲击试样,试验机刀刃半径为2 mm,跨距为40 mm,分别对四种不同试样进行多次测试。冲击结束后,使用光学显微镜和扫描式电子显微镜(SEM)观察试样的断口形貌。

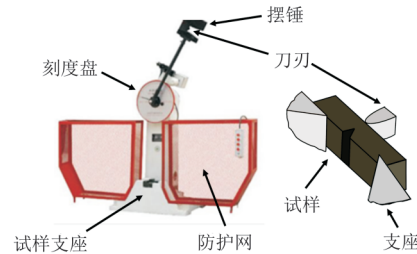


图3 SANS ZBC-4B型夏比摆锤冲击试验机与试样示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of SANS ZBC-4B Charpy pendulum impact testing machine and sample

通过上述试验方法和设备对四种不同缺口类型的复合材料试样进行敏感性试验研究。分别对V//(5个)、U//(5个)、V⊥(5个)和U⊥(5个)四种不同缺口共计20个试样进行冲击试验。冲击过程中记录材料断裂所吸收的冲击能量并计算断裂韧性值。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 断裂韧性影响规律

冲击过程中记录材料断裂所吸收的冲击能量并计算临界断裂韧性值,每组五个试验样本断裂韧性柱状图如图4所示,并计算每组试验样本临界断裂韧性值的均值与标准差,即图4中黑色误差棒,误差棒中点为均值,上下两端为“均值±标准差”。

(1) 缺口线与针刺相对位置对断裂韧性的影响:U⊥试样的断裂韧性显著高于U//试样,而V⊥试样与V//的断裂韧性差异不明显。因此,对于U型缺口试样,平行针刺的缺口试样易断,断裂韧性相较于垂直针刺缺口的试样低。

(2) 分别对比平行缺口和垂直缺口试样中的U型和V型的断裂韧性,得出断裂韧性平均水平从高到低为:U⊥、V//、V⊥、U//。

分散性的角度看:U⊥与U//的分散性明显小

于V⊥与V//,且V型试样中平行/垂直两类分散区域大部分重合,而U型试样中平行/垂直两类分散区域差距较远,没有交集。

从断裂韧性的平均水平看:U型试样中的平行/垂直两类均值差别较大,而V型试样中的平行/垂直两类均值差别较小。

即U型试样相较于V型试样对缺口线与针刺相对位置(平行/垂直)更为敏感。

(3) 由断裂韧性值分散性较大可知,按照金属断裂韧性GB/T 229标准2 mm的缺口<sup>[24]</sup>深度进行测试,在缺口为2 mm的情况下,该类材料的断裂韧性分散性较大,建议加深缺口深度。

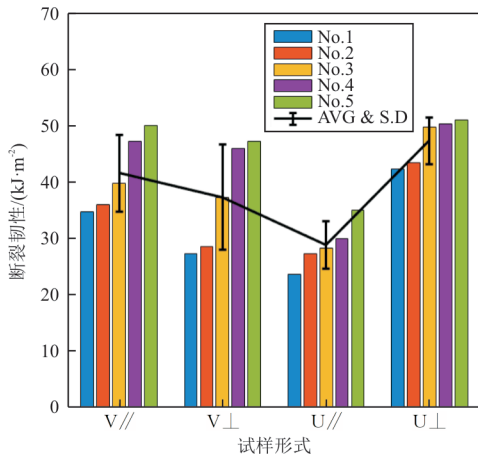


图4 四种试样的断裂韧性平均水平与分散性  
Fig. 4 Average level of fracture toughness and dispersion of four kinds of samples

## 2.2 断口宏观分析

为了对比缺口线与针刺相互垂直和平行的不同,选取临界冲击能量相近的四种不同试样,进行宏观断口观测,如图5~图8所示,可以看出:

(1) 缺口线与针刺相互垂直试样的断口相对较为平整,没有或者只有很少的纤维簇拔出现象,试样断口更多的表现出倾斜截面,较多的纤维簇整体剪断(如图5(a)、图5(b)和图6(b)所示)。

(2) 缺口线与针刺相互平行试样断面平行于缺口所在平面,拔出纤维束长而多;而垂直试样的断面是倾斜截面,拔出的纤维束短而少(如图5(c)、图5(d)和图6(a)所示)。因此垂直试样拥有更长的裂纹或断裂面积使其吸收更多能量,表现出更强的断裂韧性。

(3) 缺口线与针刺相互垂直的试样伴随有明

显的复合材料的层间破坏现象,且与U型缺口或V型缺口无关,所有垂直缺口试样均发生分层现象(如图7所示)。相较于平行缺口试样(如图8所示),均未发生层间破坏现象。

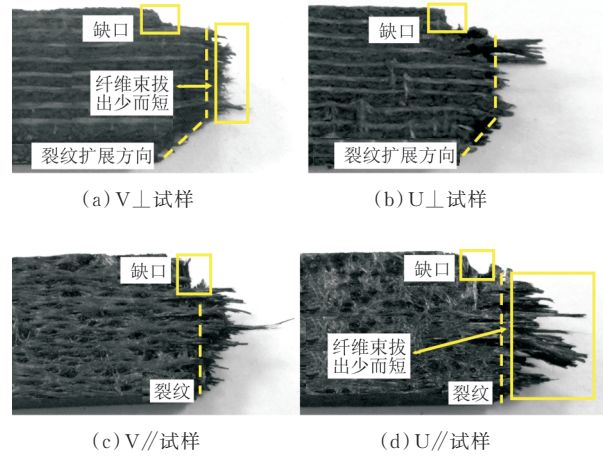


图5 四个样本断口侧视图  
Fig. 5 Fracture side views of four samples

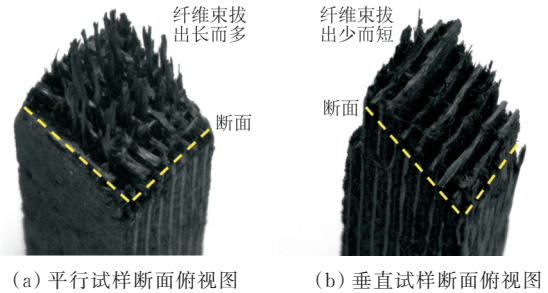


图6 平行与垂直两种试样断面俯视图  
Fig. 6 Top view of two kinds of sample sections: parallel and vertical

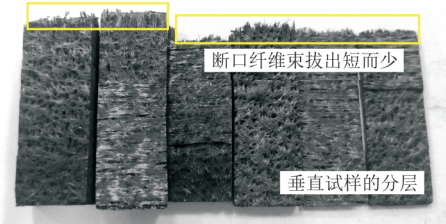


图7 垂直试样的分层现象  
Fig. 7 The stratification of vertical specimens

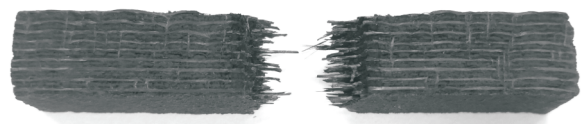


图8 平行试样无分层现象  
Fig. 8 No delamination in parallel samples

### 2.3 断口细观分析

缺口线与针刺相互平行的试样如图9所示,由于试样受到的是垂直于针刺纤维束方向的冲击,同时垂直于 $0^\circ$ 无纬布纤维铺层方向,而平行于 $90^\circ$ 无纬布纤维铺层方向。

从图9可以看出:

(1) 针刺纤维束在断口可见,但无明显断裂,由于出现的针刺纤维束打断了 $0^\circ$ 无纬布纤维铺层。试样在针刺纤维束和 $0^\circ$ 无纬布纤维铺层相交处最薄弱,裂纹沿其扩展。

(2) 纤维束在垂直方向上承载能力差,故表现为多数 $0^\circ$ 铺层剪切破坏, $90^\circ$ 铺层较为完好的现象,即 $90^\circ$ 铺层承载小。

(3) 平行试样中裂纹是沿着距离缺口最近的针刺纤维束所在的部位进行扩展的,可通过增加材料每个针刺纤维间隔的距离来增大裂纹扩展路径,即增大断裂吸收能量,以提高其断裂韧性。

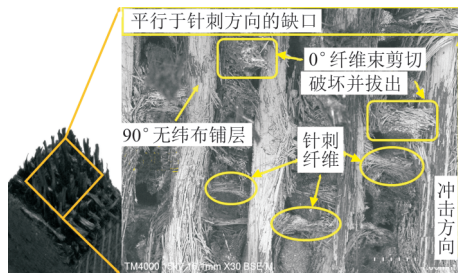


图9 平行试样的细观观察

Fig. 9 Microscopic observation of parallel specimens

缺口线与针刺相互垂直的试样如图10所示,可以清楚观察到针刺纤维束的断裂,以及 $90^\circ$ 无纬布纤维铺层剪切破坏,由于冲击来自于平行于针刺纤维束方向,且同时垂直于 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 无纬布纤维铺层。针刺纤维束与 $90^\circ$ 纤维束交叉的地方最薄弱,因此针刺纤维束剪切破坏,且交叉点附近的 $0^\circ$ 与 $90^\circ$ 无纬布铺层也大量断裂。

故垂直试样中,针刺纤维束与 $90^\circ$ 纤维束交叉的地方最薄弱,裂纹沿其扩展,三个方向的纤维束均承载冲击,因此垂直试样断裂韧性更高。且由于针刺纤维束断裂很多,层间结合力减弱,很容易发生如图7所示的宏观分层现象。

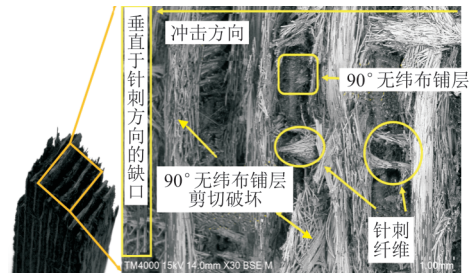


图10 垂直试样的细观观察

Fig. 10 Microscopic observation of vertical specimens

### 2.4 断口微观分析

根据断口的宏观、细观分析可知,缺口线与针刺相对位置平行和垂直时表现出显著不同的断裂特性。进而在SEM(扫描式电子显微镜)下进行微观分析,平行试样与垂直试样断口的微观图如图11~图12所示,可以看出:无论垂直还是平行的情况,断口均较为平整,存在基体不致密区的 $0^\circ$ 纤维剪切断裂、基体致密区纤维—基体界面脱粘和纤维拔出现象。

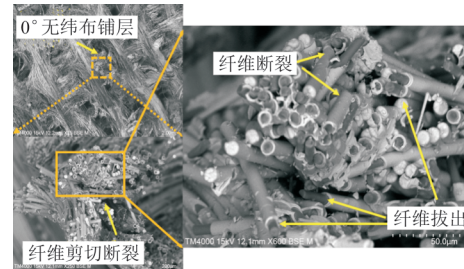


图11 平行试样断口微观图

Fig. 11 Micrograph of parallel specimen fracture

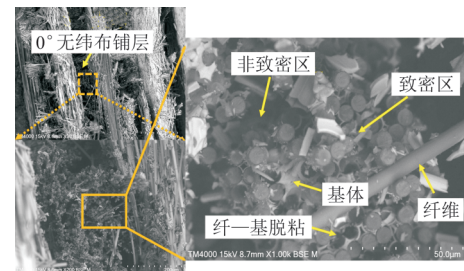


图12 垂直试样断口微观图

Fig. 12 Micrograph of vertical specimen fracture

## 3 结论

(1) 3D针刺C/SiC复合材料的断裂韧性U型试样相较于V型试样对缺口线与针刺相对位置

(平行/垂直)更为敏感,断裂韧性值分散性较大。按照金属断裂韧性标准 2 mm 的缺口深度进行测试,缺口所致剪切面积的减小不足以掩盖 3D 针刺 C/SiC 复合材料剪切断裂的分散性,故建议 3D 针刺 C/SiC 复合材料冲击断裂韧性标准试样应加深缺口深度。

(2) 3D 针刺 C/SiC 复合材料的断裂韧性与针刺纤维束的分布有关,针刺纤维束与 0° 和 90° 经纬铺层交叉部位最薄弱,裂纹会沿其扩展。

(3) 缺口线与针刺相互平行的试样的断面平行于缺口所在平面,且纤维束拔出长而多;而缺口线与针刺相互垂直的试样的断面是倾斜截面,拔出的纤维束短而少,且由于垂直试样中的针刺纤维束被严重破坏,其分层现象十分普遍,而平行试样不存在此现象。

### 参 考 文 献

- [1] 陈玉峰,洪长青,胡成龙,等. 空天飞行器用热防护陶瓷材料[J]. 现代技术陶瓷, 2017, 38(5): 311-390.  
CHEN Yufeng, HONG Changqing, HU Chenglong, et al. Ceramic-based thermal protection materials for aerospace vehicles[J]. *Advanced Ceramics*, 2017, 38(5): 311-390. (in Chinese)
- [2] 刘斌,高一迪,谭志勇,等. 二维叠层 C/SiC 复合材料低能量冲击损伤实验[J]. 航空学报, 2021, 42(2): 116-126.  
LIU Bin, GAO Yidi, TAN Zhiyong, et al. Low energy level impact damage on 2D C/SiC composites: experimental study[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(2): 116-126. (in Chinese)
- [3] ZHANG Hao. A small piece of plastic foam destroyed the Columbia space shuttle, killing seven astronauts [EB/OL]. (2017-09-06) [2021-05-12]. <https://www.21ic.com/chongdian/crazy/2017-09-06/736951.html>.
- [4] 徐世南,吴催生. 高超声速飞行器热防护结构研究进展[J]. 飞航导弹, 2019(4): 48-55.  
XU Shinan, WU Cuisheng. Research progress of thermal protection structure for hypersonic vehicle[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2019(4): 48-55. (in Chinese)
- [5] LI Xuqin, TAN Zhiyong, ZHANG Yi, et al. Shear behaviors and failure mechanisms of 2D C/SiC pins prepared by chemical vapor infiltration [J]. *Ceramics International*, 2020, 46(10): 16693-16699.
- [6] LI Xuqin, CHEN Xu, CHEN Jingyi, et al. Bearing behaviors and failure mechanisms of 2D C/SiC plate with an open hole[J]. *Ceramics International*, 2020, 47(1): 1407-1413.
- [7] 田凌寒,张强,李逢舟. 碳化硅陶瓷基复合材料在固冲发动机上的应用[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(5): 72-75.  
TIAN Linghan, ZHANG Qiang, LI Fengzhou. Application of silicon carbide based composite in solid propellant ramjet [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2020, 40(5): 72-75. (in Chinese)
- [8] 张锦化. 莫来石晶须的制备、生长机理及其在陶瓷增韧中的应用[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.  
ZHANG Jinhua. Preparation, growth mechanism of mullite whiskers and their enhancement effect on ceramic matrix composites[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2012. (in Chinese)
- [9] 陈振. 针刺 C/C-SiC 复合材料双轴失效机制及高温拉伸性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.  
CHEN Zhen. Biaxial failure mechanism and high temperature tensile properties of needled C/C-SiC composite [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [10] 谢军波. 针刺预制体工艺参数建模及复合材料本构关系研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
XIE Junbo. Parametric modeling of needling process and constitutive relationship of needled composite [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [11] 姚冬梅,苏红,赵景鹏,等. 预制体及基体对 C/C 复合材料性能的影响[J]. 固体火箭技术, 2007, 30(1): 64-67.  
YAO Dongmei, SU Hong, ZHAO Jingpeng, et al. The effects of preform and matrix on properties of C/C composite [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2007, 30(1): 64-67. (in Chinese)
- [12] LEE S H. Mechanical and impact properties of needle punched nonwoven composites [J]. *Journal of Composite Materials*, 2000, 34(10): 1-5.
- [13] KIM J, MASATOSHI S, HARUKI K, et al. Mechanical properties of woven laminates and felt composites using carbon fibers, part 1: in-plane properties [J]. *Composites Science and Technology*, 2004, 64(13): 2221-2229.
- [14] 刘建军,李铁虎,郝志彪,等. 针刺炭布/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): 299-302.  
LIU Jianjun, LI Tiehu, HAO Zhibiao, et al. Investigation on morphology and property of needled carbon cloth and web composite fabric [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2005, 28(4): 299-302. (in Chinese)
- [15] 刘建军,李铁虎,郝志彪,等. 针刺炭布/网胎复合织物中的纤维转移和损伤研究[J]. 炭素技术, 2008, 27(5): 13-15.  
LIU Jianjun, LI Tiehu, HAO Zhibiao, et al. Study on fiber transfer and damage of composite fabric made by needle punched carbon cloth and web [J]. *Carbon Techniques*, 2008, 27(5): 13-15. (in Chinese)
- [16] 严科飞,张程煜,乔生儒,等. C/C 和 C/SiC 复合材料的夏比冲击性能研究[J]. 航空材料学报, 2011, 31(2): 95-98.  
YAN Kefei, ZHANG Chengyu, QIAO Shengru, et al. Charpy impact properties of C/C and C/SiC composites [J].

- Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(2): 95-98. (in Chinese)
- [17] 郑金煌, 李贺军, 崔红, 等. 针刺预制体参数对 C/C 复合材料力学性能的影响[J]. 固体火箭技术, 2017, 40(2): 221-227.  
ZHENG Jinhuang, LI Hejun, CUI Hong, et al. Effect of needle-punched preform parameters on the mechanical properties of carbon/carbon composites [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2017, 40(2): 221-227. (in Chinese)
- [18] FAN S W, XU Y D, ZHANG L T, et al. Three-dimensional needled carbon/silicon carbide composites with high friction performance [J]. Materials Science & Engineering A, 2007, 467(1): 1-11.
- [19] 邓娟利, 范尚武, 成来飞, 等. 三维针刺 C/SiC 复合材料无纬布纤维方向对材料力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(3): 571-574.  
DENG Juanli, FAN Shangwu, CHENG Laifei, et al. Effect of direction of fibers in the non-woven cloth in 3D needled C/SiC composites on the mechanical performance [J]. Bulletin of The Chinese Ceramic Society, 2012, 31(3): 571-574. (in Chinese)
- [20] 樊凯, 卢雪峰, 张典堂, 等. 针刺密度对三维碳毡增强树脂炭复合材料力学性能的影响[J]. 材料导报, 2019, 33(14): 2450-2455.  
FAN Kai, LU Xuefeng, ZHANG Diantang, et al. Effect of needle density on mechanical properties of three-dimensional carbon felt reinforced resin-based carbon composites [J]. Materials Reports, 2019, 33(14): 2450-2455. (in Chinese)
- [21] 高晓菊, 成来飞, 燕东明, 等. 制备工艺对三维针刺 C/SiC 层向动态压缩性能的影响[J]. 固体火箭技术, 2016, 39(1): 95-99, 105.  
GAO Xiaoju, CHENG Laifei, YAN Dongming, et al. Effect of preparation process on layer-directional dynamic compressive properties of 3N C/SiC composites [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2016, 39(1): 95-99, 105. (in Chinese)
- [22] 殷晓光. C/SiC 陶瓷基复合材料的力学及高温性能研究 [D]. 北京: 清华大学, 2011.  
YIN Xiaoguang. Study on mechanic and high-temperature properties of C/SiC ceramic based composites [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011. (in Chinese)
- [23] 万帆. 气相渗硅制备 C/C-SiC 复合材料的工艺、结构及力学损伤机理研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.  
WAN Fan. Investigation on the fabrication technology, microstructure and mechanical damage mechanism of C/C-SiC composites fabricated by gaseous silicon infiltration [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019. (in Chinese)
- [24] 中国钢铁研究总院. 金属材料夏比摆锤冲击试验方法: GB/T 229—2020[S]. 北京: 中国钢铁研究总院, 2020.  
CISAI. Metallic materials: Charpy pendulum impact test method: GB/T 229—2020[S]. Beijing: CISAI, 2020. (in Chinese)

#### 作者简介:

刘斌(1986—),男,博士,副研究员。主要研究方向:飞行器结构设计、复合材料损伤力学、陶瓷基复合材料力学。

安乾军(1999—),男,本科生。主要研究方向:飞行器设计。

钟金桂(1999—),男,本科生。主要研究方向:飞行器设计。

张毅(1983—),男,博士,助理研究员。主要研究方向:陶瓷基复合材料。

谭志勇(1965—),男,博士,研究员。主要研究方向:复合材料结构力学。

(编辑:丛艳娟)