

# 三维纺织复合材料热-力学性能研究进展

李存静 王晓旭 刘晓东 杨文韬 张典堂

(江南大学生态纺织教育部重点实验室, 无锡 214122)

**文 摘** 三维纺织复合材料具有优异的力学性能、可设计性强和耐极端环境等优点,在航空航天领域有着广泛应用。为深入了解应用于高温环境中三维纺织复合材料的结构体系和力学行为,本文从三维纺织结构出发,综述了三维纺织复合材料结构类型及其在航空航天领域上的应用;总结了三维纺织复合材料成型工艺和结构特征;分析了三维纺织复合材料热-力学性能的研究进展情况;提出了未来的研究重点和需解决的关键问题,以期为新一代三维纺织复合材料的耐高温/承载设计、制造和应用提供依据。

**关键词** 三维纺织复合材料, 结构类型, 成型工艺, 热-力学性能

中图分类号:TB33

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2024.04.001

## Research Progress on Thermo-mechanical Properties of Three-dimensional Textile Composites

LI Cunjing WANG Xiaoxu LIU Xiaodong YANG Wentao ZHANG Diantang

(Key Laboratory of Education Ministry of Eco-Textiles, Jiangnan University, Wuxi 214122)

**Abstract** Three-dimensional textile composites are widely used in the aerospace field due to their excellent mechanical properties, strong designability and resistance to extreme environments. In order to deeply understand the structural system and mechanical behavior of three-dimensional textile composites applied in high temperature environments, this paper starts from the three-dimensional textile structure and reviews the structural types of three-dimensional textile composites and their applications in the aerospace field. The molding process and structural characteristics of three-dimensional textile composites are summarized. The research progress of thermo-mechanical properties of three-dimensional textile composites is analyzed. Future research focus and key issues to be solved are proposed in order to provide a basis for the design, manufacturing and application of high temperature resistance/load bearing of a new generation of three-dimensional textile composites.

**Key words** Three-dimensional textile composites, Type of structure, Molding process, Thermo-mechanical properties

### 0 引言

航空航天用装备部件在服役过程中常处于极端热-力耦合环境中,例如超高速飞行器以高马赫数飞行时,气动加热产生的温度高达1 800 °C;火箭发动机工作时,燃烧室产生的高速热流冲刷喷管,烧蚀最苛刻的喉衬部位温度可超过2 000 °C,这对材料的耐高温及承载性能提出了极为严苛的要求<sup>[1]</sup>。传统的航空热端高温部件材料大多采用金属合金或层合复

合材料,并在表面涂覆涂层来实现防热,这种结构存在质量大、隔热差以及耐用性难保证等缺点<sup>[2-3]</sup>。近年来,三维纺织复合材料由于其丰富的结构设计性、优异的热-力性能和整体近净成形等优势,可实现不同服役环境下的结构-功能一体化,已成为超高速飞行器、运载火箭和卫星等耐高温领域的理想候选材料<sup>[4-6]</sup>。

本文以三维纺织结构为研究对象,综述三维纺

收稿日期:2023-04-18

基金项目:国家自然科学基金(11702115, 12072131);江苏省优秀青年基金项目(BK20211583)

第一作者简介:李存静,1999年出生,硕士研究生,主要从事三维纺织复合材料力学行为研究工作。E-mail:1305562972@qq.com

通信作者:张典堂,1986年出生,博士,研究员,主要从事先进纺织复合材料设计及制造工作。E-mail:zhangdiantang@jiangnan.edu.cn

织复合材料结构类型和三维纺织复合材料在航空航天领域的应用;总结三维纺织复合材料工艺方法和结构特征;分析三维纺织复合材料热-力学性能的研究进展情况;提出未来的研究重点和需解决的关键问题,以期为新一代三维纺织复合材料的耐高温/承载设计、制造和应用提供依据。

### 1 三维纺织复合材料结构及应用

目前,用于航空航天热端高温部件的三维纺织复合材料结构包括三维机织、三维编织、三维针刺、三维缝合等。各结构下三维纺织复合材料性能、工艺及成本方面各有千秋,其使用需要结合构件服役特征<sup>[5,7]</sup>。图1分别示出了三维纺织复合材料在航空航天热端部件上的应用及服役温度。随着对空天飞行器性能需求的提升以及服役环境的越发苛刻,三维纺织复合材料构件正趋向于大型化、复杂化和集成化。

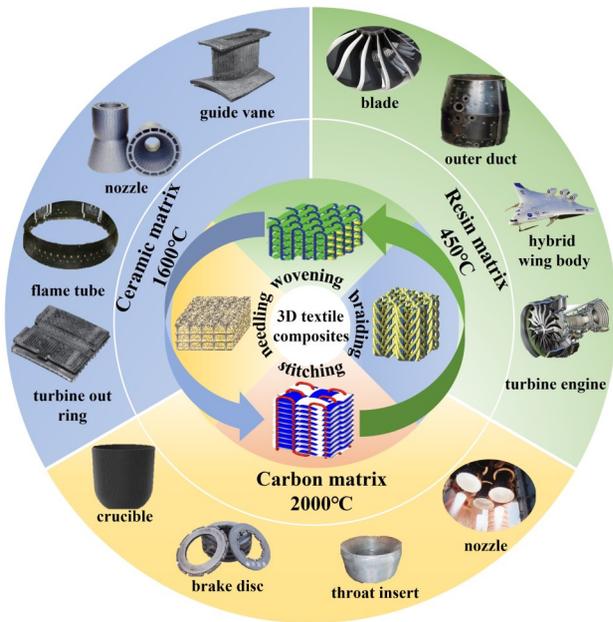


图1 三维纺织复合材料结构及热端部件应用

Fig. 1 Three-dimensional textile composite structure and hot end component application

### 2 三维纺织复合材料体系

三维纺织复合材料体系可依据基体类型分为三维纺织树脂基复合材料、三维纺织碳基复合材料和三维纺织陶瓷基复合材料,表1分别列举了各体系下典型复合材料的热-力学性能指标及特点。可见,三维纺织树脂基复合材料具有较低的密度和热导率,但由于树脂在高温环境中易分解,一般只在450℃以下环境中使用。三维纺织碳基复合材料在无氧环境下其力学性能随温度升高而升高,最高可在2000℃环境中使用,但在有氧环境下碳基体极易被氧化。三维纺织陶瓷基复合材料可在1600℃环境中使用,且相较于三维纺织树脂基和碳基复合材料,陶瓷基复

合材料具有更高的强度和模量,但存在脆性较大的问题。轻量化和高性能是目前三维纺织复合材料研究的主要方向。因此,如何结合服役特征,充分发挥三维纺织复合材料良好的结构设计性,选择相应的结构和工艺至关重要。

表1 各基体三维纺织复合材料基本信息<sup>[1,8-9]</sup>

Tab. 1 Basic information of three-dimensional textile composites for each matrix<sup>[1,8-9]</sup>

基体	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$E/\text{GPa}$	$\sigma_{\text{max}}/\text{MPa}$	$\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	特点
树脂	1.2~1.7	30~87	281~338	0.3~1.2	易成形、质轻、脆性大
碳	1.6~1.98	50~70	98~235	34~68	耐高温、高强度、易氧化
陶瓷	1.7~2.4	111~420	198~312	11~20	耐烧蚀、高强度、脆性大

#### 2.1 三维纺织树脂基复合材料

模压、缠绕、热压罐以及树脂传递模塑等工艺可以制备三维纺织树脂基复合材料。目前,常用的树脂类型包括环氧、双马来酰亚胺、聚酰亚胺和酚醛等,各类树脂基体热物理性能及特点如图2所示。其中,依据三维纺织树脂基复合材料在高温环境中服役的机理,主要分为烧蚀型和非烧蚀型两种。

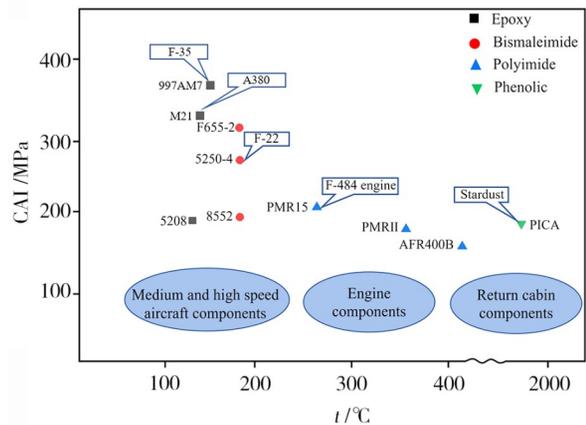


图2 高性能树脂使用温度与韧性<sup>[10]</sup>

Fig. 2 Usage temperature and toughness of high-performance resins<sup>[10]</sup>

三维纺织酚醛基复合材料是烧蚀型的典型代表,其工作原理是利用基体高温烧蚀产生质量损耗,从而带走大量热量。同时,烧蚀后形成的碳保护层也会阻碍热量进入到材料内部<sup>[11]</sup>,其烧蚀机理如图3所示。目前,学者们主要关注如何改善酚醛树脂烧蚀性能,采取的方式主要包括物理改性和化学改性<sup>[12]</sup>。物理改性是在酚醛树脂基体中引入碳化硼、纳米材料和炭黑等无机粒子作为功能填料,借助无机粒子的高温稳定性和熔融保护效应等机制,提高复合材料的抗烧蚀性能。杨滔等<sup>[13]</sup>采用物理共混的

方式将纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$  加入到酚醛树脂中制备了三维机织石英/酚醛复合材料。研究发现,改性后的复合材料质量烧蚀率和热导率分别降至  $9 \text{ mg/s}$  和  $0.657 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。FENG 等<sup>[14]</sup>研究了硅化物无机粒子对碳/酚醛复合材料烧蚀性能影响。研究表明,烧蚀过程中引入的  $\text{TaSi}_2$  会在酚醛碳化层表面形成致密的陶瓷层,显著提高了复合材料的抗气流冲刷能力。化学改性是在酚醛树脂的分子链中引入芳环、无机元素、金属元素或马来酰亚胺基团等来改变酚醛树脂的结构,从而提高酚醛树脂的热稳定性以及烧蚀残碳率。其中,硼酚醛树脂是在树脂的分子结构中引入硼氧基团,从现有报道上看,硼酚醛树脂的热分解温度比普通酚醛树脂要高  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  以上,在  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  的高温烧蚀下树脂的残碳率可达到  $70\%$ 。高迪等<sup>[15]</sup>围绕三维编织碳/硼酚醛复合材料进行了压缩和烧蚀实验研究,证明了该复合材料具有良好的防热和承载性能。

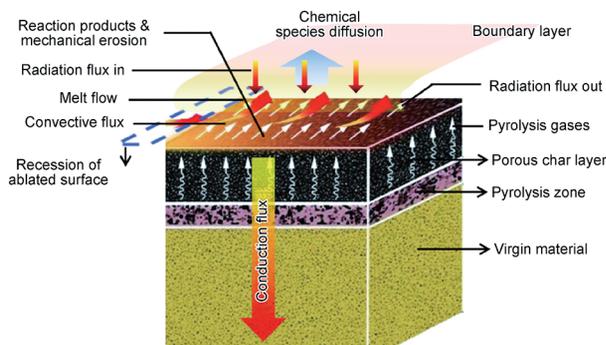


图3 酚醛树脂烧蚀机理<sup>[11]</sup>

Fig. 3 Ablation mechanism of phenolic resin<sup>[11]</sup>

三维纺织环氧、双马来酰亚胺和聚酰亚胺基复合材料是非烧蚀型的典型代表。这类树脂玻璃化转变温度较高,且高温下物理化学性质稳定。近年来,学者们主要关注此类三维纺织复合材料基体的增韧和高温力学性能的提升。目前,基体增韧形式主要包括橡胶弹性体增韧、热塑性树脂增韧和纳米粒子增韧等<sup>[16]</sup>。LEE 等<sup>[17]</sup>将热塑性聚醚砜树脂(PES)加入到环氧树脂中,研究发现,混合后的PES/环氧复合材料的断裂韧性及力学性能均有所提高,这主要归因于树脂间半互穿聚合物网络的良好分布和形成,如图4所示。在高温力学性能提升方面,主要对基体采取物理共混和化学共聚的方式,将改性剂与树脂进行物理混合或是将以嵌段、接枝的形式引入树脂基体来实现。增强体作为三维纺织树脂基复合材料另一个重要组成,同样决定着复合材料的热-力学性能。TARFAOUI 等<sup>[18]</sup>研究了二维铺层和三维机织碳/环氧复合材料在室温下的压缩力学性能,发现三维机织复合材料表现出更高的强度。李紫伦等<sup>[19]</sup>针对宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2024年 第4期

不同编织角的三维编织玻璃纤维/环氧复合材料薄壁管进行了高温轴向压缩力学性能研究,结果表明,温度对复合材料力学性能起到弱化作用,小编织角的复合材料压缩性能更优。王颖杰等<sup>[20]</sup>研究了不同衬经纤维束占比下三维机织碳/环氧复合材料的力学性能,发现随着衬经纤维束占比增加,三维机织复合材料的最大弯曲载荷增加,且不同衬经纤维束占比的试样弯曲性能对温度的敏感性不同。

此外,为进一步扩展三维纺织树脂基复合材料应用场景,解决树脂的耐高温性能有限的问题,通常采用隔热层和承载层相结合的方式。将力学性能优异且耐高温的材料置于外层,将耐热性能较差的材料置于内侧,有利于提高三维纺织树脂基复合材料耐高温及承载性能<sup>[21]</sup>。WANG 等<sup>[22]</sup>以陶瓷树脂为表层,酚醛树脂为内层,制备了具有表面致密化和渐变结构的石英纤维增强酚醛树脂气凝胶复合材料。性能测试结果表明,复合材料具有显著的压缩强度和良好的抗烧蚀性能。

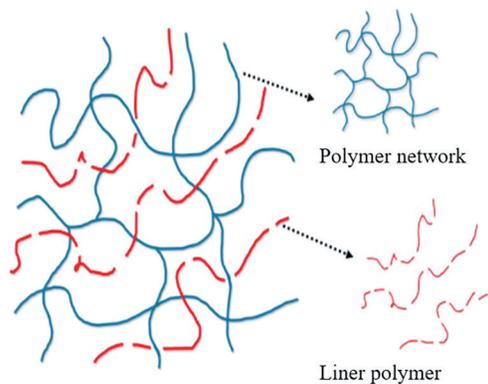


图4 半互穿聚合物网络<sup>[17]</sup>

Fig. 4 Semi-interpenetrating polymer network<sup>[17]</sup>

可以看出,改性树脂基体对提高复合材料热-力学性能和抗烧蚀性能具有重要作用,但存在操作复杂和改性效果不佳等问题。增强体作为三维纺织树脂基复合材料另一个组成,同样对复合材料的热-力学性能有着重要影响。因此,合理选择三维纺织树脂基复合材料结构或设计其他新型结构,对提高复合材料综合性能、拓展其应用领域,具有重要意义。

## 2.2 三维纺织碳基复合材料

三维纺织碳基复合材料一般是以树脂碳、热解碳和沥青碳为基体,并通过化学气相沉积(CVD)、化学气相渗透(CVI)以及先驱体浸渍裂解(PIP)等工艺制备。三维纺织碳/碳(C/C)复合材料是最为常见的碳基复合材料,也是极少数能在  $2000 \text{ }^\circ\text{C}$  以上环境中使用的结构-功能材料<sup>[22]</sup>。

增强体结构直接决定着三维纺织 C/C 复合材料的力学性能,目前国内已成功研制了二维铺层、三维

缝合、三维针刺、三维机织等结构的C/C复合材料<sup>[23]</sup>。其中,二维铺层结构在厚度方向没有连接,层间力学性能较差,在实际应用时容易产生层间破坏。三维针刺和缝合结构C/C复合材料由于刺针的穿插会对碳布纤维有一定的损伤,复合材料的面内力学性能会有所降低。同时,由于纤维束在厚度方向上的转移,层间强度得到加强。三维机织结构的C/C复合材料具有良好的整体性,其在各个方向上力学性能更为均衡。

基体氧化一直是制约三维纺织C/C复合材料在高温有氧环境服役的关键,通过基体改性技术,可以大幅提高三维纺织C/C复合材料的抗氧化和烧蚀性能<sup>[24]</sup>。碳基体的改性处理最早使用的是磷酸盐和硼化物,但此类物质耐高温性能有限,很难在超过1 000 °C环境中使用。为满足更高温度下的使用需求,后续又开发出硅化物改性材料,可满足1 300~1 650 °C环境下使用。此外,研究者们发现将高度难熔的过渡金属碳化物、氮化物和硼化物等作为基体改性剂,可大幅提高三维纺织C/C复合材料的使用温度和性能。CAI等<sup>[25]</sup>围绕三维针刺C/C复合材料,将SiC和B<sub>4</sub>C填料混合到复合材料基体中,研究了陶瓷填料对复合材料热物理性能的影响。研究发现,引入陶瓷填料后纤维/基体界面更加牢固,且在保持较低热膨胀率的同时提高了热导率。曾波等<sup>[26]</sup>研究了AlSiB和ZrC等耗散剂浸渗前后三维针刺和三维编织结构C/C复合材料力学性能及烧蚀性能变化。研究表明,加入耗散剂的C/C复合材料弯曲强度和压缩强度都有显著提升,且抗烧蚀性能也得到明显改善。

涂层改性三维纺织C/C复合材料的抗氧化和抗冲蚀性能一直被认为是最有效的办法,所使用的涂层通常为陶瓷材料。陈波等<sup>[27]</sup>针对三维编织C/C复合材料,在有无抗氧化涂层的情况下对复合材料的高温力学性能进行测试。结果表明,在700 °C下,有涂层的C/C复合材料的拉伸强度和模量以及抗疲劳性能普遍高于无涂层的C/C复合材料。XU等<sup>[28]</sup>针对C/C复合材料制备了一种新型的Hf基抗氧化涂层,并研究了复合材料在不同烧蚀条件下的烧蚀性能。结果发现,所制备的Hf基涂层C/C复合材料表面温度为1 616~2 037 °C,且具有较低的质量烧蚀率,该涂层可以在高温氧化条件下有效地保护C/C复合材料,如图5所示。

综上,学者们在三维纺织C/C复合材料的预制体结构、碳基体改性和抗氧化涂层等方面进行了大量研究,进一步拓展了三维纺织C/C复合材料在极端环境下的应用潜力。在此基础上,实现三维纺织C/C复合材料多次重复使用,调节其成本和性能之间的关

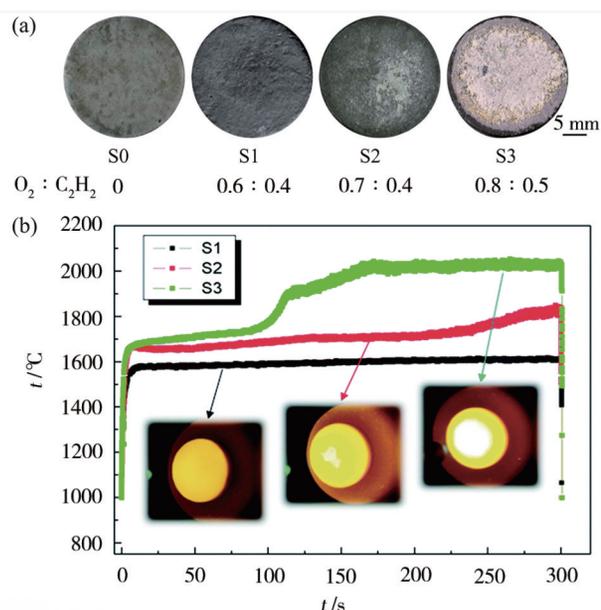


图5 Hf-C/C复合材料表面烧蚀形貌和温度<sup>[28]</sup>

Fig. 5 Surface ablation morphology and temperature of HF-C/C composite<sup>[28]</sup>

系,以期满足新型航天装备的发展需求。

### 2.3 三维纺织陶瓷基复合材料

三维纺织陶瓷基复合材料一般以SiC和SiO<sub>2</sub>陶瓷材料作为基体,并通过CVI、PIP、溶胶-凝胶法(sol-gel)和溶胶循环浸渍烧蚀法(SIS)等工艺制备。三维纺织陶瓷基复合材料在高温及烧蚀下仍然能够保持良好的使用性能,常见的三维纺织陶瓷基复合材料主要有C/SiC、SiC/SiC、C/SiO<sub>2</sub>和SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>等<sup>[29-30]</sup>。

制备工艺决定着基体孔隙以及致密化效果,从而决定陶瓷基三维纺织复合材料的韧性以及耐高温性能。LUO等<sup>[31]</sup>分别采用PIP和CVI工艺制备了三维编织SiC/SiC复合材料,研究了制备工艺对复合材料微观结构和弯曲力学性能的影响。研究表明,PIP制备的复合材料基体存在不规则裂纹;CVI制备的复合材料基体结合紧密,热处理后弯曲强度和模量基本保持不变,断裂形貌如图6所示。赵爽等<sup>[32]</sup>通过联合使用PIP和CVI工艺制备了三维机织和三维编织结构的SiC/SiC复合材料。结果表明,两者均有较高的孔隙率和较低的热导率,且使用两次CVI工艺的复合材料力学性能更好,这是因为CVI提高了材料的致密化程度,减少了内部孔隙,从而增加了纤维与基体间的结合作用。ZHANG等<sup>[33]</sup>采用硅溶胶浸渍烧蚀工艺制备了C/SiO<sub>2</sub>复合材料,并研究了不同浸渍-烧蚀周期的复合材料的微观结构、机械性能和渗透性。结果表明,复合材料机械性能和渗透性都可以通过浸渍-烧蚀循环进行优化。

在基体改性方面,研究者们发现引入玻璃相宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2024年 第4期

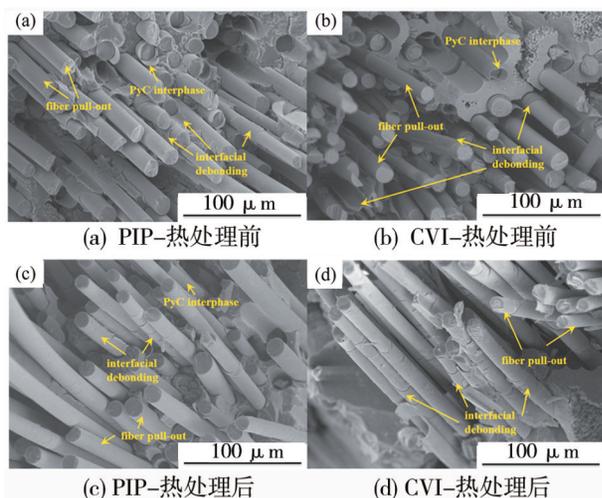


图6 SiC/SiC复合材料断口形貌<sup>[31]</sup>

Fig. 6 Fracture morphology of SiC/SiC composites<sup>[31]</sup>

( $B_xC_y$ 、SiBC、SiBCN、含B化合物等)的陶瓷基体会获得自愈效果<sup>[34]</sup>。在高温下,此类组分会被氧化,从而在陶瓷裂纹表面产生 $B_2O_3$ 或硼硅酸盐玻璃并存在体积膨胀现象。在上述两种因素的作用下,裂纹很快闭合,将氧气阻挡在外,不同玻璃相材料工作温度范围如图7所示。此外,在陶瓷基体中加入纳米粒子可以改善基体性质,从而起到增韧或是隔热效果。LAN等<sup>[35]</sup>对普通陶瓷材料和新型陶瓷纳米材料在 $1700\text{ }^\circ\text{C}$ 的高温环境下的隔热性能进行了研究。结果表明,陶瓷纳米材料混合结构的隔热效果比普通陶瓷材料的隔热效果高50%。张翠萍等<sup>[36]</sup>研究了纳米SiC颗粒对陶瓷材料组织与性能的影响。研究表明, Si纳米颗粒的加入可通过阻碍裂纹扩展来提高陶瓷基体的强度,制得的复合材料的断裂韧性提高了36%。

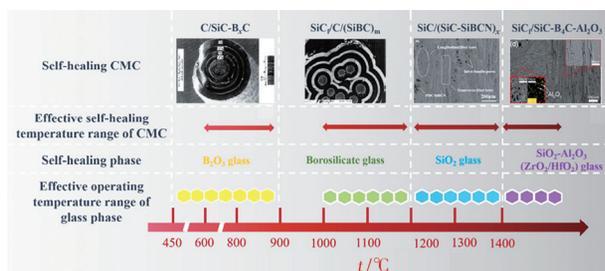


图7 各玻璃相材料自愈机理和有效工作温度范围<sup>[34]</sup>

Fig. 7 Self-healing mechanism and effective operating temperature range of each glass phase material<sup>[34]</sup>

纤维和基体之间的界面层起到保护纤维、有效传递载荷和调节纤维与基体之间热应力的作用,是决定三维纺织陶瓷基复合材料强韧性的关键微结构单元<sup>[37]</sup>。设计合适的纤维/基体界面可以避免纤维与基体之间形成强力粘结,有助于阻止界面处的微裂纹和偏转,并防止纤维增强材料的早期失效<sup>[38]</sup>。目前,层状晶体结构的热解碳(PyC)和六方氮化硼(h-

BN)是最常用的界面材料。ZHOU等<sup>[39]</sup>通过强制压力脉冲化学气相渗透工艺制备了 $(PyC/SiC)_n$ 多层界面,并分析了沉积条件对 $(PyC/SiC)_n$ 界面微观结构的影响。庞宝琳等<sup>[40]</sup>围绕着三维编织SiC/SiC复合材料,分别研究了无界面层、PyC和BN界面层对复合材料力学性能的影响。研究表明,PyC-SiC/SiC复合材料具有更高的断裂韧性,这与纤维/基体间作用力被PyC层削弱有关。段亚弟等<sup>[41]</sup>针对三维机织SiC/SiC复合材料,研究了PyC、PyC/SiC、BN、BN/SiC四种界面层体系对复合材料断裂韧性的影响。结果表明,界面层的引入能够有效偏转裂纹,从而改善复合材料的断裂韧性,且具有复合界面层的试样表现出更高的断裂韧性。

增强体结构作为三维纺织陶瓷基复合材料的内部骨架,对复合材料的力学性能具有重大影响。目前来看,二维陶瓷基复合材料在制备周期和成本方面存在着一定的优势,但其整体的力学性能较差;三维纺织陶瓷基复合材料采用一体化成型技术,材料整体性好、可设计性强。赵爽等<sup>[32]</sup>制备了三维机织和三维编织结构的SiC/SiC复合材料,对两者热-力性能以及微观结构进行了测试。结果表明,两者均有较高的孔隙率和较低的热导率,其中,三维编织结构复合材料的致密化程度更高,力学性能更好。关天茹等<sup>[42]</sup>围绕三维机织浅交弯联和浅交直联 $SiO_2/SiO_2$ 陶瓷基复合材料进行了拉伸、弯曲和剪切力学性能测试。结果表明,两种三维机织结构复合材料力学性能相差不大。蒋丽娟等<sup>[43]</sup>研究了不同编织体结构对三维编织SiC/SiC复合材料力学性能影响,研究表明,三维五向SiC/SiC复合材料因为z向纤维束的存在,其拉伸性能、强度、模量均高于三维四向SiC/SiC复合材料。

综上,通过完善基体制备工艺、改性陶瓷基体以及优化界面层的方式,实现了三维纺织陶瓷基复合材料的增韧以及耐高温性能的提升,进一步拓展了其在高温热结构材料方面的应用前景。但由于陶瓷材料存在制备温度高和不易加工等问题,很难制得形状复杂的三维纺织陶瓷基复合材料。此外,三维纺织陶瓷基复合材料较长的制备周期以及高昂的制备成本同样是需要重点解决的问题。

### 3 三维纺织复合材料热-力学性能研究进展

自20世纪起国内外学者便针对室温下三维纺织复合材料的结构参数以及动、静态载荷下的力学性能和典型破坏形式进行了大量的研究<sup>[44]</sup>。但三维纺织复合材料在实际服役过程中常处于极端温度环境下,由高温造成的三维纺织复合材料失效机理与常温下有较大不同。为明确温度效应作用下三维纺织

复合材料的失效演变机制, 研究者们通常采用实验和数值模拟相结合的方法。

### 3.1 三维纺织树脂基复合材料高温力学行为

#### 3.1.1 三维纺织树脂基复合材料实验研究

三维纺织树脂基复合材料在高温下的力学行为和损伤机理与常温下有很大不同, 对其进行高温下的力学实验研究具有重要的实践意义。LI等<sup>[45]</sup>针对三维编织碳/环氧复合材料, 研究了温度和编织角对其拉伸性能和破坏机理的影响。研究发现, 温度和编织角对三维六向编织复合材料的拉伸性能均有显著影响。随着温度和编织角度数的增加, 复合材料的拉伸强度和模量均逐渐减小。在高温下, 损伤模式主要是编织纤维多次剪切断裂、基质软化以及纤维束脱落。DANG等<sup>[46]</sup>探究了三维机织碳/环氧复合材料在室温和高温下的弯曲失效机制。研究表明, 温度对复合材料的弯曲性能有显著影响。常温下的载荷-位移曲线具有明显的线性特征, 纤维/基体界面脱粘和纤维断裂是材料的主要失效机制; 而高温下则表现出明显的非线性特征和较长的塑性阶段, 纤维断裂、基体屈服开裂和界面脱粘表现明显。LI等<sup>[47]</sup>基于不同加载模式和温度对三维编织碳/环氧复合材料压缩力学性能进行了研究。研究发现, 在三种加载方向模式下, 面外压缩性能最好, 纵向其次, 横向压缩性能最差。三维编织复合材料的失效机理随加载方式和温度的变化而变化。在面外压缩条件下, 复合材料表现出多个 $45^\circ$ 剪切破坏特征; 横向压缩下, 材料沿平面方向 $45^\circ$ 出现剪切断裂。在高温下, 纤维与基质之间的界面附着力明显降低, 剪切断裂特征仍然是主要的断裂特征。LI等<sup>[48]</sup>基于双缺口剪切试验研究了温度对三维机织碳/环氧复合材料剪切性能的影响。结果表明, 温度对层间剪切强度、变形模式和破坏机制有明显影响, 如图8所示。剪切强度随温度升高而降低, 这是由于高温引起树脂基体的软化和纤维/基体界面性能的退化所致。研究还发现,  $z$ 向纤维束能提高三维正交机织复合材料的抗分层性能, 特别是在高温条件下。

在实际应用中, 疲劳断裂是工程中最常见和最危险的断裂, 对三维纺织树脂基复合材料的抗疲劳性能进行深入研究, 以保证其长期使用时的安全性和稳定性<sup>[49]</sup>。ZUO等<sup>[50-51]</sup>在考虑编织角参数和温度效应的前提下, 对三维编织碳/环氧复合材料横向弯曲和纵向压缩疲劳行为进行了研究。结果表明, 温度较低时复合材料的抗疲劳性能更好, 纤维/基体界面剥离在高温下更加明显, 小编织角复合材料的抗疲劳性能优于大编织角复合材料, 高温下纤维和基体断裂最终导致复合材料失效。ZHAO等<sup>[52]</sup>在20、

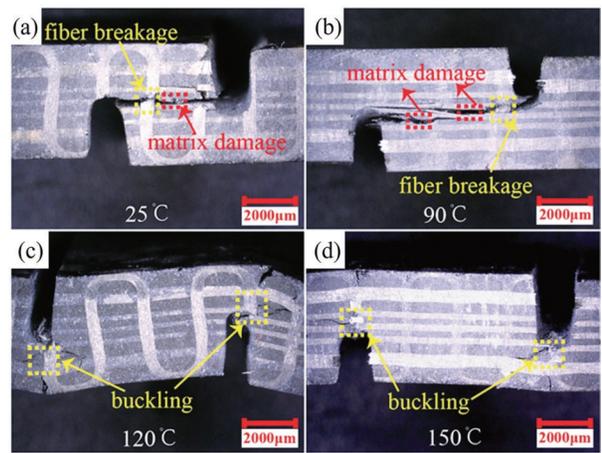


图8 三维机织碳/环氧复合材料层间剪切损伤形貌<sup>[48]</sup>

Fig. 8 Morphology of interlaminar shear damage of three-dimensional woven carbon/epoxy composites<sup>[48]</sup>

180和240 $^\circ\text{C}$ 温度条件下, 研究了三维机织碳/双马树脂复合材料经向拉伸疲劳性能。结果表明, 当温度低于180 $^\circ\text{C}$ , 随着温度的升高, 复合材料的热机械性能下降。在180 $^\circ\text{C}$ 时, 观察到以纤维为主的疲劳失效模式, 240 $^\circ\text{C}$ 与180 $^\circ\text{C}$ 热机械性能相近, 表明纤维状态对复合材料高温力学性能有重要影响。SONG等<sup>[53]</sup>围绕三维机织碳/双马复合材料, 在室温和高温下进行了纬向拉伸疲劳实验研究。研究表明, 随着温度升高, 基体软化, 复合材料疲劳寿命逐渐缩减, 且在高应力水平下, 疲劳载荷的影响比温度更重要。

综上, 三维纺织树脂基复合材料在高温及静态载荷下的疲劳失效分析和损伤机理研究居多, 而渐进损伤方面的研究还相对欠缺。因此, 搭建高温环境下材料渐进损伤表征平台, 厘清三维纺织树脂基复合材料过程失效机理, 对提高其安全性能具有重要意义。

#### 3.1.2 三维纺织树脂基复合材料数值模拟

针对三维纺织树脂基复合材料高温数值模拟, 学者们多利用细观力学方法对代表性体积单元(RVE)进行有限元分析。ZHAO等<sup>[52]</sup>在前面研究的基础上提出了一个温度相关的疲劳寿命预测模型, 来预测三维机织碳/双马复合材料25和180 $^\circ\text{C}$ 下的疲劳行为。该模型由温度渐进损伤建模方式发展而来, 能够预测疲劳寿命和损伤传播过程。SONG等<sup>[54]</sup>针对三维机织碳/双马复合材料, 基于经纬向纤维束几何关系、材料和编织参数, 建立了考虑界面和温度协同效应的热-力学预测单元模型, 预测了复合材料在20、180和240 $^\circ\text{C}$ 下力学性能和损伤扩展行为。WANG等<sup>[55]</sup>针对不同编织角的三维编织碳/环氧复合材料的高温压缩行为进行了研究。采用有限元方法计算了温度和编织角对压缩破坏机理和损伤形态的影响, 并与实验结果进行了比较。结果

表明,当编织角由大变小时,压缩破坏由韧性向脆性转变。高温下热应力改善了纵向压缩性能,但基本不改变复合材料的破坏模式。HE等<sup>[56]</sup>建立了一个多尺度模型[图9(a)]以揭示三维编织碳/环氧复合材料在高温下的失效机理。首先,基于不同温度下三维编织复合材料的拉伸和弯曲试验,标定了微尺度构件的温度相关特性,并建立了弹塑性损伤模型。然后,在微观分析的基础上,通过计算得到中尺度和宏观结构的力学和热膨胀特性,由此建立了随温度变化的力学行为的多尺度模型。最后,基于均质化过程和多尺度分析方法,依次分析了温度对三维编织复合材料微观、中观、宏观性能的影响,如图9(b)、9(c)所示。

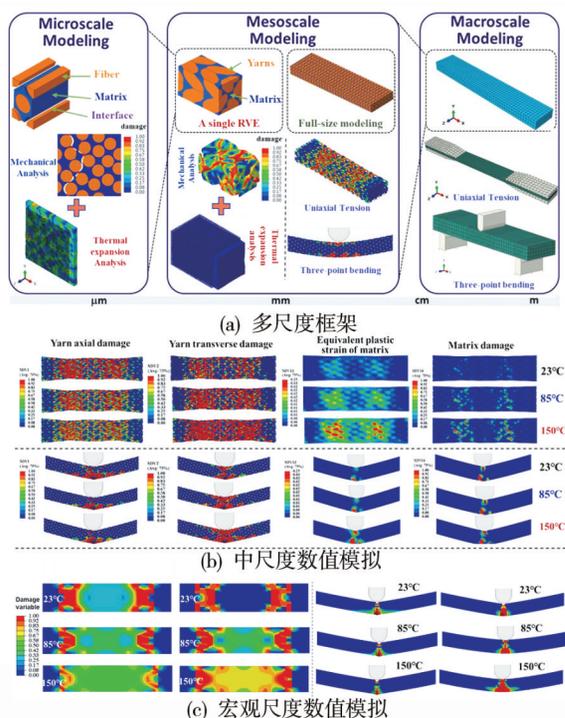


图9 多尺度框架和不同温度下拉伸和弯曲行为数值模拟<sup>[56]</sup>  
Fig. 9 Numerical simulation of tensile and bending behavior at different temperatures and multiscale frameworks<sup>[56]</sup>

综上,有限元方法被广泛用来预测三维编织树脂基复合材料的高温力学性能。但在模型构建时,通常将纤维束截面假设为圆形、椭圆形和多边形等,在一定程度上忽略了内部纤维束真实分布形态,很难进一步精确预测复合材料破坏及失效演变规律。此外,多尺度分析可以有效得到不同尺度间复合材料损伤和失效行为,但到目前为止,应用多尺度方法分析三维编织树脂基复合材料在高温下的力学损伤行为的研究还较少。因此,有必要借助计算机断层扫描(Micro-CT)图像技术等,建立精细化多尺度模型,进一步完善其在高温环境下的力学行为分析工作。

### 3.2 三维纺织碳基复合材料高温力学行为

#### 3.2.1 三维纺织碳基复合材料实验研究

三维纺织C/C复合材料力学性能随温度的升高而增强,研究其高温下的损伤机理和失效分析,对其安全服役具有重要意义。在实验研究方面,张波等<sup>[57]</sup>围绕三维针刺C/C复合材料,进行了室温和高温环境下的双切口剪切实验。结果表明,C/C复合材料在室温到1 800 °C内剪切强度随温度升高而增加。在室温下,C/C复合材料的破坏形式主要是纤维抽拔和断裂,呈现出塑性特征;高温下纤维与基体界面结合强度高,纤维拔出少,表现为脆性断裂。LI等<sup>[58-59]</sup>研究了三维针刺C/C复合材料在室温和高温环境下的压缩和弯曲行为,研究发现,C/C复合材料随着温度的升高氧化作用逐渐显著。在压缩实验中,当温度低于600 °C时,载荷-位移曲线具有明显的线弹性和脆性断裂特征,而在较高温度的曲线具有明显的非线性和塑性破坏特征;在弯曲实验中,低于400 °C的载荷-位移曲线表现出线性弹性和脆性断裂破坏,而高于500 °C的温度曲线表现出明显的韧性和塑性破坏。XIE等<sup>[60]</sup>研究了三维针刺C/C复合材料在不同温度下的高速冲击性能。结果发现,冲击速度对C/C复合材料抗冲击性能的影响比弹丸直径、测试温度和样品厚度更重要。随着温度从25 °C上升至1 206 °C,C/C复合材料的抗冲击性能逐渐增加,冲击后的相应残余强度增加了47%。

由于一些C/C复合材料部件,如圆盘和密封圈等,通常用于高速旋转部件和并承受动载荷,因此,研究C/C复合材料的动态力学性能至关重要。LI和JIN等<sup>[61-62]</sup>基于SHPB装置(图10),在室温和高温下对三维针刺C/C复合材料进行了纵向和横向的不同应变率压缩实验。研究表明,随着应变速率的增加,复合材料剪切破坏模式愈加明显。纵向破坏表现为基体压缩开裂,针刺纤维剪切断裂和基体分层主导着横向破坏。此外,在高应变率下,随着温度的升高,脆性破坏特征变得更加明显。并利用双线性拟合算法建立了不同温度下C/C复合材料的压缩强度与应变率之间的关系,可用于预测工程应用中C/C复合材料的压缩强度。

综上,目前学者们对三维纺织C/C复合材料的动、静态力学行为和失效机理进行了大量研究,并且发现高温下增强体和基体界面性能降低及基体损伤是材料失效的主要因素。同三维纺织树脂基复合材料一样,其高温下损伤表征极为困难,尤其是在渐进损伤的表征分析上。因此,有必要将先进表征手段AE(声发射)、DIC(数字图像相关)技术运用到三维纺织C/C复合材料高温力学性能表征上,厘清过程失效机理。

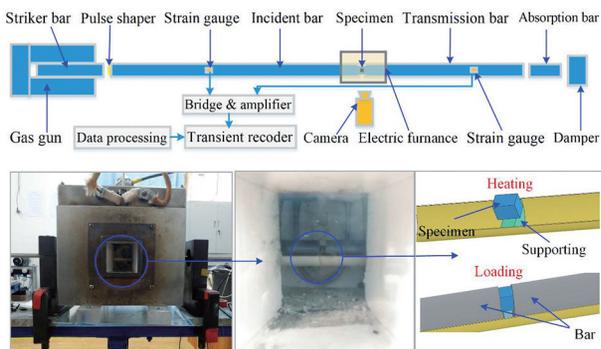


图 10 高温动态压缩试验的分离式 Hopkinson 压杆装置<sup>[62]</sup>

Fig. 10 Separate Hopkinson press rod device for high temperature dynamic compression test<sup>[62]</sup>

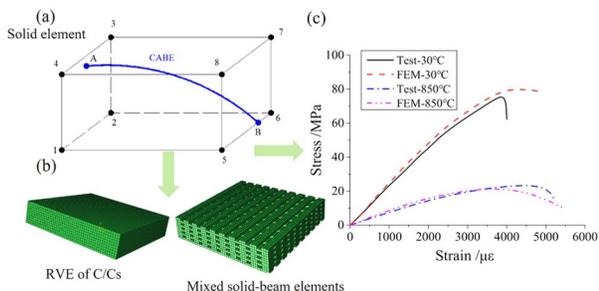
### 3.2.2 三维纺织碳基复合材料数值模拟

基于不同细观几何结构模型,研究者主要从理论分析方法和有限元方法两方面,对三维纺织 C/C 复合材料的高温力学行为展开研究。林志远等<sup>[63]</sup>围绕三维针刺 C/C 材料高温力学性能,对 Jones-Nelson-Morgan 模型进行改进,并引入了温度系数。结果表明,在温度小于 1 800 °C,复合材料为线弹性本构关系,材料强度均随温度的升高呈先升后降的趋势,建立的高温本构模型计算结果与试验结果吻合较好。HAN 等<sup>[64]</sup>基于 Mori-Tanaka 模型计算了构件结构力学参数,利用所提出的实体梁混合单元预测了三维针刺 C/C 复合材料高温氧化后的残余力学性能。结果表明,当 850 °C 下氧化比为 30% 时,预测的模量和强度残余系数分别为 28.29% 和 34.54%,与试验结果吻合较好,如图 11 所示。

有限元方法克服了理论预测模型过于简化,适用范围有限的缺点,已成为三维纺织 C/C 复合材料力学性能研究的主流<sup>[65]</sup>。李明旭等<sup>[66]</sup>基于采用三维实体单元,完成板型三维针刺 C/C 复合材料高温拉伸试样的建模,并对试样材料进行属性赋予、网格划分和施加应力场和温度场,最后进行了有限元分析。考虑到复合材料内部结构的影响,近年来学者逐渐开始采用宏-细观结合的计算方式。AI 等<sup>[67]</sup>采用多尺度有限元方法研究了三维机织 C/C 复合材料在高温下的渐进损伤破坏行为。在细观尺度和微观尺度上分别建立了 C/C 复合材料和碳纤维束的 RVE 模型。采用微尺度 RVE 模型结合最大应力破坏准则,计算了碳纤维丝束在 300~2 500 K 内的纵向和横向拉伸强度。将微尺度模型的输出结果引入中尺度 RVE 模型,研究了复合材料在 2 500 K 以下平面单向拉伸下的渐进损伤行为,如图 12 所示。SIDDGONDE 等<sup>[68]</sup>同样采用多尺度方式对三维机织 C/C 复合材料的热力学性能进行了研究。首先在微观尺度分析预测了纤维以及纤维束的热力学性能。随后将纤维束

性能纳入中尺度模型,以预测三维机织 C/C 复合材料的热力学性能,数值模拟结果与现有文献的数值和实验结果吻合良好。

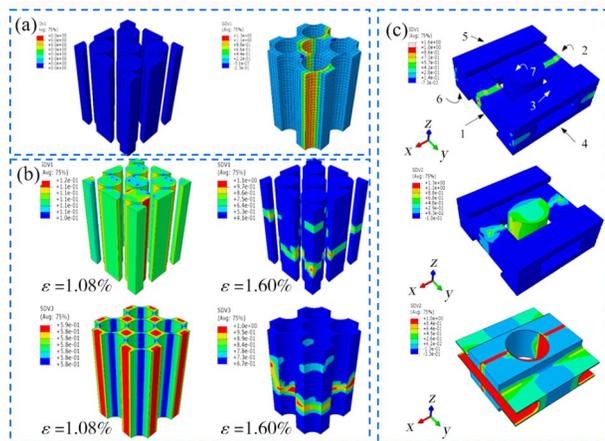
综上,三维纺织 C/C 复合材料对高温有限元分析的研究还较少,大多预测的都是关于热膨胀和热传导性能,且在模型构建时多采用理想模型,忽略了其孔隙特征。因此,如何真实还原三维纺织 C/C 复合材料细观结构,发展高温环境下三维纺织 C/C 复合材料的力学行为模拟,进而有效地预测其失效是需要重点研究的方向。



(a) 实体梁混合单元; (b) RVE 模型; (c) 模拟结果。

图 11 三维针刺 C/C 复合材料高温力学性能模拟<sup>[64]</sup>

Fig. 11 Simulation of mechanical properties of high-temperature of three-dimensional needled C/C composites<sup>[64]</sup>



(a) 1 300 K 纤维和基体纬向损伤变量; (b) 1 300 K 纤维和基体经向损伤变量; (c) 2 500 K 下单轴拉伸破坏特征。

图 12 三维 C/C 复合材料多尺度损伤特征<sup>[67]</sup>

Fig. 12 Multi-scale damage characteristics of three-dimensional C/C composites<sup>[67]</sup>

### 3.3 三维纺织陶瓷基复合材料高温力学行为

#### 3.3.1 三维纺织陶瓷基复合材料实验研究

三维纺织陶瓷基复合材料作为高温热结构材料,主要应用于力-热耦合等极端环境。因此,国内外学者关于三维纺织陶瓷基复合材料的研究主要围绕环境因素下的力学性能和破坏机理。谢巍杰等<sup>[69]</sup>围绕三维编织 SiC/SiC 复合材料,进行了不同温度下三点弯曲和断裂韧性的研究。结果表明,在室温~

1 200 °C下, SiC/SiC断裂行为表现为明显的假塑性, 随着温度上升至1 350 °C, 复合材料界面层受到破坏, 断裂韧度有所下降。张宇等<sup>[70]</sup>围绕三维机织 SiC/SiC复合材料, 在室温和高温条件下进行了拉伸以及疲劳实验。研究发现, 在轴向拉伸应力作用下, 其力学性能随温度升高明显降低, 具体表现为纤维与基体之间界面粘结、纤维拔出长度降低以及纤维断面氧化等。在疲劳载荷下, 随着应力和温度增加, 疲劳寿命骤降, 其疲劳失效与材料的损伤演化息息相关。YANG等<sup>[71]</sup>基于三维机织 SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>复合材料, 研究了其在室温、1 200 和 1 500 °C下的力学行为。结果表明, 室温下, SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>复合材料具有较高的弯曲强度, 断裂机理为脆性断裂和韧性断裂相结合; 高温下, 断裂机制转变为典型的脆性断裂。LI等<sup>[72]</sup>研究了三维机织 C/SiC复合材料在恒载荷作用下的热循环疲劳损伤演化规律, 建立了热循环温度、基体裂纹间距、界面剪切应力与损伤指标的关系。此外, 分析了材料特性、峰值应力、损伤状态和循环次数对 C/SiC复合材料热疲劳损伤演化的影响。最后, 预测了三维机织 C/SiC复合材料在不同热疲劳循环数以及恒定峰值应力作用下的损伤演化。YANG等<sup>[73]</sup>基于 Micro-CT, 对具有 PyC 和 BN 界面的 SiC/SiC 复合材料在不同温度拉伸过程中纤维、基体以及界面的损伤演化进行了量化(图 13)。研究发现, 温度为 20 和 1 000 °C时, 孔隙大多存在纤维/基体间的界面中; 当温度升高至 1 600 °C时, 孔隙主要存在基体内部。此外, BN 界面层复合材料在 1 600 °C氧化后, 由于 SiC 基体和 BN 界面的保护作用, 大多数的纤维仍然较为完整; 而 PyC 界面层复合材料在 1 600 °C条件下界面层被氧化失效, 导致复合材料中仅有少部分纤维未被氧化。

一般来说, 温度的升高会削弱复合材料的力学

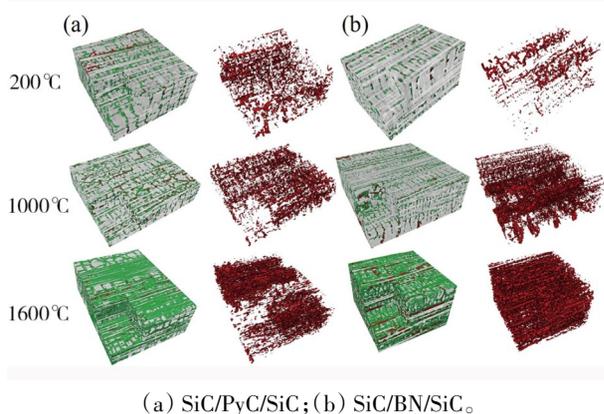


图 13 SiC/SiC 复合材料高温损伤分布<sup>[73]</sup>

Fig. 13 High-temperature damage distribution of SiC/SiC composites<sup>[73]</sup>

性能, 这是由于纤维在热处理后发生损伤以及界面的削弱导致的。但 UDAYAKUMAR 等<sup>[74]</sup>研究者们发现适当的热处理可以在一定程度上改善陶瓷基复合材料界面的结晶度和稳定性, 从而提升机械性能。陈虹等<sup>[75]</sup>发现当热处理温度为 700 °C 时, 三维编织 SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 复合材料具有最高的弯曲强度 (78 MPa)。DU 等<sup>[76]</sup>在室温~2 000 °C 的真空条件下研究了热处理温度对三维针刺 C/SiC 复合材料三点弯曲力学性能影响。研究发现, 由于热残余应力的释放, 三维针刺 C/SiC 复合材料弯曲强度和模量在室温至 800 °C 内增加。在 800~1 700 °C 时, 因进一步释放残余应力, 模量进一步增加。到 2 000 °C 时, 复合材料热应力导致纤维滑移和基体裂纹偏转, 从而提高了断裂强度, 残余应力的逐渐消失导致模量下降。

由上可知, 学者们所关注的问题和研究的热点主要集中在三维纺织陶瓷基复合材料的强度、耐久性等关键力学特征上。但三维纺织陶瓷基复合材料由于制造工艺的不同, 复合材料的微观结构(如界面条件)不相同, 且随着温度的升高, 微观结构也会发生变化, 这就导致了三维纺织陶瓷基复合材料断裂强度和断裂机理的差异。因此, 需要综合考虑界面和孔隙缺陷下三维纺织陶瓷基复合材料的热机械性能, 并进行损伤机理研究, 发展相应宏/细/微观力学模型, 实现复合材料力学行为预测。

### 3.3.2 三维纺织陶瓷基复合材料数值模拟

三维纺织陶瓷基复合材料进行高温力学试验技术难度较大, 且成本较高, 利用理论分析方法对三维纺织陶瓷基复合材料温度相关力学行为进行分析和预测至关重要。然而, 适用于高温断裂强度模型的组分材料参数很少, 现有的强度模型大多只能在常温下使用。DENG 等<sup>[77]</sup>基于温度依赖性断裂强度模型和复合材料理论, 建立纤维增强陶瓷基复合材料的断裂强度预测模型。模型中考虑了温度、纤维含量、纤维分布和基体性能对纤维增强陶瓷基复合材料强度的影响。模型预测值与实验数据吻合较好, 表明了模型的适用性和合理性。ZHANG 等<sup>[78]</sup>采用细观力学方法对 SiC/SiC 复合材料的高温疲劳失效进行了预测。建立了多种微损伤模型来描述疲劳加载过程中基体开裂、界面磨损和纤维断裂的演化过程, 并在此基础上计算了疲劳寿命。且为验证疲劳失效模型, 进行了多尺度试验, 结果吻合良好。LIU 等<sup>[79]</sup>建立了考虑基体开裂、界面脱粘滑移和纤维断裂抽拔损伤机制的迟滞本构关系模型, 研究了三维针刺 C/SiC 复合材料的循环拉伸行为。预测了三维针刺 C/SiC 复合材料在不同峰值应力下的迟滞回线并建立了复合材料迟滞行为与微观组织损伤演化的关

系。王玲玲等<sup>[80]</sup>基于超高温陶瓷复合材料热损伤和强度统计分析,建立了高温拉伸损伤非线性本构模型,该模型能准确地描述超高温陶瓷复合材料单轴高温拉伸应力-应变关系。

由于陶瓷材料的脆性较大且对内部缺陷较为敏感,且在高温条件下更容易失效。通过数值模拟预测陶瓷基复合材料在高温下的裂纹扩展过程,有利于评估其在极端环境下的使用寿命,并相应指导陶瓷材料的结构设计。HAN等<sup>[81]</sup>提出了一种热弹性损伤模型以研究陶瓷材料上热应力引起的裂纹的形成和扩展情况。数值模拟表明,随着拉伸应力的增加,试样表面越来越出现冲击裂纹,并随着时间的推移,裂纹的扩展速度逐渐减慢,最终达到稳定状态,其热裂纹扩展过程与真实实验结果非常吻合,如图14所示。LI等<sup>[82]</sup>用能量法推导了微裂纹超高温陶瓷的本构关系和陶瓷的温度依赖性临界能量释放速率,并用有限元方法模拟了陶瓷材料的热冲击行为。结果表明,模拟的裂纹模式与实验结果接近,证实了模型的准确性。

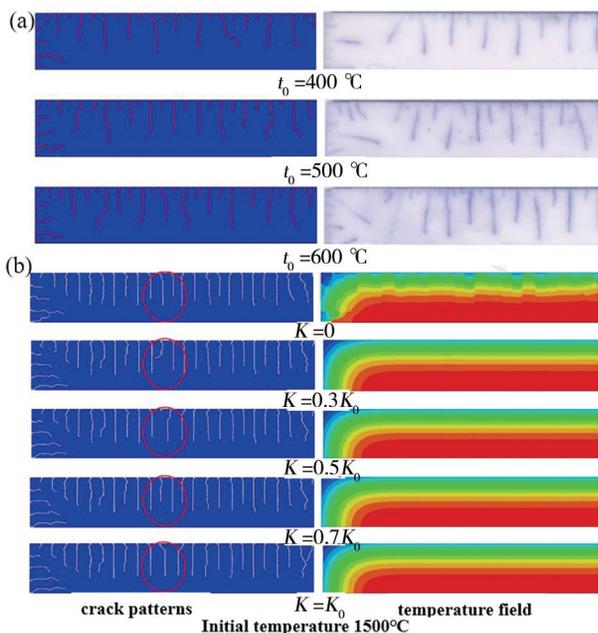


图14 不同温度下陶瓷材料裂纹扩展模式数值模拟<sup>[81]</sup>

Fig. 14 Numerical simulation of crack propagation mode of ceramic material at different temperatures<sup>[81]</sup>

综上,当前三维纺织陶瓷基复合材料在高温力学方面的数值模拟研究极少,且基本集中在理论预测上。高温力学有限元分析鲜有报道,这主要是缺乏三维纺织陶瓷基复合材料高温断裂强度模型的材料参数。因此,完善三维纺织陶瓷基复合材料参数体系,建立真实反映三维纺织陶瓷基复合材料结构的高温模型,深化复合材料自身缺陷以及服役载荷下的耦合效应,将有效促进三维纺织陶瓷基复合材料的设计、制造和应用。

## 4 结语

三维纺织复合材料因优异的力学性能、丰富的结构设计性和耐极端环境,现已成为航天航空领域部分功能-承载制件的首选材料。近年来,学者们对三维纺织复合材料的热-力学性能研究取得了一些实质性的成果,为该材料在实际中的应用提供了有力支撑。但随着航空事业的飞速发展,三维纺织复合材料将面临着更为苛刻服役环境,这对复合材料的性能、工艺和成本等提出了更高的要求,后续的研究工作还需从以下几方面开展。

(1)三维纺织复合材料结构-功能一体化设计方法。基于数字化驱动,实现三维纺织复合材料制造成形的自动化、大型化和结构多元化,提升三维纺织复合材料在极端环境中应用的可靠性。

(2)服役环境下三维纺织复合材料力学性能及损伤原位表征。针对环境温度、湿度和老化等耦合载荷下,借助Micro-CT、DIC和AE等先进设备,构建损伤量化方法,揭示服役环境下渐进损伤过程,明确失效机理。

(3)三维纺织复合材料多尺度分析方法。收集三维纺织复合材料微细观结构单元及性能数据,完善三维纺织复合材料参数体系。考虑温度、界面、缺陷等耦合下的力学行为,建立真实反映三维纺织复合材料结构的高温模型开展多尺度力学分析。

## 参考文献

- [1] LE V T, HA N S, GOO N S. Advanced sandwich structures for thermal protection systems in hypersonic vehicles: A review[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 226: 109301.
- [2] LI W J, ZHANG Z W, ZHU M D, et al. Novel strategy and multi-scale modelling of integrated multifunctional composite for thermal protection under extreme environment [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 209: 118313.
- [3] 李昱霖, 安庆升, 杨坤好, 等. 隔热承载一体化复合材料电缆罩分析及验证 [J]. 空天防御, 2019, 2(3): 1-7.
- LI Yulin, AN Qingsheng, YANG Kunhao, et al. Analysis and validation of integrated thermal protection and load bearing for composite material cable cover [J]. Air & Space Defense, 2019, 2(3): 1-7.
- [4] SONG C Y, FAN W, LIU T, et al. A review on three-dimensional stitched composites and their research perspectives [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2022, 153: 106730.
- [5] 周世豪, 倪楠楠, 刘彬, 等. 结构热防护一体化复合材料研究进展 [J]. 航空材料学报, 2022, 42(4): 1-15.
- ZHOU Shihao, NI Nannan, LIU Bin, et al. Research progress on structural thermal protection integration composite [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2022, 42(4): 1-15.
- [6] CHEN X M, LI C, ZHANG C Y, et al. Three-dimensional woven composite materials [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2022, 42(4): 1-15.
- [6] CHEN X M, LI C, ZHANG C Y, et al. Three-dimensional woven composite materials [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2022, 42(4): 1-15.

dimensional needle-punching for composites—A review [J]. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, 2016, 85:12–30.

[7] WANG X L, GAO X D, ZHANG Z H, et al. Advances in modifications and high-temperature applications of silicon carbide ceramic matrix composites in aerospace: a focused review [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41(9): 4671–4688.

[8] 李军, 刘燕峰, 倪洪江, 等. 航空发动机用树脂基复合材料应用进展与发展趋势 [J]. *材料工程*, 2022, 50(6): 49–60.

LI J, LIU Y F, NI H J, et al. Application progress and development trend of resin matrix composites for aero engine [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2022, 50(6): 49–60.

[9] 杨智勇, 张东, 顾春辉, 等. 国外空天往返飞行器用先进树脂基复合材料研究与应用进展 [J]. *复合材料学报*, 2022, 39(7): 3029–3043.

YANG Z Y, ZHANG D, GU C H, et al. Research and application of advanced resin matrix composites for aerospace shuttle vehicles abroad [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(7): 3029–3043.

[10] LI W J, WANG T K, ZHANG Z W, et al. Design of ablation resistant/heat insulation/lightweight integrated thermal protection material for extreme aerothermodynamic environment [J]. *Polymer Composites*, 2021, 42(12): 6749–6763.

[11] 冯志海, 师建军, 孔磊, 等. 航天飞行器热防护系统低密度烧蚀防热材料研究进展 [J]. *材料工程*, 2020, 48(8): 14–24.

FENG Z H, SHI J J, KONG L, et al. Research progress in low-density ablative materials for thermal protection system of aerospace flight vehicles [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48(8): 14–24.

[12] TANG K H, ZHANG A L, GE T J, et al. Research progress on modification of phenolic resin [J]. *Materials Today Communications*, 2021, 26: 101879.

[13] 杨滔. 微烧蚀/承载酚醛基复合材料性能研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.

YANG T. Study on Properties of Micro-ablation/bearing Phenolic Matrix Composites [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.

[14] FENG X, SHI Z Z, LIU Y B, et al. Ablation behavior and mechanism of TaSi<sub>2</sub>-modified carbon fabric-reinforced phenolic composite [J]. *Journal of Materials Science*, 2020, 55(20): 8553–63.

[15] 高迪. 酚醛树脂浸渍碳纤维三维编织体的成型与烧蚀行为研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

GAO D. Reserch on Fabrication and Ablation Behavior of Phenolic Impregnated Three-dimension Carbon Fiber Braid Composites [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.

[16] ZOU Q, XIAO F, GU S Q, et al. Toughening of bismaleimide resin based on the self-assembly of flexible aliphatic side chains [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, 58(36): 16526–16531.

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2024年 第4期

[17] LEE S E, JEONG E, LEE M Y, et al. Improvement of the mechanical and thermal properties of polyethersulfone-modified epoxy composites [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2016, 33: 73–9.

[18] TARFAOUI M, NACHTANE M. Can a three-dimensional composite really provide better mechanical performance compared to two-dimensional composite under compressive loading? [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2019, 38(2): 49–61.

[19] 李紫伦, 杨安坤, 覃小红, 等. 三维编织玻璃纤维/环氧树脂复合材料薄壁管轴向压缩性能的温度效应 [J]. *复合材料学报*, 2023, 40(10): 5588–5600.

LI Z L, YANG A K, QIN X H, et al. Temperature effect on axial compressive properties of three-dimensional glass fiber/epoxy resin braided composite thin-walled tubes [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(10): 5588–5600.

[20] 王颖杰, 王海楼, 张伟. 不同衬经纱占比的三维角联锁机织增强复合材料弯曲性能 [J]. *复合材料学报*, 2023, 40(06): 3291–3301.

WANG Y J, WANG H L, ZHANG W. Bending properties of three-dimensional angle interlocking woven reinforced composites with different proportions of warp insertion [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(06): 3291–3301.

[21] WANG H, QUAN X, Yin L, et al. Lightweight quartz fiber fabric reinforced phenolic aerogel with surface densified and graded structure for high temperature thermal protection [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2022, 159: 107022.

[22] WANG H, PAN Y, JIN X, et al. Gradient fiber-reinforced aerogel composites using surface ceramicizable-resin densification with outstanding ablation resistance for high-temperature thermal protection [J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 230: 109798.

[23] 王俊山, 徐林, 李炜, 等. 航天领域 C/C 复合材料研究进展 [J]. *宇航材料工艺*, 2022, 52(2): 1–12.

WANG J S, XU L, LI W, et al. Research progress on C/C composites for aerospace applications [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2022, 52(2): 1–12.

[24] YANG W, LUO R Y, HOU Z H, et al. Influence of the microstructure of the carbon matrices on the internal friction behavior of carbon/carbon composites [J]. *New Carbon Materials*, 2016, 31(2): 159–166.

[25] CAI Y Z, CHENG L F, YIN X W, et al. Thermophysical properties of three-dimensional ceramic-filler-modified carbon/carbon composites [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(1): 1302–1307.

[26] 曾波. AlSiB-ZrC-C/C 耗散防热复合材料的制备及烧蚀性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.

ZENG B. Preparation and Ablation Properties of AlSiB-

ZrC-C/C Dissipative Thermal Protective Composites [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

[27] 陈波. 三维编织C/C复合材料高温力学行为及寿命预测模型研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2018.

CHEN B. Research on Mechanical Behavior and Fatigue Prediction Method of 3d Braided Carbon/carbon Composites at Elevated Temperature [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.

[28] XU L, YANG W B, ZHEN F, et al. Fabrication of low-density carbon-bonded carbon fiber composites with an Hf-based coating for high temperature applications [J]. RSC Advances, 2018, 8(34): 19171-19180.

[29] ARAI Y, INNOUE R, GOTO K, et al. Carbon fiber reinforced ultra-high temperature ceramic matrix composites: A review [J]. Ceramics International, 2019, 45(12): 14481-14489.

[30] WANG H, WANG Y, LIN B, et al. What roles do ceramic matrix and woven fibers have in bending strength of SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> composites: An experimental investigation and acoustic emission analysis [J]. Ceramics International, 2019, 45(1): 1143-1149.

[31] LUO H, LUO R Y, WANG L Y, et al. Effects of fabrication processes on the properties of SiC/SiC composites [J]. Ceramics International, 2021, 47(16): 22669-22676.

[32] 赵爽, 杨自春, 周新贵. 先驱体浸渍裂解结合化学气相渗透工艺下二维半和三维织构SiC/SiC复合材料的结构与性能[J]. 材料导报, 2018, 32(16): 2715-2718.

ZHAO S, YANG Z C, ZHOU X G. SiC/SiC composites produced by the combinational process of polymer impregnation & pyrolysis and chemical vapor infiltration: a comparative microstructure and properties study upon 2.5D and 3D braiding structures [J]. Materials Reports, 2018, 32(16): 2715-2718.

[33] ZHANG B, HUANG H, LU X. Fabrication and properties of C/SiO<sub>2</sub> composites by silicasol-impregnation sintering process [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 789: 357-361.

[34] SONG C K, FANG Y, CHENG L F, et al. Long-term ceramic matrix composite for aeroengine [J]. Journal of Advanced Ceramics, 2022, 11(9): 1343-1374.

[35] LAN S, WU D F, PU Y, et al. Experimental research on thermal insulation performance of lightweight ceramic material in oxidation environment up to 1700 °C [J]. Ceramics International, 2016, 42(2, Part B): 3351-3360.

[36] 张翠萍, 茹红强, 朱景辉, 等. 纳米SiC颗粒增强反应结合碳化硼陶瓷复合材料的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(Sup. 1): 398-402.

ZHANG C P, RU H Q, ZHU J H, et al. Silicon carbide nano-particulates reinforced reaction bonded boron carbide composites [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(Sup. 1): 398-402.

[37] 杨甜甜, 张典堂, 邱海鹏, 等. SiC/SiC纺织复合材料

料微观结构及力学性能研究进展[J]. 航空材料学报, 2020, 40(5): 1-12.

YANG T T, ZHANG D T, QIU H P, et al. Research progress on meso-structure and mechanical properties of SiC/SiC textile composites [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40(5): 1-12.

[38] DONG S M, WANG Z, ZHOU H J, et al. Research progress in SiC-based ceramic matrix composites [J]. Journal of the Korean Ceramic Society, 2012, 49(4): 295-300.

[39] ZHOU Q, DONG S M, ZHANG X Y, et al. Carbon fiber surface coating by forced pressure-pulsed CVI [J]. Journal of Inorganic Materials, 2006, 21(6): 1378-1384.

[40] 庞宝琳, 焦健, 王宇, 等. 不同界面层体系对SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料性能的影响[J]. 航空制造技术, 2014(6): 5, 79-82.

PANG B L, JIAO J, WANG Y, et al. Effects of interfacial layers on mechanical properties of SiC<sub>f</sub>/SiC composites [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(6): 5, 79-82.

[41] 段亚弟. 2.5D机织SiC<sub>f</sub>/SiC复合材料的制备及强化机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.

DUAN Y D. Preparation and Strengthening Mechanism of 2.5D Woven SiC<sub>f</sub>/SiC Composites [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.

[42] 关天茹. 2.5D编织石英/SiO<sub>2</sub>陶瓷基复合材料微观模型构建与实验验证[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.

GUAN T R. Micro Geometry and Mechanical Model and Experimental Study of 2.5D Braided Quartz/SiO<sub>2</sub> Ceramic Matrix Composites [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.

[43] 蒋丽娟, 侯振华, 周寅智. 三维预制体结构及界面对SiC/SiC复合材料拉伸性能的影响[J]. 复合材料学报, 2020, 37(3): 642-649.

JIANG L J, HOU Z H, ZHOU Y Z. Effects of three-dimensional prefabricated structure and interface on tensile properties of SiC/SiC composites [J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2020, 37(3): 642-649.

[44] WARREN K C, LOPEZANIDO R A, GOERING J. Experimental investigation of three-dimensional woven composites [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 73: 242-259.

[45] LI D S, HAN W F, LEI J. On the tensile properties and failure mechanisms of 3D six-directional braided composites at elevated temperatures [J]. Composites Communications, 2021, 28: 100884.

[46] DANG M G, LI D S, LEI J. Temperature effects on mechanical response and failure mechanism of 3D angle-interlock woven carbon/epoxy composites [J]. Composites Communications, 2020, 18: 37-42.

[47] LI D S, YING Y, LEI J. Experimental study on the fabrication, high-temperature properties and failure analysis of 3D seven-directional braided composites under compression

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2024年 第4期

[J]. *Composite Structures*, 2021, 268:113934.

[48] LI J, FAN W, TAO L, et al. The temperature effect on the inter-laminar shear properties and failure mechanism of 3D orthogonal woven composites [J]. *Textile Research Journal*, 2020, 90(23/24): 2806–2817.

[49] DONOUGH M, GUNNIO A, ORIFICI A, et al. Scaling parameter for fatigue delamination growth in composites under varying load ratios [J]. *Composites Science and Technology*, 2015, 120:39–48.

[50] ZUO H M, LI D S, LEI J, et al. Longitudinal compression fatigue properties of 3D five-directional braided composites at different temperatures [J]. *Composite Structures*, 2022, 291:115602.

[51] ZUO H M, LI D S, LEI J. Transverse bending fatigue behaviors and failure mechanisms of 3D five-directional braided composites at different temperatures [J]. *Materials Letters*, 2022, 316:132030.

[52] ZHAO Y R, JIAN S, WEN W D, et al. Thermo-mechanical behaviors of 2.5D shallow straight-link-shaped woven composites under the warp direction fatigue loading at room and elevated temperatures [J]. *Composite Structures*, 2022, 289:115489.

[53] SONG J, WEN W D, CUI H T, et al. Weft direction tension-tension fatigue responses of layer-to-layer 3D angle-interlock woven composites at room and elevated temperatures [J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 139:105770.

[54] SONG J, ZHANG Y K, WEN W D, et al. Warp and weft direction thermo-mechanical responses of 2.5D shallow straight-link-shaped woven composites at room and elevated temperatures [J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2022, 29(28): 7672–7689.

[55] WANG H L, SUN B Z, GU B H. Numerical modeling on compressive behaviors of 3D braided composites under high temperatures at microstructure level [J]. *Composite Structures*, 2017, 16:925–938.

[56] HE C W, GE J R, ZHANG B B, et al. A hierarchical multiscale model for the elastic-plastic damage behavior of 3D braided composites at high temperature [J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 196:108230.

[57] 张波, 贺平照, 梁建伟, 等. 针刺C/C复合材料高温剪切强度研究 [J]. *材料导报*, 2018, 32(Sup. 2):5, 270–272.

ZHANG B, HE P Z, LIANG J W, et al. Shear strength of needled felt C/C composites in elevated temperature [J]. *Materials Reports*, 2018, 32(Sup. 2):5, 270–272.

[58] LI D S, YAO Q Q, NAN J, et al. Bend properties and failure mechanism of a carbon/carbon composite with a 3D needle-punched preform at room and high temperatures [J]. *New Carbon Materials*, 2016, 31(4): 437–444.

[59] LI D S, GAN L, YAO Q Q, et al. High temperature compression properties and failure mechanism of 3D needle-punched carbon/carbon composites [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 621:105–110.

[60] XIE W H, MENG S H, DING L, et al. High velocity impact tests on high temperature carbon-carbon composites [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 98:30–38.

[61] LI D S, DUAN H W, WEI W, et al. Strain rate and temperature effect on mechanical properties and failure of 3D needle-punched carbon/carbon composites under dynamic loading [J]. *Composite Structures*, 2017, 172:229–241.

[62] JIN X C, CHENG H, LI C L, et al. Strain rate effect on mechanical properties of 3D needle-punched C/C composites at different temperatures [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 160:140–146.

[63] 林志远, 邢会华, 侯晓, 等. 针刺C/C复合材料高温力学性能试验及本构关系 [J]. *固体火箭技术*, 2019, 42(1): 98–104.

LIN Z Y, XING H H, HOU X, et al. High-temperature mechanical properties testing and constitutive relation of needle-punched C/C composite [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2019, 42(1): 98–104.

[64] HAN M, ZHOU C W, BI Q S. Residual mechanical properties of needle-punched carbon/carbon composites after oxidation [J]. *Composites Communications*, 2021, 28:100966.

[65] JIAN Y, ZHOU C W, ZHANG H J. A micro-image based reconstructed finite element model of needle-punched C/C composite [J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 153: 48–61.

[66] 李明旭. 针刺碳/碳复合材料超高温拉伸力学性能试验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.

LI M X. Experimental Study on Ultra-high Temperature Tensile Mechanical Properties of Needle-punched C/C Composites [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

[67] AI S G, MA Y W, FANG D N. Multi-scale damage modeling of 3D orthogonal woven carbon-carbon composite at elevated temperatures [J]. *Journal of Thermal Stresses*, 2019, 42(6): 787–800.

[68] SIDDGONDE N, GHOSH A. Thermo-mechanical modeling of C/C 3D orthogonal and angle interlock woven fabric composites in high temperature environment [J]. *Mechanics of Materials*, 2020, 148:103525.

[69] 谢巍杰, 陈明伟. SiC/SiC复合材料高温力学性能研究 [J]. *人工晶体学报*, 2016, 45(6): 1534–1538.

XIE W J, CHEN M W. Study on the high temperature properties of SiC/SiC composites [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2016, 45(6): 1534–1538.

[70] 张宇. 2.5D编织陶瓷基复合材料(CMCs)高温力学性能及破坏机制研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2021.

ZHANG Y. Study on High-temperature Mechanical Properties and Damage Mechanism of 2.5D Woven Ceramic Matrix Composites [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong

University, 2021.

[71] YANG X, QING W, ZHI H P, et al. High-temperature properties of 2.5D SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> composites by sol-gel [J]. *Ceramics International*, 2016, 42(11): 12802–12806.

[72] LI L B, REYNUAD P, FANTOZZI G. Thermal cyclic fatigue damage evolution of fiber-reinforced ceramic-matrix composites under constant loading [J]. *Composite Interfaces*, 2022, 29(9): 1033–1052.

[73] YANG H T, LU Z L, BIE B X, et al. Microstructure and damage evolution of SiC<sub>f</sub>/PyC/SiC and SiC<sub>f</sub>/BN/SiC mini-composites: a synchrotron X-ray computed microtomography study [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(9): 11395–113402.

[74] UDAYAKUMAR A, GANESH A S, RAJIA S, et al. Effect of intermediate heat treatment on mechanical properties of SiC<sub>f</sub>/SiC composites with BN interphase prepared by ICVI [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2011, 31(6): 1145–1153.

[75] 陈虹, 张联盟, 李勇, 等. 三维编织SiO<sub>2</sub>基复合材料性能的研究[J]. *硅酸盐学报*, 2003, 31(10): 918–922.

CHEN H, ZHANG L L, LI Y, et al. Study on the property of three-dimensional SiO<sub>2</sub> composites [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2003, 31(10): 918–922.

[76] DU X B, LI D S, WEI Q H, et al. High temperature bending properties and failure mechanism of 3D needled C/SiC composites up to 2 000 °C [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2022, 42(6): 3036–3043.

[77] DENG Y, LI W G, WANG R Z, et al. The temperature dependent fracture models for fiber-reinforced ceramic matrix

composites [J]. *Composite Structures*, 2016, 140: 534–539.

[78] ZHANG S, FENG Y C, GAO X G, et al. Modeling of fatigue failure for SiC/SiC ceramic matrix composites at elevated temperatures and multi-scale experimental validation [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2022, 42(8): 3395–3403.

[79] LIU Y F, LI L B, ZHANG Z W, et al. Micromechanical modeling cyclic loading/unloading hysteresis loops of 3D needle-punched C/SiC ceramic-matrix composites [J]. *Composite Interfaces*, 2021, 29(10): 1121–1144.

[80] 王玲玲, 方国东, 梁军. ZrB<sub>2</sub>基超高温陶瓷复合材料的高温拉伸损伤行为 [J]. *复合材料学报*, 2015, 32(1): 125–130.

WANG L L, FANG G D, LIANG J. High temperature tensile damage behavior of ZrB<sub>2</sub>-based ultra-high temperature ceramic composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32(1): 125–130.

[81] HAN F S, WU X L, CUI Z I. Numerical simulation of crack propagation in ceramic materials at high temperature [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 189(3): 032022.

[82] LI D Y, LI W G, WANG R Z, et al. Simulation of the thermal shock behavior of ultra-high temperature ceramics with the consideration of temperature-dependent crack propagation criterion and interaction between thermal shock cracks evolution and thermal conduction [J]. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2018, 72, 268–274.