

DOI: 10.3901/JME.2021.16.235

陶瓷基复合材料结构的动力学强度设计方法: 研究现状及展望*

高希光^{1,2} 韩 栋^{1,2} 宋迎东^{1,2,3} 张 盛^{1,2} 于国强^{1,2}

(1. 南京航空航天大学能源与动力学院 南京 210016;

2. 南京航空航天大学江苏省航空动力系统重点实验室 南京 210016;

3. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京 210016)

摘要: 对陶瓷基复合材料动力学强度设计方法的研究进展进行综述。介绍陶瓷基复合材料的应用现状,分析陶瓷基复合材料动力学强度设计的关键因素,包括多尺度建模方法、本构模型、强度模型和结构动力学分析。比较陶瓷基复合材料的多尺度表征中常采用的单一尺度法和均匀化方法,分析各自优缺点。介绍陶瓷基复合材料常用的本构模型,并指出陶瓷基复合材料结构振动分析需要更合适的本构模型。介绍陶瓷基复合材料常用的强度模型,并指出编织复合材料在复杂应力作用下强度的预测是当前主要难点。随后,介绍当前陶瓷基复合材料结构振动分析方法,主要包括模态分析和时域响应计算,并阐述了各自的优缺点。最后,对陶瓷基复合材料结构的动力学强度研究的发展趋势进行展望。

关键词: 陶瓷基复合材料; 多尺度; 本构模型; 动力学; 强度

中图分类号: TG156

Dynamic Strength Design Methods of Ceramic Matrix Composite Structures: Current Status and Future Prospects

GAO Xiguang^{1,2} HAN Dong^{1,2} SONG Yingdong^{1,2,3} ZHANG Sheng^{1,2} YU Guoqiang^{1,2}

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016;

2. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,

Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016;

3. State Key Laboratory of Mechanics and Control Mechanical Structures,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract: The progress on the dynamic strength design methods of ceramic matrix composite structures is reviewed. The application status of ceramic matrix composites is introduced, and the key factors in the strength design of structures are analysed, which include multi-scale modeling method, constitutive model, strength model and dynamic analysis. The single-scale and multi-scale methods are compared and the advantages of them are analysed. The frequently used constitutive models of ceramic matrix composites are introduced and it is pointed out that the dynamic analysis needs more appropriate models. The strength models of ceramic matrix composites are introduced, and it is pointed out that the main difficulty is the strength prediction of woven ceramic matrix composites under complex stresses. Then, the dynamic analysis methods of ceramic matrix composite structures, including modal analysis and transient simulation, are elaborated and compared. Finally, the development directions of the dynamic strength analysis are summarized.

Key words: ceramic matrix composites; multi-scale; constitutive model; dynamic; strength

* 国家科技重大专项(Y2019-I-0018-0017)和国家自然科学基金(11972183, 51675266)资助项目。20200831 收到初稿, 20210527 收到修改稿

0 前言

随着航空技术的发展,航空发动机的工作温度越来越高。以 F119 为代表的第四代航空发动机的燃烧室出口温度已达到 $1\ 700\ ^\circ\text{C}$ ^[1]。这样的温度已超过了传统高温合金材料的熔点,如不冷却则无法保证机械强度。未来发动机将突破这一温度,工业部门亟须一种更加耐热的材料替代高温合金。近年来发展的陶瓷基复合材料(Ceramic matrix composites, CMCs)具有良好的高温力学性能,无须冷却仍可保持较高的比强度,覆盖涂层后可在 $1\ 600\ ^\circ\text{C}$ 下长时间使用,并且 CMCs 的质量密度仅为高温合金的 $1/3\sim 1/4$,被认为是应用于高性能航空发动机热端部件的理想材料^[2]。在 CMCs 的应用方面,法国和美国一直走在世界前列,早在 20 世纪 80~90 年代,法国将 CMCs 应用于 M88-2 和 M53-2 军机尾喷管调节片,取得了减重 30% 的效果,美国则对 F110 发动机尾喷管 CMC 调节片进行了演示验证;21 世纪初,美法研制的 CFM56 民用航空发动机采用的编织 CMC 燃烧室减少了 35% 的冷却空气量;2010 年以来,CMCs 的应用进一步扩展到涡轮转子,CFM56-5B 的 CMC 涡轮转子叶片挂片试车成功,美国的首个编织 CMC 低压涡轮转子在 F414 军用航空发动机上试车成功。可见,国外 CMCs 已在航发中实现了实际应用,且取得了良好的效益。

按照纤维预制体细观结构类型来划分,如图 1 所示常用的 CMCs 可以分为单向、2D 编织和 3D 编织 CMCs 三类。其中 3D 编织 CMCs 具有优良的层间性能和综合力学性能,在工程上应用最为广泛。

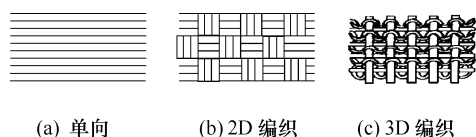


图 1 单向、2D 及 3D 编织 CMCs 预制体构型对比

美国 NASA 已推行的 EPM 计划(Enabling Propulsion Materials Program)、UEET 计划(Ultra-Efficient Engine Technology Program)^[3]、NGLT 计划(Next Generation Launch Technology Project)^[4]等一系列研究计划,均将编织 CMCs 作为重点研究对象。GE 公司更是将编织 CMC 部件作为 GE9X 发动机的一大亮点^[5]。可以预见,编织 CMCs 是未来高性能发动机的关键材料。

需要注意的是,将 CMCs 应用于航空发动机热端部件,其动力学问题不容忽视。因为在高速气流

和机械载荷双重作用下,热端部件不可避免地会产生振动。过强的振动不仅会影响发动机的性能,而且加速消耗结构的疲劳寿命,导致结构过早发生失效^[6]。所以,如何保证 CMC 结构在振动载荷下仍具有足够的寿命是 CMC 结构动力学强度设计亟待解决的关键问题。而在结构设计阶段进行 CMC 结构动力学强度计算是避免有害振动的必要手段。我国航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范(GJB 241—87)条款 3.3.8.10.2 明确规定需要对涡轮叶片、盘、静止叶片、轴及其他产生高振动和应力的构件进行振动与应力分析。但是由于 CMCs 的力学行为具有显著的各向异性和非线性特征,CMC 结构动力学计算方法的研究还处于探索阶段,国内外有关这一领域的公开文献不多。国内外还没有形成系统的 CMC 结构动力学理论与方法,这已经成为制约 CMC 关键热端部件研制的重要技术瓶颈。

对于 CMCs 这种具有复杂细观结构的材料,建立其力学分析模型是动力学分析的基础也是前提;而本构模型是实现 CMC 结构的动力学分析必不可少的环节;强度模型则是结构动力学强度的校核手段;本构模型、强度模型又需要在动力学计算中得以应用。因此多尺度建模方法、本构模型、强度模型和结构动力学分析方法是进行 CMC 结构动力学强度设计的四个关键要素。因为 CMCs 具有显著的非均质、各向异性、变刚度和迟滞特性,并且失效机制也与传统金属材料有很大区别,所以要实现 CMC 结构的动力学强度计算还存在许多技术难点。下面分别从多尺度建模方法、本构模型、强度模型和结构动力学分析方法四个方面介绍国内外研究现状。

1 多尺度建模方法

在现有的结构动力学理论框架内,需要首先建立反映结构的几何与材料特性的模型后才能进一步计算。编织 CMCs 属于典型的非均质材料,微观尺度上(几百纳米到十几微米)由纤维丝、界面和基体构成,细观尺度上(几百微米到几个毫米)由小复合材料(mini-composite,由纤维束和填充在纤维丝之间的界面和基体构成)和外围基体构成。宏观尺度上则由小复合材料及小复合材料之间的基体构成。不同尺度的几何与材料特性对整体结构的响应和破坏均有显著的影响,如不加以考虑,势必严重影响计算结果的准确性。这就要求计算模型要能提供足够多的有关 CMCs 在宏观、细观和微观尺度上的几何与材料性能等信息。

然而, 由于各个尺度之间跨度很大, 现有的计算机能力还无法实现从纳米尺度到宏观尺度(CMC 结构件宏观尺寸至少十几个毫米)的建模和计算, 因此如何在模型简化的同时兼顾效率和准确性是编织 CMCs 领域的热点难点问题。

从公开发表的文献上看, 目前用于 CMCs 建模的主流方法主要有两类: 单一尺度法^[7]和均匀化法^[8-9]。单一尺度法将 CMCs 材料看作是由微观组分构成的复杂结构体。该方法通过无损检测获得 CMCs 的微观结构信息, 然后建立接近真实结构的有限元模型^[10-14]。如图 2 所示单一尺度法试图最大限度还原 CMCs 的真实结构, 但是带来的问题就是计算量巨大^[15]。如果扩展到三维结构, 单元数量至少在千万级以上。加上 CMC 结构分析大多数为非线性过程, 计算量十分巨大, 现有的计算机系统难以胜任。

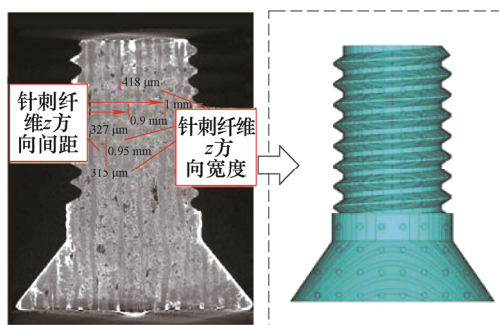


图 2 单一尺度法: 基于结构切片建立有限元模型

均匀化法将研究对象划分为几个尺度^[16], 如图 3 所示, 一般包括四个尺度: 结构、宏观、细观和微观尺度。结构尺度上假设材料为各向异性的均质材料, 而不区分纤维、基体和孔洞等微观结构。结构尺度上某点的力学行为由宏观尺度编织 CMCs 的周期单元(Repeated unite cell, RUC)通过均匀化方法计算获得。宏观尺度上, 编织 CMCs 中小复合材料的力学行为由细观尺度上小复合材料的 RUC 通过均匀化计算后获得, 而细观尺度的力学行为通常可以通过连续损伤力学(Continuum damage mechanics, CDM)模型、剪滞模型以及有限元分析等方式获得。

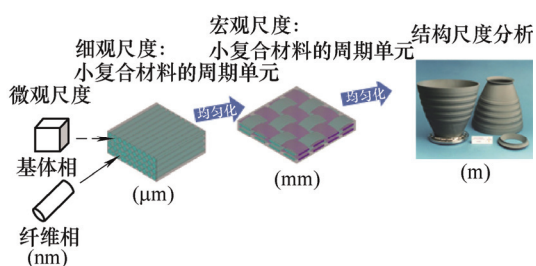
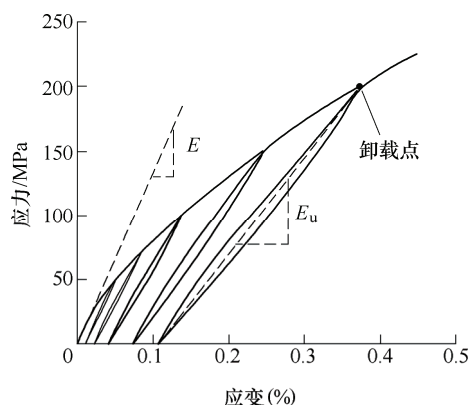


图 3 均匀化法的一般思路

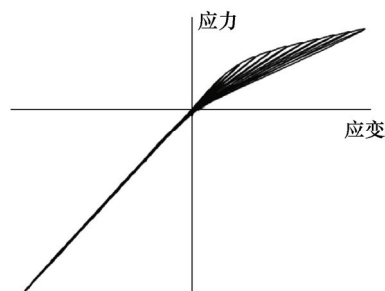
均匀化法的计算量远远低于单一尺度法, 使得 CMCs 结构级别的计算成为可能。但是, 均匀化法的关键步骤是在不同尺度通过 RUC 模型来计算材料的等效性能。这需要材料细观结构满足周期性假设。然而, 在一些局部区域(例如圆孔周边、层间缝合、螺纹、加工表面等), 细观结构比较特殊, 周期性假设难以适用, 如果套用周期性假设, 则计算结果会与实际情况产生很大偏差, 而这些区域通常是结构损伤萌生的部位。因此如何建立合适的模型来模拟这类非周期结构区域, 兼顾 CMC 结构多尺度计算的效率和准确性, 是当前亟待解决的难点问题。

2 本构模型

当材料处于线弹性状态时, 结构的振动响应比较容易计算。但是对于 CMC 结构, 情况要复杂得多。因为 CMCs 的本构行为呈现明显的非线性特征, 并且当载荷水平不高时, 非线性特征就已经相当显著^[17]。试验表明 CMCs 的非线性本构响应与载荷的大小有关, CMCs 的本构曲线呈现双线性特征, 并且两线性段通过一个非线性段相互连接^[18]。循环载荷下 CMCs 的本构响应更为复杂, 如图 4a 为循环载荷下 CMCs 的本构行为^[17], E 和 E_u 分别表示初始模量和卸载模量, 可见在循环载荷下 CMCs 存在显著



(a) CMCs 加卸载的变模量和迟滞现象



(b) CMCs 的拉压不对称现象

图 4 CMCs 加卸载下的非线性现象

的变模量和迟滞现象;除此之外,如图 4b 为 CMCs 在拉伸压缩循环载荷下的本构响应,由于压缩时的基体裂纹闭合导致明显的拉压不对称现象^[19]。此外,温度对 CMCs 本构行为也有很大的影响^[20]。

事实上,缺乏适用于高温振动响应计算的三维编织 CMCs 本构模型是实现结构振动计算的主要技术瓶颈。当前 CMCs 的非线性本构模型主要有两类:一类基于连续损伤力学 CDM 理论;另一类则基于细观力学方法。

法国航空航天研究院(Office National d'Etudes et de Recherches Aéronautiques, ONERA)是 CDM 本构模型的积极推动者^[19]。这种方法采用一组标量、矢量或者张量来表征材料的内部损伤。通过自由能方程和耗散势函数建立损伤萌生与演化方程,模拟结果与试验对比如图 5 所示。CDM 的优点是计算速度很快,缺点是必须通过大量拉伸、剪切、压缩甚至是拉扭试验来标定本构模型参数。因为 CDM 模型没有直接计算出细观应力场,也没有直接模拟细观失效的演化(如基体开裂、界面脱粘和纤维断裂等),而是采用等效的损伤变量来描述微结构的演变。当材料体系发生稍许变化(例如改变纤维体积比、纤维类型或者是预制体类型),就必须重新进行大量的试验来标定模型参数,具有很大的局限性。此外,如何引入合适的损伤变量、自由能方程和耗散势函数来描述振动循环载荷下 CMCs 复杂的本构行为,也是 CDM 需要突破的技术难题。

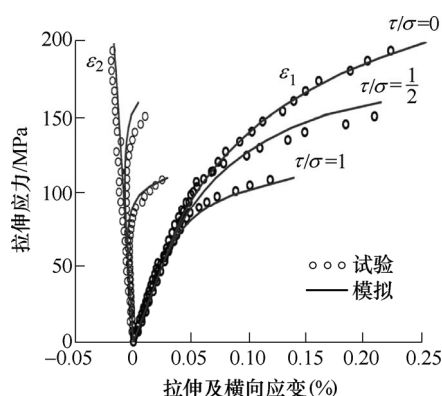


图 5 ONERA 基于 CDM 的 CMCs 本构模型

细观力学方法的核心思想是直接计算出材料细观尺度组分之间的变形协调,模拟基体开裂、界面脱粘和纤维断裂等失效模式,然后由均匀化法得到材料的应力应变关系。由于细观力学方法更为真实地反映了材料变形损伤的物理过程,尽管在建立材料细观几何模型和求解上仍存在技术难度,但已逐渐成为建立 CMCs 本构模型的主流方法和发展趋势。

剪滞模型是应用于 CMCs 非线性本构计算最为广泛的一种细观力学模型^[21-23]。如图 6a 所示,该方法采用同心圆柱体模拟纤维丝-界面-基体结构来模拟单向 CMCs,图中 σ 代表应力, x 和 r 分别表示长度方向和径向坐标, L 表示裂纹间距。分别在纤维丝和基体内部建立力平衡方程,通过求解平衡方程得到应力分布,在单轴载荷下,获得细观应力分布以后,再结合组分相的损伤模型就可以计算单向 CMCs 的应力应变响应。

采用剪滞模型描述单向 CMCs 的应力状态一定程度上是合理的,且纤维应力有解析解,相较于数值方法具有很大优势。然而复杂应力状态下,即便是单向 CMCs 在承受复合载荷如剪、弯等时,无法建立如单轴应力状态那样易于求解的控制方程。虽然一些学者致力于将剪滞模型扩展至复杂应力状态^[24-27],但大多数计算复杂且需要数值求解,即使在一些简化下有解析解,但过度简化导致细观上已无法与实际情况相符。总的来说,剪滞模型目前还难以应用于单向 CMCs 复杂应力状态计算。

针对更复杂的层合、编织 CMCs,由于铺层角度、纱线曲率的存在,细观上为复杂应力状态,因此剪滞模型也是不适用的。针对这样的情况,一部分学者在计算 CMCs 本构行为时,将 2D 编织 CMCs 的几何模型做了如图 6b 和图 6c 的简化,仍使用剪滞模型计算纤维方向的应力应变^[28-29]。

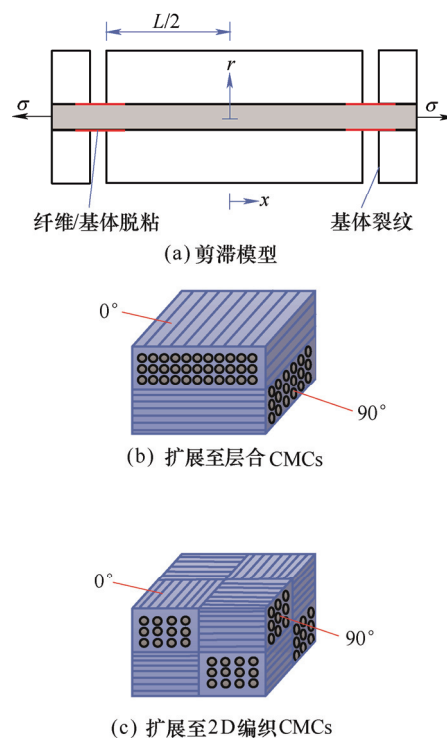


图 6 剪滞模型及其扩展

为了克服剪滞模型的缺点, 近年来研究者尝试采用有限元法(Finite element method, FEM)来建立编织 CMCs 的本构模型^[18, 30-32], 而在有限元模拟本构行为的基础上要实现 CMC 结构的多尺度动力学计算, 计算量将极为庞大。

而细观力学法目前应用于 CMC 结构的动力学计算目前也面临着极大的考验。剪滞模型为了简化界面摩擦求解难题, 假设编织结构中纤维束的应力循环是规则且等幅的。这种假设下, 界面的正向和反向滑移区的长度和分布可以事先确定。只要求解纤维与基体之间的力传导方程, 即可得到纤维和基体上的应力分布。而 CMC 结构的振动响应不一定是等幅循环的。这种情况下, 等幅循环假设不存在, 需要通过基本的界面摩擦定律来确定滑移区域的性质与分布。由于界面摩擦是一种强非线性行为, 数学模拟极为困难。

为了适应振动计算, 需要发展适用于复杂加卸载历程的编织 CMCs 本构模型, 而国际上有关此类本构模型的公开报道较少。

3 强度模型

强度模型起着为结构强度评估提供理论依据的关键作用。早期的 CMCs 强度模型基本上照搬树脂基复合材料的强度模型, 如最大应力准则, 最大应变准则, Tsai-Hill 准则等。这些准则被称为宏观强度准则^[33-38]。

由于这些准则没有考虑材料微观结构的影响, 无法模拟局部破坏的细节, 不适用于 CMCs 这种非均质特性十分明显的材料。近年来基于细观力学方法的细观强度模型则得到研究者的更多关注。

细观力学强度模型的研究重点在于如何计算组分应力分布以及组分材料的破坏强度(特别是纤维的破坏)。其中, 组分的应力分布与本构模型中的求解方法类似, 在此基础之上还需要找出细观上导致 CMCs 失效的控制因素。

为了探究 CMCs 的细观失效机理, 如表 1 所示, 国内外学者对 CMCs 进行了大量的试验研究。试验表明基体开裂、界面脱粘和纤维断裂是 CMC 强度破坏的三种基本失效模式^[65-72]。其中纤维强度对复合材料强度影响最大, 并且制备过程的高温环境对纤维性能也有显著影响^[71-72]。总的来说, 拉伸下的破坏是研究最多也是最充分的, 压缩和剪切破坏的研究则相对较少, 复杂应力状态下 CMCs 的破坏研

究是最少的^[73]。

表 1 CMCs 在不同形式载荷下的失效试验研究

	单向	2D	3D
拉伸	李龙彪等 ^[40-41] RICHTER 等 ^[42] CALLAWAY 等 ^[43] HILMAS 等 ^[44]	薛建刚等 ^[45-46] 管国阳等 ^[47] 陶永强等 ^[48] SHI 等 ^[49]	石多奇等 ^[50] 潘文革等 ^[51] MAZARS 等 ^[52] IKARASHI 等 ^[53]
压缩	FLECK 等 ^[54] EVANS ^[55] BANSAL 等 ^[56]	LANKFORD ^[57] 郭洪宝等 ^[58] PIRZADA 等 ^[59]	王波等 ^[60] XU 等 ^[61] WAN 等 ^[62]
剪切	RAJAN 等 ^[63]	李潘等 ^[64]	王波等 ^[60]

在通过试验了解 CMCs 失效模式的基础上, 学者们一直在尝试建立能够考虑组分失效的 CMCs 强度模型。

CURTIN 等^[22]认为纤维的破坏控制着最终强度, 纤维应力基于剪滞模型, 计算了基体裂纹饱和时的小复合材料的强度。CAO 和 THOULESS^[74]基于双参数韦布尔模型计算纤维在参考应力下失效的概率, 通过剪滞模型计算纤维应力, 建立了单向 CMCs 裂纹饱和状态下的强度模型。杨成鹏等^[75]引入了主裂纹的概念, 认为最大的基体裂纹控制着 CMCs 的极限强度, 基于剪滞模型计算基体裂纹间距, 并针对强弱界面分别推导了单向 CMCs 的拉伸强度。曾增等^[76]结合剪滞模型和临界应变能准则对单向 C/SiC 陶瓷基复合材料的强度进行计算, 计算结果与采用扩展有限元方法接近, 均与试验结果吻合较好。SHAO 等^[77]基于临界破坏能理论和剪滞模型建立了考虑温度影响的陶瓷纤维强度模型, 在该模型中临界破坏能由应变能和热能组成, 在此基础上推导了裂纹饱和状态下的单向 CMCs 的强度。

总结上述学者们的研究, 目前大多数单向 CMCs 强度模型都认为纤维强度控制着材料的最终失效。而判定纤维失效的依据有临界破坏能量、强度概率分布、最大应力等理论。由于基体裂纹的存在, 纤维承受载荷在长度方向是不均匀的, 纤维长度方向应力的计算大多基于剪滞模型。他们的模型均在一定程度上得到了试验结果的验证。

但是针对复杂应力状态或者复杂预制体结构, 如前文所述剪滞模型同样是不适用的。在此情况下, YANG 等^[28]将 2D 编织 CMCs 简化为交叉层, 采用剪滞模型计算纤维 0° 方向应力分布, 当纤维最大应力达到临界值时, 材料失效。类似地, DENG 等^[29]忽略了 90° 方向纤维的承载能力, 同样基于剪滞模型推导了考虑温度影响的 2D 编织 CMCs 的拉伸强度。

更多学者则采用有限元分析实现 CMCs 的强度计算,基本思路为建立包含了纤维束、基体相的 RUC 几何模型并划分网格,施加边界条件通过刚度退化的方式计算强度。

而在 RUC 有限元模型的刚度退化过程中,部分学者对不同材料(纱线、基体等)的单元基于损伤力学理论进行刚度退化,最终计算 CMCs 的强度^[78-79];还有的学者则采用两尺度模型对 RUC 进行刚度退化,两尺度包括 RUC 模型的中观尺度和组分的微观尺度,如图 7 所示。微观尺度强度计算,又可分为有限元模拟^[80-86]和细观力学方法^[87-89]。虽然采用两尺度方法可以获得更精细的细观应力分布,从而更精准地判断材料破坏的原因,但是两尺度法一方面计算量极大;另一方面两尺度的计算精度依赖于细观参数的精度,而 CMCs 较大的分散性导致其细观参数是难以表征的。

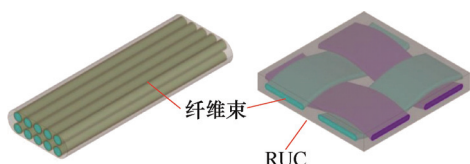


图 7 编织 CMCs 的两尺度模型

综上,目前单向 CMCs 的拉伸强度研究比较充分,而复杂应力状态、复杂预制体结构 CMCs 的强度计算仍是当前领域的难点,也是动力学分析亟待解决的问题。

4 结构动力学分析

CMC 结构的动力学特性与材料在振动状态下的力学行为密切相关。材料的模量决定了结构的刚度,从而影响固有频率,材料阻尼影响了振动系统的阻尼。目前,已有不少学者对动态加载下 CMCs 的力学特性进行了研究。FUTAKAWA 等^[90]采用 Hopkinson 压杆系统对具有 C 和 BC 界面涂层的 SiC/SiC 复合材料在不同加载速率下的强度进行了测试。试验结果表明,CMCs 的动强度随着加载速率的增大而增加。且具有 BN 涂层的 CMCs 相较于 C 涂层,具有更高的动强度,因为具有更长的纤维拔出长度。LIU 等^[91]通过 Hopkinson 压杆系统对 2D-C/SiC 层向动态压缩下的性能进行了测试。试验结果表明材料的模量、强度随加载速率的增加而增大,而失效应变随着加载速率的增加而减小。在压缩载荷的作用下,材料的破坏主要由剪力导致,且加载速率越大,破坏面倾角越大。汤彬等^[92]发展了

一种单向 CMCs 材料阻尼的计算方法,并进行了数值分析,分析结果表明单向 CMCs 的阻尼主要是由 CMCs 纤维和基体之间的滑移摩擦引起,CMCs 的阻尼随界面剪应力的减小而增大、随裂纹密度的增加而增大。

针对 CMC 结构的动力学分析,研究主要集中在结构振动特性如模态、阻尼的测试与分析。胡殿印等^[93]建立了二维编织 SiC/SiC 单胞模型,在此基础上预测了 CMCs 的宏观等效弹性常数,对复合材料平板件进行了模态分析和试验验证。研究结果表明,从 CMCs 的细观结构出发,进而预测宏观结构的动力学特性是行之有效的。徐雅洁等^[94]对平纹编织 SiC/SiC 复合材料梁的振动特性进行了试验测试。CMC 梁的振动台扫频结果表明,材料的损伤对结构的振动特性产生了显著影响,随着振动载荷的增加,CMC 梁的共振频率逐步降低,且其幅频曲线与弹性状态相比,出现了多峰值的非线性现象。

BIRMAN 和 BYRD^[95]提出了弯曲 CMC 梁基体开裂规律和刚度分布的分析方法。数值分析结果表明,即使 CMC 梁受拉侧表面基体裂纹达到饱和,此时 CMC 梁的刚度变化很小,固有频率变化仍然不明显,但是当梁的横向截面上的基体裂纹达到饱和,此时 CMC 梁的频率将会发生显著衰减。BIRMAN 和 BYRD^[96]还分析了 CMCs 中基体开裂对阻尼影响,并研究了动态加卸载对 CMCs 阻尼的影响。分析结果表明基体开裂引起的阻尼主要是桥接裂纹相邻的纤维-基体界面的摩擦能量耗散导致的,并且基体裂纹密度增加会引起 CMCs 的阻尼增大。在加卸载的情况下,如果存在桥接裂纹,用单一的材料阻尼系数来表征结构阻尼具有误导性,因为 CMCs 的阻尼在结构中是空间分布的。有必要在解析或数值解中反映局部阻尼,这种阻尼取决于应力的分布以及运动的频率。

综合上述针对 CMC 结构振动特性的研究结论,可知对于应力状态更复杂的结构,不宜再采用单一的材料属性,而应结合材料所处部位的载荷状况包括机械应力、热应力等条件,考虑材料的损伤状况,赋予局部单元相应的力学参数,才能获得更精准的分析结果。然而,由于 CMCs 在振动状态下损伤机理十分复杂,和振动的频率、幅值是相耦合的,因此在结构动力学分析时如何确定材料参数具有相当的难度。

为了直接反映 CMCs 损伤对结构振动响应的影响,GAO 等^[97]采用两尺度方法对单向 CMC 杆在轴

向载荷作用下的瞬态动力学响应进行了模拟, 细观上基于有限元法对细观模型进行离散和求解, 并考虑了基体开裂与界面滑移的影响。计算结果表明, 由于裂纹闭合, CMC 结构的振动幅值具有不对称的特征, 界面的滑移抑制了固有频率下结构动力学响应的无限增大。GAO 等^[98]还进行了单向 C/SiC 梁的扫频试验, 不同载荷下的幅频响应如图 8 所示, 并采用两尺度方法对其时域响应进行了模拟, 采用剪滞模型对 CMCs 的细观本构响应进行模拟, 宏观尺度采用中心差分法对动力学方程进行计算。试验与仿真结果均显示, 由于 CMCs 的损伤, CMC 梁的幅频曲线呈现共振区递增扫频时陡升、递减扫频时缓降的特征, 分析表明这是 CMCs 损伤累积的结果。

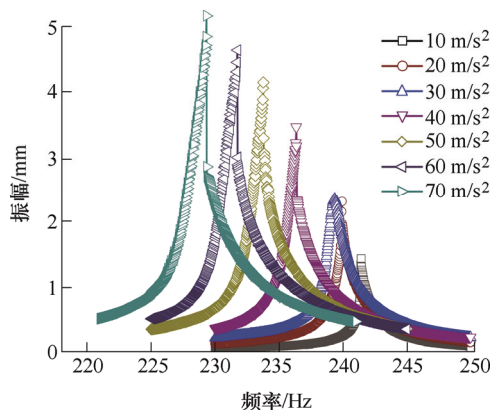


图 8 不同载荷下的 CMC 梁幅频曲线

采用多尺度方法模拟 CMC 结构的振动响应, 考虑了局部材料损伤, 能模拟非线性动力学行为。然而, 计算 CMC 结构的时域响应由于算法的稳定性条件限制, 求解是十分耗时的。且在细观尺度的模拟大多仅限单向 CMCs, 工程中常用的编织结构 CMCs 损伤机理十分复杂, 这对细观尺度的模拟提出了更高的要求。

为了更贴近 CMCs 的实际应用场景——航空发动机热端部件, 一些学者还对多物理场作用下 CMC 结构的振动问题进行了分析。HÖNIG 等^[99]进行了正交各向异性 C/C-SiC 复合材料无损共振频率阻尼分析(Resonant frequency damping analysis, RFDA), 研究了 CMCs 动态模量与温度的关系。试验结果表明, 尽管 C/C-SiC 材料的拉伸模量在惰性气氛下从室温到大约 1 350 °C 的范围内保持恒定, 但纵向弯曲模量随温度增加。因此, 对于在高温下承受弯曲载荷的 C/C-SiC 材料, 在数值计算中采用其弯曲模量将会获得更精准的结果。

HAN 等^[100]采用弱耦合的方式对 CMC 平板的

流固耦合振动响应进行了模拟(图 9)。结构域采用两尺度方法对单向 CMC 梁脉冲激励下的自由振动响应进行了模拟。计算结果表明: 随着脉冲载荷的增加, CMCs 的损伤加剧, 一方面其自由振动的频率随之下降, 另一方面振幅衰减更快。这是因为 CMCs 损伤一方面降低了结构的刚度, 另一方面材料的迟滞引起的阻尼使系统能量更快耗散。流固耦合作用为振动系统引入了附加质量和阻尼, 降低了振动的频率和振幅。

由于 CMC 结构工况的复杂性, CMC 结构往往受到离心、气动、热应力等载荷的共同作用, 目前针对 CMC 结构的多物理场仿真大多数仅有 2 个物理场, 还停留在初步研究阶段。

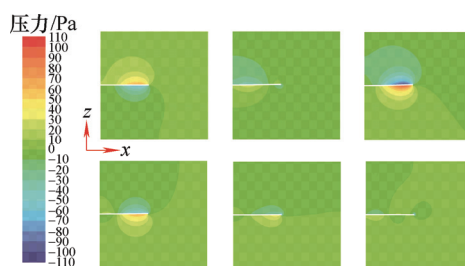


图 9 CMC 平板流固耦合仿真

5 结论

陶瓷基复合材料良好的高温力学行为以及其较低的质量密度使其成为高性能航空发动机热端部件的重要候选材料。但是 CMC 的各向异性、非均质性、变模量和迟滞特性给该材料的结构设计, 特别是动力学强度设计带来巨大挑战, 主要体现在多 R 度建模方法、本构模型、强度模型和结构动力学分析方法四个方面。这些挑战也为未来本领域指明了发展方向。

(1) 对 CMC 结构的多尺度建模是进行结构动力学分析和设计的第一步, 模型的精度直接决定了计算结果的精度。然而 CMC 结构的非均质性使得以周期性假设为前提的均匀化方法不再适用。如何建立合适的模型来模拟这类非周期结构区域, 并兼顾 CMCs 结构多尺度计算的效率和准确性, 是当前亟待解决的难点问题。

(2) CMC 结构的动力学响应通常是非等幅的, 因此等幅循环假设不适用于 CMC 结构动力学强度分析, 需要通过基本的界面摩擦定律来确定滑移区域的性质与分布。由于界面摩擦是一种强非线性行为, 数学模拟极为困难, 需要发展适用于复杂加卸载历程的编织 CMCs 本构模型, 而国际上有关此类

本构模型的公开报道较少。

(3) 由于 CMCs 的非均质特性, 其纤维束通常处于复杂的应力状态。但是目前主流的剪滞模型难以考虑复杂应力的影响。而有限元模拟本构行为, 计算量较大。所以如何建立考虑三维应力状态对纤维束复合材料力学行为影响的编织 CMCs 强度模型是当前本领域的发展方向。

(4) 学界已经意识到 CMCs 的损伤在结构振动响应的分析起着至关重要的作用, 在动力学分析中需对 CMCs 的损伤机理加以考虑, 并开始对多物理场下 CMC 结构的针对问题展开了研究。CMC 结构振动分析的发展方向: 第一, 对结构局部损伤影响下的刚度、阻尼等动力学参数的进行表征, 并反映到结构振动特性的变化上, 进而可对 CMC 结构的设计进行指导; 第二, 分析具有更为复杂预制体和与之对应损伤模式下的 CMC 结构的振动分析; 第三, 接近真实工况的 CMC 结构的多物理场振动分析。

参 考 文 献

- [1] 张宝诚. 航空发动机的现状和发展[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2008, 25(3): 6-10.
ZHANG Baocheng. The current situation and development of aeroengine[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2008, 25(3): 6-10.
- [2] GRADY J E. CMC technology advancements for gas turbine engine applications[C]//10th Pacific Rim Conference on Ceramic and Glass Technology (American Ceramic Society), San Diego, CA. 2013.
- [3] DICARLO J A, YUN H M, MORSCHER G N, et al. Progress in SiC/SiC ceramic composite development for gas turbine hot-section components under NASA EPM and UEET programs[C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. 2002, 36096: 39-45.
- [4] DICARLO J A, YUN H M, MORSCHER G N, et al. SiC/SiC composites for 1 200℃ and above[M]//Handbook of ceramic composites. Boston: Springer, 2005: 77-98.
- [5] ZOK F W. Ceramic-matrix composites enable revolutionary gains in turbine engine efficiency[J]. Am. Ceram. Soc. Bull., 2016, 95(5): 22-28.
- [6] 张庆民, 张万秋, 王立波. 发动机涡轮 II 级叶片断裂原因分析[J]. 失效分析与预防, 2010, 5(1): 35-8.
ZHANG Qingmin, ZHANG Wanqiu, WANG Libo. Analysis of the causes of the fracture of engine turbine II stage blades[J]. Failure Analysis and Prevention, 2010, 5(1): 35-38.
- [7] MITAL S K, GOLDBERG R K, BONACUSE P J. Two-dimensional nonlinear finite element analysis of CMC microstructures[C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. 2011, 54617: 491-496.
- [8] BORKOWSKI L, CHATTOPADHYAY A. Multiscale model of woven ceramic matrix composites considering manufacturing induced damage[J]. Composite Structures, 2015, 126: 62-71.
- [9] SHOJAEI A, LI G, FISH J, et al. Multi-scale constitutive modeling of ceramic matrix composites by continuum damage mechanics[J]. International Journal of Solids & Structures, 2014, 51(23-24): 4068-4081.
- [10] GAO Xiguang, LUO Piaoyang, YU Guoqiang, et al. Micro-XCT-based finite element method for prediction of elastic modulus of plane woven carbon fiber-reinforced ceramic matrix composites[J]. Journal of Composite Materials, 2015, 49(27): 3373-3385.
- [11] TOHIDI S D, ROCHA A M, ENGESSER B, et al. Micromechanical finite element parametric study of polyamide 6 based single polymer composites reinforced by woven textile structures[J]. Composite Structures, 2019, 225: 111088.
- [12] GHOSH S, LEE K, RAGHAVAN P. A multi-level computational model for multi-scale damage analysis in composite and porous materials[J]. International Journal of Solids & Structures, 2001, 38(14): 2335-2385.
- [13] SHARMA R, MAHAJAN P, MITTAL R K. Image-based finite element analysis of 3D-orthogonal carbon-carbon composite[C]//Proceedings of the World Congress on Engineering. 2010, 2: 1597-1601.
- [14] 于皓. 基于 XCT 技术的陶瓷基复合材料导热系数预测及应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
YU Hao. Prediction and application of thermal conductivity of ceramic matrix composites based on XCT technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [15] 朱宝城, 高希光, 宋迎东. 陶瓷基复合材料螺栓渐进损伤计算与强度预测[J]. 推进技术, 2020, 41(2): 406-411.
ZHU Baocheng, GAO Xiguang, SONG Yingdong. Progressive damage calculation and strength prediction of ceramic matrix composites bolt[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(2): 406-411.
- [16] SCHMIDT S, BEYER S, KNABE H, et al. Advanced

- ceramic matrix composite materials for current and future propulsion technology applications[J]. *Acta Astronautica*, 2004, 55(3): 409-420.
- [17] YANG Chengpeng, JIAO Guiqiong, WANG Bo, et al. Damage-based failure theory and its application to 2D-C/SiC composites[J]. *Composites Part A*, 2015, 77: 181-187.
- [18] AUBARD X, LAMON J, ALLIX O. Model of the nonlinear mechanical behavior of 2D SiC-SiC chemical vapor infiltration composites[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2010, 77(8): 2118-2126.
- [19] CHABOCHE J L, MAIRE J F. A new micromechanics based CDM model and its application to CMC's[J]. *Aerospace Science & Technology*, 2002, 6(2): 131-145.
- [20] GAO Xiguang, LI Long, SONG Yingdong. A temperature-dependent constitutive model for fiber-reinforced ceramic matrix composites and structural stress analysis[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2014, 23(4): 507-522.
- [21] BLACKLOCK M, HAYHURST D. Multi-axial failure of ceramic matrix composite fiber tows[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2011, 78(3): 2388-2399.
- [22] CURTIN W A, AHN B K, TAKEDA N. Modeling brittle and tough stress-strain behavior in unidirectional ceramic matrix composites[J]. *Acta Materialia*, 1998, 46(10): 3409-3420.
- [23] SOLTI J, MALL S, ROBERTSON D. Modeling behavior of cross-ply ceramic matrix composites under quasi-static loading[J]. *Applied Composite Materials*, 1995, 2(5): 265-292.
- [24] OKABE T, TAKEDA N, KAMOSHIDA Y, et al. A 3D shear-lag model considering micro-damage and statistical strength prediction of unidirectional fiber-reinforced composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2001, 61(12): 1773-1787.
- [25] JIANG Guoliang, PETERS K. A shear-lag model for three-dimensional, unidirectional multilayered structures[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2008, 45(14-15): 4049-4067.
- [26] PENG Zheqi, WANG Xin, WU Zhishen. A bundle-based shear-lag model for tensile failure prediction of unidirectional fiber-reinforced polymer composites[J]. *Materials & Design*, 2020, 196: 109103.
- [27] PENG Zheqi, WANG Xin, WU Zhishen. Multiscale strength prediction of fiber-reinforced polymer cables based on random strength distribution[J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 196: 108228.
- [28] YANG Chengpeng, ZHANG Litong, WANG Bo, et al. Tensile behavior of 2D-C/SiC composites at elevated temperatures: Experiment and modeling [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2017, 37(4): 1281-1290.
- [29] DENG Yong, LI Weiguo, WANG Xiaorong, et al. Temperature-dependent tensile strength model for 2D woven fiber reinforced ceramic matrix composites[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2018, 101(11): 5157-5165.
- [30] CHEN Mingming, BLACKLOCK M, ZHANG Daxu, et al. Effects of stochastic tow waviness on stiffness and strength of plain-weave ceramic matrix composites[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, 9(8): 1-10.
- [31] FAGIANO C, GENET M, BARANGER E, et al. Computational geometrical and mechanical modeling of woven ceramic composites at the mesoscale[J]. *Composite Structures*, 2014, 112(1): 146-156.
- [32] ISMAR H, SCHRÖTER F, STREICHER F. Modeling and numerical simulation of the mechanical behavior of woven SiC/SiC regarding a three-dimensional unit cell[J]. *Computational Materials Science*, 2000, 19(1-4): 320-328.
- [33] YEH H, KIM C H. The Yeh-Stratton criterion for composite materials[J]. *Journal of Composite Materials*, 1994, 28(10): 926-939.
- [34] YEH H, LEE R C. Simple analysis of the Yeh-Stratton failure criterion on composite materials[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1995, 51(1): 37-49.
- [35] KIM C H, YEH H. Development of a new yielding criterion: The Yeh-Stratton criterion[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1994, 47(4): 569-582.
- [36] TSAI S W, WU E M. A general theory of strength for anisotropic materials[J]. *Journal of Composite Materials*, 1971, 5(1): 58-80.
- [37] HOFFMAN O. The brittle strength of orthotropic materials[J]. *Journal of Composite Materials*, 1967, 1(2): 200-206.
- [38] HASHIN Z, ROTEM A. A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials[J]. *Journal of Composite Materials*, 1973, 7(4): 448-464.
- [39] 杜善义, 王彪. 复合材料细观力学[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- DU Shanyi, WANG Biao. *Micromechanics of composite materials*[M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [40] 李龙彪, 宋迎东, 孙志刚. 单向陶瓷基复合材料单轴拉伸强度研究[J]. *航空动力学报*, 2010, 25(10): 1994-2001.

- 2177-2187.
- LI Longbiao, SONG Yingdong, SUN Zhigang. Research on uniaxial tensile strength of unidirectional ceramic matrix composites[D]. Journal of Aeronautics and Dynamics, 2010, 25(10): 2177-2187.
- [41] 李龙彪. 长纤维增强陶瓷基复合材料疲劳损伤模型与寿命预测[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- LI Longbiao. Fatigue damage model and life prediction of long fiber reinforced ceramic matrix composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [42] RICHTER H, PETERS P W M. Tensile strength distribution of all-oxide ceramic matrix mini-composites with porous alumina matrix phase[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2016, 36(13): 3185-3191.
- [43] CALLAWAY E B, ZOK F W. Tensile response of unidirectional ceramic minicomposites[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2020, 138: 103903.
- [44] HILMASA A M, HENSON G, SINGHAL A, et al. In-situ observation of damage in unidirectional CMC laminates under tension[J]. Ceramics International, 2020, 46(9): 13502-13510.
- [45] 薛建刚, 高希光, 方光武, 等. 2.5D C/SiC 复合材料连续损伤本构模型[J]. 复合材料学报, 2016, 33(3): 606-612.
- XUE Jiangang, GAO Xiguang, FANG Guangwu, et al. Continuous damage constitutive model for 2.5D C/SiC composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016(3): 606-612.
- [46] 薛建刚, 高希光, 方光武, 等. 针刺陶瓷基复合材料损伤本构模型及构件应力分析[J]. 航空动力学报, 2016, 31(10): 2370-2375.
- XUE Jiangang, GAO Xiguang, FANG Guangwu, et al. Damage constitutive model and component stress analysis of needle-punched ceramic matrix composites[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(10): 2370-2375.
- [47] 管国阳, 矫桂琼, 张增光. 2D-C/SiC 复合材料的宏观拉压特性和失效模式[J]. 复合材料学报, 2005, 22(4): 81-85.
- GUAN Guoyang, JIAO Guiqiong, ZHANG Zengguang. Macroscopic tensile and compression characteristics and failure modes of 2D-C/SiC composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(4): 81-85.
- [48] 陶永强, 矫桂琼, 王波, 等. 2D 编织陶瓷基复合材料应力-应变行为的试验研究和模拟[J]. 固体力学学报, 2010, 31(3): 258-268.
- TAO Yongqiang, JIAO Guiqiong, WANG Bo, et al. Stress-strain behavior in 2D weave ceramic matrix composite: analysis predictions[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2010, 31(3): 258-268.
- [49] SHI Duoqi, LIU Changqi, CHENG Zhen, et al. On the tensile behaviors of 2D twill woven $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ composites at ambient and elevated temperatures: mesoscale analysis and in situ experimental investigation[J]. Ceramics International, 2021, 47(9): 12680-12694.
- [50] 石多奇, 景鑫, 杨晓光. 三维四向编织 CMCs 拉伸性能及损伤演化数值预测[J]. 复合材料学报, 2014, 31(6): 1543-1550.
- SHI Duoqi, JING Xin, YANG Xiaoguang. Numerical prediction of tensile properties and damage evolution of three dimensional-four directional braided CMCs[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(6): 1543-1550.
- [51] 潘文革, 矫桂琼, 管国阳, 等. 三维编织 C/SiC 复合材料的拉伸破坏行为[J]. 硅酸盐学报, 2005(2): 160-163.
- PAN Wenge, JIAO Guiqiong, GUAN Guoyang, et al. Tensile damage behavior of three-dimensional braided C/SiC composites[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2005(2): 160-163.
- [52] MAZARS V, CATY O, COUÉGNAT G, et al. Damage investigation and modeling of 3D woven ceramic matrix composites from X-ray tomography in-situ tensile tests[J]. Acta Materialia, 2017, 140: 130-139.
- [53] IKARASHI Y, OGASAWARA T, AOKI T. Micromechanical model of time-dependent damage and deformation behavior for an orthogonal 3D-woven SiC/SiC composite at elevated temperature in vacuum[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2020, 40(12): 3887-3896.
- [54] FLECK N A, BUDIANSKY B. Compressive failure of fibre composites due to microbuckling[M]//Inelastic deformation of composite materials. New York: Springer, 1991: 235-273.
- [55] EVANS A G. The mechanical performance of fiber-reinforced ceramic matrix composites[J]. Materials Science and Engineering: A, 1989, 107: 227-239.
- [56] BANSAL N P, LAMON J. Ceramic matrix composites: materials, modeling and technology[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014.
- [57] LANKFORD J. The effect of hydrostatic pressure and loading rate on compressive failure of fiber-reinforced ceramic-matrix composites[J]. Composites Science &

- Technology, 1994, 51(4): 537-543.
- [58] 郭洪宝, 谢骏. 2D-SiC/SiC 复合材料损伤耦合力学行为[J]. 材料工程, 2019, 47(10): 160-165.
- GUO Hongbao, XIE Jun. Damage coupling mechanical behaviors of 2D-SiC/SiC composite[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(10): 160-165.
- [59] PIRZADA T J, SINGH S, DE MEYERE R, et al. Effects of polymer infiltration processing (PIP) temperature on the mechanical and thermal properties of Nextel 312 fibre SiCO ceramic matrix composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021, 140: 106197.
- [60] 王波, 矫桂琼, 常岩军, 等. 三维编织 C/SiC 复合材料剪切和压缩性能的试验研究[J]. 航空材料学报, 2006(6): 64-67.
- WANG Bo, JIAO Guiqiong, CHANG Yanjun, et al. Experimental study on the shear and compression properties of 3D braided C/SiC composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006(6): 64-67.
- [61] XU Huajie, ZHANG Litong, CHENG Laifei. The yarn size dependence of tensile and in-plane shear properties of three-dimensional needled textile reinforced ceramic matrix composites[J]. Materials & Design, 2015, 67: 428-435.
- [62] WAN Fan, LIU Rongjun, WANG Yanfei, et al. In situ observation of compression damage in a 3D needled-punched carbon fiber-silicon carbide ceramic matrix composite[J]. Composite Structures, 2019, 210: 189-201.
- [63] RAJAN V P, ZOK F W. Matrix cracking of fiber-reinforced ceramic composites in shear[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2014, 73: 3-21.
- [64] 李潘, 王波, 甄文强, 等. 二维编织 SiC/SiC 复合材料的剪切性能[J]. 机械强度, 2014, 36(5): 691-693.
- LI Pan, WANG Bo, ZHEN Wenqiang, et al. Shear properties of two-dimensional braided SiC/SiC composites[J]. Mechanical Strength, 2014, 36(5): 691-693.
- [65] SOLT J P, MALL S, ROBERTSON D D, et al. Modeling damage in unidirectional ceramic-matrix composites[J]. Composites Science and Technology, 1995, 54(1): 55-66.
- [66] LISSART N, LAMON J. Damage and failure in ceramic matrix minicomposites: Experimental study and model[J]. Acta Materialia, 1997, 45(3): 1025-1044.
- [67] CHATEAU C, GÉLÉBART L, BORNERT M, et al. Modeling of damage in unidirectional ceramic matrix composites and multi-scale experimental validation on third generation SiC/SiC minicomposites[J]. Journal of The Mechanics and Physics of Solids, 2014: 298-319.
- [68] ZHANG Sheng, GAO Xiguang, CHEN Jing, et al. Strength model of the matrix element in SiC/SiC composites[J]. Materials & Design, 2016, 101: 66-71.
- [69] ZHANG Sheng, GAO Xiguang, CHEN Jing, et al. Effects of micro-damage on the nonlinear constitutive behavior of SiC/SiC minicomposites[J]. Journal of Ceramic Science and Technology, 2016, 7(4): 341-348.
- [70] ZHANG Sheng, GAO Xiguang, SONG Yingdong. In situ strength model for continuous fibers and multi-scale modeling the fracture of C/SiC composites[J]. Applied Composite Materials, 2019, 26(1): 357-370.
- [71] ZHANG Sheng, GAO Xiguang, DONG Hongnian, et al. In situ modulus and strength of carbon fibers in C/SiC composites[J]. Ceramics International, 2017, 43(9): 6885-6890.
- [72] HAN Xiao, GAO Xiguang, SONG Yingdong, et al. Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical behavior of SiC/SiC mini-composites[J]. Materials Science and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2019: 94-104.
- [73] 王翔, 王波, 矫桂琼, 等. 平纹编织 C/SiC 材料复杂应力状态的力学行为试验研究[J]. 机械强度, 2010, 32(1): 35-39.
- WANG Xiang, WANG Bo, JIAO Guiqiong, et al. Experimental investigation on plain woven C/SiC composites under complex stress states[J]. Journal of Mechanical Strength, 2010, 32(1): 35-39.
- [74] CAO Hengchu, THOULESS M D. Tensile tests of ceramic-matrix composites: Theory and experiment[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1990, 73(7): 2091-2094.
- [75] 杨成鹏, 矫桂琼, 王波. 界面性能对陶瓷基复合材料拉伸强度的影响[J]. 无机材料学报, 2009, 24(5): 919-923.
- YANG Chengpeng, JIAO Guiqiong, WANG Bo. Effects of interface properties on tensile strength of ceramic matrix composites[J]. Journal of Inorganic Materials, 2009, 24(5): 919-923.
- [76] 曾增, 张庆茂, 刘伟先, 等. 单向 C/SiC 陶瓷基复合材料基体失效机制与强度预测[J]. 复合材料学报, 2015, 32(4): 1075-1082.
- ZENG Zeng, ZHANG Qingmao, LIU Weixian, et al. Matrix failure mechanism and strength prediction of UD-C/SiC ceramic matrix composites[J]. Acta Materialia Sinica, 2015, 32(4): 1075-1082.

- [77] SHAO Jiaying, LI Weiguo, DENG Yong, et al. Theoretical models and influencing factor analysis for the temperature-dependent tensile strength of ceramic fibers and their unidirectional composites[J]. *Composite Structures*, 2017, 164: 23-31.
- [78] LAMON J, THOMMERET B, PERCEVAULT C. Probabilistic-statistical approach to matrix damage and stress-strain behavior of 2-D woven SiC/SiC ceramic matrix composites[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 1998, 18(13): 1797-1808.
- [79] DAGGUMATI S, SHARMA A, KASERA A, et al. Failure analysis of unidirectional ceramic matrix composite lamina and cross-ply laminate under fiber direction uniaxial tensile load: Cohesive zone modeling and brittle fracture mechanics approach[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020: 1-12.
- [80] MEYER P, WAAS A M. Mesh-objective two-scale finite element analysis of damage and failure in ceramic matrix composites[J]. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, 2015, 4(1): 63-80.
- [81] WANG Liang, WU Jiayi, CHEN Chuanyong, et al. Progressive failure analysis of 2D woven composites at the meso-micro scale[J]. *Composite Structures*, 2017, 178: 395-405.
- [82] ZHOU Lichuan, CHEN Mingwei, LIU Chuang, et al. A multi-scale stochastic fracture model for characterizing the tensile behavior of 2D woven composites[J]. *Composite Structures*, 2018, 204: 536-547.
- [83] SHI Duoqi, TENG Xuefeng, JING Xin, et al. A multi-scale stochastic model for damage analysis and performance dispersion study of a 2.5 D fiber-reinforced ceramic matrix composites[J]. *Composite Structures*, 2020, 248: 112549.
- [84] SKINNER T, RAI A, CHATTOPADHYAY A. Multiscale ceramic matrix composite thermomechanical damage model with fracture mechanics and internal state variables[J]. *Composite Structures*, 2020, 236: 111847.
- [85] YANG Zhengmao, YAN Han. Multiscale modeling and failure analysis of an 8-harness satin woven composite[J]. *Composite Structures*, 2020, 242: 112186.
- [86] 惠新育, 许英杰, 张卫红, 等. 平纹编织 SiC/SiC 复合材料多尺度建模及强度预测[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(10): 2380-2388.
- HUI Xinyu, XU Yingjie, ZHANG Weihong, et al. Multi-scale modeling and strength prediction of plain weave SiC/SiC composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(10): 2380-2388.
- [87] ZHANG Daxu, HAYHURST D R. Stress-strain and fracture behaviour of 0/90 and plain weave ceramic matrix composites from tow multi-axial properties[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2010, 47(21): 2958-2969.
- [88] GAO Xiguang, DONG Hongnian, ZHANG Sheng, et al. Multi-scale modeling and experimental study of the strength of plain-woven SiC/SiC composites[J]. *Applied Composite Materials*, 2019, 26(5): 1333-1348.
- [89] 孔春元, 孙志刚, 高希光, 等. 2.5 维 C/SiC 复合材料经向拉伸性能[J]. *复合材料学报*, 2012(2): 192-198.
- KONG Chunyuan, SUN Zhigang, GAO Xiguang, et al. Warp tensile properties of 2.5-dimensional C/SiC composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2012(2): 192-198.
- [90] FUTAKAWA M, TANABE Y, WAKUI T, et al. Dynamic effect on strength in SiCf/SiCm composite[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 25(1): 29-40.
- [91] LIU Mingshuang, LI Yulong, XU Fei, et al. Dynamic compressive mechanical properties and a new constitutive model of 2D-C/SiC composites[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 489(1-2): 120-126.
- [92] 汤彬, 孙志刚, 高希光, 等. 单向陶瓷基复合材料阻尼计算方法[J]. *航空动力学报*, 2010, 25(10): 2217-2222.
- TANG Bin, SUN Zhigang, GAO Xiguang, et al. Damping calculation method for unidirectional ceramic matrix composites[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(10): 2217-2222.
- [93] 胡殿印, 曾雨琪, 张龙, 等. 二维编织 SiC/SiC 陶瓷基复合材料宏观弹性常数预测及模态试验研究[J]. *推进技术*, 2018, 39(2): 465-472.
- HU Dianyin, ZENG Yuqi, ZHANG Long, et al. Prediction of macro-elastic constants and modal test of two-dimensional braided SiC/SiC ceramic matrix composites[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(2): 465-472.
- [94] 徐雅洁, 高希光, 张华军, 等. 损伤对平纹编织陶瓷基复合材料梁振动特性影响的试验研究[J/OL]. *推进技术*: 1-7 [2021-02-05]. <https://doi.org/10.13675/j.cnki.tjjs.200010>.
- XU Yajie, GAO Xiguang, ZHANG Huajun, et al. Experimental study on the influence of damage on the vibration characteristics of plain weave ceramic matrix composite beams[J/OL]. *Propulsion Technology*: 1-7

- [2021-02-05]. <https://doi.org/10.13675/j.cnki.tjjs.200010>.
- [95] BIRMAN V, BYRD L W. Matrix cracking in transverse layers of cross-ply beams subjected to bending and its effect on vibration frequencies[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2001, 32(1): 47-55.
- [96] BIRMAN V, BYRD L W. Damping in ceramic matrix composites with matrix cracks[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2003, 40(16): 4239-4256.
- [97] GAO Xiguang, SONG Yingdong, SUN Zhigang, et al. Numerical simulation of dynamic response of fiber reinforced ceramic matrix composite beam with matrix cracks using multiscale modeling[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2010, 23(5): 537-548.
- [98] GAO Xiguang, HAN Dong, CHEN Jing, et al. Numerical and experimental study on the nonlinear dynamic response of a ceramic matrix composites beam[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(6): 6223-6231.
- [99] HÖNIG S, KOCH D, WEBER S, et al. Evaluation of dynamic modulus measurement for C/C-SiC composites at different temperatures[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2019, 16(5): 1723-1733.
- [100] HAN Dong, GAO Xiguang, ZHANG Huajun, et al. Dynamic and fluid-structure interaction simulations of a ceramic matrix composite plate[J]. *Composite Structures*, 2020, 243: 112177.

作者简介: 高希光, 男, 1981 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为陶瓷基复合材料力学模型与结构设计。
E-mail: gaoxiguang@nuaa.edu.cn
宋迎东(通信作者), 男, 1969 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为航空发动机结构强度设计与分析。
E-mail: ydsong@nuaa.edu.cn

(上接第 234 页)

- [64] TAN J P, TU S T, WANG G Z, et al. Effect and mechanism of out-of-plane constraint on creep crack growth behavior of a Cr-Mo-V steel[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2013, 99(1): 324-334.
- [65] NIKBIN K. Justification for meso-scale modelling in quantifying constraint during creep crack growth[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2004, 365(1): 107-113.
- [66] JIANG W, LUO Y, ZHANG B, et al. Characterization of creep constraint effect for brazed joint specimens at crack tip by new constraint parameter A_s [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, 109: 102707.
- [67] WANG G Z, LIU X L, XUAN F Z, et al. Effect of constraint induced by crack depth on creep crack-tip stress field in CT specimens[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2010, 47(1): 51-57.
- [68] TAN J P, WANG G Z, TU S T, et al. Load-independent creep constraint parameter and its application[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2014, 116(1): 41-57.
- [69] MA H S, WANG G Z, XUAN F Z, et al. Unified characterization of in-plane and out-of-plane creep constraint based on crack-tip equivalent creep strain[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015, 142(10): 1-20.
- [70] 肖承燃. Inconel625BNi-2 钎焊接头强韧化机理研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2020.
- XIAO Chengran. Study on strengthening and toughening mechanism of Inconel625/BNi-2 brazed joint[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2020.
- [71] ZHANG Y C, YU X T, JIANG W, et al. Elastic modulus and hardness characterization for microregion of Inconel 625/BNi-2 vacuum brazed joint by high temperature nanoindentation[J]. *Vacuum*, 2020, 181: 109582.

作者简介: 张玉财, 男, 1986 年出生, 博士。主要研究方向为高温结构完整性。
E-mail: zhangyucai050223@163.com
涂善东(通信作者), 男, 1961 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为高温结构完整性。
E-mail: sttu@ecust.edu.cn