

航空发动机陶瓷基复合材料疲劳迟滞机理与模型 研究进展

宋迎东 高希光 孙志刚

(南京航空航天大学能源与动力学院, 南京, 210016)

摘要: 对陶瓷基复合材料疲劳迟滞机理与模型的研究进展进行综述。首先, 简要回顾了陶瓷基复合材料在航空发动机上的应用情况, 综述了单向、铺层和编织陶瓷基复合材料细观疲劳失效模式与疲劳迟滞机理。总结出纤维增强陶瓷基复合材料基本的细观失效模式是: 基体裂纹、纤维/基体界面脱粘和纤维断裂、铺层陶瓷基复合材料中的铺层/铺层界面脱粘以及编织陶瓷基复合材料中的纱线/纱线界面和纱线/基体界面脱粘。脱粘后的各类界面在循环载荷下的界面滑移是导致疲劳迟滞行为的根本原因。然后, 详细分析了陶瓷基复合材料疲劳迟滞行为力学建模研究历史与现状, 指出了其中存在的问题。最后, 对陶瓷基复合材料疲劳迟滞行为研究的发展趋势进行了展望。

关键词: 航空发动机; 陶瓷基复合材料; 疲劳; 迟滞; 失效机理

中图分类号: V231.9; TB332

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2019)04-0417-10

Progress on Fatigue Hysteresis Mechanisms and Models of Aero-engine Ceramic Matrix Composites

SONG Yingdong, GAO Xiguang, SUN Zhigang

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Progress on the fatigue hysteresis mechanisms and models of ceramic matrix composites is reviewed. The application of ceramic matrix composites on the aero-engines is introduced first. The microscopic failure modes and fatigue hysteresis mechanisms of unidirectional, laminated and braided ceramic matrix composites are then discussed, including the general matrix cracking, the fiber/matrix interfacial debonding and fiber fracture for these three types of composites, the laminate/laminate interfacial debonding for laminated ceramic matrix composites, and the yarn/yarn and yarn/exterior matrix interfacial debonding for braided ceramic matrix composites. The primary cause of the fatigue hysteresis behavior is the interfacial sliding under cyclic loading after the dedonding of these interfaces. Finally, progress on the hysteresis models is also reviewed and the development direction is pointed out.

Key words: aero-engine; ceramic matrix composites; fatigue; hysteresis; damage mechanisms

基金项目: 国家自然科学基金(51675266, 51575261)资助项目; 国家重点研发计划(2017YFB0703200)资助项目。

收稿日期: 2019-07-30; **修订日期:** 2019-08-09

作者简介: 宋迎东, 男, 1969年3月生, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 陶瓷基复合材料失效机理、力学模型与结构设计。先后主持承担国家自然科学基金、国家重点研发计划、“两机专项”基础研究重大项目、军委科技委基础加强重点项目、国防973、总装预研、空装预研、陆航预研等40余项科研项目。在国内外重要刊物发表学术论文200余篇, 其中SCI收录近60篇, 申请和授权发明专利50余件, 获得省部级科技成果二等奖3项、三等奖2项、市级科技成果一等奖1项。获得江苏省“333高层次人才培养工程”中青年科学技术带头人、江苏省高校科技先进个人、美国UTC-容闳科技教育奖、霍英东教育基金会高校青年教师奖等荣誉称号。

通信作者: 宋迎东, E-mail: ydsong@nuaa.edu.cn。

引用格式: 宋迎东, 高希光, 孙志刚. 航空发动机陶瓷基复合材料疲劳迟滞机理与模型研究进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(4): 417-426. SONG Yingdong, GAO Xiguang, SUN Zhigang. Progress on Fatigue Hysteresis Mechanisms and Models of Aero-engine Ceramic Matrix Composites[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(4): 417-426.

纤维增强陶瓷基复合材料,由于具有低密度和高耐温性,在航空发动机热端部件的应用上已经显示出巨大的发展潜力。在民用航空发动机中采用陶瓷基复合材料(Ceramics matrix composites, CMCs)结构,可以降低冷却空气量,提高涡轮前温度和燃烧效率,降低油耗率和有害排放,从而提高航空发动机的经济性和环保性,这也是民用航空发动机热端部件结构的重要发展趋势。在军用航空发动机上采用陶瓷基复合材料结构,可以显著地降低发动机重量,提高涡轮前温度,从而提高发动机的推重比。按照增强纤维的细观结构形式,纤维增强陶瓷基复合材料分为单向CMCs、铺层CMCs和编织CMCs(包括2维、2.5维和3维编织等形式)。编织CMCs以纤维预成型件为增强体,从根本上消除了单向和铺层陶瓷基复合材料层间强度低、易分层、抗冲击性能差、开裂和损伤容限低等缺点,能够大幅度提高CMCs的强度和刚度,并可以显著提高韧性。在航空发动机上实际工程应用中通常都是编织CMCs结构。

法国于20世纪80年代末,最早开展了编织CMCs尾喷管调节片在航空发动机上的试验验证工作,90年代在M88-2和M53-2军用航空发动机上投入实际使用,与原型机的高温合金材料相比,降低重量30%^[1-2]。21世纪初,法国和美国各自在CFM56发动机上开展了编织CMCs燃烧室的试验,这是编织CMCs第一次在民用航空发动机上应用,结果表明可以大大地提高燃烧效率,降低污染排放,减少冷却空气量35%^[3]。随后,CFM公司(由法国SNECMA和美国GE公司共同出资组建)在下一代先进民用发动机上验证了涡轮外环静子件^[4],并将应用于中国民用大飞机C919研制的LEAP-1C发动机上。2010年6月,由法国研制的低压涡轮转子叶片在CFM56-5B发动机上挂片试车成功,这是CMCs结构在航空发动机转动零件上的首次应用。至此,法国一直引领航空发动机CMCs结构的研制和相关研究工作。美国从20世纪90年代中期开始,在F110和F100军用航空发动机上对多种编织CMCs尾喷管调节片进行了试验^[5]。此后,美国凭借其强大的综合实力,在IHPTET、VAATE以及UEET^[3]等多个航空发动机技术研究计划中,对编织CMCs涡轮静子叶片、燃烧室、涡轮外环和尾喷口等结构进行了更加广泛的研究,目前已经超越了法国。2010年年底,美国首个编织CMCs转动零件——低压涡轮转子叶片在F414军用航空发动机低压涡轮上挂片试车成功,只比法国晚半年。2014年,Lamon等^[6]对CMCs结构在航空发动机中的应用做了全面的综

述结果表明:迄今CMCs结构在航空发动机上的实际使用仍限于应力水平较低、疲劳载荷尚不苛刻的静子件(如尾喷管、燃烧室、火焰稳定器等),2010年以来法国、美国 and 英国在先进军民航空发动机上均开展了大规模验证,呈现出爆发式的发展。

2015年2月10日,世界上首台CMCs转动部件——低压涡轮转子成功地在F414军用航空发动机上通过试车。由于CMCs涡轮转子叶片本身质量很轻,可以减少甚至无需冷却,这样就大幅度降低了涡轮盘和整个涡轮部件的质量,从而显著提高发动机的推重比和效率,因此GE公司将CMCs转子作为其新一代自适应通用航空发动机AD-VENT(Adaptive versatile engine technology engine)的两大技术亮点之一,并认为它将给航空发动机设计带来革命性的变化,这标志着航空发动机CMCs结构的重大突破,使得CMCs在航空发动机上呈现出更加广阔的应用前景,对新一代高性能航空发动机的成功将起到十分关键的作用。

航空发动机是可重复使用的高速旋转机械,无论是静子件还是转子件,在服役期间都承受着疲劳载荷,而转动件的应力水平更高、疲劳载荷更加苛刻,美国GE公司认为如何克服CMCs的疲劳问题将是关键技术挑战之一,因此CMCs结构能否成功应用到航空发动机上,除了材料工艺本身尚需要进一步完善之外,另一个亟待解决的关键问题是:如何有效地进行疲劳寿命设计。

自20世纪90年代以来,大量纤维增强CMCs力学行为试验表明:循环载荷下的疲劳迟滞行为是CMCs最典型的特征,它综合反应了CMCs基体开裂、界面脱粘和纤维断裂等基本细观失效模式及其演化。2011年美国空军组织召开的由工业界、NASA和大学共同参与的航空发动机CMCs力学行为和寿命预测研讨会指出^[7]:CMCs是具有强烈结构特征的多相体、非均质材料,宏观的应力-寿命数据拟合法不能使用,必须基于其细观失效机理,建立物理意义明确的疲劳寿命预测方法,因此对疲劳迟滞行为的准确模拟是其疲劳寿命预测的基础。目前,国际上已经建立了单向CMCs和十字铺层CMCs疲劳迟滞行为的力学模型,以此为基础发展了相应的疲劳寿命预测方法。然而,与单向和铺层CMCs相比较,编织CMCs的细观结构更加复杂,其疲劳迟滞行为与编织体几何特性、组分材料性能、纱线自身力学性能、纱线之间以及纱线与基体间的界面特性等细观结构密切相关,比单向和铺层CMCs要复杂得多。编织CMCs疲劳迟滞行为的力学建模是CMCs疲劳领域的前沿,目前研究工作十分有限。

当前中国军事斗争形式严峻,迫切需要更加先进的高推重比军用航空发动机。自行研制的大型客机C919已经下线,仍将不得不使用国外研制的LEAP-1C发动机,其重要的新技术就是采用编织CMCs涡轮外环。因此,发展中国新一代高性能航空发动机对编织CMCs结构提出了迫切的需求。目前,西北工业大学、中航工业集团、国防科技大学、中科院上海硅酸盐研究所、中科院沈阳金属所、航天三院等单位都在积极开展CMCs结构的制备工艺研究工作,为了尽快地将编织CMCs结构应用于航空发动机的实际工程,加速先进航空发动机的发展,十分有必要发展编织CMCs结构的疲劳寿命预测方法,而其疲劳迟滞力学行为的建模研究则是寿命预测方法的重要基础。

建立基于细观疲劳失效机理的疲劳迟滞行为的力学模型,是准确开展CMCs疲劳寿命预测的基础。本文首先简要回顾了单向、铺层和编织CMCs细观疲劳失效模式与疲劳迟滞机理,然后重点阐述CMCs疲劳迟滞行为力学建模研究现状。

1 CMCs细观失效模式和疲劳迟滞机理

20世纪80年代中期到90年代初期,试验研究已经发现无论是单向CMCs、铺层CMCs还是编织CMCs在循环载荷下均具有明显的迟滞现象,如图1所示。在大量的试验观察之后,人们对疲劳迟滞机理开展广泛的研究,这也标志着CMCs疲劳这一新兴热点研究领域的开始。

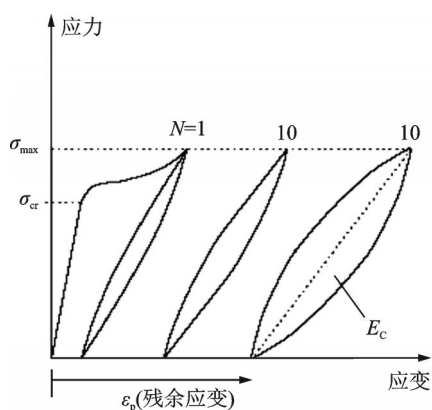


图1 纤维增强CMCs疲劳迟滞回线

Fig.1 Hysteresis loops of fiber reinforced CMCs

1985年,Marshall等^[8]首先发现了单向CMCs室温循环加载过程中的应力-应变迟滞现象,并将迟滞回线归因于纤维/基体界面之间的摩擦滑移。随后,Marshall等^[9]、Minford等^[10]对单根纤维进行了循环推入/推出试验,也发现了应力-应变迟滞回

线,证明了界面摩擦滑移是产生疲劳迟滞的原因。1989年,Holmes等^[11]发现单向CMCs高温循环加载过程中同样出现明显的应力-应变迟滞现象。1992年,Holmes等^[12]揭示了疲劳迟滞回线面积、迟滞模量随循环数的变化规律及其机理;Karandikar等^[13]首次将基体裂纹密度作为疲劳损伤的表征量,建立了基体裂纹的演化模型及其对疲劳迟滞回线形状的影响规律;Pryce等^[14]研究发现循环过程中纤维/基体界面剪应力的衰退导致残余应变及迟滞回线宽度的增加。1995年,Evans等^[15]率先研究了循环过程中界面剪切应力的定性变化,发现界面磨损导致界面剪应力衰减。1999年,McNulty等^[16]通过纤维推入试验,定量地测量了界面剪切强度随着循环数的变化。到2000年左右,国际上比较清晰地认识到:基体开裂、界面脱粘和纤维断裂是单向CMCs的3种基本细观失效模式,而循环载荷下基体/纤维间的界面滑移是产生疲劳迟滞现象的根本原因。3种基本细观失效模式都对界面滑移规律产生直接的影响。

铺层CMCs是由0°层和非0°层单向CMCs按照一定的角度铺叠而层,1991年Zawada等^[17]最早发现其在循环载荷下同样存在疲劳迟滞现象。此后,Kuo等^[18]、Opalski等^[19]、Lee等^[20]、Eddy等^[21]、Lynch等^[22]科研人员大量研究表明:铺层CMCs基本的细观失效模式除了铺层内单向CMCs内部的基体开裂、界面脱粘和纤维断裂之外,还存在层与层之间的界面脱粘,在循环载荷下产生迟滞现象的根本原因是:(1)铺层内的纤维/基体界面滑移;(2)铺层/铺层间界面脱粘之后的滑移。而铺层结构对上述两类滑移规律均有直接的影响。

与单向CMCs和铺层CMCs相比较,编织CMCs细观结构更加复杂,由纱线和纱线/纱线间隙内填充的基体(称之为Ⅱ类基体)组成,而纱线是内部充填了陶瓷基体(称之为Ⅰ类基体)的纤维束,本质上属于单向CMCs。1993年,Rouby等^[23]最早发现编织CMCs存在明显的疲劳迟滞现象。随后针对2维、2.5维和3维编织CMCs结构开展的大量疲劳试验研究^[24-34]表明,编织CMCs的基本细观失效模式包括:纱线内部的Ⅰ类基体裂纹、界面脱粘和纤维断裂,以及纱线/纱线交叉点的界面脱粘,纱线/Ⅱ类基体间的界面脱粘。在循环载荷下产生迟滞现象的根本原因是:(1)纱线内部纤维/基体界面滑移;(2)纱线/纱线交叉点的界面以及纱线/Ⅱ类基体间的界面滑移。而编织结构对上述两类滑移规律均有直接的影响。

综上所述,纤维增强CMCs基本的细观失效模式是:基体裂纹、界面脱粘和纤维断裂,另外由于增

强纤维细观结构的不同导致的其他界面脱粘,包括:铺层CMCs中的铺层/铺层界面脱粘,编织CMCs中的纱线/纱线界面和纱线/基体界面脱粘。脱粘后的各类界面在循环载荷下的界面滑移是导致疲劳迟滞行为的根本原因。

2 CMCs疲劳迟滞行为的力学模型研究进展

1990年,Kotil等^[35]基于剪滞理论,首次将单向CMCs的疲劳细观损伤与宏观应力-应变迟滞回线联系起来,建立了预测单向CMCs在平行于纤维方向加载下的疲劳迟滞回线的细观力学模型(称为KHC模型),该模型能够反映基体裂纹、界面剪应力和纤维失效对迟滞回线的影响。

1991年,Cho等^[36]认为疲劳加载过程中,纤维相对基体在界面滑移是疲劳迟滞现象产生的主要原因,基于上述模型,首次将界面滑移分为部分滑移和完全滑移两种情况,建立了新的疲劳迟滞回线模型,该模型仍然只适用于平行于纤维方向的轴向加载,且需要事先对界面滑移模式进行假设。随后,Zawada等^[17]、Holmes等^[12]、Pryce等^[14]、Thomas等^[40-41]、Evans等^[15]通过大量拉-拉、拉-压和压-压疲劳试验,研究了室温单向CMCs拉-拉疲劳载荷下迟滞回线形状和面积的影响因素,为改进疲劳迟滞回线模型提供了试验依据。

1993年,Pryce等^[14]假设界面摩擦粘结,脱粘区界面剪应力为常数,定义载荷传递长度为界面脱粘长度,建立了界面部分脱粘情况下的迟滞回线细观力学模型(称为PS模型)。1995年,Keith等^[39]在PS模型基础上,假设二维编织CMCs只有轴向纱线内部纤维/基体界面产生滑移,建立了二维编织CMCs的迟滞回线模型,通过试验测量基体裂纹间距,预测了疲劳加载过程中不同循环数下的界面剪应力,并与纤维推入试验进行了对比。

1995年,Solti等^[40]在PS模型^[14]基础上,采用最大界面剪应力准则确定初始加载界面脱粘长度、卸载界面反向滑移长度和重新加载新界面滑移长度,建立了纤维/基体界面存在化学黏结情况下的疲劳迟滞回线模型(称为SMR模型)。同年,Vagaggini等^[41]发现界面脱粘能对单向CMCs初始加载界面脱粘以及疲劳载荷下的界面滑移产生很大的影响,在Hutchison-Jensen^[42]纤维拔出模型基础上,建立了纤维/基体界面化学黏结情况下的迟滞回线模型(称为VDE模型)。1996年,Domergue等^[43]在VDE模型^[41]的基础上,假设铺层CMCs的疲劳迟滞仅由0°层内纤维/基体的界面滑移引起,建立了

3种不同正交铺层CMCs疲劳迟滞回线模型。2000年,Jacobsen等^[44]发现横向纱线在低应力水平下出现裂纹,轴向纱线在较高应力下出现基体裂纹,裂纹的出现使得纤维/基体界面发生脱粘,在VDE模型^[41]基础上建立了二维编织CMCs的疲劳迟滞回线模型。该模型没有考虑纱线/纱线界面、纱线/II类基体界面之间的滑移。

1996年,Hild等^[45]采用宏细观结合的方法建立了陶瓷基复合材料疲劳迟滞回线模型,模型包括4个状态变量、1个试验观察量和3个内部变量,而内部变量包括了采用细观力学模型描述的基体开裂、界面脱粘以及裂纹张开时产生的应变等(称为HBL模型)。

1997年,Ahn等^[46]假设基体内部缺陷服从双参数威布尔分布,采用随机方法模拟了陶瓷基复合材料基体裂纹演化,将基体裂纹分为长裂纹、中等长度裂纹和短裂纹3种,进一步改进了PS模型,并研究了基体随机开裂对陶瓷基复合材料疲劳迟滞回线的影响(称为AC模型)。同年,Solti等^[47]在他们1995年建立的单向CMCs疲劳迟滞回线模型基础上,假设0°铺层内纤维/基体界面滑移出现是疲劳迟滞的唯一原因,建立了模拟正交铺层CMCs疲劳迟滞回线模型。

1999年,McNulty等^[16]研究了6种不同单向CMCs在室温下的疲劳迟滞回线,发现基体开裂与饱和是疲劳迟滞回线出现和闭合的先决条件,当CMCs在疲劳载荷下出现基体裂纹时,应力-应变曲线出现迟滞回线,但此时迟滞回线并未闭合,而当基体裂纹密度达到饱和后,迟滞回线闭合,当陶瓷基复合材料在疲劳载荷下无基体裂纹出现时,应力-应变曲线呈线性。

2003年,Yang等^[48]考虑纤维断裂对单向陶瓷基复合材料疲劳迟滞行为的影响,建立了新的迟滞回线模型(称为YM模型)。

2005年,Pailler等^[49]考虑了氧化对纤维强度及界面剪应力的影响,建立了氧化环境下疲劳迟滞回线的模拟方法,并开展了纤维束CMCs的疲劳试验验证。该方法仍然是基于剪滞理论,因此只适用于单向CMCs。

2009年,法国著名陶瓷基复合材料力学专家Fantozzi等^[30]对单向疲劳迟滞回线模型进行了比较系统的分析,以多种CMCs的疲劳试验数据阐述了迟滞回线形状、面积、纤维/基体界面剪切应力随循环数的演化规律。他们认为在假设只有轴向方向纤维/基体界面对疲劳迟滞有影响时,十字铺层以及平纹编织CMCs的疲劳迟滞特性与单向CMCs类似,但是由于缺乏准确疲劳迟滞行为的力学模

型,只能定性分析。

至此,国际上就基本确定了纤维增强CMCs疲劳迟滞行为的力学建模理论框架。对于单向CMCs,基于剪滞理论,结合基体裂纹演化、界面脱粘和纤维断裂3种基本的细观失效模式的力学模型,以及基于事先假设的加卸载滑移模式建立的纤维/基体界面滑移规律,联立上述方程求解获得循环加载下的应力-应变曲线,即疲劳迟滞回线。对于铺层CMCs和编织CMCs,在大量假设基础上将单向CMCs进行简单的推广,建立疲劳行为的力学模型。上述理论框架,一直沿用至今。

利用疲劳迟滞行为的力学模型,就可以建立起与细观结构及失效机理密切相关的CMCs疲劳寿命预测方法,已经在单向^[11]和十字铺层^[12]CMCs中得到成功的应用。2011年的航空发动机CMCs力学行为和寿命预测研讨会上明确指出^[7]:宏观的应力-寿命数据拟合法不适用于CMCs结构,必须基于其细观失效机理,建立物理意义明确的疲劳寿命预测方法,并且应考虑环境、复杂载荷等对失效机理的影响。因此,准确的疲劳迟滞行为力学模型的建立对编织CMCs结构的寿命预测具有重要的意义。然而,由于编织CMCs的细观结构和疲劳迟滞机理复杂,至今没有建立其有效的疲劳迟滞行为力学模型。尽管2013年美国NASA公布了针对二维平纹编织CMCs的多尺度疲劳寿命预测方法^[50-51],但该方法中仍然基于剪滞理论,且只考虑了纱线内部纤维/基体界面滑移引起的疲劳迟滞,没有考虑纱线/纱线、纱线/基体界面滑移对迟滞的影响,只能模拟经纱方向或者纬纱方向加载的疲劳迟滞行为。

2011年以来,编织CMCs疲劳迟滞行为力学建模研究的公开发表文献并不多,主要仍然是在上述模型基础上的改进。相关研究集中在环境对基本细观失效模式的定性研究、载荷对基体裂纹开裂模式和演化规律影响研究以及和界面滑移模型的改进上。在环境因素对界面脱粘和纤维断裂等基本失效模式的影响方面,2011年文献^[52]开展了频率和保载时间对编织CMCs疲劳损伤的影响,2009—2015年开展了大量模拟航空发动机燃烧环境下的高温和水蒸汽对编织CMCs细观疲劳损伤的影响,获得了大量的试验数据^[53-55],但仍然主要是定性的,尚没有利用上述试验数据,对界面脱粘和纤维断裂等失效模型进行修正,进而改进疲劳迟滞力学模型。在载荷对基体裂纹演化的影响方面,自20世纪90年代初期美国国家科学院院士Evans和Zok首次建立其轴向加载时基体裂纹演化模型以来,迄今建立的所有基于细观疲劳失效机理的疲

劳迟滞行为的力学模型中,基体裂纹演化模型均只适应于纤维方向轴向拉伸加载情况,国际上开展了不少非轴向加载时的基体裂纹的研究,但主要仍然停留在试验观察方面^[56-61],没有建立起其演化的力学模型,更没有融入疲劳迟滞模型之中。2014年,Zok领导的研究小组利用剪滞理论与有限元相结合的方法,首次发表了剪切应力下单向CMCs基体裂纹演化模型^[62],这是第一篇关于非轴向应力下基体裂纹演化模型。2015年,该小组首次在文献^[63]中指出,编织CMCs中由于纱线走向的反复弯曲,使得纱线无论在何种加载条件下承受的都是复杂应力,使得其细观损伤特别是基体裂纹演化在局部十分复杂,有必要建立新的模型。该文实测了由于纱线走向的反复弯曲导致的表面位移分布的变化,并利用有限元法进行了分析。同年,在美国PW航空发动机公司和美国空军的资助下,Auburn大学利用剪滞理论与有限元相结合的方法,研究了在经向拉伸载荷作用下编织CMCs中纤维弯曲对基体裂纹演化规律的影响^[64]。上述研究工作,是基体裂纹演化模型方面的重要突破,将对复杂编织结构力学行为模拟起到促进作用。在界面滑移规律及其建模方面,本课题组基于剪滞理论,建立了“界面部分脱粘,卸载/重新加载纤维相对基体完全滑移”“界面部分脱粘,卸载/重新加载纤维相对基体部分滑移”“界面完全脱粘,卸载/重新加载纤维相对基体部分滑移”和“界面完全脱粘,卸载/重新加载纤维相对基体完全滑移”4种情况下的界面滑移规律,以此为基础建立了单向CMCs疲劳迟滞行为的力学模型,并研究了纤维失效^[65]对疲劳迟滞行为的影响,基于上述疲劳迟滞回线模型,发展了疲劳寿命预测方法^[66],提出了界面剪切应力和界面摩擦因数的估算方法^[67-68],并在单向C/SiC中得到应用^[69]。在不考虑铺层/铺层界面滑移引起的疲劳迟滞情况下,针对正交铺层CMCs,建立了其疲劳迟滞力学模型,开展了正交铺层C/SiC的试验验证^[70]。针对2.5D编织CMCs,假设疲劳迟滞仅由经向纱线内部纤维/基体界面滑移引起,建立了编织CMCs疲劳迟滞回线模型,并发展了界面剪切应力的估算方法^[71]。为了克服在疲劳迟滞行为模拟时事先对纤维/基体界面滑移模式进行假设,本课题组提出了一种界面滑移数值求解方法^[72]。该方法无需对纤维/基体界面滑移进行假设,同时还可以进行变幅循环载荷下迟滞回线的计算。利用该方法,揭示了纤维/基体界面滑移和反向滑移区的分布规律及其与疲劳加载历史的相关性^[73]。但是,目前该方法针对的仍然是轴向加载情况。Zhang等^[74]在此基础上提出了相应的界面滑移区分布模型,并发展出了

适用于任意加卸载下的剪滞模型。该模型相比界面摩擦模型省去了大量的数值计算,计算速度得到显著提升。Fang等^[75]测试了针刺CMCs在不同循环数下的剩余强度,并建立了数学模型。在此基础上,Fang等^[76]进一步发现了针刺CMCs的疲劳强化现象,试验结果表明通过施加循环载荷可以提高CMCs的剩余强度到拉伸强度的120%。通过断口分析,作者认为循环载荷导致细观应力分布更为均匀,导致剩余强度提高。Fang^[77]提出了一种针对单向及2D针刺C/SiC复合材料疲劳寿命计算的多尺度分析方法。单胞中的基本组元——小复合材料的力学性能则采用其发展的基于界面滑动摩擦的细观力学模型来描述。通过非线性有限元法模拟了复合材料的应力应变响应,在此基础上引入疲劳失效判据,最终实现了对复合材料疲劳寿命的预测。Zhang等^[78-79]研究了基体裂纹密度对本构的影响,发现了卸载过程的裂纹闭合现象,并基于此现象修正了剪滞模型,解决了本构模型预测卸载曲线与试验不符合的问题。Zhang等^[80]提出了一种考虑缺陷分布的纤维强度模型,并应用该模型预测了C/SiC小复合材料的拉伸强度。Gao等^[81]基于CMCs的迟滞本构模型提出了一种计算CMCs结构变刚度和迟滞振动的两尺度方法,成功预测了CMCs梁的幅频特性曲线的跳跃现象,预测结果与试验吻合。Han等^[82]利用迟滞回线与细观参数的关系,实现了CMCs界面摩擦力的预测。

在国内,先进航空发动机对编织CMCs结构提出了迫切的需求,推动了CMCs疲劳问题的研究。除南京航空航天大学本课题组^[65-82]外,西北工业大学^[83-90]、北京航空航天大学^[91]以及国防科技大学^[92]针对CMCs疲劳行为开展了十分有益的研究工作。在CMCs疲劳迟滞行为的力学模型研究方面,2008年,Mei^[83]对二维编织CMCs在不同峰值应力下进行了循环加载试验,测量了迟滞回线及完全卸载残余应变,将VDE模型^[41]与载荷承担法则相结合,提出了一种通过测量卸载/重新加载迟滞回线预测CMCs残余热应力的方法。Wang等^[84]试验研究了二维编织CMCs迟滞回线,迟滞回线宽度和残余应变随应力增加而增加,这说明基体裂纹在拉伸失效前尚未饱和,迟滞回线形状分为抛物线段和线性段两部分,通过测量迟滞回线宽度和残余应变获得了界面剪应力和热残余应力,利用VDE模型^[41]预测了加卸载迟滞回线。2009年,Mei等^[85]试验测试了二维、2.5维和三维编织CMCs在不同拉伸应力下的应力-应变迟滞行为。2010年,Wang等研究了纤维束丝数^[86]和热处理工艺^[87]对二维编织CMCs迟滞回线的影响,分析了残余应变、迟滞回线宽度

和迟滞回线切线模量随应力变化过程。2010年,王锐等^[88]研究了二维编织CMCs在室温下疲劳迟滞回线,发现同频率下迟滞回线包围面积与试样表面温度升高的关系近乎一致,而应力峰值和温升不是线性关系。2014年,李潘等^[89]利用单向CMCs疲劳迟滞力学模型预测了单向C/SiC陶瓷基复合材料的疲劳迟滞回线,并与试验结果进行了对比分析。2015年,郭洪宝等^[90]在假设只有加载方向纱线内纤维/基体界面滑移引起疲劳迟滞的基础上,分析了基体长短碎块对疲劳迟滞力学行为的影响。上述研究成果对推动CMCs在国内航空发动机上的应用起到了很好的促进作用,然而这些研究仍然主要局限于国外CMCs疲劳迟滞行为力学模型的应用和修正。

3 总结与展望

综上所述,目前单向CMCs疲劳迟滞模型相对比较成熟,开展了大量的理论和试验验证工作,能够有效模拟平行于纤维方向循环加载下的疲劳迟滞行为。对于铺层CMCs,目前只能模拟十字铺层CMCs的疲劳迟滞行为,且没有考虑铺层/铺层界面滑移对疲劳迟滞的影响。编织CMCs疲劳行为力学模型研究工作更加有限,尚很不成熟,均假设只有加载方向的纱线内部纤维/基体界面对疲劳迟滞产生影响^[72-92],没有考虑纱线/纱线、纱线/Ⅱ类基体界面滑移。除本课题组2013年提出的疲劳迟滞力学模型^[73-74]之外,国际上其他所有模型均需要事先假设界面滑移模式。特别是,由于上述所有的疲劳迟滞回线模型的基础均是剪滞理论,不适用于具有复杂细观结构的编织CMCs,其中的基体裂纹模型均只适用于平行于纤维的轴向加载,无法考虑编织CMCs纱线的弯曲对基体裂纹演化规律的影响。

从上述分析可见,编织CMCs疲劳迟滞行为研究领域的重要发展趋势是:(1)在建模的理论框架方面,突破剪滞模型的限制,建立从微观→细观→宏观的多尺度力学模型以模拟复杂细观结构。(2)在细观层次失效和滑移模型方面,考虑载荷对基体裂纹的影响,建立复杂载荷下基体裂纹演化模型和复杂界面的滑移模型;考虑循环加载过程中,所有脱粘界面滑移对迟滞行为的影响,建立纱线/纱线、纱线/基体界面滑移模型;考虑氧化、湿热等环境因素的影响建立界面脱粘和纤维断裂的细观失效模型。

参考文献:

- (C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>
[1] BOUILLEON E P, BERTARND S, HABAROU G,

- et al. Ceramic matrix composite for aircraft engine application [C]//2nd EUCASS Conference. Brussel, Belgim:[s.n.], 2007.
- [2] SPRIET P, LASALMONIE A. New trends for the manufacturing in the aeronautic industry[C]//Hegan Conference. San Sebastian, Spain:[s.n.], 2000: 24-25.
- [3] DICARLO J A, VAN ROODE M. CMC development for gas turbine engine hot section components.GT2006-90151[R]. [S.l.]:[s.n.], 2006.
- [4] SPRIET P. Aerospace & industrial application of C/C, C/SiC & SiC/SiC components at SPS [C]//MS&T'II Conference & Exhibition. Columbus, OH:[s.n.], 2011.
- [5] ZAWADA L P, CHARDSON G Y, DOPPEN G, et al. CMCs for aerospace turbine engine exhaust nozzles [C]//Proceedings of the 5th International Conference on High Temperature Ceramic Matrix Composites. Seattle, WA:[s.n.], 2004: 12-16.
- [6] BANSAL N P, LAMON J. Ceramic matrix composites: Materials, modeling and technology[M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2014.
- [7] CRAIG P. CMC behavior and life modeling workshop summary report: AFRL-RX-WP-TP-2011-4396[R]. [S.l.]:[s.n.], 2011.
- [8] MARSHALL D B, EVANS A G. Failure mechanisms in ceramic-fiber/ceramic-matrix composites[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1985, 68(5): 225-231.
- [9] MARSHALL D B, OLIVER W C. Measurement of interfacial mechanical properties in fiber-reinforced ceramic composites [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1987, 70(8): 542-548.
- [10] MINFORD E, PREWO K M. Fatigue of silicon carbide reinforced lithium-aluminosilicate glass-ceramics [C]//Tailoring Multiphase and Composite Ceramics. Boston, MA: Springer, 1986: 561-570.
- [11] HOLMES J W, KOTIL T, FOULDS W. High temperature fatigue of SiC-fiber-reinforced Si₃N₄ ceramic composites[C]// Proceedings of Symposium on High-Temperature Composites. Lancaster, UK: [s.n.], 1989: 176-186.
- [12] HOLMES J W, CHO C D. Experimental observation of frictional heating in fiber-reinforced ceramics [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1992, 75(4): 929-938.
- [13] KARANDIKAR P G, CHOU T W. Microcracking and elastic moduli reductions in unidirectional nicalon-CAS composite under cyclic fatigue loading [J]. Ceramic Engineering and Science Proceedings, 1992, 13(9/10): 881-888.
- [14] PRYCE A W, SMITH P A. Matrix cracking in unidirectional ceramic matrix composites under quasi-static and cyclic loading [J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1993, 41(4): 1269-1281.
- [15] EVANS A G, ZOK F W, MCMECKING R M. Fatigue of ceramic matrix composites [J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1995, 43(3): 859-875.
- [16] MCNULTY J C, ZOK F W. Low cycle fatigue of Nicalon-fiber-reinforced ceramic composites [J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(10): 1597-1607.
- [17] ZAWADA L P, BUTKUS L M, HARTMAN G A. Tensile and fatigue behavior of silicon carbide fiber-reinforced aluminosilicate glass [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1991, 74(11): 2851-2858.
- [18] KUO W S, CHOU T W. Multiple cracking of unidirectional and cross-ply ceramic matrix composites [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1995, 78(3): 745-755.
- [19] OPALSKI F A, MALL S. Tension-compression fatigue behavior of a silicon carbide calcium-aluminosilicate ceramic matrix composite [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1994, 13: 617-636.
- [20] LEE S S, STINCHCOMB W W. Damage mechanisms of cross-ply Nicalon/CAS II laminate under cyclic tension [J]. Ceramic Engineering and Science Proceedings, 1994, 15(4): 40-48.
- [21] EDDY V, MARTINE W, BIEST O V D. Influence of the laminate lay-up on the fatigue behavior of SiC-fiber/BMAS-matrix composites [J]. Composites Part A, 1999, 30(5): 623-635.
- [22] LYNCH C S, EVANS A G. Effects of off-axis loading on the tensile behavior of a ceramic matrix composite [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1996, 79(12): 3113-3123.
- [23] ROUBY D, REYNAUD P. Fatigue behavior related to interface modification during load cycling in ceramic-matrix fiber composites [J]. Composites Science and Technology, 1993, 48(1/2/3/4): 109-118.
- [24] REYNAUD P, ROUBY D. Effects of interfacial evolution on the mechanical behavior of ceramic matrix composites during cyclic fatigue [J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1994, 31(8): 1061-1066.
- [25] REYNAUD P. Cyclic fatigue of ceramic-matrix composites at ambient and elevated temperatures [J]. Composites Science and Technology, 1996, 56(7): 809-814.
- [26] REYNAUD P, ROUBY D, FANTOZZI G. Effects of

- temperature and of oxidation on the interfacial shear stress between fibers and matrix in ceramic - matrix composites [J]. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1998, 46(7): 2461-2469.
- [27] DALMAZ A, REYNAUD P, ROUBY D, et al. Cyclic fatigue behavior at room temperature and at high temperature under inert atmosphere of a C/SiC multilayer composites[J]. *Key Engineering Materials*, 1999, 164/165: 325-328.
- [28] DALMAZ A, REYNAUD P, ROUBY D, et al. Damage propagation in carbon/silicon carbide composites during tensile tests under the SEM [J]. *Journal of Materials Science*, 1996, 31(16): 4213-4219.
- [29] FANTOZZI G, REYNAUD P, ROUBY D. Fatigue behavior of structural ceramic composites[J]. *Advances in Science and Technology*, 2006, 45: 1664-1673.
- [30] FANTOZZI G, REYNAUD P. Mechanical hysteresis in ceramic matrix composites[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2009, 521/522: 18-23.
- [31] SHULER S F, HOLMES J W, WU X. Influence of loading frequency on the room-temperature fatigue of a carbon-fiber/SiC-matrix composite[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1993, 76(9): 2327-2336.
- [32] CHAWLA N, TUR Y K, HOLMES J W, et al. High-frequency fatigue behavior of woven-fiber-fabric-reinforced polymer-derived ceramic-matrix composites [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1998, 81(5): 1221-1230.
- [33] LEE S S, ZAWADA L P, STAEHLER J M, et al. Mechanical behavior and high-temperature performance of a woven NicalonTM/Si-N-C ceramic matrix composite [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1998, 81(7): 1797-1811.
- [34] STAEHLER J M, MALL S, ZAWADA L P. Frequency dependence of high-cycle fatigue of CVI C/SiC at room temperature[J]. *Composites Science and Technology*, 2003, 63(15): 2121-2131.
- [35] KOTIL T, HOLMES J W, COMNIOU M. Origin of hysteresis observed during fatigue of ceramic matrix composites [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1990, 73(7): 1879-1883.
- [36] CHO C D, HOLMES J W, BARBER J R. Estimate of interfacial shear in ceramic composites from frictional heating measurements [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1991, 74(11): 2802-2808.
- [37] THOMAS W A, KOPP M W, SANCHEZ J M. Stress-strain behavior of Nicalon-fiber-reinforced calcium aluminosilicate composites under tensile fatigue conditions [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1993, 76(9): 2175-2179.
- [38] THOMAS W A, SANCHEZ J M. Observation of crack closure in Nicalon/CAS composites[J]. *Journal of Materials Science Letters*, 1995, 14(8): 571-573.
- [39] KEITH W P, KEDWARD K T. The stress-strain behavior of a porous unidirectional ceramic matrix composite[J]. *Composites*, 1995, 26(3): 163-174.
- [40] SOLTI J P, MALL S, ROBERTSON D D. Modeling damage in unidirectional ceramic-matrix composites[J]. *Composites Science and Technology*, 1995, 54(1): 55-66.
- [41] VAGAGGINI E, DOMERGUE J M, EVANS A G. Relationships between hysteresis measurements and the constituent properties of ceramic matrix composites: I, Theory [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1995, 78(10): 2709-2720.
- [42] HUTCHISON J W, JENSEN H M. Models of fiber debonding and pullout in brittle composites with friction[J]. *Mechanics of Materials*, 1990, 9(2): 139-163.
- [43] DOMERGUE J M, HEREDIA F E, EVANS A G. Hysteresis loops and the inelastic deformation of 0/90 ceramic matrix composites [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1996, 79(1): 161-170.
- [44] JACOBSEN T K, BRONSTED P. Mechanical properties of two plain-woven chemical vapor infiltrated silicon carbide-matrix composites [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2000, 84(5): 1043-1051.
- [45] HILD F, BURR A, LECKIE F A. Matrix cracking and debonding of ceramic - matrix composites [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1996, 33(8): 1209-1220.
- [46] AHN B K, CURTIN W A. Strain and hysteresis by stochastic matrix cracking in ceramic matrix composites[J]. *Journal of the Mechanics Physics and Solids*, 1997, 45(2): 177-209.
- [47] SOLTI J P, MALL S, ROBERTSON D D. Modeling of fatigue in cross-ply ceramic matrix composites [J]. *Journal of Composite Materials*, 1997, 31(19): 1921-1943.
- [48] YANG B, MALL S. Cohesive-shear-lag model for cycling stress-strain behavior of unidirectional ceramic matrix composites [J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2003, 12: 45-64.
- [49] PAILLER F, LAMON J. Micromechanics based model of fatigue/oxidation for ceramic matrix composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2005, 65(3/4): 369-374.
- [50] MIN J B, XUE D, SHI Y. Micromechanics fatigue damage analysis modeling for fabric reinforced ceramic

- matrix composites: NASA/TM—2013-217870 [R]. USA: NASA, 2013.
- [51] MIN J B, XUE D, SHI Y. Micromechanics modeling for fatigue damage analysis designed for fabric reinforced ceramic matrix composites [J]. *Composite Structures*, 2014, 111(1): 213-223.
- [52] JOHN R, OJARD G, MILLER R. Frequency and hold-time effects on durability of melt-infiltrated SiC/SiC: AFRL-RX-WP-TP-2011-4234[R]. [S.l.]: [s.n.], 2011.
- [53] DEVON T C. Fatigue behavior of an advanced SiC/SiC composite at elevated temperature in air and in steam: ADA512774[R]. [S.l.]: [s.n.], 2009.
- [54] DUSTIN J B. Ceramic matrix composite characterization under a gas turbine combustion and loading environment[D]. Ala: Air University, 2014.
- [55] RICHARD L L. Tension-compression fatigue of an oxide, oxide ceramic matrix composite at elevated temperature in air and stream environments[D]. Ala: Air University, 2015.
- [56] WILLIAM P K, KEITH T K. Shear damage mechanisms in a woven, nicalon-reinforced ceramic-matrix composite[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1997, 80(2): 357-364.
- [57] GEARALD C. Modelling of the mechanical behavior and damage processes of fibrous ceramic matrix composites: Application to a 2-D SiC/SiC [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2000, 37(6): 919-942.
- [58] MORSCHERW G N, YUN H M, DICARLO J A. In-plane cracking behavior and ultimate strength for 2D woven and braided melt-infiltrated SiC/SiC composites tensile loaded in off-axis fiber directions [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2007, 90(10): 3185-3193.
- [59] MORSCHERW G N, SINGH M, KISER J D, et al. Modeling stress-dependent matrix cracking and stress-strain behavior in 2D woven SiC fiber reinforced CVI SiC composites [J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 67(6): 1009-1017.
- [60] SOUTIS C, KASHTALYAN M. Residual stiffness of cracked cross-ply composite laminates under multi-axial in-plane loading [J]. *Applied Composite Materials*, 2011, 18(1): 31-43.
- [61] BERNACHY-BARBE F, GÉLÉBART L, BORNERT M. Anisotropic damage behavior of SiC/SiC composite tubes: Multiaxial testing and damage characterization [J]. *Composite: Part A*, 2015, 76: 281-288.
- [62] 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.
- [63] ROSSEL M N, RAJAN V P, ZOK F W. Effect of weave architecture on mechanical response of 2D ceramic composites [J]. *Composites: Part A*, 2015, 74: 141-152.
- [64] GOWAYED Y, OJARD G, SANTHOSH U, et al. Modeling of crack density in ceramic matrix composites [J]. *Journal of Composite Materials*, 2015, 49(18): 2285-2294.
- [65] LI L B, SONG Y D. Influence of fiber failure on fatigue hysteresis loops of ceramic matrix composites [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2011, 30(1): 12-25.
- [66] 孙志刚, 许仁红, 宋迎东. 陶瓷基复合材料低循环拉-拉疲劳寿命预测[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(12): 31-36.
- SUN Zhigang, XU Renhong, SONG Yingdong. Low cycle tensile-tensile fatigue life prediction of ceramic matrix composites [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(12): 31-36.
- [67] LI L B, SONG Y D. An approach to estimate interface shear stress of ceramic matrix composites from hysteresis loops [J]. *Applied Composite Materials*, 2010, 17(3): 309-328.
- [68] LI L B, SONG Y D. Estimate interface frictional coefficient of ceramic matrix composites from hysteresis loops [J]. *Journal of Composite Materials*, 2011, 45(9): 989-1006.
- [69] LI L B, SONG Y D, SUN Y C. Estimate interface shear stress of unidirectional C/SiC ceramic matrix composites from hysteresis loops [J]. *Applied Composite Materials*, 2013, 20(4): 693-707.
- [70] LI L B, SONG Y D, SUN Y C. Effect of matrix cracking on hysteresis behavior of cross-ply ceramic matrix composites [J]. *Journal of Composite Materials*, 2014, 48(12): 1505-1530.
- [71] LI L B, SONG Y D. Estimate interface shear stress of woven ceramic matrix composites from hysteresis loops [J]. *Applied Composite Materials*, 2013, 20(6): 993-1005.
- [72] GAO X G, FANG G W, SONG Y D. Hysteresis loop model of unidirectional carbon fiber-reinforced ceramic matrix composites under an arbitrary cyclic load [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 56: 92-99.
- [73] 方光武, 高希光, 宋迎东. 单向纤维增强陶瓷基复合材料界面滑移规律 [J]. *复合材料学报*, 2013, 30(4): 101-107.
- FANG Guangwu, GAO Xiguang, SONG Yingdong. Interface slip distribution of unidirectional fiber-reinforced ceramic matrix composites [J]. *Acta Materialiae*

- Compositae Sinica, 2013, 30(4): 101-107.
- [74] GAO X G, ZHANG S, FANG G W, et al. Distribution of slip regions on the fiber-matrix interface of ceramic matrix composites under arbitrary loading [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2015, 34(20): 1713-1723.
- [75] FANG G W, GAO X G, ZHANG S, et al. A residual strength model for the fatigue strengthening behavior of 2D needled CMCs [J]. International Journal of Fatigue, 2015, 80: 298-305.
- [76] FANG G W, GAO X G, YU G Q, et al. Effect of the stress level on the fatigue strengthening behavior of 2D needled C/SiC CMCs at room temperature [J]. Materials & Design, 2016, 89: 432-438.
- [77] 方光武. 复杂预制体陶瓷基复合材料疲劳失效机理及多尺度模拟[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016. FANG Guangwu. Failure mechanism and multiscale simulation of the fatigue behavior of ceramic matrix composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [78] ZHANG S, GAO X G, CHEN J, 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): 341-347.
- [79] ZHANG S, GAO X G, DONG H N, et al. Effects of gradual matrix crack closure on the constitutive behavior of SiC/SiC composites upon unloading [J]. Ceramics International, 2017, 43(2): 1839-1842.
- [80] ZHANG S, GAO X G, DONG H N, et al. In situ modulus and strength of carbon fibers in C/SiC composites[J]. Ceramics International, 2017, 43(9): 6885-6890.
- [81] GAO X G, HAN D, CHEN J, 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.
- [82] HAN X, GAO X G, SONG Y D. Parameters identification of interface friction model for ceramic matrix composites based on stress-strain response[J]. Applied Composite Materials, 2018, 25(5): 1057-1073.
- [83] MEI H. Measurement and calculation of thermal residual stress in fiber reinforced ceramic matrix composites[J]. Composites Science and Technology, 2008, 68(15): 3285-3292.
- [84] WANG Y Q, ZHANG L T, CHENG L F, et al. Characterization of tensile behavior of two-dimensional woven carbon/silicon carbide composite fabricated by chemical vapor infiltration [J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 497(1/2): 295-330.
- [85] MEI H, CHENG L F. Comparison of the mechanical hysteresis of carbon/ceramic matrix composites with different fiber performs [J]. Carbon, 2009, 47(4): 1034-1042.
- [86] WANG Y Q, ZHANG L T, CHENG L F. Effect of yarn size on the tensile damage evolution of a C/SiC composite fabricated by chemical vapor infiltration[J]. Applied Composite Materials, 2011, 18(2): 165-174.
- [87] WANG Y Q, ZHANG L T, CHENG L F. Characterization of hysteresis stress-strain behaviors of C/SiC composites under different fiber pre-treatments [J]. Journal of Advanced Materials, 2010, 42(4): 5-13.
- [88] 王锬, 程起有, 郑翔, 等. 平纹编织 C/SiC 复合材料拉-拉疲劳特性的试验研究[J]. 机械强度, 2010, 32(1): 130-133. WANG Kun, CHENG Qiyu, ZHENG Xiang, et al. Experimental investigation on the tension-tension fatigue characteristics of plain-woven C/SiC composite [J]. Journal of Mechanical Strength, 2010, 32(1): 130-133.
- [89] 李潘, 王波, 甄文强, 等. 2D-SiC/SiC 复合材料拉伸加卸载行为[J]. 复合材料学报, 2014, 31(3): 676-682. LI Pan, WANG Bo, ZHEN Wenqiang, et al. Tensile loading/unloading stress-strain behavior of 2D-SiC/SiC composites [J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2014, 31(3): 676-682.
- [90] 郭洪宝, 贾普荣, 王波, 等. 基于迟滞行为的 2D-SiC/SiC 复合材料组份力学性能分析[J]. 力学学报, 2015, 47(2): 260-269. GUO Hongbao, JIA Purong, WANG Bo, et al. Study on constituent properties of a 2D-SiC/SiC composite by hysteresis measurements [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, 47(2): 260-269.
- [91] SHI D Q, JING X, YANG X G. Low cycle fatigue behavior of a 3D braided KD-I fiber reinforced ceramic matrix composite for coated and uncoated specimens at 1100 °C and 1300 °C [J]. Materials Science & Engineering A, 2015, 631: 38-44.
- [92] 曹英斌, 张长瑞, 周新贵, 等. 单向 C_f/SiC 复合材料的弯曲疲劳性能[J]. 硅酸盐学报, 2001, 29(3): 278-281. CAO Yingbin, ZHANG Changrui, ZHOU Xingui, et al. Bending fatigue properties of UD-C_f/SiC composites [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2001, 29(3): 278-281.

(编辑: 夏道家)