

单向陶瓷基复合材料任意应力本构行为快速计算方法*

韩笑^{1,2}, 高希光^{1,2}, 史剑³, 宋迎东^{1,2,4}, 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 航空发动机热环境与热结构工业和信息化部重点实验室, 江苏南京 210016;
2. 南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 江苏南京 210016;
3. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川成都 610000;
4. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏南京 210016)

摘要: 为了实现快速预测陶瓷基复合材料(CMCs)任意应力加卸载作用后的损伤状态和本构行为, 对CMCs任意应力加卸载力学行为进行研究。提出基于剪滞模型的任意应力加卸载曲线简化方法, 得到仅包含决定CMCs损伤状态的等效载荷曲线, 直接计算CMCs在等效载荷曲线作用后的滑移区分布, 避免对载荷曲线的逐点计算, 进而预测了材料的损伤状态和应力应变行为。对一给定的载荷曲线, 简化后峰值和谷值载荷总数减小了63.16%。将该原始加卸载曲线和简化后的等效载荷曲线分别带入剪滞模型和本文提出的滑移区分布计算过程, 计算CMCs的滑移区分布和应变。结果表明, 两种方法计算结果一致, 说明本文提出的载荷曲线简化过程和滑移区分布计算过程是可行的。

关键词: 陶瓷基复合材料; 载荷曲线; 简化方法; 剪滞模型; 滑移区分布

中图分类号: TB332 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055(2021)11-2562-07

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.200152

Efficient Calculation Method for Constitutive Behavior of Unidirectional Ceramic Matrix Composites under Arbitrary Loading

HAN Xiao^{1,2}, GAO Xi-guang^{1,2}, SHI Jian³, SONG Ying-dong^{1,2,4}, ZHANG Sheng^{1,2}, YU Guo-qiang^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Aero-Engine Thermal Environment and Structure, Ministry of Industry and Information Technology, College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System, College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
3. AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chendu 610000, China;
4. State Key Laboratory of Mechanics and Control Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to rapidly predict the damage state and constitutive behavior of ceramic matrix composites (CMCs) under arbitrary loading, the mechanical behavior of CMCs under arbitrary loading was studied. A

* 收稿日期: 2020-03-20; 修订日期: 2020-05-27。

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX19_0184)。

作者简介: 韩笑, 博士生, 研究领域为陶瓷基复合材料。

通讯作者: 高希光, 博士, 教授, 研究领域为陶瓷基复合材料。

引用格式: 韩笑, 高希光, 史剑, 等. 单向陶瓷基复合材料任意应力本构行为快速计算方法[J]. 推进技术, 2021, 42(11): 2562-2568. (HAN Xiao, GAO Xi-guang, SHI Jian, et al. Efficient Calculation Method for Constitutive Behavior of Unidirectional Ceramic Matrix Composites under Arbitrary Loading[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(11): 2562-2568.)

simplified method of arbitrary load curve was proposed based on the shear lag model, and the equivalent load curve that determines the damage state of CMCs was obtained. The distribution of slip regions of CMCs under equivalent load curve was obtained directly, avoiding the point by point calculation of the load curve. Then damage state and the stress-strain behavior of CMCs were predicted. For a given load curve, the sum of peak and valley loads is reduced by 63.16% after simplification. The original load curve and the equivalent load curve were, respectively, introduced into the shear lag model and the calculation process of the distribution of slip regions proposed in this paper, and the distribution of slip regions and strain of CMCs were calculated. The results show that the calculated results obtained by two methods are consistent, which proves that the simplification process of load curve and the calculation process of distribution of slip regions proposed in this paper are feasible.

Key words: Ceramic matrix composites; Load curve; Simplification method; Shear-lag model; Distribution of slip regions

1 引言

随着材料科技的进步,航空发动机的推重比要求越来越高。而推重比的提高,必然引起涡轮前进口温度的提高。推重比由2~3提高到10以上,涡轮前进口温度从873℃提高到1700℃以上^[1]。传统的高温合金将难以满足要求,因此,新型材料的研发很有必要。陶瓷基复合材料(CMCs)由于其高比模量、高比强度、耐高温性能优良等特点,成为航空发动机热端部件重要的候选材料^[2-3]。

自20世纪70年代开始,国内外学者就对CMCs进行了大量研究,并在CMCs在燃烧室、涡轮外环、火焰稳定器、矢量喷管的调节片、密封环、SiC/SiC涡轮转子叶片上等高温静止和转动部件的应用上取得了一定的进展^[4]。GE还将CMCs转子作为新一代自适应发动机的两大亮点之一。由此可见,CMCs的应用对推动航空发动机的发展至关重要。

CMCs在实际服役过程中,承受无规则载荷作用。在载荷作用下,CMCs发生基体开裂、界面脱粘和滑移、界面磨损等微观损伤模式^[5-6]。此外,与在任意应力加卸载作用过程中的应力应变行为相比,人们更关心材料在承受了一系列载荷作用后的损伤状态和本构行为,从而为快速预测材料的剩余寿命提供基础。因此,在任意应力加卸载作用下,如何快速预测陶瓷基复合材料的损伤状态和本构行为是需要研究的问题。

剪滞模型^[7-8]是描述单向陶瓷基复合材料力学行为最常用的模型之一。基于剪滞模型,对于经历任意加卸载曲线作用后的CMCs而言,其平均基体裂纹间距可由载荷曲线中的最大峰值载荷确定,界面磨损可由载荷曲线中的峰值、谷值载荷和界面磨损直接计算得到。而基于传统剪滞模型计算方法,界面

脱粘后的滑移区分布则无法直接给出。在卸载过程中,CMCs会发生反向滑移,且反向滑移区长度随卸载应力的减小而增加,而在随后的加载过程中,CMCs会产生新的正向滑移区,新正向滑移区长度随加载应力的增加而增加^[9-10]。即在应力加卸载过程中,单向CMCs会交替产生正反向滑移区,发生滑移区的覆盖。而滑移区的分布决定CMCs内纤维应力分布,也决定着复合材料的损伤状态和本构行为。因此,快速预测CMCs损伤状态和本构行为的核心之一是计算CMCs在任意应力作用下滑移区的分布。

现有基于剪滞模型计算CMCs在应力加卸载作用下滑移区分布的方法,都是对应力曲线上的点进行逐一计算,且考虑滑移区的覆盖时还需要进行迭代判断,计算效率低,无法实现快速预测^[11-12]。而基于界面磨损模型的CMCs滑移区分布计算^[13-14],更需要大量的数值计算,耗时长。

基于上述讨论,本文基于剪滞模型,提出任意应力加卸载曲线简化方法,得到等效载荷曲线。在此基础上,给出CMCs滑移区分布的快速计算过程,避免对等效载荷曲线的逐点计算,实现任意应力加卸载作用下单向CMCs损伤行为的快速预测。

2 应力加卸载曲线简化方法

假设某个加载时刻,单向CMCs存在 n 对滑移区,且滑移区成对出现,从纤维粘结区向基体裂纹方向,滑移区编号从1逐渐增加直至 n ,且先有正向滑移区,后有反向滑移区。基于剪滞模型加载过程,如果当前加载应力大于第 $j+1$ 个正向滑移区产生时对应的应力,小于第 j 个正向滑移区产生对应的应力,该加载过程将覆盖第 n 到第 $j+1$ 对滑移区。同理,如果卸载应力小于第 j 个反向滑移区产生时对应的应力,大于第 $j-1$ 个反向滑移区产生对应的应力,则该加载过

程将覆盖第 n 到第 $j + 1$ 对滑移区。

基于上述讨论可以发现,在任意应力加卸载曲线中,大部分峰值和谷值载荷对滑移区分布的影响会被覆盖,只有少部分峰值和谷值载荷决定最终滑移区的分布。因此,可以在任意应力加卸载曲线中提取决定滑移区分布的峰值和谷值载荷,简化载荷曲线。图 1 为原始载荷曲线简化方法的流程图。

对简化方法说明如下:首先,在原始应力加卸载曲线的最大峰值载荷及其往后的载荷曲线,挑选其中依次减小的峰值载荷,组成峰值点降序载荷数组。具体操作方法:(1)对原始应力加卸载曲线中的峰值载荷和谷值载荷按顺序依次编号;(2)提取最大峰值载荷及其后续的峰值载荷,以及其在原始应力加卸载曲线中的序号,组成峰值点载荷数组,峰值点载荷数组中共有 n_1 个载荷数据,组内序号为 $1 \sim n_1$;(3)峰值点载荷数组中,提取序号 $1 \sim n_1$ 的峰值载荷的最大值,若同时出现多个最大值,则提取组内序号最大的点;(4)提取序号 $j_1 \sim n_1$ 的峰值载荷的最大值,序号 j_1 为上一个提取出的峰值载荷最大值所对应的组内序号+1;(5)重复步骤(4),直至峰值点载荷数组中最后一个载荷为止;(6)将步骤(3)到(5)中提取的各峰值载荷及其在原始应力加卸载曲线中对应的序号一同放入峰值点降序载荷数组中,得到峰值点降序载荷数组。如图 2 所示为应力加卸载曲线示意图,则上述步骤提取的峰值点载荷如图 2 中红色标记的峰值点所示。

其次,在原始应力加卸载曲线的最大峰值载荷及其往后的载荷曲线,挑选其中依次增加的谷值载

荷,组成谷值点升序载荷数组,具体操作如下:(1)对原始应力加卸载曲线中的峰值载荷和谷值载荷按顺序依次编号;(2)提取最大峰值载荷及其往后载荷曲线中谷值载荷,以及其在原始应力加卸载曲线中的序号,组成谷值点载荷数组;谷值点载荷数组中共有 m_1 个载荷数据,组内序号为 $1 \sim m_1$;(3)在谷值点载荷数组中,提取序号 $1 \sim m_1$ 的谷值载荷的最小值,若同时出现多个最小值,则提取组内序号最大的点;(4)提取序号 $k_1 \sim m_1$ 的谷值载荷的最小值,序号 k_1 为上一个提取出的谷值载荷最小值所对应的组内序号+1;(5)重复步骤(4),直至谷值点载荷数组中最后一个载荷为止;(6)将步骤(3)~(5)中提取的各谷值载荷及其在原始应力加卸载曲线中对应的序号一同放入谷值点升序载荷数组中,得到谷值点升序载荷数组。对于图 2 所示的应力加卸载曲线,上述步骤提取的谷值点载荷如图 2 中蓝色标记的谷值点。

最后,将峰值点降序载荷数组和谷值点升序载荷数组按照原始应力加卸载曲线中的载荷顺序进行组合,组成等效载荷曲线,具体操作如下:(1)将峰值点降序载荷数组和谷值点升序载荷数组组合在一起,并将两个数组中的元素按照在原始应力加卸载曲线中的序号从小到大进行排列,得到初始等效加卸载载荷数组;(2)对初始等效加卸载载荷数组,依次提取峰值载荷和谷值载荷,提取方法如下:峰值载荷和谷值载荷按照顺序交替提取;在上一个提取的峰值载荷序号往后,提取第一个谷值载荷;在上一个提取的谷值载荷序号往后,提取第一个峰值载荷。最终得到峰值载荷和谷值载荷依次交错的等效载荷曲线,且峰值载荷不断减小,谷值载荷不断增加。

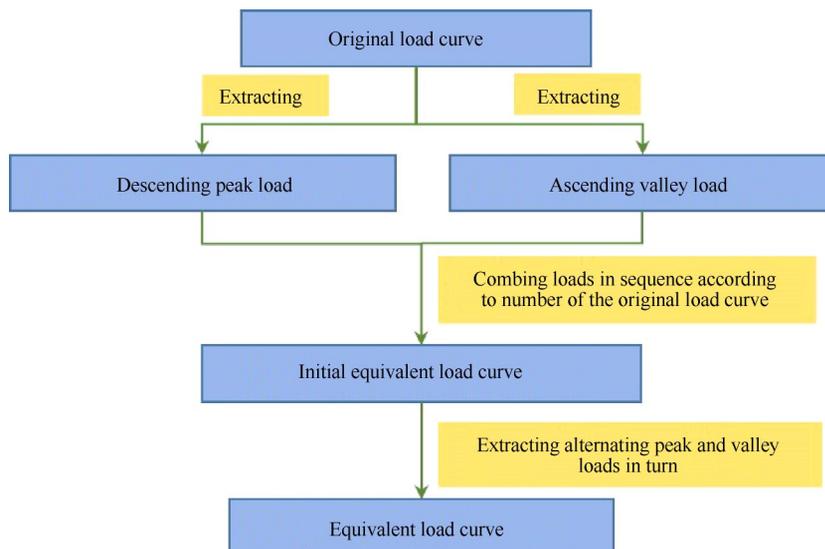


Fig. 1 Flow chart of simplification method of load curve

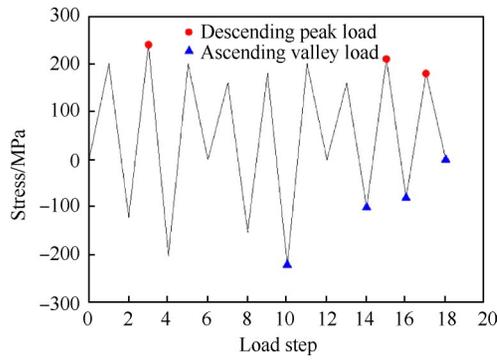


Fig. 2 Schematic diagram of load curve

3 单向 CMCs 损伤本构行为预测

3.1 基体开裂

对于单向 CMCs, 当加载应力大于初始基体开裂应力, CMCs 会发生基体开裂, 产生基体裂纹, 随着加载应力的增加, 基体裂纹逐渐增加, 直至达到饱和。本文采用 Weibull 分布描述基体开裂过程。

将载荷曲线中峰值应力的最大值代入 Weibull 分布公式^[15], 计算单向 CMCs 在载荷曲线作用后的平均基体裂纹间距, 计算式为

$$L = L_{sat} / (1 - \exp(-\frac{\sigma_{max}}{\sigma_0})^m) \quad (1)$$

式中 σ_{max} 为应力加卸载曲线峰值应力的最大值, L 为平均基体裂纹间距, L_{sat} 为基体裂纹饱和间距, σ_0 和 m 为 Weibull 开裂特征强度和 Weibull 模量。

3.2 界面磨损

界面磨损是单向 CMCs 应力加卸载过程中主要的细观损伤机制^[9]。本文采用下式计算单向 CMCs 在加卸载过程中的界面摩擦力变化^[11-12]。

$$\tau_i = 1 - \exp(-\omega (\int d\sigma / \sigma_A)^\lambda) (\tau_{i_{min}} - \tau_{i_0}) + \tau_{i_0} \quad (2)$$

式中 $\omega, \sigma_A, \lambda$ 为拟合参数, $\tau_{i_{min}}, \tau_{i_0}$ 为初始和最终界面剪应力, τ_i 为当前载荷循环下的界面剪应力, $\int d\sigma$ 为与载荷历程相关的参数, 其计算式为

$$\int d\sigma = \sum_{j=j_m}^{n_i} |\sigma_{p_j} - \sigma_{v_j}| \quad (3)$$

式中 $\sigma_{p_j}, \sigma_{v_j}$ 分别表示第 j 个加载循环或者卸载循环的峰值应力和谷值应力, j_m 对应第一个峰值应力大于初始基体开裂应力的加载过程, n_i 表示对加卸载曲线中各载荷过程进行编号, 当前载荷对应的载荷过程序号。假设一次加载或者卸载过程中, 界面剪应力大小保持不变。

3.3 滑移区分布

基于剪滞模型, 滑移区分布长度可由峰值和谷值应力确定, 因此, 可以基于简化后的等效载荷曲线中的峰值和谷值应力, 直接计算单向 CMCs 滑移区分布, 而无需对载荷曲线上的点进行逐一计算。

基于等效载荷曲线中的峰值和谷值应力, 计算数组 $A = \{a_j\}, j = 1, 2, \dots, n_2 - 1, a_j$ 的计算式为

$$a_j = |\sigma_j - \sigma_{j+1}|, \quad j = 1, \dots, n_2 - 1 \quad (4)$$

式中 σ_j 为等效载荷曲线中序号为 j 对应的载荷, 其为峰值点或者谷值点, n_2 为等效载荷曲线中峰值或者谷值点的总数。基于数组 A 进一步定义中间数组 $B = \{b_j\}, j = 1, 2, \dots, n_2 - 1, b_j$ 的计算式为

$$b_j = \begin{cases} a_j - a_{j+1}, & j = 1, \dots, n_2 - 2 \\ a_j, & j = n_2 - 1 \end{cases} \quad (5)$$

基于数组 B , 进一步计算中间数组 $D = \{d_j\}, j = 1, 2, \dots, n_2$, 计算式为

$$d_j = \begin{cases} \frac{b_j C_1}{2 \tan \theta_i}, & j = 2, 3, \dots, n_2 \\ L_0 - \sum_{k=2}^{n_2} d_k, & j = 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中 $C_1 = \frac{1}{v_f} - \frac{E_f}{E_c}$, v_f 为纤维体积分, E_f 为纤维弹性模量, E_c 为复合材料等效弹性模量, $\tan \theta_i$ 的表达式为 $\frac{2\tau_i}{r_f}$, r_f 为纤维半径, L_0 为界面脱粘长度, $L_0 =$

$\frac{\sigma_{max} C_1 - \sigma_{f,th}}{\tan \theta_i}$, $\sigma_{f,th}$ 为纤维热残余应力。如果在等效载荷曲线作用后, 单向 CMCs 平均基体裂纹间距和界面脱粘长度之间满足不等式(7), 则界面完全脱粘, 需要对数组 D 中的元素进行筛选

$$L_0 > L/2 \quad (7)$$

此时, 界面脱粘长度变为 $L_0 = L/2$ 。在等效载荷曲线中, 按顺序对各峰值载荷和谷值载荷进行编号, 找到满足如下等式的组内序号最大的峰值载荷及其序号。

$$\sigma_j \geq (\frac{L}{2} \tan \theta_i + \sigma_{f,th}) / C_1, \quad j = 1, 2, \dots, n_2 \quad (8)$$

假设 $\sigma_{max_{cr}}$ 为在等效载荷曲线中满足式(7)、且序号最大的峰值载荷, $j_{max_{cr}}$ 为其对应的序号, 剔除数组 D 中序号 $< j_{max_{cr}}$ 的元素, 则数组 D 中元素的个数从 n_2 变为 $n_3 = n_2 - j_{max_{cr}} + 1$ 个, 数组 D 中的元素组成为

$$D = \{d_j\}, \quad j = j_{max_{cr}}, \dots, n_2 \quad (9)$$

式中 $d_{j_{max_{cr}}}$ 的表达式变为式(10)所示, 其余元素

大小和序号都不发生改变。

$$d_{j_{\max,cr}} = L_0 - \sum_{k=j_{\max,cr}+1}^{n_2} d_k \quad (10)$$

如果单向CMCs平均基体裂纹间距和界面脱粘长度之间不满足式(7),则界面部分脱粘,不需要对数组D进行上述处理。

在上述讨论的基础上,如果在等效载荷曲线中存在谷值载荷使得单向CMCs满足如下所示的不等式,则界面完全滑移,需要对数组D进行进一步处理,否则,界面部分滑移,无需对数组D进行下述处理。

$$\sigma_j \leq (\sigma_{\max,cr} - 2L_0 \tan\theta_i / C_1), \quad j > j_{\max,cr} \quad (11)$$

此时,如果界面部分脱粘,则令 $\sigma_{\max,cr}$ 等于 σ_{\max} ,令 $j_{\max,cr}=1$,并在等效载荷曲线中找到满足式(11)的序号最大的谷值点。假设 $\sigma_{\min,cr}$ 为在等效载荷中满足式(11),且序号最大的谷值点载荷, $j_{\min,cr}$ 为其对应的序号。进一步剔除数组D中序号 $< j_{\min,cr}$ 的元素,则数组D中的元素从 n_3 进一步减小为 $n_4 = n_2 - j_{cr_min} + 1$,数组D中元素变为

$$D = \{d_j\}, \quad j = j_{\min,cr}, \dots, n_2 \quad (12)$$

$$\sigma_f(x) = \begin{cases} \frac{\sigma_i}{v_f} + \tan\theta_i x, & x \in [0, d_{r_n}) \\ \frac{\sigma_i}{v_f} + 2\tan\theta_i d_{r_n} - x \tan\theta_i, & x \in [d_{r_n}, d_{f_n} + d_{r_n}) \\ \dots\dots \\ \frac{\sigma_i}{v_f} - 2\tan\theta_i (\sum_{k=2}^n d_{f_k}) + x \tan\theta_i, & x \in [\sum_{k=2}^n d_{r_k} + \sum_{k=2}^n d_{f_k}, \sum_{k=1}^n d_{r_k} + \sum_{k=2}^n d_{f_k}) \\ \frac{\sigma_i}{v_f} + 2\tan\theta_i (\sum_{k=1}^n d_{r_k}) - x \tan\theta_i, & x \in [\sum_{k=1}^n d_{r_k} + \sum_{k=2}^n d_{f_k}, \sum_{k=1}^n d_{r_k} + \sum_{k=1}^n d_{f_k}) \\ \frac{E_f \sigma_i}{E_c} + \sigma_{f_th}, & x \in [\sum_{k=1}^n d_{r_k} + \sum_{k=1}^n d_{f_k}, L/2) \end{cases} \quad (18)$$

复合材料应变 ε_i 等于纤维应变,由下式计算

$$\varepsilon_i = \frac{2}{E_f L} \int_0^{L/2} \sigma_f(x) dx + \varepsilon_{f_th} \quad (19)$$

式中 ε_{f_th} 表示纤维热残余应变。

4 结果与讨论

4.1 载荷曲线简化

基于本文的载荷曲线简化方法,对图2所示的原始应力加卸载曲线进行简化,得到等效载荷曲线如图3所示。从图中可以发现,原始应力加卸载曲线中有9峰值和10谷值载荷组成,而简化后的载荷曲线只有3个峰值和4谷值载荷组成,峰值和谷值载荷总数缩减了63.16%,从而可以大大减少计算过程,提高计算效率。

式中 $d_{j_{\min,cr}}$ 的表达式为

$$d_{j_{\min,cr}} = L_0 \quad (13)$$

对于以上讨论,假设数组D中的元素个数为 n_D ,组内序号从1~ n_D ,在等效载荷曲线作用下,如果单向CMCs没有发生界面完全滑移,滑移区的对数为 $n = (n_D + 1)/2$,滑移区分布为

$$d_{f_k} = d_{2k-1}, \quad 1 \leq k \leq (n_D + 1)/2, k \text{为整数} \quad (14)$$

$$d_{r_k} = d_{2k}, \quad 1 \leq k \leq n_D/2, k \text{为整数} \quad (15)$$

否则,滑移区的对数为 $n = n_D/2 + 1$,滑移区分布为

$$d_{f_k} = \begin{cases} 0, & k = 1 \\ d_{2(k-1)}, & 2 \leq k \leq n_D/2 + 1, k \text{为整数} \end{cases} \quad (16)$$

$$d_{r_k} = d_{2k-1}, \quad 1 \leq k \leq (n_D + 1)/2, k \text{为整数} \quad (17)$$

式中 d_{f_k} , d_{r_k} 分别表示第k个正向滑移区长度和第k个反向滑移区长度。

3.4 本构行为

基于滑移区分布,可以确定纤维应力分布。假设等效载荷曲线上最后一点的载荷值为 σ_i ,则纤维应力分布为

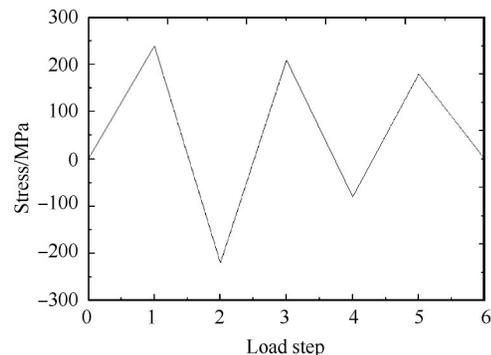


Fig. 3 Equivalent load curve

4.2 单向CMCs损伤状态和本构行为预测

测量一种化学气相渗透工艺(CVI)工艺制备的

单向 SiC/SiC 复合材料的细观力学参数,如表 1 所示。将表 1 中的材料参数代入式(1)~(19),计算单向 CMCs 在图 3 等效载荷曲线作用后的滑移区分布和应力应变行为。滑移区分布计算结果如表 2 所示。从表 2 中可以发现,有 3 对滑移区。滑移区分布和纤维应力分布示意图如图 4 所示。

CMCs 在等效载荷曲线作用后的应变为 2.747×10^{-4} ,此时,应力为 0。说明该应变为残余应变,是由于 CMCs 在应力加卸载作用下产生的细观损伤引起的。滑移区分布和残余应变的大小反应了材料内部的损伤程度。

为了验证本文提出的载荷曲线简化过程以及滑移区分布计算过程的准确性,将表 1 中的材料参数带入剪滞模型,逐点计算图 2 载荷曲线作用后的单向 CMCs 滑移区分布和应变。滑移区分布计算结果如表 2 所示,应变计算结果为 2.747×10^{-4} 。从中可以发现,两种方法计算的滑移区分布和应变大小一致,说明了本文提出

Table 1 Micromechanical parameters of unidirectional CMCs (UD-CMCs) of SiC/SiC

Material property	Value
Modulus of fiber E_f /GPa	170
Modulus of matrix E_m /GPa	200
Fiber volume fraction V_f /%	0.23
Fiber radius r_f / μm	6.5
Initial interface friction stress τ_{i_0} /MPa	20
Final interface friction stress $\tau_{i_{\min}}$ /MPa	5
Saturation crack spacing L_{sat} / μm	300
Weibull constant m	5
Weibull cracking characteristic strength b_0 /MPa	300
Empirical constant ω	0.1
Empirical constant λ	0.1
Empirical constant σ_A /MPa	200

的载荷曲线简化过程和滑移区分布计算过程是可行的。此外,本文方法在计算任意应力载荷后单向 CMCs 损伤状态和本构行为时效率更高,更有优势。

Table 2 Distribution of slip regions of UD-CMCs under equivalent load curve and original load curve based on shear-lag

Method	Equivalent load curve			Original load curve		
	1	2	3	1	2	3
Number						
Length of forward slip regions/ μm	6.06	42.44	24.25	6.06	42.44	24.25
Length of reverse slip regions/ μm	9.09	9.09	54.67	9.09	9.09	54.67

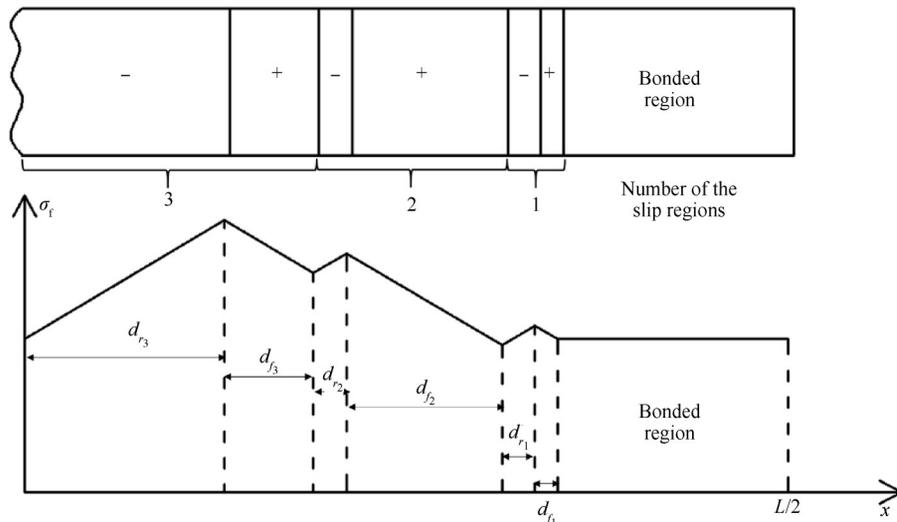


Fig. 4 Schematic diagram of distribution of slip regions and fiber stress

5 结论

为实现快速预测任意应力加卸载作用后 CMCs 损伤行为,本文对 CMCs 任意应力本构行为进行研究,并得出以下结论:

(1) 基于剪滞模型,提出了一种任意应力加卸载

曲线简化方法,获取了仅包含用于确定 CMCs 滑移区分布的峰值和谷值载荷值的等效载荷曲线。对给定的载荷曲线,简化后峰值和谷值载荷总数缩减了 63.16%,从而可以大大减少计算过程。

(2) 提出了基于等效载荷曲线中峰值和谷值点载荷直接计算滑移区分布的方法,避免了载荷曲线

的逐点计算,提高了计算效率。

(3)将原始应力加卸载曲线加入剪滞模型,逐点计算载荷曲线作用后单向CMCs的滑移区分布和应变大小,并与本文的计算方法进行比较。两种计算方法得到的滑移区分布和应变大小一致,说明本文的方法是可行的。此外,本文的方法效率更高。

致谢:感谢江苏省研究生科研与实践创新计划的资助。

参考文献

- [1] 林左鸣. 战斗机发动机的研制现状和发展趋势[J]. 航空发动机, 2006, 32(1): 1-8.
- [2] 李志永, 郑日恒, 李立翰, 等. 冲压发动机C/SiC喷管承压失效研究[J]. 推进技术, 2013, 34(4): 545-550. (LI Zhi-yong, ZHENG Ri-heng, LI Li-han, et al. Investigation on Pressure Failure of C/SiC Nozzle in Ramjet [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(4): 545-550.)
- [3] 张杰, 魏鑫, 郑力铭, 等. C/SiC复合材料在空气中的氧化烧蚀[J]. 推进技术, 2008, 29(4): 488-493. (ZHANG Jie, WEI Xin, ZHENG Li-ming, et al. Oxidation and Ablation of C/SiC Composites in Air [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2008, 29(4): 488-493.)
- [4] 文生琼, 何爱杰. 陶瓷基复合材料在航空发动机热端部件上的应用[J]. 航空制造技术, 2009(s1): 4-7.
- [5] 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, 63: 298-319.
- [6] Kuo W S, Chou T W. Predictions of the Critical Strain for Matrix Cracking of Ceramic Matrix Composites [M]. New York: Springer, 1991.
- [7] Rouby D, Reynaud P. Fatigue Behaviour Related to Interface Modification during Load Cycling in Ceramic-Matrix Fibre Composites [J]. *Composites Science and Technology*, 1993, 48(1-4): 109-118.
- [8] Zhang S, Gao X, Chen J, et al. Strength Model of the Matrix Element in SiC/SiC Composites [J]. *Materials & Design*, 2016, 101: 66-71.
- [9] Li Longbiao, Song Yingdong, Sun Youchao. Modeling Loading/Unloading Hysteresis Behavior of Unidirectional C/SiC Ceramic Matrix Composites [J]. *Applied Composite Materials*, 2013, 20(4): 655-672.
- [10] Li Longbiao, Song Yingdong. An Approach to Estimate Interface Shear Stress of Ceramic Matrix Composites from Hysteresis Loops [J]. *Applied Composite Materials*, 2010, 17(3): 309-328.
- [11] Gao Xiguang, Zhang Sheng, Fang Guangwu, 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.
- [12] 宋迎东, 张盛, 高希光, 等. 单向陶瓷基复合材料任意加卸载应力应变行为预测方法[P]. 中国专利: 201510334899, 2018-08-26.
- [13] 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): 107-113.
- [14] Gao Xiguang, Fang Guangwu, Song Yingdong. 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.
- [15] 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.

(编辑:史亚红)