

碳基复合材料烧蚀性能的多尺度研究^{*}

Research on Multi-Scale Modeling of Carbon-Based Composites in Ablation

北京工业大学 刘娜 杨庆生
国机集团北京飞机强度研究所 黄祎丰

[摘要] 简要介绍了碳基复合材料烧蚀性能的多尺度分析方法,重点阐述了多尺度方法在碳基复合材料的等效性能,烧蚀粗糙度形貌,烧蚀多物理场耦合上的应用,最后对多尺度分析方法的应用前景进行了展望。

关键词: 多尺度模拟 碳基复合材料 烧蚀 表面衰退

[ABSTRACT] The multi-scale analysis of carbon-based composites in ablation is simply introduced. Then the application of multi-scale method in properties homogenization, multi-scale ablation morphology and multi-physics coupling of carbon-based materials in ablation is focused on. Finally, a perspective to the multi-scale analysis method is given.

Keywords: Multi-scale modeling Carbon-based composites Ablation Surface recession

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.03.086

随着人类文明的进步,材料的使用也趋于多元化,材料的使用条件日益苛刻,尤其航天飞行器热防护材料要求能承受高温、高压、高热流及高焓等复杂的空间环境,需要特别的热防护材料设计^[1]。空间飞行器在地球表面低轨道下运行,在原子氧的侵蚀下材料表面会发生各种退化损伤^[2]。碳基复合材料,以碳纤维或碳化硅等陶瓷纤维为增强体,以碳为基体的复合材料的总称^[3],如碳/碳(C/C)复合材料、碳/碳化硅(C/SiC)复合材料和碳/酚醛树脂(C/R)复合材料,以其耐高温、低密度、高比模、高比强、抗热震、耐腐蚀、摩擦性能好、吸振性好及热膨胀系数小等优异性能,尤其能耐受3300K的高温环境,在抗烧蚀、耐摩擦、热防护结构、抗核辐射及高温热结构等领域得到了广泛的应用^[4-5],主要在航空航天领域中用作热结构材料和烧蚀材料。

材料在空间和时间上的多尺度现象是材料科学中材料变形和失效的固有现象^[6]。随着航天技术的迅猛发展,对防热材料及其结构在极端复杂环境下的性能表征和热损毁机理的研究日趋迫切,弄清碳基热防护材料性

能的宏、微观演化规律,控制材料的失效与破坏具有重要意义。多尺度分析方法是考虑空间和时间的跨尺度与跨层次特征,并将相关的尺度耦合的新方法,是计算各种复杂的材料科学和工程问题的重要的技术方法^[7]。

近年来,随着细观力学分析方法和均匀化理论的深入,发展微细观到宏观的多尺度方法在工程应用中得到广泛关注。部分学者开始将多尺度这种重要的技术方法用来分析研究碳基烧蚀材料的力学性能,并对其烧蚀的多尺度演化进行了数值模拟。本文综述了多尺度分析方法在碳基复合材料性能分析中的研究进展,并对多尺度方法在碳基复合材料烧蚀分析中的应用研究进行了展望。

1 碳基复合材料的多尺度分析

碳基复合材料一般通过化学气相沉积法(CVD)制造的,是多尺度复合材料,在长度和时间上都具有多尺度效应,不同尺度特征采用不同的数值分析方法^[8],如图1所示。作为一种多相材料,碳基复合材料的力学性能与破坏机理不仅与宏观的性能有关,也与组分相的性能与分布^[9]、增强相的形状以及增强相与基体之间的界面特性等细观特征密切相关。目前复合材料的多尺度分析已经发展到在纳米尺度上的力学行为表征。材料多尺度分析是深刻认识材料机理的重要技术方法^[10,11]。

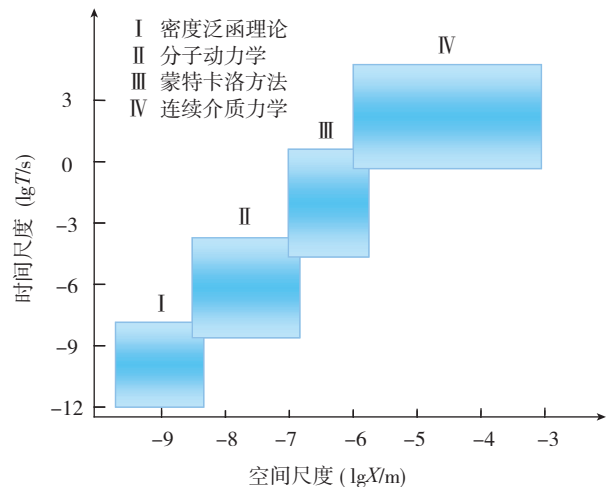


图1 材料的时间与长度多尺度

Fig.1 Multi-scale of materials in time-scale and length-scale

^{*} 国家自然科学基金项目(11172012)支持。

不同的尺度下,具有不同的力学性能和破坏机理^[12]。

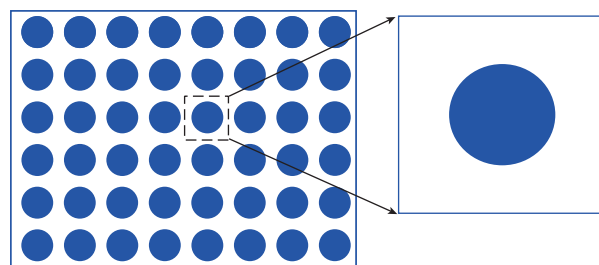
在宏观尺度分析上,碳基复合材料的建模比细观上扩大了一个尺度,碳基复合材料可以看作是均匀的各项异性材料,忽略纤维和基体之间的区别。通常是利用多尺度方法,如均匀化方法、Mori-Tanaka 方法及通用单胞模型法等,通过不同尺度上的联系从较低一级尺度上推导出有效的材料性能,具体将在第二节中举例介绍。

在细观尺度分析上,是以纤维和基体作为基本单元,把纤维和基体分别看作各向同性或者各向异性的均匀材料,然后根据纤维的几何形状和分布形式、纤维和基体的力学性能、纤维和基体之间的相互作用等条件来分析碳基复合材料的力学性能^[13]。Sullivan^[14]提出了用来建立复合材料氧化模型的连续体理论。这种方法是将复合材料看作是基体、纤维和孔隙的均匀模型。虽然这种连续体模型预测碳基复合材料的力学行为是有效的,但这种方法在模拟纤维氧化中并没有涉及到材料本身固有的异构性问题。通过宏观和微观模型耦合建立的多尺度模型才能既有连续体模型的有效性,又有微观模型的精确性。单向增强的复合材料常采用平面单胞模型来建模,平面四边形或者六边形单胞模型,如图 2 所示。3D 碳基复合材料通常采用立体单胞模型或者六棱柱体单胞模型,如图 3 所示。

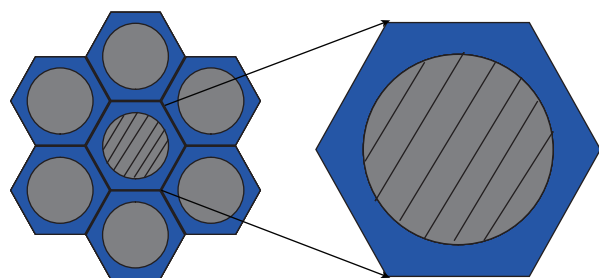
在微观尺度分析上,碳基复合材料通常取单根碳纤维为对象,分析其在高温下其性能和结构的演化。冯志海^[15]等人通过试验对碳纤维在碳/碳烧蚀耐热复合材料中应用的基础问题进行了研究,研究表明碳/碳复合材料的碳纤维的力学性能的好坏对其烧蚀过程中纤维烧蚀“笋尖”的剥蚀具有重要的作用。Jachaud^[16]等人建立了单根纤维尺度上的微观模型,从微观尺度上建立了由浸渍在碳化酚醛基体中的碳纤维预成型料的氧化烧蚀模型。数值模拟结果表明了基体的体积烧蚀会造成碳纤维暴露。这是由于碳化酚醛树脂基体的反应速率比碳纤维的反应速率要大。周围的基体被氧化烧蚀后,暴露的纤维随着氧化烧蚀的进行其直径会慢慢减小。当纤维出现烧蚀时,整体材料开始出现衰退。

2 多尺度分析在碳基复合材料有效性能分析中的应用

碳基材料作为航天器热防护系统的组件材料,其对航天器结构性能影响较大的是材料的弹性系数、热膨胀系数和强度等材料性能。对于单向碳基复合材料的这些力学性能可以通过试验方法测得。但是,随着复合材料纤维排布方式和铺层方式的不同其力学性能也不相同^[17, 18],而纤维排布和铺层方式多种多样。要全部通过试验测得复合材料的这些力学性能数据,既不实际也不



(a) 平面四边形单胞模型



(b) 平面六边形单胞模型

图2 单向增强碳/碳复合材料的单胞模型

Fig.2 Unit cell model of unidirectional carbon/carbon composites

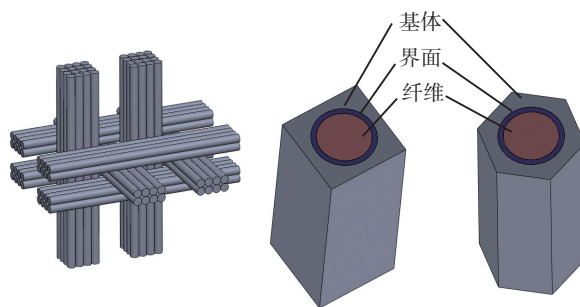


图3 碳基复合材料的三维单胞模型

Fig.3 3D unit cell model of carbon-based composites

经济。此外,由于碳基复合材料本身材料性能的复杂性和分散性,有时很难通过试验获得可靠的数据。通过有效的力学分析获得材料的性能数据才是合理的解决途径。通过多尺度分析计算材料的有效性能,可以大大简化数值模拟的建模工作量,提高工作效率。

均匀化方法^[19]是一种分析周期性微观结构材料性能的具有严格数学依据的方法,是一种既能分析复合材料,又能反映其细观结构特征并建立起二者之间联系及相互作用的方法。通过选取适当的相对于宏观尺度很小,但可以反映材料组成性质的单胞来建立模型,确定单胞的描述变量,建立能量表达式并求解,再利用周期性条件和均匀性条件,得到宏观等效的材料系数,如弹性模量、泊松比、热膨胀系数及热弹性常数等。

Zhang^[20]等人在研究 SiC/C 复合材料残余应力对抗烧蚀性能的影响时,为了简化建模工作,采用均匀化的方法计算了其等效弹性系数,如图 4 所示。其中碳和 SiC 材料的相关性能通过直接均匀化获得。弹性模量

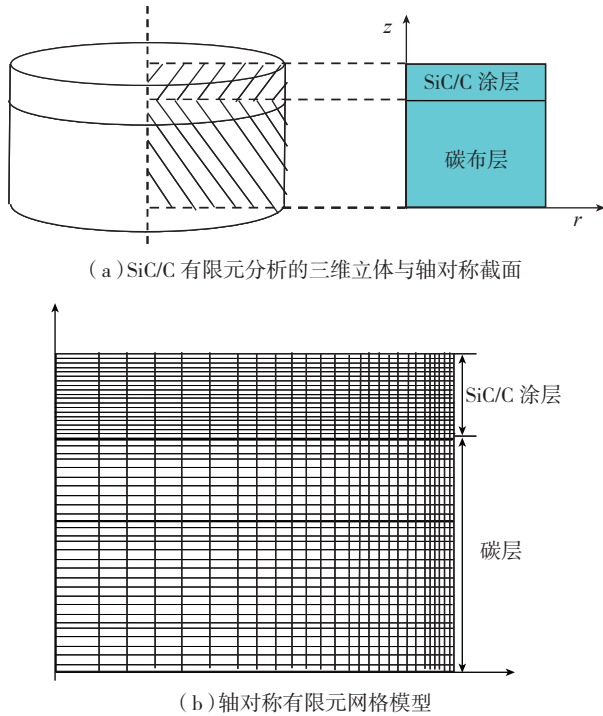


图4 3D SiC/C 复合材料的有限元分析模型
Fig.4 Finite element analysis model of 3D SiC/C

(E)、每一层的热膨胀系数(α)通过以下修正式计算:

$$E = \frac{eV_C E_C + V_{SiC} E_{SiC}}{eV_C + V_{SiC}}$$

其中, $e = \frac{q + E_{SiC}}{q + E_C}$ 。

$$\alpha = V_C \alpha_C + V_{SiC} \alpha_{SiC} - \frac{A - 1/\bar{K}}{1/K_C - 1/K_{SiC}} (\alpha_C - \alpha_{SiC})$$

$$A = \frac{V_C}{K_C} + \frac{V_{SiC}}{K_{SiC}}$$

式中, α_i, V_i, E_i, K_i 分别代表复合材料相应组分的热膨胀系数、体积分数、弹性模量和体积模量; \bar{K} 代表均匀化后的体积模量, q 通常是在 500MPa 下定义的应力-应变传递率。

宋广兴^[21] 等将均匀化与有限元法相结合求解了碳/碳复合材料的有效弹性性能。M. Grujicic^[22] 等人分别从微观、宏观两个尺度上建立了三维 C/C 复合材料固定传热的有限元分析模型, 计算出了 C/C 复合材料在横向和纵向上的平均热导率。Mao^[23] 等人提出了碳纤维编织复合材料渐进损伤分析的一种多尺度建模方法。编织复合材料在 3 个不同尺度上(微观、细观和宏观)根据它们独特的几何和材料特性建立了的多尺度模型, 如图 5 所示。

在这种方法中, 材料的宏观有效性能是通过微观和细观尺度上的均匀化性能得到的, 3 个尺度上的应力是采用从宏观到微观尺度的应力放大法计算出的。通过

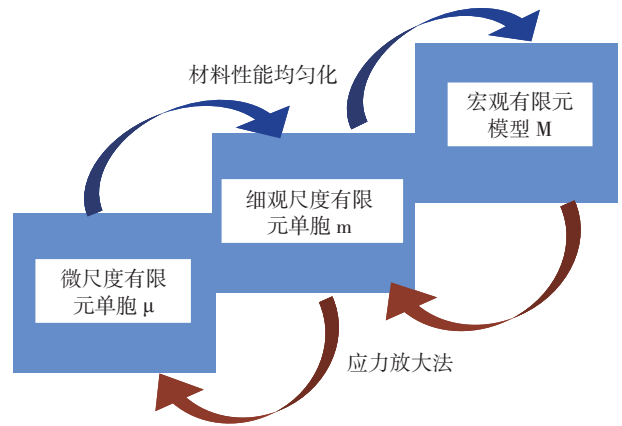


图5 编织复合材料层合板的多尺度建模^[23]
Fig.5 Multi-scale modeling of braided composites laminate

不同尺度上双向信息的传递, 便可以得到复合材料微观、细观和宏观尺度上的结构特征, 进而, 可以通过宏观模型研究得到复合材料的微观损伤机理和不同尺度之间的相互影响。除此之外, 在渐进损伤分析中还能跟踪到材料结晶和损伤增长的变化。采用连续损伤力学的分析方法来建立后失效模型, 通过提出的多尺度方法准确预测了带有开放孔洞的编织复合材料层合板的材料刚度、拉伸强度和破坏模式。

3 碳基复合材料烧蚀粗糙度的多尺度模拟

许多非均质的碳基材料被用作极端温度下热防护系统的组件, 比如再入防护罩^[24] 和火箭喷嘴^[25]。C/C 复合材料的服役环境是极其恶劣的^[26], 作为多尺度非均质材料, 其不同尺度上由于纤维、基体的性能差异, 使得材料在热服役环境中的氧化烧蚀, 呈现出不同的粗糙度特征, 如表 1 所示。热防护系统的设计在很大程度上依赖于材料表面粗糙度的演化。

表1 不同尺度上C/C烧蚀的粗糙度示意图^[27]

粗糙度尺度	微观尺度		细观尺度	宏观尺度
材料尺度	微结构		细观结构	复合材料
C/C 复合材料	纤维	纤维束	编织结构	板
				REV

C/C 复合材料的多尺度粗糙度分类如下:

(1) 宏观粗糙度发生在平面六面体上。由于外部纤维束和基体是由不同的反应速率造成的, 机械剥蚀偶然发生在外部纤维束的基体上。纤维束是锥形, 整体呈波浪形的粗糙面。

(2) 细观粗糙度发生在纤维束顶部, 呈“针状层”。

(3) 微观粗糙度呈现出微观结构, 一些材料在纤维顶部出现孔洞, 纤维束上也呈现出明显的粗糙度^[28]。

Lachaud^[29] 等人建立了三维反应-扩散模型模拟

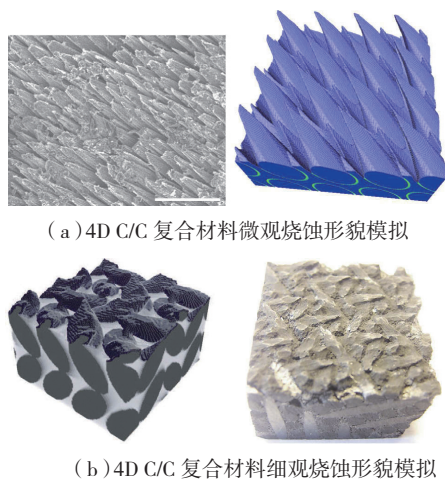


图6 4D C/C复合材料烧蚀形貌的多尺度模拟^[29]

Fig.6 Multi-scale modeling of ablation surface of 4D C/C composites

碳基复合材料烧蚀过程中碳纤维的典型针状的形成。Vignoles^[30]等人采用VOF技术模拟了火箭发动机喷嘴用C/C复合材料多尺度烧蚀,从微观、细观两个尺度上模拟了4D碳/碳复合材料烧蚀后退,如图6所示。

碳基复合材料在服役过程中在周围环境的作用下,由于发生氧化或升华会生成大量的热传递出去而造成材料退化。烧蚀过程中影响碳基复合材料表面烧蚀的因素有很多,为了弄清楚碳基复合材料烧蚀变化过程和机理,已经进行了大量试验,如电弧喷射试验^[31-33]、热重法^[34]和氧乙炔烧蚀试验^[35, 36]等。Vignoles^[27, 37-39]等人通过大量的试验观察碳基复合材料的烧蚀形貌,发现其粗糙度建模需要考虑以下4个因素进行建模:

第1个因素是表面衰退率,即材料在氧化反应和升华反应下的表面衰退。任何部位的表面衰退速率取决于纤维的方向^[9]和质量转移。单位面积上的质量损失同材料暴露时间大约成正比,并取决于材料表面的温度。这个衰退率可以由哈密顿-雅克比(Hamilton-lacobi)方程模拟,该方程用来描述表面的烧蚀退化。用 $S(x, y, z, t) = 0$ 作为材料表面的隐式表达。写成

$$\frac{\partial S}{\partial t} + v \cdot \nabla S = 0 \quad (1)$$

这个哈密顿方程中, $H = v \cdot \nabla S$ 包括实际的法线方向的表面衰退速率 v , t 表示时间, 该衰退率取决于材料的反应速率

$$v = vRn \quad (2)$$

这个反应速率取决于既定的表面温度和局部反应气体浓度

$$R = k_0 \exp(-E_a/\mathfrak{R}T) \cdot C(z=h) \quad (3)$$

其中, k_0 表示多相反应系数, E_a 表示反应活化能, \mathfrak{R} 表示气体摩尔常数, C 表示气体浓度, T 表示材料表面温度, h 表示材料表面最高值。

在升华情况下,与平均值相比,表面衰退率取决于当前局部升华气体物种的浓度,例如,通过克努森-兰缪关系

$$v = v_s \cdot \alpha_0 \exp(-E_a/\mathfrak{R}T) (2\pi \mathfrak{R}TM)^{-1/2} \cdot [P_i(z=h) - P_i^{eq}(T(z=h))]n \quad (4)$$

其中, v_s 表示固相反应速率, α_0 表示粘附系数常数, M 表示材料点的位置。方程(4)同方程(2)和(3)是很类似的。升华和氧化问题在以下两种情况下是动态等效的: a. 当用饱和浓度 $(p_i - p_i^{eq})$ 代替浓度 C 时; b. 当定义等效反应常数 $k_0 = \alpha_0(2\pi \mathfrak{R}TM)^{-1/2}$ 时。

注意曲面的法线由隐式函数 $S(x, y, z, t)$ 的梯度获得:

$$n = \nabla S / \|\nabla S\| \quad (5)$$

当表面没有任何突起时,可以写下隐式方程 S 如下:

$$S(x, y, z, t) = z - h(x, y, t) \quad (6)$$

第2个因素是局部气体浓度,局部气体浓度通过大量的气体相质量传递中求解质量守恒方程:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (v_g C - D \nabla C) = 0 \quad (7)$$

表面的消耗和产生

$$-D \nabla C \cdot n = -R \quad (S = 0, z = h) \quad (8)$$

气相的传递运输以扩散和对流为特征(可能是多种气体组分)。这个因素需要气体相的速度场 V_g , 很有可能是在紊流状态下的,使得 V_g 在实际中很难获得。

第3个因素是材料表面温度。局部表面温度由热平衡方程评估,主要是固-气相间的质量传递。

$$\rho_g c_{pg} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_g \nabla T \right) + \nabla \cdot (-\lambda_g \nabla T) = 0 \quad (9)$$

$$\rho_g c_{ps} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-\lambda_s \nabla T) = 0 \quad (10)$$

其中, ρ_g 表示气体密度, c_{ps} 表示气体相的界面浓度, c_{pg} 表示固体相的界面浓度, λ_g 代表气体的导热系数。同时界面处的热消耗为: $[-\lambda \nabla T \cdot n]_{g-s} = L_T R$ 。

第4个因素是材料自身的非均匀性。必要时,可能考虑材料非均质性,化学反应特性(比如,反应常数 k 或者粘附概率 α) 也将会是空间位置的函数。

碳基复合材料最简单的细观烧蚀模型是等温模型,并且在材料非均质消退中只考虑特定气体在材料中的扩散。这个适用于2种情况:(1)等温氧化测试;(2)微尺度模拟,当垂直材料平均表面方向上的长度小于0.1mm时,在分析时就可以忽略这些尺度上温度的变化。该模型的基本方程^[37]是:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial t} + v \cdot \nabla S = 0 \\ v = -v_s R n \\ R = kC \quad \text{at } S(x, y, z) = 0 \\ \nabla \cdot (-D \nabla C) = 0 \quad \text{at } S(x, y, z) \geq 0 \\ -D \nabla C \cdot n = -R \quad \text{at } S(x, y, z) = 0 \end{cases}$$

其中, D 是气体扩散系数, 由于气体浓度稳定特征时间比表面衰退的时间短得多, 此时这个系数是固定的。

在宏观尺度上, 要考虑热传递作用, 此时由于气体相对消耗率小, 浓度场是简单的常数。因此, 忽略对流和辐射的影响, 只考虑热平衡特征就可以建立另一多尺度模型。模型的方程表达式如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial t} + v \cdot \nabla S = 0 \\ v = -v_s R n \\ R = k_0 C_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \text{ at } S(x, y, z) = 0 \\ \nabla \cdot (-\lambda_g \nabla T) = 0 \text{ at } S(x, y, z) \geq 0 \\ \nabla \cdot (-\lambda_s \nabla T) = 0 \text{ at } S(x, y, z) = 0 \\ [-\lambda_s \nabla T]_{g \rightarrow s} \cdot n = -L_r R \text{ at } S(x, y, z) \geq 0 \end{cases}$$

其中, λ_g 和 λ_s 分别代表气体和固体的导热系数, E_a 是反应活化能, L_r 是反应摩尔焓值, 方括号中的部分代表的是界面处的热流跳跃。

通过多尺度建模分析, 在纤维尺度上确认了一些参数对烧蚀过程中材料粗糙度的影响, 如反应速率常数、扩散-反应速率比、纤维体分比和针状纤维波峰到波谷的粗糙度高度。在宏观均匀尺度上, 复合材料反应速率取决于最弱组分基体的反应速率和材料本省的粗糙度性能。

4 碳基复合材料烧蚀过程中的多场耦合多尺度模拟

碳基复合材料的高温、高焓和高压环境中因物理、化学和力学因素造成质量损失, 引起材料烧蚀, 其烧蚀过程与很多因素有关, 而且各种因素也并非孤立的, 相互之间存在复杂的影响。部分研究人员在碳基复合材料烧蚀多场耦合模拟方面进行初步探索。国内黄海明^[40]等研究了 C/C 复合材料的烧蚀机理, 主要有热化学烧蚀和机械剥蚀。王臣^[41]等人从碳基烧蚀的机理出发, 建立了烧蚀模型, 基于移动边界条件下的瞬态热边界、物性随温度变化的物体内非线性传热特性, 对瞬态的热力耦合进行有限元求解计算。但是该模型从宏观上构建, 并没有考虑材料本身的多尺度特征, 不能揭示材料内部的烧蚀损伤变化。此外, 王臣^[42]等人, 基于 C/C 复合材料烧蚀表面细观形貌和细观结构上的流场分布, 根据热化学烧蚀理论, 模拟了扩散控制下材料的裂纹扩展。该模拟分析通过细观上的结构损伤预测这种材料内部的微裂纹可能进一步发展为宏观裂纹, 并造成失稳扩展, 但并没有从多尺度角度进一步分析。目前针对碳基复合材料的烧蚀性能分析, 从多场耦合的基础上, 已经建立了一些有效的烧蚀模型^[43], 如表面烧蚀模型、体积烧蚀模型、线烧蚀模型和机械剥蚀模型等。但针对碳基复合材料烧蚀多场耦合分析的多尺度模拟关

注的并不多。

国外, Sundararaghavan^[12] 和 Lee^[44] 采用完全的耦合多尺度均匀化方法建立了多尺度模型用来预测碳基材料烧蚀后退的变化行为。首先, 在微观尺度上考虑氧化烧蚀问题, 其中碳纤维镶嵌在惰性基体 (SiC) 中与氧气反应。图 7 是 2D-C/SiC 复合材料的单胞结构从微观到宏观均匀化分析的边界条件。一个单胞代表宏观尺度上有限元网格中的一个集成点。为了确定每个单胞上的边界条件, 利用计算均匀化方法来推导。宏观-微观的联系是将微观密度场分解成宏观密度场和扰动场 ($\tilde{\rho}$) 的总和:

$$\rho = \rho_{ref} + \overline{\nabla \rho} \cdot x + \tilde{\rho} \quad (11)$$

其中, ρ 代表微观上的密度场, 宏观参考点的局部密度场记作 ρ_{ref} , 坐标 x 代表与单胞的参考点相关的微尺度上的点, 微观尺度上局部密度场记作 ρ 。

一般而言, 我们将与微观性能 (x) 对应的宏观尺度上的性能记作 \bar{x} 。方程 (11) 中, 宏观材料点上材料组分的局部密度梯度记作 $\overline{\nabla \rho}$ ($=\nabla_{macro} \bar{\rho}$)。均匀化理论最一般的假设是, 该梯度 (即前面所说的宏观尺度 $\overline{\nabla \rho}$) 能表示微观结构外部边界上的场变量:

$$\overline{\nabla \rho} = \frac{1}{V} \int_s \rho n dS \quad (12)$$

由于宏观上密度场看作是连续的, 在均匀化方法中, 密度场作为外部边界是已知的。微观平衡方程通过有限元分析来完整描述氧气在微观尺度上的密度扩散。类似的, 微观上的温度场也可以分解成宏观温度场和扰动场 (\tilde{T}) 的总和:

$$T = T_{ref} + \overline{\nabla T} \cdot x + \tilde{T} \quad (13)$$

其中, T 代表微观上的温度场, 宏观参考点的局部温度

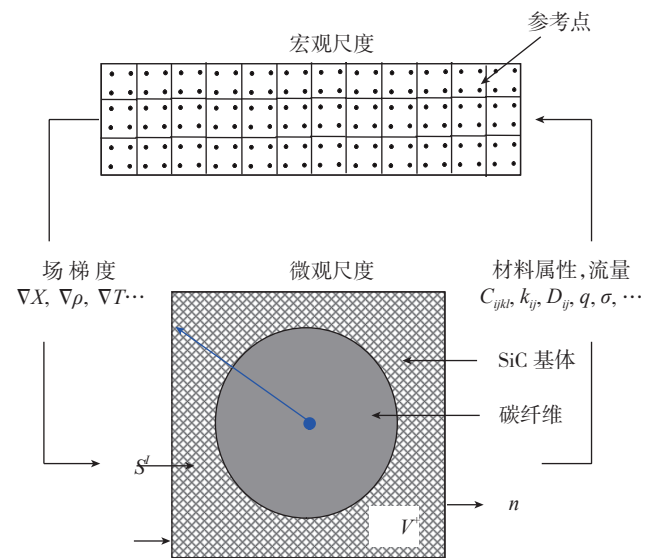


图7 C/SiC复合材料均匀化边界条件
Fig.7 Boundary condition of homogenized C/SiC composites

场记作 T_{ref} , 坐标 x 代表与单胞的参考点相关的微尺度上的点, 微观尺度上的局部温度记作 T 。

在耦合的多尺度模型上, 微观尺度上的均匀流量是通过 Hills 的宏观均匀化条件来解释微观单胞质量流量的跳跃和组分密度场的跳跃。尤其关键的是获得宏观的质量流量来满足 Hills 宏观均匀化条件, 这个条件与宏观流量 \bar{q} 和微观结构上对应的 q 相关:

$$\overline{\nabla \rho \cdot \bar{q}} = \overline{\nabla \rho \cdot q} \quad (14)$$

该工作中采用了均匀化边界条件和泰勒边界条件对比分析其质量扩散性能, 不管是哪个边界条件, 为了满足上面宏观均匀性条件, 都需要推导出质量流量:

$$\bar{q} = \frac{1}{V} \int q dV \quad (15)$$

然后, 利用计算均匀化方法对碳基复合材料氧化过程中界面的移动与流量跳跃问题进行分析, 可得到宏观上在不同氧压分布对应微观尺度上碳纤维的氧化结构。

此外, Sundararaghavan 和 Lee 采用水平集方法与自适应技术追踪碳纤维与基体界面的移动。该工作是目前研究碳基耐热复合材料烧蚀演化数值模拟较为突出的成果, 也可以用来分析其他的耐高温烧蚀材料的烧蚀行为。

5 结束语

碳基复合材料的多尺度研究对于飞行器热防护系统的设计有重要意义:

第 1, 多尺度方法主要是将非均质的材料等效成全局的均匀材料, 且满足两个尺度上的应变能完全或近似相同, 该方法能够加速碳基复合材料的建模过程, 减少计算工作量。

第 2, 多尺度方法能在考虑不同尺度下材料力学行为的差异提供更为准确高效的材料强度理论与破坏机制, 为工程应用提供更为科学准确的性能评价和强度预测方法和手段。

虽然对碳基复合材料的研究有较长的历史了, 但目前存在的问题仍比较多。比如, 材料本身性能分散、随机性大、难以模拟; 对于碳基复合材料在退化过程中的热力氧等多物理场耦合, 难以直接给出控制方程和耦合方程; 缺少高效的计算方法等。尤其现有的技术还不能完成对飞行器热防护系统中碳基复合材料在服役过程中组织结构变化的原位测试, 因此对材料组织演变与性能变化之间的关系还不清楚。通过多尺度分析模拟碳基复合材料的表面烧蚀衰退形貌, 并预测碳基复合材料烧蚀后的力学性能将是很有前景的研究方向, 对航天器的设计也有指导意义。

参考文献

- [1] Nathan R P. Modeling of ablation of carbon-carbon composite thermal protection system. 39th AIAA Thermophysics Conference, Miami, FL, United states, 2007.
- [2] Fujimoto K, Shioya T, Satoh K. Degradation of carbon-based materials due to impact of high-energy atomic oxygen. International Journal of Impact Engineering. 2003, 28(1): 1-11.
- [3] Manocha L M, Fitzer E. Carbon reinforcement and C/C composites. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998:10-160.
- [4] Buckley J D, Edie D D. Carbon-carbon materials and composites, Noyes Publication, USA, 1994:1-17, 106-122.
- [5] Schmidt D L, Davidson K E, Theibert L. Evolution of carbon-carbon composite. SAMPE Journal, 1996, 4(32): 44-45.
- [6] 张征, 刘更, 刘天祥, 等. 计算材料科学中桥域多尺度方法的若干进展. 计算力学学报, 2006(6): 652-658.
- [7] Lucia A. Multi-scale methods and complex processes: A survey and look ahead. Computers & Chemical Engineering, 2010, 34(9): 1467-1475.
- [8] Dollet A. Multiscale modeling of CVD film growth—a review of recent works. Surface and Coatings Technology. 2004, 177-178: 245-251.
- [9] Farhan S, Li K, Guo L, et al. Effect of density and fibre orientation on the ablation behaviour of carbon-carbon composites. New Carbon Materials, 2010, 25(3): 161-167.
- [10] Espinosa H D, Filleter T, Naraghi M. Multiscale experimental mechanics of hierarchical carbon-based materials. Advanced Materials, 2012, 24:2805-2823.
- [11] Karakasidis T E, Charitidis C A. Multiscale modeling in nanomaterials science. Materials Science and Engineering, 2007, 27(5-8): 1082-1089.
- [12] Sundararaghavan V, Le S. Multiscale modeling of oxidative degradation of C-SiC composite. 51st AIAA/ASME /ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Orlando, FL, United states, 2010.
- [13] Aubard X, Cluzel C, Guitard L, et al. Damage modeling at two scales for 4D carbon/carbon composites. Computers & Structures, 2000, 78(1-3): 83-91.
- [14] Sullivan R M. A model for the oxidation of carbon silicon carbide composite structures. Carbon, 2005, 43(2): 275-285.
- [15] 冯志海, 李同起, 杨云华, 等. 碳纤维在高温下的结构、性能演变研究. 中国材料进展, 2012(8): 7-14.
- [16] Lachaud J, Mansour N N. Microscopic scale simulation of the ablation of fibrous materials. 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, FL, United states, 2010.
- [17] Rao M V, Mahajan P and Mittal R K. Effect of architecture on mechanical properties of carbon/carbon composites. Composite Structures, 2008, 83(2): 131-142.
- [18] Neumeister J, Jansson S, Leckie F. The effect of fiber architecture on the mechanical properties of carbon/carbon fiber composites. Acta Materialia, 1996, 44(2): 573-585.
- [19] 郑晓霞, 郑锡涛, 缙林虎. 多尺度方法在复合材料力学分析中的研究进展. 力学进展, 2010(1): 41-56.

本文共有参考文献 44 篇, 因篇幅有限, 未能一一列出, 如有需要, 请向本刊编辑部索取。 (责编 玲犀)