

纤维增强复合材料的细观力学模型以及数值模拟进展

Progress in Numerical Simulations and Mesoscopic-mechanical Models of Fiber-reinforced Composites

李红周¹, 贾玉玺^{1,2}, 姜 伟¹, 安立佳¹

(1 中国科学院研究生院 长春应用化学
研究所高分子物理与化学国家重点实验室, 长春
130022; 2 山东大学 材料科学与工程学院, 济南 250061)

LI Hong-zhou¹, JIA Yu-xi^{1,2}, JIANG Wei¹,
AN Li-jia¹ (1 State Key Laboratory of Polymer Physics and
Chemistry, Changchun Institute of Applied Chemistry, Graduate School
of Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China; 2 School of
Materials Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

摘要: 纤维增强复合材料是一类高比强度、高比刚度的新兴结构材料。开展该材料的强度分析和破坏过程模拟具有重要的科学意义和工程价值。介绍了纤维增强复合材料的细观力学模型的发展过程, 综述了引入统计概念的复合材料力学行为有限元分析的研究现状, 并展望了其发展趋势。

关键词: 复合材料; 力学模型; 综述; 数值模拟

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2006) 08-0057-04

Abstract: Fiber-reinforced composites were a new kind of structural material with high specific strength and high specific rigidity. It was very important to analyze and simulate the mesoscopic-mechanical behaviors of fiber-reinforced composites. The developments of the mesoscopic-mechanical models of the material were presented. Then the developments of the numerical simulations, based on finite element method and Monte Carlo method, of the mechanical behavior were reviewed. Finally, the development trends were prospected.

Key words: composite; mechanical model; review; numerical simulation

纤维增强复合材料是一类新兴的结构材料, 具有高比强度、高比刚度, 抗疲劳、耐磨、耐腐蚀、耐高温性能和破损安全性能好, 热膨胀系数小, 成型工艺好等特点。因此, 该材料广泛应用于航空、航天、国防、交通、医疗、化工、土木建筑和体育用品等领域。

本文介绍了纤维增强复合材料的剪切滞后模型、强度统计模型等细观力学模型的发展过程, 综述引入统计概念的复合材料强度有限元分析的研究现状, 并展望了其发展趋势。

1 细观力学模型的发展

1.1 剪切滞后模型的发展

Cox^[1]于 1952 年在细观力学分析中首次引入剪切滞后(shear-lag)概念。引入该概念的目的在于: 不具

体求解复合材料的应力场和应变场, 而重点考虑材料结构的主要特点, 通过构造一个数学模型来计算材料结构对载荷的响应。该模型简化了复合材料力学分析, 为解释实验数据以及设计损伤容限更好的材料结构提供了方向性的理论指导。但是, Cox 的模型仅研究了弹性基体中的单根纤维断裂后的应力分布, 没有考虑其它临近纤维的应力分布, 因而不能分析应力集中问题。

Hedgepeth^[2]等发展了 Cox 的模型, 研究了单向纤维增强复合材料的多根纤维断裂后的应力分布问题, 并预测了无限根纤维增强复合材料的内部多根纤维断裂后的应力集中值。其剪切滞后模型的主要假定是: 纤维是一维轴向应力传递实体; 纤维只受拉力作用, 只能沿轴向位移; 纤维等间距排列; 纤维和基体界面强结合; 基体不能传递轴向力, 仅传递剪力; 界面剪

切强度为常数。该模型可以较好地描述基体的拉伸模量较低以及纤维体积分数较大的单向复合材料中纤维断点周围的应力集中现象。

Van Dyke 等^[3]进一步发展了剪切滞后模型,研究了单根纤维断裂后其临近基体的塑性效应和界面脱粘对应力集中的影响,但不足之处是不适宜研究较多数目的纤维发生相继断裂,以及裂纹临近的基体或界面也发生破坏的情况。因此,Zweben^[4]提出了一种近似分析法,研究了含有垂直于纤维轴向的狭长割口的单向复合材料在轴向拉伸载荷作用下的应力分布问题,并考虑了裂纹前沿区域基体的非弹性效应。

Ochiai 等^[5]提出了一种考虑基体拉力的修正的剪切滞后模型,研究了二维单向复合材料中纤维断裂、基体横向裂纹以及纤维/基体界面破坏等因素对于断口邻近的纤维和基体的应力集中的影响,但对于具体的纤维/基体界面破坏问题,仅能求解单根纤维断裂后的应力分布。因此,曾庆敦等^[6,7]提出了改善的剪切滞后模型,较好地解决了上述问题。

此外,Fukuda^[8]等,Goree^[9]等,Rossettos^[10]等和Phoenix^[11,12]等改进了剪切滞后模型,McMeeking^[13-16]等、Curtin^[17-19]等和Okabe^[20-22]等把剪切滞后模型推广到三维问题。他们研究的重点是修改Hedgepeth^[2]的剪切滞后模型的主要假定,即考虑基体轴向刚度、界面滑移和纤维非等距排列等因素对应力集中的影响。

1.2 强度统计模型的发展

Coleman^[23]于1958年在细观力学分析中假定纤维由 N 个无相互作用的单位长度的短纤维串联而成(单位长度的纤维相当于链条中的一个链节),并假定同一纤维的所有链节具有同样的累积强度分布函数,且具有 Weibull 分布形式,进而初步建立了强度统计模型。

Gucer 等^[24]提出了链式模型以研究分散的、无关的内部断裂所导致材料破坏问题。该模型把材料分成一系列厚度为一个单位的、完全相同的层,每一层含有 N 个无关的、具有相同强度分布的、平行排列的元素。如果把每一层内的每一个元素称为一个环,这些环就连成了不同的链,每一链条上的环服从某一强度分布。一条链中只要有一个环断了,整个链条就断了(即最弱环统计模型)。对于处理复合材料的累积型断裂问题,Gucer 的链式模型比 Coleman 的模型更加合理。但是,该模型的缺点是没有考虑元素间上下和左右的相互联系,很含糊地把每层的厚度取为一个单位。

Rosen^[25]把链式模型应用于单向纤维增强复合材料的纵向拉伸破坏问题分析,提出了无效长度(也称为

有效载荷长度)的概念,并用它作为每一层的长度。Rosen 把纤维应力从零(断口)恢复到断裂前承载力的某一给定比率(也称为纤维效率)所需的距离定义为无效长度,进而通过弹性分析得到无效长度的计算式:

$$\delta = \frac{1}{2} d_f \left[\left(\frac{1}{\sqrt{v_f}} - 1 \right) \frac{E_f}{2G_m} J^{\frac{1}{2}} \cosh^{-1} \left[\frac{1 + (1 - \phi)^2}{2(1 - \phi)} \right] \right] \quad (1)$$

式中: δ 为无效长度, d_f 为纤维直径, v_f 为纤维的体积分数, E_f 为纤维的弹性模量, G_m 为基体的剪切模量, ϕ 为纤维效率。

$$\text{当 } \phi \rightarrow 1 \text{ 时, } \delta = \frac{1}{2} d_f \left[\left(\frac{1}{\sqrt{v_f}} - 1 \right) \frac{E_f}{2G_m} J^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2)$$

上述的链式模型采用了平均载荷分担法则(Global Load Sharing Rule)。显然,这不符合单向纤维增强复合材料的实际承载情况。

Zweben^[26]根据单向纤维增强复合材料的拉伸破坏特点,提出了基于链式模型的裂纹扩展统计理论。在该理论中采用了两个重要假设:(1)无效长度为常数,约为5到10倍的纤维直径;(2)若考虑应力集中,也仅限于与断裂纤维紧邻的一小簇纤维上,即局部载荷分担法则(Local Load Sharing Rule)。

Phoenix 等^[27,28]研究了单向纤维增强复合材料的拉伸破坏过程,导出了复合材料破坏概率的近似计算式。针对上述的链式模型的不足,曾庆敦等^[29]提出了随机扩大临界核统计模型和理论,该模型可以较好地克服链式模型所固有的缺点。

Phoenix 等^[30]进一步发展了强度统计模型,估计了单根纤维增强复合材料承载过程的界面剪切强度和 Weibull 参数。Phoenix 等^[31]还研究了在基体屈服和界面脱粘情况下单根纤维增强复合材料承载过程的统计断裂问题,并把该模型推广到多纤维增强复合材料。

复合材料具有非连续性、非均匀性和破坏模式的复杂性等特点,导致其强度统计断裂理论的建立困难。受计算机资源的限制,基于 Monte Carlo 方法的复合材料断裂过程模拟通常局限于 $nN \leq 50000$ (N 为纤维根数, n 为链式模型中的链节数),从而限制了该模型的发展与应用。

2 引入统计概念的有限元模拟

2.1 本构关系

目前,纤维增强复合材料力学行为的数值模拟方法主要是有限元方法^[32]。传统模型把复合材料作为各向异性材料处理。在平面应力状态下,正交异性纤维复合材料的应变-应力关系如下^[33]:

$$\begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, 刚度矩阵 $[Q]$ 的分量如下:

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, Q_{66} = G_{12} \quad (4)$$

式中: α_x 为 x 方向的正应力; α_y 为 y 方向的正应力; τ_{xy} 为剪应力; ε_x 为 x 方向的正应变; ε_y 为 y 方向的正应变; γ_{xy} 为剪应变; E_1 为复合材料 x 方向的弹性模量; E_2 为复合材料 y 方向的弹性模量; ν_{12} 为复合材料 x 方向的泊松比; ν_{21} 为复合材料 y 方向的泊松比; G_{12} 为复合材料的剪切模量。

把纤维和基体作为两种独立的材料进行建模, 将更加真实地反映复合材料的实际情况。通常把纤维当作纯弹性材料, 其本构关系为广义 Hooke 定律, 把基体当作纯弹性或弹塑性材料。对弹塑性应变硬化基体, 其应变率-应力率关系普遍采用 J_2 流动理论^[34]。

2.2 基于能量的断裂准则

Sih^[35] 提出了基于能量的 S -断裂准则, 用来预测含裂纹复合材料构件的裂纹的起裂条件和扩展方向。经典的最大周向应力准则、COD (Crack Opening Displacement) 准则和应力强度因子准则都是将断裂破坏视为材料强度的失效性破坏, 而 S -断裂准则将裂纹扩展视为仅由弹性体系失稳性破坏方式控制的过程, 实验和数值计算表明 S -断裂准则是有缺陷的。为此, 张少琴^[36-39] 等对 S -断裂准则进行了修正, 提出了 Z -断裂准则。在该准则中, 同时考虑了材料强度的失效性破坏方式和弹性体系的失稳性破坏方式。实验表明, 该断裂准则能够较好地应用于各种类型裂纹的扩展分析^[33]。

2.3 引入统计概念的有限元模拟方法

对同一纤维不同部位的强度的随机分布问题, 目前普遍假定纤维强度服从 Weibull 概率分布, 并通常采用下述的二参数 Weibull 分布模型^[18, 22, 40]:

$$F(\sigma; L) = P_f(\sigma \geq \alpha) = 1 - \exp\left[-\frac{L}{L_0}\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^{m_f}\right] \quad (5)$$

式中: P_f 为每一纤维单元的断裂累积概率, 其取值范围为 0~1, 由均匀随机数生成程序产生; α 为 Weibull 尺度参数, 描述拉伸过程中长度为 L_0 的纤维的强度; m_f 为形状参数, 即 Weibull 模量, 描述纤维强度的变化; L_0 为用于估计 Weibull 参数的标准度量长度; L 为

纤维单元的长度。

有限元模拟复合材料的变形和断裂过程如下: 首先按一定概率分布(如: Weibull 分布、正态分布、对数正态分布)用 Monte Carlo 方法随机确定纤维的强度; 然后用有限元法确定纤维的断裂位置, 用断裂准则判断裂纹是否扩展以及裂纹扩展的方向; 最后用剪切滞后模型分析因纤维断裂而引起的应力重新分布, 此过程就可以模拟复合材料的整个破坏过程。

3 研究展望

(1) 虽然剪切滞后分析方法简化了复合材料的细观力学分析, 但是该方法无法求解复合材料的应力场与应变场。虽然有限元分析方法能求解复合材料的应力场与应变场, 但是计算量与纤维数之间是指数函数关系, 导致现有的计算机硬件资源难以处理纤维数量较多的问题^[22]。引入新的计算方法处理纤维数量较多的复合材料体系是解决计算资源不足的有效途径。

(2) 在有限元模型中引入纤维强度的概率分布、基体缺陷的概率分布以及界面强度的概率分布, 建立基于 Monte Carlo 方法和有限元方法的细观力学行为的数值模拟理论, 分析复合材料变形和断裂过程, 将使数值模拟更加趋于真实情况。

(3) 有限元技术虽已发展得很成熟, 纤维增强复合材料断裂分析的软件也相继推出^[33], 但是分析软件难以实现复合材料应力分析、微裂纹产生、裂纹稳态扩展和失稳扩展的全过程模拟。因此, 有必要开展纤维增强复合材料力学行为的多层次、跨尺度模拟。

(4) 复合材料裂纹扩展的研究, 特别是动态裂纹扩展的研究, 是当前复合材料力学研究的热点之一。脆性不定型材料的动态断裂实验表明: 单裂纹低速扩展时, 实验和理论预测吻合; 单裂纹高速扩展时, 实验测得的最高平均速率远小于理论最高速率 Rayleigh 波速 v_R (波在自由表面传播时的速率)。有限元模拟表明: 当裂纹扩展速率大于临界速率 $v_c \approx 0.4v_R$ 时, 裂纹将分叉形成多裂纹^[41]。分子动力学模拟表明: 通过增加和减小局部能量流, 裂纹尖端局部超弹性能显著影响裂纹扩展的速度, 从而能解释裂纹分叉和裂纹尖端的不稳定扩展^[42]。最近的实验观察到一种以裂纹不连续扩展为特征的新的动态断裂现象^[43]。建立和完善动态裂纹扩展的数值模拟理论和技术, 开发相应的计算机模拟软件, 具有重要的科学意义和工程价值。

参考文献

- [1] COX H L. The elasticity and strength of paper and other fibrous

- materials[J]. Brit J Appl Phys, 1952, 3: 72– 79.
- [2] HEDGEPEETH J M, VAN DYKE P. Local stress concentration in imperfect filamentary composite materials[J]. J Comp Mater, 1967, 1: 294– 304.
 - [3] VAN DYKE P, HEDGEPEETH J M. Stress concentration from single-filament failures in composite materials[J]. Textile Res J, 1969, 39: 618– 626.
 - [4] ZWEBEN C. An approximate method of analysis for notched unidirectional composites[J]. Engng Fract Mech, 1974, 6: 1– 10.
 - [5] OCHIAIS, SCHULTE K, PETERS P W M. Strain concentration factor of fibers and matrix in unidirectional composites[J]. Compos Sci Technol, 1991, 41: 237– 256.
 - [6] ZENG Q D, WANG Z L, LING L. A study of the influence of interfacial damage on stress concentration in unidirectional composites[J]. J Compos Mater, 1997, 57: 129– 135.
 - [7] 曾庆敦. 复合材料的细观破坏与强度[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
 - [8] FUKUDA H, KAWATA K. On the stress concentration factor in fibrous composites[J]. Fiber Sci Tech, 1976, 9: 189– 203.
 - [9] GOREE J G, GROSS R S. Stresses in a three-dimensional unidirectional composite containing broken fibers[J]. Engng Fract Mech, 1980, 13: 395– 405.
 - [10] ROSSETTOS J N, SHISHESAZ M. Stress concentration in fiber composite sheets including matrix extension[J]. J Appl Mech, 1987, 54: 723– 724.
 - [11] HUI C Y, PHOENIX S L, IBNABDELJALIL M, et al. An exact closed-form solution for fragmentation of Weibull fibers in a single filament composite with applications to fiber-reinforced ceramics[J]. J Mech Phys Solids, 1995, 43: 1551– 1585.
 - [12] PHOENIX S L, IBNABDELJALIL M, HUI C Y. Size effects in the distribution for strength of brittle matrix fibrous composites[J]. Int J Solids Structures, 1997, 34: 545– 568.
 - [13] DU Z Z, MCMEEKING R M. Creep models for metal matrix composites with long brittle fibers[J]. J Mech Phys Solids, 1995, 43: 701– 726.
 - [14] LANDIS C M, MCMEEKING R M. A shear-lag model for a broken fiber embedded in a composite with a ductile matrix[J]. Comp Sci Tech, 1999, 59: 447– 457.
 - [15] LANDIS C M, MCGLOCKTON M A, MCMEEKING R M. An improved shear lag model for broken fibers in composite materials[J]. J Comp Mater, 1999, 33: 667– 680.
 - [16] LANDIS C M, MCMEEKING R M. Stress concentrations in composites with interface sliding, matrix stiffness, and uneven fiber spacing using shear lag theory[J]. Int J Solids Structures, 1999, 36: 4333– 4361.
 - [17] CURTIN W A. Theory of mechanical properties of ceramic matrix composites[J]. J Am Ceram Soc, 1991, 74: 2837– 2845.
 - [18] 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]. Compos Sci Technol, 2001, 61: 1773– 1787.
 - [19] XIA Z, OKABE T, CURTIN W A. Shear-lag versus finite element models for stress transfer in fiber-reinforced composites[J]. Compos Sci Technol, 2002, 62: 1141– 1149.
 - [20] OKABE T, TAKEDA N. Estimation of strength distribution for a fiber embedded in single-fiber composite: experiments and statistical simulation based on the elastoplastic shear-lag approach[J]. Compos Sci Technol, 2001, 61: 1789– 1800.
 - [21] OKABE T, TAKEDA N. Elastoplastic shear-lag analysis of single-fiber composites and strength prediction of unidirectional multi-fiber composites[J]. Composites, Part A, 2002, 33: 1327– 1335.
 - [22] XIA Z, CURTIN W A, OKABE T. Green's function *vs* shear-lag models of damage and failure in fiber composites[J]. Compos Sci Technol, 2002, 62: 1279– 1288.
 - [23] COLEMAN B D. On the strength of classical fibers and fiber bundle[J]. J Mech Phys Solids, 1958, 7: 60– 70.
 - [24] GUCER DE, GURLAND J. Comparison of the statistics of two fracture models[J]. J Mech Phys Solids, 1962, 10: 365– 373.
 - [25] ROSEN B W. Tensile failure of fibrous composites[J]. AIAA J, 1964, 2: 1985– 1991.
 - [26] ZWEBEN C. Tensile failure of fibrous composites[J]. AIAA J, 1968, 6: 2325– 2331.
 - [27] HARLOW D G, PHOENIX S L. Chain of bundles probability model for strength of fibrous materials: analysis and conjectures[J]. J Compos Mater, 1978, 12: 195– 214.
 - [28] SMITH R L, PHOENIX S L. A comparison of probabilistic techniques for the strength of fibrous materials under local load-sharing among fibres[J]. Int J Solids Structures, 1983, 19: 479– 496.
 - [29] 曾庆敦, 马锐, 范赋群. 复合材料正交叠层板最终拉伸强度的细观统计分析[J]. 力学学报, 1994, 26: 451– 461.
 - [30] HUI C Y, PHOENIX S L, SHIA D. The single filament composite test: application of new statistical theory for estimating and Weibull parameters for composite design[J]. Compos Sci Technol, 1997, 57: 1707– 1725.
 - [31] SHIA D, HUI C Y, PHOENIX S L. Statistics of fragmentation in a single fiber composite under matrix yielding and debonding with application to the strength of multi-fiber composites[J]. Compos Sci Technol, 2000, 60: 2107– 2128.
 - [32] 张美忠, 李贺军, 李克智. 三维编织复合材料的力学性能研究现状[J]. 材料工程, 2004, (2): 44– 48.
 - [33] 张少琴, 杨维阳, 张克颢. 复合材料的 Z-断裂准则及专家系统[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
 - [34] 黄克智. 固体本构关系[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
 - [35] SIH G C. Energy-density concept in fracture mechanics[J]. Engng Fract Mech, 1973, 6: 1037– 1040.
 - [36] ZHANG S Q, JANG B Z, VALAIRE B T, et al. A new criterion for composite materials mixed mode fracture analysis[J]. Engng Fract Mech, 1989, 34: 749– 769.
 - [37] ZHANG S Q, VALAIRE B T, JANG B Z, et al. An energy based fracture criterion for mode II crack in fiber composite[J]. Engng Fract Mech, 1990, 36: 49– 59.
 - [38] ZHANG S Q, VALAIRE B T, SUHLING J C, et al. An energy based mode III fracture criterion for composites[J]. Engng Fract Mech, 1991, 38: 353– 360.

- [8] 程祥珍, 肖加余, 谢征芳, 等. 活性碳纤维研究与应用进展[J]. 材料科学与工程学报, 2003, 21(2): 284–287.
- [9] BRASQUET C, CLOIREC P L. Adsorption onto activated carbon fibers: application to water and air treatments[J]. Carbon, 1997, 35(9): 1307–1313.
- [10] 郑经堂. 活性碳纤维[J]. 新型炭材料, 2000, 15(2): 80–81.
- [11] MATATOV Y M, SHEINTUCH M. Catalytic fibers and cloths[J]. Applied Catalysis A: General, 2002, 231(1–2): 1–16.
- [12] 候一宁, 王安, 王燕. 二氧化钛/活性碳纤维混合材料净化室内甲醛污染[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2004, 336(4): 41–44.
- [13] AO C H, LEE S C. Indoor air purification by photocatalyst TiO₂ immobilized on an activated carbon filter installed in an air cleaner[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(1): 103–109.
- [14] YUAN R S, GUAN R B, ZHENG J T. Effect of the pore size of TiO₂-loaded activated carbon fiber on its photocatalytic activity[J]. Scripta Materialia, 2005, 52(12): 1329–1334.
- [15] YAMASHITA H, HARADA M, TANII A, et al. Preparation of efficient titanium oxide photocatalysts by an ionized cluster beam(ICB) method and their photocatalytic reactivities for the purification of water[J]. Catalysis Today, 2000, 63(1): 63–69.
- [16] FU P F, LUAN Y, DAI X G. Preparation of activated carbon fibers supported TiO₂ photocatalyst and evaluation of its photocatalytic reactivity[J]. Journal of Molecular Catalysis, 2004, 221(1–2): 81–88.
- [17] YUAN R S, ZHENG J T, GUAN R B, et al. Surface characteristics and photocatalytic activity of TiO₂ loaded on activated carbon fibers[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem, 2005, 254(1–3): 131–136.
- [18] TAKEDA N, IWATA N, TORIMOTO T, et al. Influence of carbon black as an adsorbent used in TiO₂ photocatalyst films on photodegradation behaviors of propylamide[J]. Journal of Catalysis, 1998, 177(2): 240–246.
- [19] AMJAD H E, NEWMAN A P, DAFFACE H A I, et al. Deposition of anatase on the surface of activated carbon[J]. Surface & Coatings Technology, 2004, 187(2–3): 284–292.
- [20] 陆诚. 二氧化钛催化剂的表面改性、负载和光催化性能研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2002.
- [21] CHATTERJEE M, HAYASHI H, SAITO N. Role and effect of supercritical fluid extraction of template on the Ti(IV) active sites of T+MCM-41[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2003, 57(2): 143–155.
- [22] NAGAOKA S, HAMASAKI Y, ISHIHARA S I, et al. Preparation of carbon/TiO₂ microsphere composites from cellulose/TiO₂ microsphere composites and their evaluation[J]. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 2002, 177(2): 255–263.
- [23] TYRBA B, MORAWSKI A W, INAGAKI M. Application of TiO₂-mounted activated carbon to the removal of phenol from water[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2003, 41(4): 427–433.
- [24] TAMAI H, KATSU N, ONO K, et al. Simple preparation of TiO₂ particles dispersed activated carbons and their photostereolization activity[J]. Journal of Materials Science, 2002, 37(15): 3175–3180.
- [25] WANG J, UMA S, KLABUNDE K J. Visible light photocatalysis in transition metal incorporated titania-silica aerogels[J]. Applied Catalysis, 2004, 48(2): 151–154.
- [26] ANPO M, TAKEUCHI M. The design and development of highly reactive titanium oxide photocatalysts operating under visible light irradiation[J]. Journal of Catalysis, 2003, 216(1–2): 505–516.

收稿日期: 2005-12-12; 修订日期: 2006-04-27

作者简介: 刘建华(1957–), 男, 教授, 博士生导师, 从事环境材料、电化学、材料腐蚀与防护等方面的研究, 联系地址: 北京航空航天大学 103 室(100083)。

(上接第 60 页)

- [39] ZHANG S Q, ZHU Y Z, YANG W Y. Energy based Z_c criterion in fracture analysis of composite plate under bending[J]. Engng Fract Mech, 1992, 43: 797–805.
- [40] XIA Z, OKABE T, PARK J M, et al. Quantitative damage detection in CFRP composites: coupled mechanical and electrical models[J]. Compos Sci Technol, 2003, 62: 1411–1422.
- [41] SHARON E, FINEBERG J. Confirming the continuum theory of dynamic brittle fracture for fast cracks[J]. Nature, 1999, 397: 333–335.
- [42] BUEHLER M J, ABRAHAM F F, GAO H J. Hyperelasticity governs dynamic fracture at a critical length scale[J]. Nature, 2003, 426: 141–146.

- [43] 刘凯欣, 刘维甫, 张晋香, 等. 纤维增强复合板中裂纹的动态扩展[J]. 科学通报, 2005, 50: 317–320.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2003CB615601); 国家自然科学基金重大资助项目(20490220); 国家自然科学基金面上项目(50403009, 50573079)

收稿日期: 2005-12-25; 修订日期: 2006-05-15

作者简介: 李红周(1978–), 男, 博士研究生, 研究方向为先进聚合物复合材料的制备与性能模拟, 联系地址: 中国科学院长春应用化学研究所高分子物理与化学国家重点实验室(130022)。