

文章编号: 1000-4750(2014)07-0199-04

基于细观损伤力学的耐火材料单轴压缩 非线性力学行为研究

杨 康, 王志刚, 刘昌明

(武汉科技大学冶金装备及其控制教育部重点实验室, 武汉 430081)

摘 要: 在单轴压缩实验的基础上, 分析材料细观损伤机理, 结合广义自洽模型, 通过构建基质相弹性模量关于外载荷的损伤函数来表征细观损伤演化过程, 建立材料受载状态下的微损伤模型, 实现材料非线性力学行为的定量描述。以镁碳质耐火材料为例, 对材料在受压载荷下的损伤演化过程进行了模拟, 结果表明, 运用此方法对耐火材料的受压损伤过程进行表征, 其结果与材料试验结果可以较好地吻合。

关键词: 细观损伤力学; 损伤机理; 损伤函数; 广义自洽模型; 镁碳质耐火材料

中图分类号: TB35 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.01.0052

RESEARCH ON NONLINEAR MECHANICAL BEHAVIOR OF REFRACTORY UNDER UNIAXIAL COMPRESSION BASED ON MICROSCOPIC DAMAGE MECHANICS

YANG Kang, WANG Zhi-gang, LIU Chang-ming

(Key Laboratory of Metallurgical Equipment & Control Technology,

Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: The main aim of this paper is to get a quantitative relationship between the microstructure and macro effective elastic modulus by using a generalized self-consistent model, and to establish a micro-damage model for the refractory under uniaxial compression load. Hence, a uniaxial compression experiment is firstly set up to analyze the Micro-damage mechanism of the refractory. Then, a damage function about external load based on the elastic modulus of the matrix is constructed to characterize the micro-damage evolution. After that, a stress-strain curve is simulated to describe the nonlinear mechanical behavior of the refractory. A numerical simulation of MgO-C refractory under compression is finally performed with a micro-damage model. The result demonstrates that the simulated stress-strain curve is in a good agreement with the experimental result.

Key words: microscopic damage mechanics; damage mechanism; damage function; generalized self-consistent model; MgO-C refractory

近年来, 随着钢铁行业可持续发展战略的深入实施, 对耐火材料的消耗提出了新的更高要求。在这样的背景下, 对耐火材料进行全面、深入的损伤

分析, 准确、合理地对耐火材料在工作环境下的力学性能进行研究, 真实、全面地反映材料的力学特性就显得尤为重要。这不仅能为耐火材料的数值模

收稿日期: 2013-01-17; 修改日期: 2013-03-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51075310); 教育部博士点专项基金项目(20114219110003); 湖北省自然科学基金重点项目(2012FFA022); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0715); 中国博士后基金项目(2013M542072)

通讯作者: 王志刚(1973—), 男, 武汉人, 教授, 博士, 博导, 主要从事细观力学在耐火材料设计中的应用、金属与非金属复合结构热机械行为、机械设备故障诊断、结构强度分析与计算机仿真等方面的研究(E-mail: wzgwy@126.com).

作者简介: 杨 康(1986—), 男, 天门人, 工程师, 硕士, 主要从事耐火材料细观损伤模型方面的研究(E-mail: yangkang0625@163.com); 刘昌明(1984—), 男, 武汉人, 讲师, 博士, 主要从事细观力学在耐火材料设计中的应用、机械设备故障诊断等方面的研究(E-mail: liuchangmingwh@gmail.com).

拟和强度评价提供可靠基础,而且对于指导设计在特定工作环境下使用的耐火材料具有重要意义。

目前,国内外学者对耐火材料的损伤研究主要采用宏观与微观相结合的方法。利用细观力学理论,通过引入代表性体积单元(Representative Volume Element RVE)的概念,结合材料局部微观结构特性,建立不同的微观模型从而推导出材料微观损伤对宏观有效性能的影响,同时在宏观上引入一宏观变量来描述损伤,将微观和宏观二者结合起来表征材料从微损伤演化到宏观性能降低直至最后破坏的全过程^[1]。在假定颗粒相与基质相完全粘结的前提下,Eshelby^[2]提出了等效夹杂理论,首次建立了材料微观结构特性与宏观力学性能之间的内在关系。但是 Eshelby 理论只解决了基质相中含有单一颗粒的问题。Mori T、Tanaka K^[3]根据细观力学均匀化理论推导出了基质相中含有随机分布非均质弹性多相复合材料的宏观有效弹性模量。Ju 和 Chen^[4]在 Eshelby 一般理论的基础上,提出了一种由颗粒相与基质相组成且二者处于完全粘结状态的细观力学理想模型,在当时被公认为最有效的理论模型。Kerner^[5-6]在材料受外载状态时考虑颗粒相之间的相互作用对基质相应力分布的影响,将颗粒相和基体组成的复合球嵌入到无限大的等效介质中,提出了一种比较完善的细观力学模型——广义自洽模型(generalized self-consistent scheme GSCS),之后王志刚、刘昌明等^[7-8]利用多尺度广义自洽模型,对材料微观损伤过程和损伤机理进行分析,提出了一种模拟材料非线性力学行为的有效方法。但是,到目前为止,从材料微损伤与外载荷之间相互作用的定量关系入手来描述材料损伤机制的研究还鲜见报道。

为此,本文在单轴压缩实验的基础上,分析材料微观损伤机理,通过构建基质相弹性模量关于外载荷的损伤函数来表征细观损伤演化过程。利用广义自洽模型建立微观结构与宏观有效弹性模量之间的定量关系,搭建材料受载状态下的微损伤模型,并模拟出材料应力-应变全过程曲线,描述材料的非线性力学行为。

1 耐火材料受压状态下的微损伤形式

耐火材料是多孔、多相的增强型复合材料,主要由耐高温的颗粒相、起粘合作用的基质相以及添加物组成,在细观上是一种非均质多相材料,表现

出比单一材料更复杂的力学行为。在外载荷作用下,材料内部各相应力场逐渐增加且存在明显的非均匀性。如果材料中某相的局部应力超过了该相的损伤阈值,该相首先发生细观损伤,导致材料宏观承载能力开始降低。

材料的细观损伤形式主要通过两种形式表现出来:基质相微裂纹的萌发、扩展和颗粒相与基质相之间界面相的脱粘。主导细观损伤形式取决于基质相的强度、颗粒相与基质相之间界面相的粘结强度以及材料承受的外载荷形式^[9]。

在单轴压缩载荷实验^[10]下,通过对试样进行电镜扫描发现:即使颗粒相与基质相完全发生脱粘,颗粒相依然有形变产生。这主要是在压缩应力作用下,材料内部微裂纹(微孔洞)会发生闭合,这使得即使外载荷超过界面相的强度,应力场依然可以通过界面相从基质相传递到颗粒相中。由于颗粒相刚度远远高于基质相,且在压应力作用下基质相主要承受拉应力,细观单元主要表现为拉损伤破坏(如图1所示),微损伤主要为在基质相中沿加载方向排列的微裂纹的萌发、扩展,最终导致材料宏观轴向劈裂。

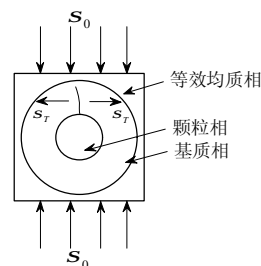


图1 压缩载荷下的细观损伤形式

Fig.1 The microscopic damage form under compression

2 单轴压缩载荷下耐火材料的细观损伤表征

2.1 基质相细观损伤表征

在加载过程中,当外载在基质相中产生的最大切向应力 s_T 达到基质相的损伤阈值 s_{mc} 时,基质相随即产生微裂纹。由此,基质相微裂纹的萌发临界条件可以表示为:

$$s_T > s_{mc} \quad (1)$$

随着外载荷的增加,微裂纹开始在基质相中扩展,降低了基质相的弹性特性,消弱了基质相对材料宏观整体性能的贡献。同时由于基质相中微裂纹的扩展,材料承载能力逐渐降低。通过基质相弹性

模量的损失来表征微裂纹对基质相的损伤效应, 基质相损伤时的弹性模量 E_{eff}^m 可以表述为^[11]:

$$E_{\text{eff}}^m = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left(\pi \frac{s_T - s_{mc}}{2(s_{mf} + s_{mc})} \right) \right) E_0^m, \quad (2)$$

$s_{mc} < s_T < s_{mf}$

其中: E_0^m 为基质相初始(即未损伤时的)弹性模量; s_{mf} 为基质相的极限抗拉强度。

2.2 参数 s_{mf} 、 s_{mc} 的确定

根据图 1, 当外加应力达到材料极限应力时基质相中最大切向拉应力 s_T 即为 s_{mf} 。而基质相损伤阈值 s_{mc} 可以通过如图 2 所示的单轴压缩-卸载状态下的应力-应变全过程曲线来确定。

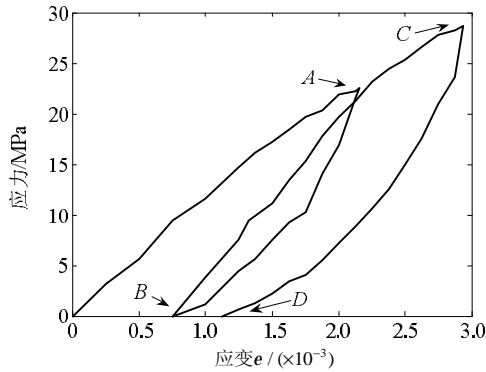


图 2 单轴压缩卸载状态下的耐火材料应力-应变曲线^[12]
Fig.2 Stress-strain curve under monotonic compression-unloading

在单轴压缩加载过程中, 材料的宏观应变由线性和非线性两部分组成, 即 A 点应变可以表示为:

$$e_A = e_{e_{\text{max}}} + e_i \quad (3)$$

其中, $e_{e_{\text{max}}}$ 、 e_i 分别表示 A 点的弹性极限应变和非线性应变。

在初始加载作用下材料处于线性阶段, 此阶段材料不产生塑性变形, 也无细观损伤产生。此时材料应力-应变曲线呈线性关系, 记材料宏观有效弹性模量为 E_0 , 由弹性力学可知:

$$e_e = s / E_0, \quad s_T < s_{mc} \quad (4)$$

其中, s 为外载荷。

当外载增加到 A 点时, 基质相中最大切向应力已高于 s_{mc} , 材料已进入非线性阶段。应力-应变曲线非线性的产生主要是基质相微裂纹的萌发、演化造成的。因此基质相切向应力为 s_{mc} 的物理意义为基质相微裂纹萌发的临界值, 此时应变为材料最大弹性应变 $e_{e_{\text{max}}}$ 。

AB 阶段为卸载阶段, 在 B 点材料产生永久性

残余变形 e_p 。Hild、McMeeking 等^[13-14]通过对颗粒增强复合材料研究发现, 永久性残余变形和非弹性变形之间存在以下关系:

$$e_i = 2e_p \quad (5)$$

由式(3)、式(5)求得 $e_{e_{\text{max}}}$ 。将 $e_{e_{\text{max}}}$ 代入式(4)中可求得材料的弹性极限应力。由弹性理论解析法^[15]可以求得模型在弹性极限应力处基质相的最大切向应力, 即为 s_{mc} 。

3 镁碳质耐火材料单轴压缩的非线性力学行为模拟

压缩实验^[12]选取的试样为由氧化镁、石墨、酚醛树脂组成的原料经混炼, 烧结而成的镁碳质耐火材料。试样被制成长方体(100mm×100mm×250mm)并抛光。该试样颗粒相可看作为 MgO。氧化镁弹性模量为 248GPa, 泊松比为 0.23^[16]。由压缩实验^[12]可得初始载荷作用下试样宏观有效弹性模量值 $E_0 = 12.063\text{GPa}$, 利用广义自洽模型解析法^[17]计算基质相弹性模量 $E_0^m = 2.8\text{GPa}$, 泊松比为 0.12。

通过单轴压缩卸载实验^[12]获得材料永久性残余变形约为 $e_p = 0.75 \times 10^{-3}$ (如图 2 所示), 由式(3)、式(5)得最大弹性应变为 $e_{e_{\text{max}}} = 0.656 \times 10^{-3}$, 由式(4)以及弹性力学解析法^[15]可得 $s_{mc} = 9.89\text{MPa}$ 。由压缩实验可得镁碳质耐火材料宏观发生破坏时的外载荷为 33.455MPa, 计算出材料基质相最大切向应力为 $s_{mf} = 41.8\text{MPa}$ 。

利用广义自洽模型解析法^[17]得出镁碳质耐火材料受损伤的宏观有效弹性模量 E_{eff} , 并由镁碳质耐火材料宏观有效弹性模量和外载压应力拟合出材料的 $s-E_{\text{eff}}$ 变化曲线, 利用材料力学 $de = ds/E$, 推导出材料的应力-应变曲线, 如图 3 所示。与实验

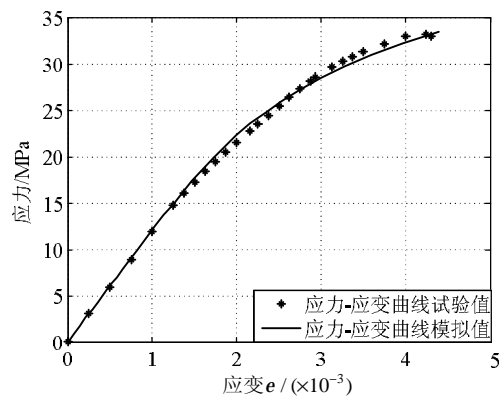


图 3 模拟值与试验值的比较
Fig.3 Comparisons between model prediction and experimental data

值进行对比, 两者变化趋势相吻合。但是在 $8.71\text{MPa} < \sigma < 26.02\text{MPa}$ 之间弹性模量模拟值始终高于实验值, 这主要是由于在加载过程中除了微裂纹的损伤外还伴随着其他损伤, 如相邻面之间的滑移^[18]; 在 $29.6\text{MPa} < \sigma < 33.44\text{MPa}$, 试验值和模拟值最大误差达到 6.5%。

4 结论

(1) 利用构造的基质相弹性模量关于外载荷的损伤函数, 可以表征在单轴压缩应力载荷状态下材料的细观损伤效应。

(2) 通过对镁碳质耐火材料宏观性能进行预测, 其模拟值与试验结果能较好的吻合, 验证了本文提出的细观损伤表征方法能较好的预测材料的细观损伤演化过程。

(3) 本文提出材料非线性力学研究思路不仅适用于单轴压缩状态下的细观损伤表征, 对于其他载荷状态, 比如单轴拉伸载荷, 热-机械载荷等均有较好的参考意义。

参考文献:

- [1] Jin Shengli, Luo Ming, Li Yawei, et al. Research progress of micromechanics in the refractories based on finite element method [J]. *Materials Review A*, 2012, 26(7): 125—128.
- [2] Eshelby J D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems [J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1957, 241(1226): 376—396.
- [3] Mori T, Tanaka K. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions [J]. *Acta Metall*, 1973(21): 571—574.
- [4] Ju J W, Chen T M. Micromechanics and effective moduli of elastic composites containing randomly dispersed ellipsoidal inhomogeneities [J]. *Acta Mechanica*, 1994, 103(1/2/3/4): 103—121.
- [5] Kerner E H. The elastic and thermoelastic properties of composite media [J]. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 1956, 69(8): 808.
- [6] Kerner E H. The electrical conductivity of composite media [J]. *Proceedings of the Physical Society, Section B*, 1956, 69(8): 802.
- [7] Wang Zhigang. Research on thermomechanical behaviour of refractories [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2005: 22—36.
- [8] Liu Changming. Development and implementation of the damage constitutive model of refractory based on micro mechanical [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2012: 32—57.
- [9] Zhang Fan, Niu LiSha, Shi Ping'an, Mo Jun. Numerical simulation of evolutionary inclusion-matrix debonding in the vicinity of a crack-tip in a brittle matrix composite [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2007, 29(4): 607—613.
- [10] Basaran C, Nie S, Hutchins C S, Ergun H. Influence of interfacial bond strength on fatigue life and thermo-mechanical behavior of a particulate composite: An experimental study [J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2008, 17(2): 123—147.
- [11] Wang Fengsen. Nonlinear mechanical properties model of refractory [J]. *Foreign Refractories*, 1998(7): 51—57.
- [12] Wu Qiuling. Thermo mechanical behaviour of MgO-C refractories [J]. *Foreign Refractories*, 1999(11): 32—40.
- [13] Hild F, Burr A, Leckie F A. Matrix cracking and debonding in ceramic-matrix composites [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1996, 33(8): 1209—1220.
- [14] McMeeking R M, Evans A G. Matrix fatigue cracking in fiber composites [J]. *Mechanics of Materials*, 1990, 9: 217—227.
- [15] Xu Zhilun. Elasticity [M]. Beijing: Academic Publishing, 2006, 12: 54—87.
- [16] Schmitt N, Burr A, Berthaud Y, Poirier J. Micro mechanics applied to the thermal shock behavior of refractory ceramics [J]. *Mechanics of Materials*, 2002(34): 725—747.
- [17] Schmitt N, Burr A, Berthaud Y, Poirier J. Micromechanics applied to the thermal shock behavior refractory ceramics [J]. *Mechanics of Materials*, 2002(34): 725—747.
- [18] 朱宏平, 徐文胜, 陈晓强, 等. 利用声发射信号与速率过程理论对混凝土损伤进行定量评估[J]. *工程力学*, 2008, 25(1): 186—191.
Zhu Hongping, Xu Wensheng, Chen Xiaoqiang, et al. Quantitative concrete-damage evaluation by acoustic emission information and rate-process theory [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(1): 186—191. (in Chinese)