

# 基于 ABAQUS 的耐火材料细观损伤本构模型的开发与实现

陈 瑶<sup>1)</sup> 王志刚<sup>1,2)</sup> 刘昌明<sup>1)</sup> 孔建益<sup>1)</sup>

1) 武汉科技大学 冶金装备及其控制省部共建教育部重点实验室 湖北武汉 430081

2) 武汉科技大学 高温陶瓷与耐火材料省部共建国家重点实验室培育基地 湖北武汉 430081

**摘 要:** 针对耐火材料复杂的非线性力学行为及其损伤机制,在细观力学基础上提出了基于界面相模型的耐火材料细观损伤力学模型,利用 ABAQUS 软件的二次开发平台,开发了该本构关系的子程序。利用该本构模型,对镁碳质耐火材料的受压试验进行了数值模拟。结果表明,运用该本构模型对耐火材料的非线性损伤力学行为进行模拟,与试验结果能够较好地吻合。

**关键词:** 耐火材料;本构模型;细观力学;二次开发;ABAQUS 软件

中图分类号:TB35

文献标识码:A

文章编号:1001-1935(2012)02-0114-04

耐火材料作为高温容器的隔热保温材料,是保障高温设备安全运行的关键。热应力破坏是耐火材料的主要损毁方式之一,数值模拟是研究耐火材料热应力的主要技术手段。本构模型能否真实反映其力学行为,将直接决定有限元法等数值模拟技术计算的准确性。然而,耐火材料的微观非均质性使其物理性能特别是热态力学性能受温度和载荷状况的影响较大,在宏观上表现为依赖于温度的非线性力学行为。由于耐火材料力学行为的非线性源可能来自任何可能的微观变形和损伤机制,因此,建立在连续介质假设基础上的材料本构行为的统一描述就变得非常困难。到目前为止,仍未找到一种适合于数值模拟的耐火材料力学行为的表征方法。

耐火材料复杂的非线性力学行为,实际上是其微观结构与外载荷相互作用的结果。任何材料在使用中都不可避免地会产生微损伤,而这些微损伤的存在必将对材料的力学性能产生重要的影响。因此,从材料的显微结构出发,利用细观力学方法,研究其微观结构与外载荷的相互作用及其对宏观性能的影响,对阐明耐火材料非线性力学行为的产生机制具有重要的意义。目前,国内外利用细观力学理论进行复合材料的损伤研究已经取得了一些进展,提出了一系列基于细观力学方法的耐火材料本构关系,为进一步开发适用于耐火材料的本构关系模型奠定了基础。在本工作中,针对细观力学方法提出的基于界面相模型的耐火材料损伤本构关系模型,采用 ABAQUS 有限元软件提供的二次开发平台,实现了该损伤本构关系的

数值模拟,并利用数值算法对耐火材料的受压试验进行了数值模拟,对比分析解析结果和试验结果,验证了该本构关系的有效性。

## 1 耐火材料的本构模型

### 1.1 耐火材料本构模型概述

材料本构方程是用来描述其应力-应变关系的数学表达式。一般来说,本构方程应该尽可能简单,且需要的力学参数也要尽可能少,但必须包括造成非线性行为的原因,如损伤等。目前,在已有的耐火材料本构模型里,热弹性模型最为简单,它是一种近似模型,没有考虑任何非线性力学行为<sup>[1]</sup>。C Comi 等<sup>[2]</sup>提出的弹塑性模型,J M Robi 等<sup>[3]</sup>提出的损伤弹塑性模型,以及 Hernandez 等<sup>[4]</sup>提出的考虑脱水的弹塑性模型,是目前使用最广泛的一种模型。但此模型涉及到许多需要实验测定的材料参数,而且只考虑了受压时的材料特征。弥散裂纹模型将拉伸状态下的裂纹扩展行为与压缩的塑性行为统一起来,较为全面地描述了耐火材料的非线性行为<sup>[5]</sup>。Mitsuo Sugawara 等<sup>[6]</sup>提出的神经网络模型,只是本构方程的一种近似算法。

实际上,对耐火材料合适的非线性行为分析将取决于材料的细观结构及其与载荷之间的相互作

\* 国家自然科学基金面上项目(51075310)。

陈瑶:男,1988年生,硕士研究生。

E-mail: wzgwy@126.com

收稿日期:2011-11-30

编辑:柴剑玲

用。因此,从微观尺度出发,利用细观力学方法研究耐火材料宏观非线性行为的细观力学机制,不失为解决耐火材料复杂非线性行为的另一种有效途径<sup>[7]</sup>。目前,国内外学者利用细观力学理论研究复合材料的损伤已经取得了一些进展,例如:H K Lee 等<sup>[8]</sup>在 Eshelby 细观力学方法的基础上,利用 Weibull 概率函数来表征颗粒和基质之间的弱界面变化概率;Schjudt Thomsen 等<sup>[9]</sup>利用 Mori-Tanaka 平均场理论以及改进的 Eshelby 张量来研究具有弱界面的短纤维复合材料;Burr 等<sup>[10-13]</sup>从界面损伤的角度出发,用细观力学方法解释材料的宏观强度,但只给出了材料的几种破坏假设,没有实际模拟材料的非线性损伤过程;刘昌明等<sup>[14]</sup>在细观力学角度上,运用多尺度广义自洽模型模拟了镁碳质耐火材料的损伤过程。

### 1.2 基于界面相模型的耐火材料细观损伤本构模型

基于以上讨论,从细观力学的角度出发,提出了基于界面相模型的耐火材料细观损伤本构模型:在细观力学理论的基础上引入界面相模型的方法,根据界面相模型建立颗粒、基质、界面的弹性常数与耐火材料的弹性常数的关系,结合损伤力学理论,研究耐火材料的损伤演化规律,建立宏观损伤变量与界面弹性常数的关系。在实现该本构关系的问题上,将耐火材料的行为过程看作分段的非线性弹性模型,基于材料行为过程中弹性模量的变化,用弹性模量的变化来表征耐火材料的损伤,并结合界面相模型方法计算出的弹性模量和界面参数的变化曲线,从而建立起在宏观和微观两个尺度上的本构关系。

界面相模型即二次组装 CSA 模型,其等效力学性能由广义自洽模型<sup>[7]</sup>推广得到。基于界面相模型的耐火材料损伤演化表征可以分为 3 个阶段,即损伤起始阶段、基质损伤阶段和界面损伤阶段。第一个阶段是线弹性模型,弹性模量  $E$  不变;后两个阶段里弹性模量  $E$  变化,为分段的非线性弹性模型。为了表征损伤,以弹性模量  $E$  的变化来定义界面损伤阶段的损伤: $d = (1 - E)/E_0$  (其中  $E_0$  为初始时的弹性模量值),则材料的损伤应力-应变关系为: $\sigma = E_0(1 - d)\xi$ 。

对材料压缩试验测点测得的应力  $\sigma$  与应变  $\xi$  的变化关系进行拟合,再通过解析法得到损伤  $d$  与纵向应变  $\xi$ 、弹性模量  $E$  与纵向应变  $\xi$  的变化关系,然后运用界面相模型方法得到了弹性模量  $E$  与界面参数  $q$  的变化关系,最终得到损伤  $d$  与界面参数  $q$  的变化关系。该本构模型的技术路线如图 1 所示。

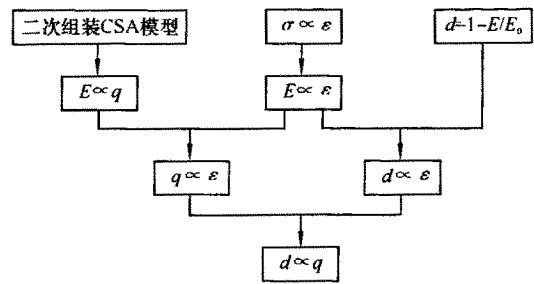


图 1 理论模型技术路线图

Fig. 1 Technology route of theoretical model

每个阶段的变量间变化关系如下:

损伤起始阶段,

$$d = 0, q = 1, \xi = -0.000\ 04 \sim 0; \quad (1)$$

基质损伤阶段,

$$\begin{aligned} d &= 7.02 \times 10^{-10} \times q^3 - 1.33 \times 10^{-6} \times q^2 + \\ &1.23 \times 10^{-3} \times q - 0.001, \\ q &= -1.645 \times 10^{15} \times \xi^4 - 1.04 \times 10^{12} \times \xi^3 + \\ &1.263 \times 10^8 \times \xi^2 - 1.026 \times 10^6 \times \xi - 40, \\ \xi &= -0.000\ 78 \sim -0.000\ 04; \end{aligned} \quad (2)$$

界面损伤阶段,

$$\begin{aligned} d &= 1.554 \times 10^{-10} \times q^3 - 5.411 \times 10^{-7} \times q^2 + \\ &8.288 \times 10^{-4} \times q + 0.086, \\ q &= -6.123 \times 10^{10} \times \xi^3 - 4.872 \times 10^8 \times \xi^2 - \\ &1.351 \times 10^6 \times \xi - 69.48, \\ \xi &= -0.003\ 1 \sim -0.000\ 78. \end{aligned} \quad (3)$$

式(1)、(2)、(3)中, $d$  表示损伤, $q$  表示界面参数, $\xi$  表示应变。

## 2 ABAQUS 用户子程序开发

### 2.1 ABAQUS 用户子程序功能

ABAQUS10.1 一共有 42 个用户子程序接口,15 个应用程序接口,用户可以定义包括边界条件、荷载条件、接触条件、材料特性以及利用用户子程序和其他应用软件进行数值交换等。这些用户子程序接口使得用户在解决一些问题时有很大的灵活性,同时这些接口也大大扩充了 ABAQUS 的功能。常用的接口程序有:用于定义材料力学行为的 UMAT,用于定义场变量的 USDFLD,用于定义不同单元模式的 UEL 和自定义硬化变量子程序 UHARD 等,涉及材料、单元、算法等多方面。在本文中,根据提出的细观力学损伤模型,介绍了利用用户子程序 UMAT 和 USDFLD 来实现该本构模型,在相应的 ABAQUS 输入 \*.inp 文件中,输入“\*USER MATERIAL”关键字表示采用用户自定义材料属性,计算时会自动调用用户材料子程序。

UMAT子程序可以定义ABAQUS材料库中没有包含的各类材料本构模型,以扩充材料库;还可以用于力学行为分析的任何分析过程,几乎可以把用户材料属性赋予ABAQUS中的任何单元;另外,还可以与USDFLD一起使用,通过“USDFLD”来重新定义单元每个积分点上传递到UMAT中的场变量的数值。

$$D = \begin{bmatrix} \frac{(1-\mu)E}{(1+\mu)(1-2\mu)} & \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} & \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} & & & \\ \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} & \frac{(1-\mu)E}{(1+\mu)(1-2\mu)} & \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} & & & \\ \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} & \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} & \frac{(1-\mu)E}{(1+\mu)(1-2\mu)} & & & \\ & & & 0 & & \\ & & & & 0 & \\ & & & & & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{E}{2(1+\mu)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{E}{2(1+\mu)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E}{2(1+\mu)} \end{bmatrix}$$

其中,  $E, \mu$  分别代表弹性模量和泊松比。在整个非线性力学行为过程中,弹性模量  $E$  是不断变化的 ( $E = E_0(1-d)$ ),而泊松比是不变的。每个阶段对应的损伤  $d$ 、界面参数  $q$  和纵向应变  $\xi$  间的变化关系见式(1)、(2)、(3)。对应于一个应变增量,可以求得相应的界面参数  $q$ ,进一步可以得到损伤  $d$ ,根据损伤  $d$  和弹性模量的关系又可得到弹性模量  $E$ ,从而可求得数值求解过程中的弹性刚度矩阵  $D$ ,最后再更新应力、状态变量和其他数据。

基于上面所述的材料本构模型、应力更新算法和场变量之间的传递关系,将纵向应变  $\xi$  和界面参数  $q$  定义为场变量1和场变量2,将纵向应变  $\xi$ 、界面参数  $q$ 、损伤变量  $d$  和弹性模量  $E$  定义为状态变量,在每一个增量步进行更新。

### 3 压缩试验的数值模拟与结果比较

本研究中选用镁碳质耐火材料进行了简单的压缩试验。镁碳砖被制成  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$  的长方体试样,用恒定的位移率进行单负荷试验。

为检验程序的有效性,数值模拟采用三维模型  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ ,见图2(a),单元类型为C3D8,单元数160个,对该模型施加底面固支,顶面施加位移  $U_2 = -0.775 \text{ mm}$  的边界条件,得到的应力云图见图2(b),取顶面的单元数61作为测点。调用所编写的子程序本构模型进行数值模拟。

实际上,数值模拟得到的应力  $\sigma$ -纵向应变  $\xi$  曲线和试验得到的结果能够较好地吻合,将ABAQUS数

### 2.2 本构模型的子程序实现

UMAT子程序的核心内容是定义材料本构模型的雅克比矩阵,即应力增量对应变增量的变化率  $\partial\sigma/\partial\xi$ 。为了验证本构模型思路有效性,将它看作是分段非线性各向同性弹性模型,所以UMAT定义  $\partial\sigma/\partial\xi = D$ 。弹性刚度矩阵  $D$  的定义如下:

值模拟得到的应力  $\sigma$ -纵向应变  $\xi$  曲线与试验得到的应力  $\sigma$ -纵向应变  $\xi$  曲线进行对比,见图3(基质损伤阶段)和图4(整个损伤过程)。从中可以看到,数值

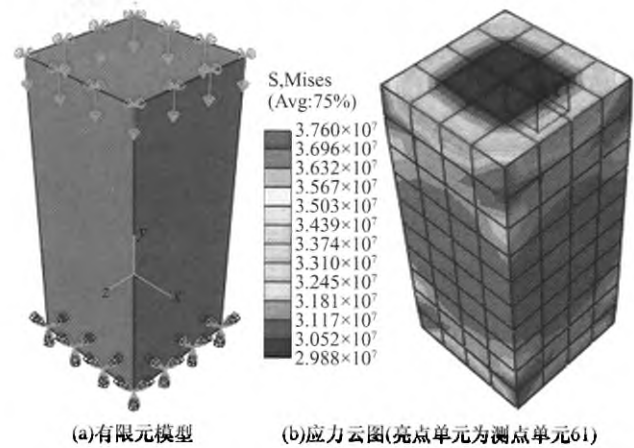


图2 有限元模型及应力云图  
Fig. 2 Finite element model and stress contours

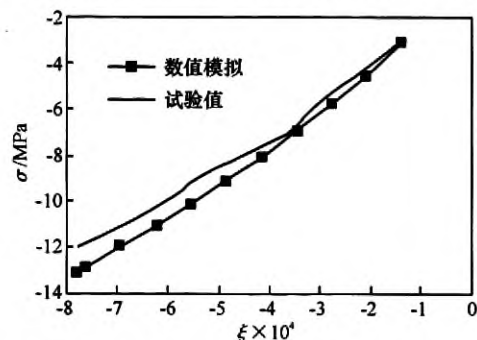


图3 基质损伤阶段数值模拟和试验得到的应力  $\sigma$ -纵向应变  $\xi$  曲线对比  
Fig. 3 Comparison between numerical simulation and experimental curve of stress vs axial strain in matrix damage stage

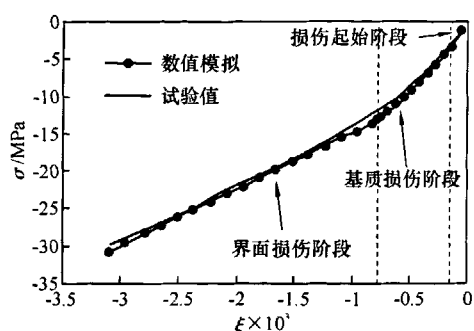


图4 数值模拟和试验在整个损伤过程演化模拟的应力 $\sigma$ -纵向应变 $\xi$ 曲线对比

Fig.4 Comparison between numerical simulation and experimental curve of stress vs axial strain in whole damage process

模拟得到的模拟值比试验值略大,这是因为本构模型只考虑了纵向应变,而数值模拟时受到其余方向上应变的影响。最大误差发生在纵向应变值 $-0.00078$ 处,为 $9.1\%$ ,其余误差均小于 $7.8\%$ 。

#### 4 结语

在本研究中,用 ABAQUS 有限元软件的子程序功能开发了基于界面相模型方法的耐火材料损伤本构模型,扩展了材料库,并验证了该损伤本构关系的有效性,为耐火材料的非线性力学行为提供了一种新的描述方法,为实现含耐火材料结构的多尺度模拟奠定了基础。如何用有限元软件有效、完整地模拟耐火材料损伤过程,将是下一步研究的重点。

#### 参考文献

- [1] Poirier J. Thermomechanical simulation of refractory linings—an overview[J]. *Refractories Applications and News*, 2003, 8(6): 16–22.
- [2] Comic, Berthaud Y, Billardon R. On localization in ductile brittle materials under compressive loadings [J]. *European Journal of*

*Mechanics A—Solids*, 1995(14): 1–3.

- [3] Robin J M. Thermomechanical behaviour of magnesia—carbon refractories[J]. *British Ceramic Transactions*, 1998, 97(1): 1–10.
- [4] Hernandez. Thermomechanical computations of refractory structure improvement due to the modeling of the dehydration process in high alumina castable [C]//Proc of UNITECR'99, Berlin, Germany, 1999: 107–109.
- [5] Boisse P, Gasser A. Computations of refractory linings structures under thermal loadings[J]. *Advances in Engineering Software*, 2002(3): 487–496.
- [6] Sugawara M A. Computational method on the analysis of refractory material with the use of neural network and FEM [C]//Proc of UNITECR'97, New Orleans, USA, 1997: 359–368.
- [7] Wang Zhigang, Li Nan, Kong Jianyi, et al. Prediction of properties of  $Al_2O_3-C$  refractory based on microstructure by an improved generalized self-consistent scheme[J]. *Metallurgical and Materials Transactions (B)*, 2005, 36(10): 577–582.
- [8] Lee H K, Pyo S H. Micromechanics-based elastic damage modeling of particulate composites with weakened interfaces[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, 44(12): 8390–8406.
- [9] Schjudt-Thomsen J, Pyrz R. Overall creep modeling of short fibre reinforced composites with weakend interfaces and complex fibre orientation[J]. *Mechanics of Materials*, 2000, 32(6): 349–359.
- [10] Schmitt N, Burr A, Berthaud Y, et al. Micromechanics applied to the thermal shock behavior of refractory ceramics[J]. *Mech Mater*, 2002, 34(11): 725–747.
- [11] Zhong Z, Meguid S A. On the elastic field of a spherical inhomogeneity with an imperfectly bonded interface[J]. *J Elast*, 1997, 46(2): 91–113.
- [12] Evans A G, Zok F W, McMeeking R M. Fatigue of ceramic matrix composites[J]. *Acta Metall Mater*, 1995, 43(3): 859–875.
- [13] Hashin Z. The spherical inclusion with imperfect interface [J]. *J Appl Mech*, 1991, 58(2): 444–449.
- [14] 刘昌明, 王志刚, 李友荣, 等. 基于多尺度广义自洽模型对耐火材料损伤过程的模拟[J]. *北京科技大学学报: 自然科学版*, 2011, 33(4): 468–473.

Constitutive model of refractories micromechanics damage based on ABAQUS/Chen Yao, Wang Zhigang, Liu Changming, Kong Jianyi//*Naihuo Cailiao*. –2012, 46(2): 114

**Abstract:** The damage constitutive model of refractories was put forward based on the interphase model by the method of micromechanics aimed at the complex nonlinear mechanics behavior and the damage mechanisms of refractories. Utilizing the secondary developing platform of software ABAQUS, a subroutine was developed. Using the constitutive model, the crushing experiment of magnesia–carbon refractories was numerically simulated. The results show that the simulation is in good agreement with the experimental result.

**Key words:** refractories; constitutive model; micromechanics; secondary development; software ABAQUS

**First author's address:** Hubei Province Key Lab of Machine Transmission and Manufacturing Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China

# 基于ABAQUS的耐火材料细观损伤本构模型的开发与实现

作者: 陈瑶, 王志刚, 刘昌明, 孔建益, Chen Yao, Wang Zhigang, Liu Changming, Kong Jianyi  
作者单位: 陈瑶, 刘昌明, 孔建益, Chen Yao, Liu Changming, Kong Jianyi (武汉大学冶金装备及其控制省部共建教育部重点实验室 湖北武汉430081), 王志刚, Wang Zhigang (武汉大学冶金装备及其控制省部共建教育部重点实验室 湖北武汉430081; 武汉大学高温陶瓷与耐火材料省部共建国家重点实验室培育基地 湖北武汉430081)  
刊名: 耐火材料 ISTIC PKU  
英文刊名: Refractories  
年, 卷(期): 2012, 46(2)

## 本文读者也读过(10条)

1. 李志刚, 张振燕, 任刚伟. Li Zhigang, Zhang Zhenyan, Ren Gangwei 硅溶胶结合刚玉和刚玉-莫来石浇注料的性能研究[期刊论文]-耐火材料 2012, 46(2)
2. 胡济东 CFB锅炉用耐火材料的选择、施工及质量控制[期刊论文]-耐火材料 2012, 46(2)
3. 陈军, 隋秀蔚, 王兴贵, CHEN Jun, SUI Xiu-wei, WANG Xing-gui 卫星天线双轴驱动机构综合性能的模糊评判[期刊论文]-机械设计与制造 2012(6)
4. 加入添加剂对MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>质耐火材料力学性能的改善[期刊论文]-耐火与石灰 2012, 37(2)
5. 使用新型Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-C砖降低铁水运输过程中耐火材料成本[期刊论文]-耐火与石灰 2012, 37(2)
6. 王峰, 王广忠, 刘广涛, 张彩东, WANG Feng, WANG Guang-zhong, LIU Guang-tao, ZHANG Cai-dong 如何提高RH真空炉耐火材料寿命[期刊论文]-金属世界 2012(2)
7. 王强, 崔志华 基于年龄的腿骨折范围的人车碰撞事故仿真分析[期刊论文]-河南机电高等专科学校学报 2012, 20(2)
8. 刘志峰, 张敬东, 成焕波 基于ABAQUS显式动力学的PCB板跌落研究[期刊论文]-中国机械工程 2012, 23(12)
9. 张亚辉 绿色装修创造舒适环境[期刊论文]-中国科技纵横 2011(22)
10. 吴昊旻 浅析建筑审美与建筑装饰的关联性[期刊论文]-中华民居 2011(2)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_nhcl201202009.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_nhcl201202009.aspx)