

## 耐火材料热应力分析中的材料本构模型研究

王志刚<sup>1,2</sup>, 李楠<sup>2</sup>, 孔建益<sup>1</sup>, 李友荣<sup>1</sup>

(1. 武汉科技大学机械传动与制造工程湖北省重点实验室, 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:**热应力是耐火材料破坏的主要原因之一。材料的本构关系是有限元模拟准确性的决定因素。论述了各种用于耐火材料的本构模型, 比较了各自的优缺点和适用范围, 阐明了建立统一的耐火材料本构模型的困难, 提出了一种利用细观力学方法解决该问题的新思路。

**关键词:**耐火材料; 本构模型; 热应力; 有限元; 细观力学

**中图分类号:** TQ175.1    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-6988(2008)04-0037-04

## Research on Constitutive Model of Refractory in the Thermomechanical Stress Analysis

WANG Zhi-gang<sup>1,2</sup>, LI Nan<sup>2</sup>, KONG Jian-yi<sup>1</sup>, LI You-rong<sup>1</sup>

(1. Hubei Province Key Lab of Machine Transmission and Manufacturing Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. Hubei Province Key Lab of Ceramics and Refractories, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

**Abstract:** Thermomechanical stress is one of the main causes that results in destruction of the refractory lining in many situations. It is very important that a proper constitutive equation of material is selected in the finite element analysis. In this paper, all kinds of constitutive equations used for refractory are described. And their merits and drawbacks together with their applicability are discussed. It is concluded that it is difficult to build a proper constitutive equation for refractory. Based on the results, the solving way using micromechanics has been presented.

**Key words:** refractory; constitutive model; thermal stress; finite element; micromechanics

耐火材料的损坏一般基于两种原因, 一是化学侵蚀, 二是热机械应力。目前, 国内外已发表了大量的文献, 利用有限单元法对耐火材料的热机械应力进行了研究。他们在通过优化几何形状和边界条件(特别是加热制度), 改善高温容器的热应力分布, 提高耐火材料使用寿命方面, 取得了较好的实用效果<sup>[1-7]</sup>。但是, 其分析模拟的准确程度还需进一步探讨。

实际上, 有限单元法能否准确模拟耐火材料服役时的真实状态, 取决于所建立的有限元模型与实际状况的相近程度。而有限元模型的准确性主要由研究对象的几何模型、边界条件和材料本构模型决定。几何模型的建立和边界条件设定是传统有限元的研究范畴, 目前的理论和方法已较为成熟。而耐火材料本身的本构模型却是耐火材料热机械应力研究中出现特定问题。其本构模型是否能真实反映其力学行为, 将直接决定有限元计算的准确性。本文论述了耐火材料热应力分析中所采用的各种本构模型, 比较了各自的优缺点, 并提出了一种基于细观力学的处理方法, 对准确模拟耐火材料的热机械应力做出了理论上的探讨。

收稿日期: 2008-05-04

基金项目: 湖北省自然科学基金资助项目(2005ABA020); 湖北省教育厅资助项目(B200611004)。

作者简介: 王志刚(1973—), 男, 工学博士, 教授, 主要从事冶金设备的强度和力学行为、设备故障诊断方面的研究。

## 1 耐火材料的非线性力学行为

耐火材料是多孔、多相的微观非均质材料,由耐高温的无机物骨料、粘合相和添加物组成。其物理性能,特别是热机械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。比如,在低温条件下,耐火材料表现出脆性,受载时产生偏离线性的行为,并在卸载后产生永久残余变形,而在高温下却表现出粘塑性。又比如,在受拉时,耐火材料弹性模量大而抗拉强度低,在受压时,弹性模量小而抗压强度高,表现出明显的拉压非对称性行为。在有限元等数值模拟方法中,材料的非线性力学行为是利用其本构方程来描述和表征的。材料的本构方程所描述的力学行为与材料本身的力学行为的相近程度,决定了有限元模拟的精确程度。因此,在耐火材料热应力分析中,选取能够准确描述其非线性力学行为的本构方程,是计算精确性的保证。

## 2 耐火材料的本构模型

材料的本构方程是用来描述其应力-应变关系的数学表达式。通常,要求本构方程应尽可能地简单,且所需的力学参数也要尽可能的少,但又必须包括造成其非线性行为的原因,诸如损伤、塑性、蠕变等。过于简单的本构方程会导致不合实际的计算结果。目前,在耐火材料的热应力分析中,主要采用以下几类本构模型。

### 2.1 热弹性模型

热弹性模型是一种基于线弹性理论的粗略本构关系。它忽略了耐火材料所有的非线性行为,用线弹性来代替以简化计算,是一种近似模型。其应力张量与应变张量的表达式为<sup>[2]</sup>

$$\sigma = K(\varepsilon_v - \varepsilon_v^h)I + 2Ge$$

式中: $\sigma$ 为应力张量; $K$ 为体积模量; $G$ 为剪切模量; $\varepsilon_v$ 为体积应变; $\varepsilon_v^h$ 为热膨胀产生的体积应变; $I$ 为单位张量; $e$ 为整体应变张量中的偏张量部分。

热弹性本构模型的优点是简单,所需的计算时间短。它通常用于有限元的初步分析,通过计算可以了解结构中热应力的大致分布状态,作为进一步精确分析的基础。由于模型中没有考虑耐火材料的非线性行为,因此计算出的结果不够准确,只能作定性分析。

### 2.2 弹塑性模型

耐火材料的弹塑性模型由 C.Comi 等人<sup>[8]</sup>于 1995 年提出,它是所有模型中最具有代表性的一种。该模型采用屈服函数  $f$  来描述材料的力学行为。当  $f \leq 0$  时,材料处于弹性状态;当  $f > 0$  时,材料处于塑性状态。屈服函数  $f$  是应力和温度的函数,由下式决定

$$f(\sigma, T) = \left\{ \frac{I_1^2}{18K(T)} + \frac{J_2^2}{2G(T)} \right\} + B(T)I_1 - R(T)$$

式中: $\sigma$ 为应力张量; $I_1 = \sigma_{ii}$ ;  $J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij}$ ;  $S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} I_1 \delta_{ij}$ ;  $T$ 为温度; $B(T)$ 和  $R(T)$ 为材料参数; $K(T)$ 、 $G(T)$ 分别为材料的体积弹性模量和剪切弹性模量。

研究表明,利用以上模型进行热机械应力计算时,往往对靠近炉墙的热表面应力估计过高,难与观测结果相符。

### 2.3 修正的弹塑性模型

#### 2.3.1 损伤弹塑性模型

针对弹塑性模型在温度较高的热表面计算出的热应力偏高的问题, J.M. Robin 等人<sup>[9]</sup>基于损伤力学理论,提出了一种适用于中温烧结未进行相转变的耐火材料的损伤弹塑性模型。他们认为非线性行为是由于材料的逐渐损伤所致,温度的主要影响是滞弹性应变增加和强度下降。该模型利用热力学方法,通过在材料的屈服函数中引入损伤变量  $d$  来表征由于材料的逐渐破伤导致的屈服函数的演变,将屈服函数  $f$  改写为:

$$f(\sigma, d, T) = \left\{ \frac{I_1^2}{18K(T)(1-d)^2} + \frac{J_2^2}{2G(T)(1-d)^2} \right\} + B(d, T)I_1 - R(d, T)$$

式中: $R(d, T) = b_6 \{ b_3 d (1-d)^{b_4} + b_5 \}$ ,

$$B(d, T) = b_1 \frac{1 + b_2 d}{1 - d}$$

其中,  $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$  是与温度有关的材料参数。

图 1 为不同受载状态下材料屈服函数的演变过程。

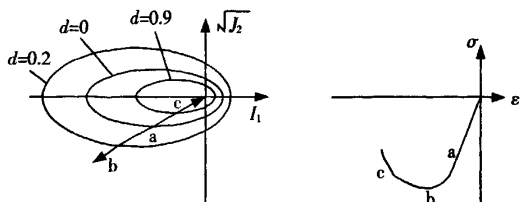


图 1 材料屈服函数的演变

利用该模型对材料进行压缩实验、蠕变实验和3点弯曲实验的数值模拟,得到了与实验结果相符的计算结果。

### 2.3.2 考虑脱水的弹塑性模型

针对某些耐火材料的低温脱水现象,Hernandez等人<sup>[10]</sup>在弹塑性模型的基础上,提出了一种考虑脱水的弹塑性模型。他们在模型中引入变量 $\xi$ 来表征脱水过程的质量损失,假定 $\xi$ 仅与其达到的最高温度有关,通过质量损失实验测定 $\xi$ ;然后采用热弹性理论,将脱水引起的应变在总应变中扣除,来考虑脱水引起的非线性行为。屈服函数 $f$ 改写为

$$f(\sigma, T, \xi) = \left\{ \frac{I_1^2}{18K(T, \xi)^2} + \frac{J_1^2}{2G(T, \xi)} \right\} + B(T, \xi)I_1 - R(T, \xi)$$

### 2.4 弥散裂纹模型

耐火材料在受压时呈现弹塑性行为,在受拉时则为弹性可破坏行为,并在弹性区后出现了软化现象。并且在受拉时,弹性模量大而抗拉强度低;在受压时,弹性模量小而抗压强度高,表现出明显的拉压非对称性行为。弹塑性模型仅考虑了耐火材料在受压时的非线性行为,而无法描述其拉压非对称行为。弥散裂纹(smearred crack)模型<sup>[11]</sup>是基于弹塑性力学的连续模型和基于断裂力学的间断模型的一种折衷方法。它考虑了耐火材料在受拉和受压时表现出的不同材料特性。该模型中将裂纹不作为宏观裂纹处理,而是用刚性的丧失来描述。它的主要特征是在连续模型中引入一个应变软化的破坏平面来表征材料的可破坏行为。

这种模型的优点是拉伸状态下裂纹扩展行为与压缩状态下的塑性行为统一起来,用一个类似屈服函数的表达式来表示拉伸状态下破坏裂纹的发生,该表面类似塑性时的屈服面,称为裂纹探测表面,用以下式子表示:

$$f = q - (3 - b \frac{\sigma_t}{\sigma_u})p - (2 - \frac{b}{3} \frac{\sigma_t}{\sigma_u})\sigma_t = 0$$

$$p = -\frac{1}{3} \text{trace}(\sigma), q = \sqrt{\frac{3}{2} S : S}, S = \sigma + pI$$

此处 $\sigma_u$ 为单轴拉伸屈服应力; $p$ 为有效的压变力; $q$ 为等效的 von Mises 应力; $b$ 为常数; $\sigma_t$ 为单轴拉伸实验时裂纹发生后能达到的最大应力。

### 2.5 神经网络模型

以上几种模型都是在弹塑性模型基础上,考虑

不同的因素对模型作了相应的修正,只能描述材料的某些特定的非线性行为,而不是全部。实际上,耐火材料在生产和使用过程中,会由于不同的状况产生难以用数学表达式来描述的非线性行为。因为不同的耐火材料随温度、时间和加热速度的差异会产生不同的反应膨胀(包括脱水收缩和高温烧结),因此很难用统一的数学表达式来表征所有这些特征。神经网络技术的出现,为非线性行为的模拟提供了一种可能。

Mitsuo Sugawara 等人<sup>[12]</sup>利用神经网络技术,开发了一种耐火材料在热机械载荷下的分析模型。该模型避免了纠缠于材料本身复杂的变形问题,利用神经网络方法,通过一组的实验数据来训练网络,使之来模拟材料由于化学反应、烧结以及反复作用下的热载荷的膨胀等产生的复杂膨胀的非线性行为。他们将膨胀分为反应膨胀和热膨胀,将不可逆膨胀作为时间和温度的函数,与可逆的热膨胀分开。在模型中,假设总应变由弹性应变、塑性应变、蠕变应变和反应应变4部分组成,并且彼此相互独立,见图2。利用神经网络技术,将温度和反应应变作为输入层参数,通过含有两个中间层的神经网络来模拟耐火材料的非线性膨胀行为,输出层参数为反应应变率(或反应应变增量)。

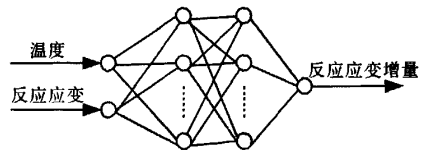


图2 神经网络模型

将此神经网络集成到有限元软件中,即可对耐火材料进行数值模拟。利用该方法对钢包进行了分析,分析结果与实际状况比较相符。

### 2.6 讨论

从以上所述的耐火材料本构模型可以看出,热弹性模型最为简单,但由于未考虑材料的非线性应变,计算精度不高,只能作为初步分析使用。弹塑性模型及其修正模型,借鉴了金属材料的本构方程,是目前使用最广泛的一种模型。但一方面,模型中涉及许多材料参数,需大量实验才能获得,而且这些参数没有普适性,不同耐火材料需进行重复实验;另一方面,模型只考虑了受压时的变形特征,而未考虑受拉

时的力学行为。弥散裂纹模型用一个类似屈服函数的表达式来表示拉伸状态下破坏裂纹的发生,将拉伸状态下裂纹扩展行为与压缩状态下的塑性行为统一起来,可以比较全面地描述耐火材料的非线性行为。至于神经网络模型,其本质并不是一种本构方程,而是本构关系的一种近似算法,它必须建立在大量应力-应变关系的实测数据上。因此,将修正的弹塑性模型与弥散裂纹模型结合起来,是耐火材料最理想的本构模型。它不仅考虑了耐火材料的热弹性、热粘塑性和其它非线性特征,还考虑了耐火材料在使用过程中的损伤和相转变现象以及拉压非对称行为。

正是由于模型的完善性,也增加了模型实现的难度。因为模型中涉及的材料参数必须经过大量的实验才能获得,而且这些参数并不具有普适性,不同成分以及不同制造工艺的材料必须通过同样的实验获取该材料的相关参数。因此,该模型在实现上是很困难的,必须建立在大量实验数据的基础上。在实际使用中,仅用于耐火材料元件或结构简单的特殊的炉衬结构。

材料的本构模型是材料对外载(包括环境因素)所作的变形响应的一种数学表达,是建立在唯象学描述基础之上的。对于耐火材料的非线性力学行为,由于非线性源可能来自任何可能的细观变形和损伤机理,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。

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用上。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理,是解决描述耐火材料复杂非线性行为的另一种途径<sup>[13]</sup>。

### 3 结论

在模拟耐火材料炉衬时,为了得到与实际情况相吻合的结果,必须考虑耐火材料本身的热机械行为特征。为了确定耐火材料的行为规则,实验数据库的积累建立是非常必要的。在建立耐火材料的行为规则时,必须充分考虑造成其非线性的原因,还应尽量简单,以方便用户使用。如果考虑更加复杂的化学和力学现象之间的作用(诸如矿物相转变等),

那么耐火材料的本构模型将会更加精确。但由于耐火材料微观结构的复杂性,从唯象学角度给出材料本构行为的统一描述非常困难,将细观力学方法引入到耐火材料的研究中,是一种新的研究思路。

#### 参考文献:

- [1] SCHACHT C. A. Refractory linings: Thermomechanical design and applications[M], New York: Marcel Dekker Inc 1995.
- [2] POIRIER J. Thermomechanical simulation of refractory linings-an overview[J]. Refractories Applications and News, 2003,8(6):16~22.
- [3] WANG Zhi-gang, LI Nan, KONG Jian-yi, et al. Calculation of Temperature and Stress Distribution for Ladle Lining [J], Refractories Applications and News, 2004,9(3):27~30.
- [4] WANG Zhi-gang, LI Nan, KONG Jian-yi, et al. Research on thermomechanical stress of long nozzle and improvement measures[J]. Refractories Applications and News, 2005,10(1):13~17.
- [5] WANG Zhi-gang, LI Nan, KONG Jian-yi, et al. Thermomechanical simulations of refractory linings based on the neural network and smeared model[R], ICRM, 2005.
- [6] WANG Zhi-gang, LI Nan, KONG Jian-yi, et al. Calculation of Thermomechanical stress of ladle lining during pre-heating and optimization of refractory properties[C]// Dalian, China: Proceedings of the Fourth International Symposium on Refractories, 2003: 24~28.
- [7] 王志刚, 李楠, 孔建益, 等. 长水口热机械应力研究[J], 耐火材料, 2004(2):20~22.
- [8] COMI C, BERTHAUD Y, BILLARDON R. On localization in ductile brittle materials under compressive loadings [J], European Journal of Mechanics A-Solids, 1995(14):1~3.
- [9] ROBIN J M. Thermalmechanical behaviour of magnesia-Carbon refractories[J]. British Ceramic Transactions, 1998,97(1):1~10.
- [10] Hernandez Thermomechanical computations of refractory Structure. improvement due to the modeling of the dehydration process in high alumina castable[C]. UNITECT, 1999:107~109.
- [11] BOISSE P, GASSER A. Computations of refractory linings structures under thermal loadings[J], Advances in Engineering Software, 2002(33):487~496.
- [12] SUGAWARA M. A computational method on the analysis of refractory material with the use of neural network and FEM[M]. UNITECR, 1998:359~368.
- [13] WANG Zhi-gang, LI Nan, KONG Jian-yi, 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.

作者: [王志刚](#), [李楠](#), [孔建益](#), [李友荣](#), [WANG Zhi-gang](#), [LI Nan](#), [KONG Jian-yi](#), [LI You-rong](#)

作者单位: [王志刚, WANG Zhi-gang \(武汉大学, 机械传动与制造工程湖北省重点实验室, 湖北, 武汉, 430081; 武汉大学, 高温陶瓷与耐火材料省部共建国家重点实验室培育基地, 湖北, 武汉, 430081\)](#), [李楠, LI Nan \(武汉大学, 高温陶瓷与耐火材料省部共建国家重点实验室培育基地, 湖北, 武汉, 430081\)](#), [孔建益, 李友荣, KONG Jian-yi, LI You-rong \(武汉大学, 机械传动与制造工程湖北省重点实验室, 湖北, 武汉, 430081\)](#)

刊名: [工业炉](#) **ISTIC**

英文刊名: [INDUSTRIAL FURNACE](#)

年, 卷(期): 2008, 30(4)

## 参考文献(13条)

1. [SCHACHT C A Refractory linings:Thermomechanical design and applications](#) 1995
2. [POIRIER J Thermomechanical simulation of refractory linings-an overview](#) 2003(06)
3. [WANG Zhi-gang;LI Nan;KONG Jian-yi Calculation of Temperature and Stress Distribution for Ladle Lining](#) 2004(03)
4. [WANG Zhi-gang;LI Nan;KONG Jian-yi Research on thermo mechanical stress of long nozzle and improvement measures](#) 2005(100)
5. [WANG Zhi-gang;LI Nan;KONG Jian-yi Thermomechanical simulations of refractory linings based on the neural network and smeared model](#) 2005
6. [WANG Zhi-gang;LI Nan;KONG Jian-yi Calculation of Ther momechanical stress of ladle lining during pre-heating and optimization of refractory properties](#)[会议论文] 2003
7. [王志刚;李楠;孔建益 长水口热机械应力研究](#)[期刊论文]-[耐火材料](#) 2004(02)
8. [COMI C;BERTHAUD Y;BILLARDON R On localization in ductile brittle materials under compressive loadings](#) 1995(14)
9. [ROBIN J M Thermalmehanical behaviour of magnesia-Carbon refractories](#)[外文期刊] 1998(01)
10. [Hernandez Thermomechanical computations of refractory Structure.improvement due to the modeling of the dehydration process in hish alumina castable](#) 1999
11. [BOISSE P;GAsSER A Computations of refractory linings structures under thermal loadings](#)[外文期刊] 2002(33)
12. [SUGAWARA M A computational method on the analysis of refractory material with the use of neural network and FEMUNITECR](#) 1998
13. [WANG Zhi-gang;LI Nan;KONG Jian-yi Prediction of properties of Al2O3-C refractory based on microstructure by an improved generalized self-consistent scheme](#) 2005(10)

## 本文读者也读过(9条)

1. [王兴东, 李刚, 李江, 李远兵 耐火材料热应力计算的现状与发展](#)[期刊论文]-[江苏冶金](#)2006, 34(3)
2. [王志刚, 李楠, 孔建益, 李友荣, Wang Zhigang, Li Nan, Kong Jianyi, Li Yourong 耐火材料热机械应力分析中的两类关键问题研究](#)[期刊论文]-[武汉科技大学学报\(自然科学版\)](#) 2008, 31(1)
3. [李江, 李远兵, 李楠 脱硫喷枪中钢纤维的含量对热应力影响的研究](#)[会议论文]-2003
4. [李江, 李楠, 李远兵 耐火材料有限元热分析与热应力分析研究进展](#)[期刊论文]-[材料导报](#)2004, 18(11)

5. [吴建军](#), [陈卫彬](#), [李顺平](#) [材料模型对成形过程一步法模拟结果的影响](#)[期刊论文]-[锻压技术](#)2004, 29(3)
6. [李江](#), [李楠](#), [李远兵](#) [耐火材料有限元热分析与热应力分析综述](#)[会议论文]-2004
7. [王志刚](#), [李楠](#), [孔建益](#), [李友荣](#) [降低长水口颈部应力的研究](#)[期刊论文]-[炼钢](#)2004, 20(4)
8. [王志刚](#), [李楠](#), [孔建益](#), [李友荣](#) [一种改进的广义自洽模型及其在耐火材料性能预测中的应用](#)[会议论文]-
9. [王志刚](#), [李楠](#), [孔建益](#), [李友荣](#) [用细观力学模型估算镁碳耐火材料基质的力学性能](#)[期刊论文]-[耐火材料](#)2008, 42(5)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_gyl200804011.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_gyl200804011.aspx)