

反应堆部件设计及寿命预测的 有限元技术研究

朱江江, 杨自春

(海军工程大学 船舶与动力学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 为了能更好地设计、分析核反应堆部件以及预测其寿命, 本文将 Chaboche 本构模型与损伤模型相结合, 推导了 Chaboche 损伤本构模型。在弹性预测-径向返回和向后欧拉积分方法的基础上, 研究了模型的隐式积分算法。将 Chaboche 损伤本构模型链接到 ABAQUS 有限元程序, 并利用六面体单元模拟了某型反应堆部件材料的 4 种变形行为, 计算结果与实验值吻合良好。

关键词: 核反应堆部件; Chaboche 损伤本构模型; 隐式积分算法; ABAQUS

中图分类号: TL351 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931 (2010) S0-0298-05

Research of Finite Element Technology Used in Design and Life Prediction of Fusion Reactor Component

ZHU Jiang-jiang, YANG Zi-chun

(College of Naval Architecture and Power, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to improve the capacity of design, analysis and life prediction of fusion reactor component for designer, Chaboche constitutive model of coupled damage was conducted by the combination of Chaboche unified constitutive model and damage model. Based on the radial return method and backward Euler integration, implicit stress integration algorithm was researched and a new expression of consistent tangent modulus was also derived for that model. The Chaboche constitutive model of coupled damage was implemented into the finite element program ABAQUS, and then was used to simulate four kinds of deformation. The results show that the simulated values are very close to the experiment data.

Key words: fusion reactor component; Chaboche constitutive model of coupled damage; implicit stress integration algorithm; ABAQUS

核反应堆部件常承受着疲劳、蠕变、高温环境等复杂应力的综合作用, 对于设计和维护人员而言, 分析其工作时的应力应变响应、预测其工作寿命具有很大难度, 需要先进的弹粘塑性损伤本构模型并将其融入到有限元计算软件中。

目前已提出的弹粘塑性本构模型有十几种, 其中 B-P^[1-2]、Walke^[3]、Chaboche^[4-6]型本构模型是应用得最广泛的 3 个本构理论。其中采用了著名的 A-F 非线性模型来表示运动硬化, 同时叠加了各向同性硬化的 Chaboche 模型能力最强, 能够描述循环塑性、棘轮行为等复杂变

形行为。随着损伤力学的发展，人们开始关注把损伤与本构模型结合起来描述材料的失效过程，Lemaitre 等^[7-8]提出的“有效应力”概念和应变等价原理把损伤与本构模型有机结合，随后 Pirondi、张克实、石多奇、康国政等^[9-12]均沿用这一方法研究具体问题。

将本构模型应用于有限元技术涉及的关键问题是本构模型的数值积分。本构积分算法分为显式积分算法和广义中点法，广义中点法即隐式积分算法。经典的隐式积分算法是由 Wilkiins^[13]于 1964 年提出的径向返回法 (E-R) 被认为是最成功的方法，后人多是对该方法进行改进或应用研究^[14-18]。王勖成等^[19-20]提出了渐近积分法 (A-I)，A-I 算法是对材料硬化参数的渐近解，当硬化参数较大及加载方向偏离径向时误差较大。本工作采用弹性预测-径向校正法推导了弹粘塑性损伤本构模型的数值积分公式，应用 FORTRAN 语言编制了材料子程序，嵌入到大型有限元软件 ABAQUS 中实现了弹粘塑性损伤本构模型的有限元应用。

1 Chaboche 损伤本构模型离散化

本文研究的弹粘塑性本构模型为 Chaboche 模型，硬化模型为采用 A-F 非线性随动硬化叠加各向同性硬化的混合硬化模型，损伤演化模型采用非弹性应变损伤模型^[8]。采用后退欧拉格式对本构方程组进行离散，从第 n 步到 $n+1$ 步时间间隔内，本构方程的增量形式为如下形式（以下各式中无下标字母表示标量，单下标字符表示二阶张量，双下标字符表示四阶张量）。

$$\Delta \underline{\sigma}_{n+1} = (1 - D_{n+1}) \underline{\Phi} : (\Delta \underline{\varepsilon}_{n+1} - \Delta \underline{\varepsilon}_{n+1}^{\text{in}}) \quad (1)$$

$$\Delta p_{n+1} = \left(\frac{F_{n+1}}{K} \right)^n \Delta t_{n+1} \frac{1}{1 - D_{n+1}} \quad (2)$$

$$\Delta \underline{\varepsilon}_{n+1}^{\text{in}} = \frac{3}{2} \Delta p_{n+1} \underline{n}_{n+1} \quad (3)$$

$$\Delta \underline{s}_{n+1} = (1 - D_{n+1}) (2G \underline{I}_d : \Delta \underline{\varepsilon}_{n+1} - 2G \Delta \underline{\varepsilon}_{n+1}^{\text{in}}) \quad (4)$$

其中： $\Delta t_{n+1} = t_{n+1} - t_n$ ， $\underline{I}_d = \underline{I}_4 - 1/3 \underline{I}_2 \otimes \underline{I}_2$ 。

$$F_{n+1} = J_2 \left(\frac{\underline{\sigma}_{n+1}}{1 - D_{n+1}} - \underline{X}_{n+1} \right) - R_{n+1} - k_0 \quad (5)$$

$$\underline{n}_{n+1} = \left(\frac{\underline{s}_{n+1}}{1 - D_{n+1}} - \underline{X}_{n+1} \right) / J_2 \left(\frac{\underline{\sigma}_{n+1}}{1 - D_{n+1}} - \underline{X}_{n+1} \right) \quad (6)$$

式中： $\underline{\sigma}$ 、 \underline{s} 、 \underline{X} 、 R 、 D 分别为名义应力、名义偏应力、运动硬化变量（背应力）、各向同性硬化变量、损伤变量； F 为 Mises 屈服函数； $\underline{\Phi}$ 为弹性张量； Δp 为累积塑性应变； k_0 为初始屈服半径； \underline{I} 为单位二阶张量；下标 n 表示第 n 步加载结束时已知变量值， $n+1$ 表示第 $n+1$ 步加载结束时的变量值，为未知量。为方便起见，

$$\text{后式中用 } J_2 \text{ 代替 } J_2 \left(\frac{\underline{\sigma}_{n+1}}{1 - D_{n+1}} - \underline{X}_{n+1} \right)。$$

各向同性硬化方程离散化为：

$$R_{n+1} = R_n + b(Q - R_{n+1}) \Delta p_{n+1} \quad (7)$$

A-F 随动硬化叠加模型为：

$$X_{n+1} = \sum_{k=1}^m X_{n+1}^k \quad (8)$$

$$X_{n+1}^k = X_n^k + \frac{2}{3} c_k a_k \Delta \underline{\varepsilon}_{n+1}^{\text{in}} - c_k X_{n+1}^k \Delta p_{n+1} \quad (9)$$

其中： b 、 Q 、 c_k 、 a_k 为与温度有关的材料参数。损伤演化方程：

$$D_{n+1} = D_n + \frac{J_2^2 R_v}{2ES_0(1-D)} \Delta p_{n+1} H(p - p_D) \quad (10)$$

其中： E 为弹性模量； S_0 为材料常数； R_v 为应力三轴度因子； H 为 Heviside 函数。

2 径向返回算法

假设非弹性应变增量 $\Delta \underline{\varepsilon}_{n+1}^{\text{in}} = 0$ ，则预测应力为：

$$\underline{\sigma}_{n+1}^T = (1 - D_{n+1}) \underline{\Phi} : (\underline{\varepsilon}_n + \Delta \underline{\varepsilon}_{n+1}) \quad (11)$$

预测应力须满足屈服准则条件。把预测应力代入式 (5) 求出 F_{n+1}^T 。如果 $F_{n+1}^T \leq 0$ ，则材料未屈服，预测应力即为真实应力，反之材料发生屈服， $\Delta \underline{\varepsilon}_{n+1}^{\text{in}} \neq 0$ ，需对应力作非弹性修正，则有：

$$\underline{\sigma}_{n+1} = \underline{\sigma}_{n+1}^T - 2G(1 - D_{n+1}) \Delta \underline{\varepsilon}_{n+1}^{\text{in}} \quad (12)$$

其中： $2G(1-D_{n+1}) \Delta \varepsilon_{n+1}^{\text{in}}$ 即为非弹性修正项， G 为剪切模量。

由式 (3)、(6) 得：

$$\underline{s}_{n+1} = \underline{s}_{n+1}^T - 3G(1-D_{n+1}) \Delta p_{n+1} \underline{n}_{n+1} \quad (13)$$

由式 (7)、(9) 分别可得：

$$R_{n+1} = (R_n + bQ\Delta p_{n+1}) / (1 + b\Delta p_{n+1}) \quad (14)$$

$$\underline{X}_{n+1} = \sum_{k=1}^2 \frac{X_n^k + c_k a_k \Delta p_{n+1} \underline{n}_{n+1}}{1 + c_k \Delta p_{n+1}} \quad (15)$$

当 $p \leq p_D$ 时， $D_{n+1} = 0$ ，当 $p > p_D$ 时，积分式 (10) 得：

$$D_{n+1} = 1 - \sqrt{1 + D_n^2 - 2D_n - \frac{J_2^2 R_v}{ES_0} \Delta p_{n+1}} \quad (16)$$

由式 (13) ~ (16)、(18) 5 个方程组成了由 \underline{n}_{n+1} 和 Δp_{n+1} 表示的方程组，可用方程组迭代的方法求得 \underline{n}_{n+1} 和 Δp_{n+1} 的数值解^[21]。但这样的计算量非常庞大，径向返回算法^[13]假设在 n 到 $n+1$ 步间隔内，材料塑性流动的方向由预测

应力张量和第 n 步运动硬化张量决定，本文沿用这一假设并且损伤变量取第 n 步时的值。 \underline{n}_{n+1} 表示为：

$$\underline{n}_{n+1} = \left(\frac{\underline{s}_{n+1}^T}{1-D_n} - X_n \right) / J_2 \left(\frac{\underline{s}_{n+1}^T}{1-D_n} - X_n \right) \quad (17)$$

应力状态必须满足屈服准则条件。

$$f = J_2 \left(\frac{\underline{s}_{n+1}}{1-D_{n+1}} - X_{n+1} \right) - R_{n+1} - k_0 - K \left((1-D_{n+1}) \frac{\Delta p_{n+1}}{\Delta t} \right)^n = 0 \quad (18)$$

把式 (13) ~ (17) 代入式 (18) 可得关于 Δp_{n+1} 的非线性标量方程 $f(\Delta p_{n+1}) = 0$ 。通过牛顿迭代法求解方程的数值解后代入上述变量方程中即可求出第 $n+1$ 步的应力张量及其它内变量。

3 有限元模型验证及讨论

利用 ABAQUS 提供的用户材料子程序接口 UMAT，编制了 Chaboche 损伤本构模型的材料模型，嵌入到 ABAQUS 主程序中进行计算。研究对象为某型反应堆结构材料，550 °C 时材料参数列于表 1。

表 1 550 °C 时材料损伤本构模型参数
Table 1 Parameters of damage constitutive model at 550 °C

E/GPa	ν	K/MPa	$Z/(\text{MPa}\cdot\text{s}^{1/n})$	n	C_1	C_2
183	0.35	425	545	20.3	1 989	137
a_1/MPa	a_2/MPa	b	Q/MPa	S/MPa	p_D	Dc
153	190	7.13	161	0.2	0	0.5

有限元验证模型为一边长为单位 1 的 8 节点六面体等参单元，如图 1 所示。约束 1、4、5、8 号节点 x 轴方向上的位移，1、2、5、6 号节点 y 轴方向上的位移以及节点 1、2、3、4 号节点 z 轴方向上的位移。

3.1 材料单调拉伸行为模拟

通过 ABAQUS 控制节点位移模拟加载应变率为 0.001/s 情况下材料的单调拉伸应力应变曲线如图 2 所示。

3.2 应力控制疲劳行为模拟

单轴状态下，控制应力载荷，最大应力为 900 MPa，应力比为 -1。总应变随时间的循环曲线如图 3 所示。

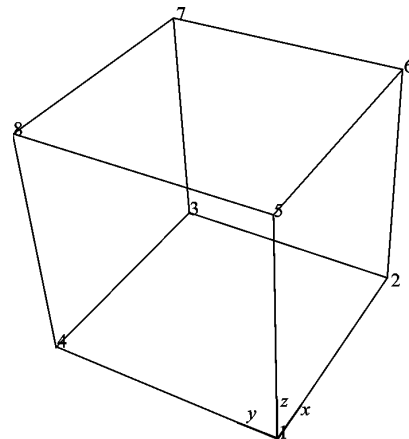


图 1 有限元验证模型及约束
Fig. 1 Finite element model

3.3 应力控制疲劳蠕变交互作用

单轴状态下，控制应力载荷。最大应力为 900 MPa，最小应力为 0，最大应力处的保持时间为 10 s。总应变随时间的循环变化曲线如图 4 所示。

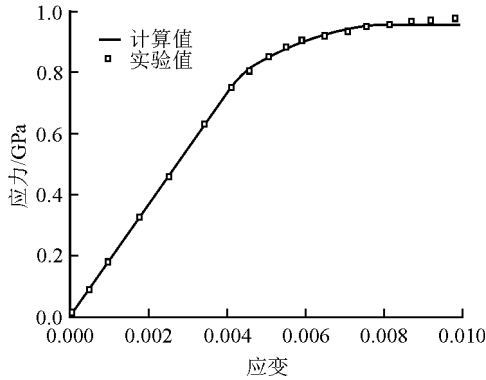


图 2 应变率为 0.001/s 时单调拉伸曲线
Fig. 2 Monotony stress strain curve with 0.001/s strain rate

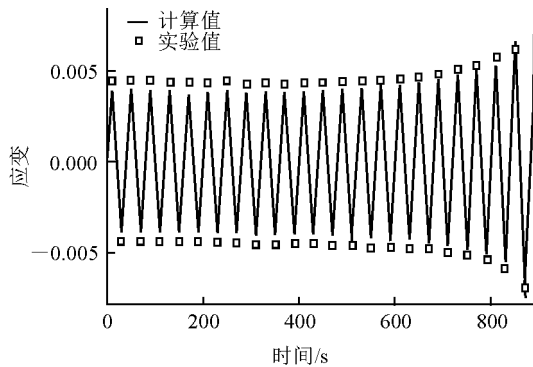


图 3 应力控制疲劳总应变随循环的变化曲线
Fig. 3 Relation between total strain and cycle in stress control fatigue test

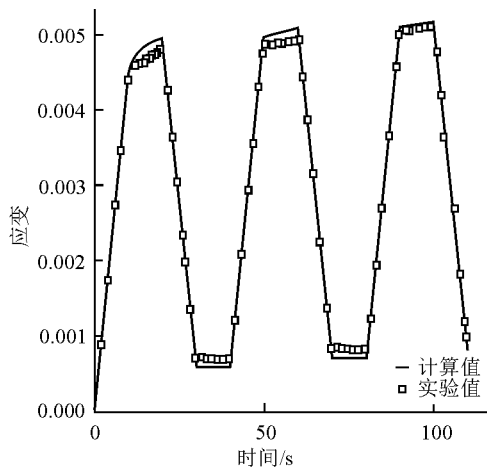


图 4 应力控制疲劳蠕变交互作用曲线
Fig. 4 Fatigue-creep interaction curve in stress control test

3.4 蠕变行为模拟

单轴状态下，拉伸应力为 600 MPa，蠕变变形随时间的变化曲线如图 5 所示。

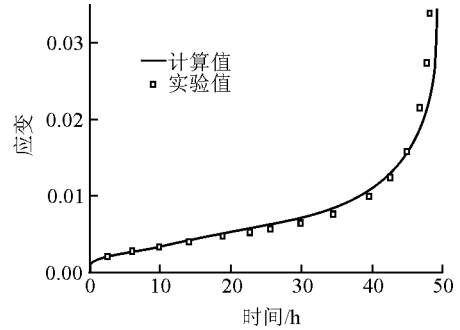


图 5 600 MPa 应力下蠕变随时间变化曲线
Fig. 5 Evolution of creep strain under 600 MPa stress

4 结论

本文推导了 Chaboche 损伤本构模型，研究其隐式积分算法，并利用 ABAQUS 的材料子程序接口 UMAT 编制了材料子程序。从模型验证结果可看出：

- 1) Chaboche 损伤本构模型不但能准确地模拟材料短时的应力应变关系，还能描述材料在疲劳、蠕变等加载方式下材料变形与损伤的交互作用导致材料劣化的全过程；
- 2) 将 Chaboche 损伤本构方程嵌入有限元技术模拟得到的材料变形行为与试验数据十分接近；
- 3) Chaboche 损伤本构方程材料子程序能够应用于核反应堆热端部件的设计、分析和寿命预测。

参考文献：

[1] BODNER S R, PARTOM Y. A large deformation elastic-viscoplastic analysis of a thick-walled spherical shell[J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 1972, 39(9): 751-757.

[2] BODNER S R, PARTOM Y. Constitutive equations for elastic-viscoplastic strain hardening materials[J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 1975, 42(6): 385-389.

[3] WALKER K P. Research and development program for non-linear structural modeling with advanced time-temperature dependent constitutive relationships, NASA CR-165553[R]. [S. l.]: [s. n.], 1981.

- [4] CHABOCHE J L. Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity[J]. *International Journal of Plasticity*, 1989, 5: 247-302.
- [5] CHABOCHE J L. On some modifications of kinematic hardening to improve the description of ratcheting effects[J]. *International Journal of Plasticity*, 1991, 7: 661-678.
- [6] CHABOCHE J L. Modelisation of ratcheting: Evaluation of various approaches[J]. *Eur J Mech: A/Solids*, 1994, 13(4): 501-518.
- [7] LEMAITRE J, CHABOCHE J L. *Mechanics of solid materials*[M]. UK: Cambridge University Press, 1990.
- [8] LEMAITRE J. A continuous damage mechanics model for ductile fracture[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1985, 107: 83-89.
- [9] PIRONDI A, BONORA N, STEGLICH D, et al. Simulation of failure under cyclic plastic loading by damage models[J]. *International Journal of Plasticity*, 2006, 22: 2146-2170.
- [10] 张克实, WOLFGANG B. Chaboche 热粘塑性损伤模型的应用研究[J]. *航空动力学报*, 2002, 17(5): 615-622.
- ZHANG Keshi, WOLFGANG B. Application of chaboche thermal viscoplastic model[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2002, 17(5): 615-622(in Chinese).
- [11] 石多奇, 杨晓光, 王延荣. 耦合蠕变损伤的 Chaboche 粘塑性本构方程的应用[J]. *航空动力学报*, 2005, 20(1): 60-65.
- SHI Duoqi, YANG Xiaoguang, WANG Yanrong. Applied investigation of chaboche unified viscoplastic constitutive model of coupled creep damage [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2005, 20(1): 60-65(in Chinese).
- [12] KANG Guozheng, LIU Yujie, DING Jun, et al. Uniaxial ratcheting and fatigue failure of tempered 42CrMo steel: Damage evolution and damage-coupled visco-plastic constitutive model[J]. *International Journal of Plasticity*, 2009, 25: 838-860.
- [13] WILKINS M L. Calculation of elastic-plastic flow[M]// ALDER B, FERNBACK S, ROTENBERG M. *Methods of Computational Physics*, Vol. 3. New York: Academic Press, 1964: 211-272.
- [14] CHABOCHE J L, CAILLETAUD G. On the calculation of structures in cyclic plasticity or viscoplasticity[J]. *Comput Struct*, 1986, 23: 23-31.
- [15] 王庆五, 杨晓光, 石多奇. IN738LC 材料 Chaboche 热粘塑性本构模型的隐式 Euler 格式[J]. *航空动力学报*, 2005, 20(6): 964-968.
- WANG Qingwu, YANG Xiaoguang, SHI Duoqi. Implicit Euler form of Chaboche thermal viscoplastic model of IN738LC material[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2005, 20(6): 964-968(in Chinese).
- [16] 高炳军, 陈旭. 叠加型 A-F 类随动强化模型塑性应变的数值计算法[J]. *计算力学学报*, 2006, 23(1): 24-28.
- GAO Bingjun, CHEN Xu. Numerical algorithm of plasticity with superposed A-F kinematic hardening rule[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2006, 23(1): 24-28(in Chinese).
- [17] 丁伟. 关于半隐式向后 Euler 本构积分算法的改进[J]. *江西科学*, 2007, 25(4): 387-389.
- DING Wei. An improvement for semi-implicit back Euler constitutive integration algorithm[J]. *Jiangxi Science*, 2007, 25(4): 387-389(in Chinese).
- [18] 周计明, 齐乐华. 率相关本构方程积分新算法[J]. *应用力学学报*, 2009, 26(4): 762-766.
- ZHOU Jiming, QI Lehua. New integration algorithm of rate dependent constitutive equation[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2009, 26(4): 762-766(in Chinese).
- [19] 王勖成, 常亮明. 各向同性硬化材料弹塑性本构关系的渐近积分及其计算精度[J]. *固体力学学报*, 1986(1): 69-77.
- WANG Xucheng, CHANG Liangming. Asymptotic integration of elasto-plastic constitutive relation for isotropic hardening material and its computational precision[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1986(1): 69-77(in Chinese).
- [20] WANG Xucheng, CHANG Liangming. Integration of constitutive equations of hardening material[J]. *Res Mechanica*, 1987, 20: 113-125.
- [21] CHABOCHE J L, CAILLETAUD G. Integration methods for complex plastic constitutive equations[J]. *Comput Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1996, 13: 125-155.