

DOI: 10.11973/jxgccl202112011

内压条件下轴向内表面裂纹管道蠕变断裂参量 C^* 的工程估算方法

刘长军¹, 蔡 君¹, 孙春燕¹, 谈建平¹, 邵雪娇²

(1. 华东理工大学机械与动力工程学院, 承压系统与安全教育国家重点实验室, 上海 200237;

2. 中国核动力研究设计院, 核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都 610213)

摘 要: 以内压条件下含轴向内表面裂纹的管道为研究对象, 通过引入 x_0 参数使 J 积分全塑性解与蠕变指数无关对 Zahoor 提出的蠕变断裂参数 C^* 估算方法进行改进; 采用改进方法、Zahoor 估算公式以及参考应力法中的 R6 整体解和 Kim 优化解计算不同蠕变指数和不同裂纹尺寸下的 C^* 值, 并与有限元计算结果进行比较。结果表明: 参考应力法所得 C^* 值比有限元计算结果大 2~8 倍, 准确度较差; 改进方法所得 C^* 值与有限元计算结果的比值在 1 左右, 准确度较高; 与 Zahoor 估算公式相比, 改进方法在蠕变指数为 3 时的计算准确度更高, 但随着蠕变指数增大, 2 种方法的计算准确度趋于相同。

关键词: 蠕变断裂参量; 工程估算; 参考应力法; 轴向裂纹管道

中图分类号: TG115.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2021)12-0062-05

Engineering Estimation Method of Creep Fracture Parameter C^* for Axial Internal Surface Cracked Pipes under Internal Pressure

LIU Changjun¹, CAI Jun¹, SUN Chunyan¹, TAN Jianping¹, SHAO Xuejiao²

(1. MOE Key Laboratory of Pressure Systems and Safety, School of Mechanical and Power Engineering,

East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

2. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

Abstract: With axial internal surface cracked pipes under internal pressures as the research object, the creep fracture parameter C^* estimation method proposed by Zahoor was improved by introducing the x_0 parameter to make the J -integral full plastic solution independent of Norton indexes. The C^* values under the conditions of different Norton indexes and different crack size were calculated by the improved method, Zahoor solution, and reference stress methods including R6 global solution and Kim solution, and were compared with the finite element calculation. The results show that the C^* values calculated by the reference stress methods were two to eight times higher than those by the finite element calculation; the accuracy of the reference stress methods was poor. The ratios of the C^* values calculated by the improved method to the finite element calculation results were close to 1; the accuracy of the improved method was relatively high. Comparing with the Zahoor solution, the improved method had higher calculation accuracy with the Norton index of 3. But as the Norton index increased, the calculation accuracy of the two methods tended to be the same.

Key words: creep fracture parameter; engineering estimation; reference stress method; axial cracked pipe

收稿日期: 2020-09-10; 修订日期: 2021-09-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0808800); 国家自然科学基金

基金资助项目(11502082); 核反应堆系统设计技术重点实验室资助项目

作者简介: 刘长军(1972—), 男, 上海人, 教授, 博士

0 引言

为描述含缺陷构件的蠕变裂纹扩展性能, 学者们提出了多种蠕变断裂参量, 其中参量 C^* 与蠕变

裂纹扩展速率的关联效果最好,使用最广泛^[1],并且已被多种标准和规范采纳^[2]。目前,计算 C^* 参量的方法主要包括有限元法、实验室半经验法,以及工程上应用的参考应力法和类比美国电力研究协会(EPRI)J积分工程估算法的 C^* 估算法。其中:有限元法的计算准确度较好,但标准化难度大,对使用人员要求高,耗时长,因此其工程应用受限;实验室半经验法在计算 C^* 参量时需要测定加载位移(或裂纹张开位移),而工程构件获取该参数的难度大,因此其工程应用受限;参考应力法虽然是工程上普遍采用的计算方法,但是其计算精度与极限载荷的确定相关,通常计算结果比有限元结果高2~3倍及以上,有时也会出现低估的情况^[3-5]。鉴于材料的稳态蠕变本构与塑性本构关系具有类比性,LANDES等^[6]将弹塑性断裂参量J积分类比至大范围蠕变条件下的蠕变断裂参量 C^* 来表征稳态蠕变裂纹扩展行为。因此,同样可类比推导EPRI-J积分估算方法得到 C^* 估算法^[7-11]。该 C^* 估算法并非由EPRI直接提出,但为了便于文中讨论,将其简称为EPRI- C^* 估算法。EPRI- C^* 估算法一般根据裂纹尺寸 a/t 、 a/c ,管道尺寸 R_i/t (a, c, t 分别为裂纹深度、裂纹半长和管道壁厚, $2R_i$ 为管道内径)和蠕变指数 n ,查询EPRI手册得到对应的J积分全塑性解 h_1 (简称塑性解 h_1),将 h_1 值代入方程计算得到 C^* 值;这种方式简化了工程人员的操作,其核心在于塑性解 h_1 值的确定^[3]。但是该数值与材料、几何结构、裂纹尺寸等参数相关,按照这些相关参数编写的塑性解表格复杂,查询不便。

表1 现有EPRI- C^* 工程估算法的对比Table 1 Comparison of current EPRI- C^* engineering estimation methods

方法	Kumar-Yoon ^[8]	Kumar-EPRI ^[7]	Zahoor ^[10]	Yagawa ^[11]
适用对象	管道表面裂纹表面点 管道表面裂纹最深点	管道表面裂纹最深点	管道表面裂纹最深点	管道表面裂纹表面点 管道表面裂纹最深点
适用范围	$n=8,6$ $R_i/t=10$ $a/c=1/3$ $0.125 \leq a/t \leq 0.5$	$n=1,2,3,5,7,10$ $R_i/t=10$ $a/c=0$ (无限长裂纹) $0.125 \leq a/t \leq 0.75$	$n=1,2,3,5,7$ $R_i/t=10$ $0.05 \leq a/c \leq 0.67$ $0.1 \leq a/t \leq 0.8$	$n=1,2,3,5,7,10$ $R_i/t=10$ $0.2 \leq a/c \leq 1$ $0.2 \leq a/t \leq 0.8$
优点	1) 现有塑性解 h_1 是根据不可压缩性有限元计算推导得到的,根据此类 h_1 求解得到的 C^* 值偏保守。王凯等 ^[3] 利用三维有限元重新计算了 h_1 ,命名为 H_c ,代入Zahoor估算公式 ^[10] 计算 C^* ,所得 C^* 值的准确度有所提升 2) 通过查询塑性解 h_1 的值然后计算 C^* 值的方法便于在工程上使用			
缺点	现有的 h_1 表格维数较多(与 $R_i/t, a/c, a/t, n$ 相关),利用有限元求解多维数的解十分繁琐			
准确度 ^[12]	Zahoor估算式 ^[10] 最高、Yagawa估算式 ^[11] 次之、Kumar-Yoon估算式 ^[8] 与Kumar-EPRI估算式 ^[7] 并列最低			

1.2 方法改进

利用EPRI- C^* 工程估算法计算内压条件下轴

综上,现有 C^* 参量的工程估算法无法兼顾结果准确度与操作简便性。为此,作者基于EPRI- C^* 工程估算法中Zahoor的 C^* 估算方法^[10],通过引入 x_0 系数与塑性解 h_1 构成与蠕变指数 n 无关的函数,建立了一种改进的 C^* 参量计算方法;应用该方法计算得到不同蠕变指数($n=3,5,7,9$)、不同裂纹尺寸(a/c 为1/3, a/t 分别为0.2,0.4,0.6)的轴向内表面裂纹管道($R_i/t=10$)在内压下的蠕变断裂参量 C^* 值,并与有限元方法、参考应力法中的R6整体解和Kim优化解计算的 C^* 值进行对比,用以验证改进方法计算结果的准确度。

1 蠕变断裂参量 C^* 的工程估算方法

1.1 现有EPRI- C^* 工程估算法

对于内压条件下内表面含轴向裂纹的管道, Kumar等最先给出了相应的塑性J积分的估算公式^[12],以此为理论基础发展出了相应的 C^* 估算公式,目前常见的有Kumar-Yoon估算公式^[8]、Kumar-EPRI估算公式^[7]、Zahoor估算公式^[10]和Yagawa估算公式^[11]。表1总结了上述4种形式的EPRI- C^* 工程估算法计算管道裂纹 C^* 值的适用对象、范围、优缺点与结果准确度排序。采用EPRI- C^* 工程估算法计算蠕变断裂参量不需要工程人员掌握太多理论知识,只需查询EPRI手册获取塑性解 h_1 的值,代入估算公式计算 C^* 值即可。但是塑性解 h_1 的影响因素较多,包括 $R_i/t, a/c, a/t$ 和 n ,并且利用不可压缩性有限元计算推导此类 h_1 的过程比较繁琐。通常由此类 h_1 值计算得到的 C^* 值远高于实际值^[12],保守性较高。

向裂纹管道 C^* 值时, Zahoor估算公式所得解的准确度优于其他EPRI- C^* 工程估算法所得解的准确

度^[3]。因此,作者基于 Zahoor 估算公式的理论进行估算方法改进。

Zahoor 塑性 J 积分计算公式^[10]如下:

$$J_p = \alpha \sigma_0 \varepsilon_0 t \cdot h_1(a/t, a/c, n, R_i/t) \cdot (\sigma/\sigma_0)^{n+1} \quad (1)$$

式中: J_p 为塑性 J 积分; α 为与材料相关的常数; σ_0 为屈服强度; ε_0 为与 σ_0 对应的应变; σ 为任意时刻垂直于裂纹方向的应力。

基于此塑性 J 积分将 EPRI- J 积分推广到 C^* 的估算, C^* 的计算公式为

$$C^* = A \cdot t \cdot h_1\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, n, \frac{R_i}{t}\right) \cdot \left(P_i \cdot \frac{R_o^2 + R_i^2}{R_o^2 - R_i^2}\right)^{n+1} \quad (2)$$

式中: A 为 Norton 方程系数; P_i 为管道内压; $2R_o$ 为管道外径。

式(2)即为 Zahoor 估算公式^[10],作者以此为理论基础,并参考孙亮等^[13]的“ $\ln[h_1(n)]$ 随 n 成近似线性变化”的关系对该 ERPI- C^* 工程估算方法进行改进。由式(1)可以看出, h_1 与管道裂纹尺寸 $a/t, a/c$, 蠕变指数 n 以及管道尺寸 R_i/t 相关,影响因素较多。式(1)可以简化成 J_p 与 σ^{n+1} 成正比的形式,则 h_1/σ_0^{n+1} 为常数^[13]。令

$$\frac{h_1}{\sigma_0^{n+1}} = C \quad (3)$$

对式(3)两边取对数,得

$$\ln h_1 = n \ln \sigma_0 + (\ln C + \ln \sigma_0) \quad (4)$$

式(4)中 $\ln C + \ln \sigma_0$ 和 $\ln \sigma_0$ 仍为常数,可分别记作 A_1 与 B ,则式(4)可改写为

$$\ln h_1 = A_1 + Bn \quad (5)$$

由式(5)可以看出, $\ln h_1$ 与 n 成线性关系,其中 B 为直线的斜率;孙亮等^[13]在其研究中已经证明了该关系的准确性。 h_1 与 n 相关,因此作者尝试寻找一个系数 x ,使得 $h_1(n) \cdot x^{n+1}$ 成为一个与 n 无关的函数。对该函数取对数,并代入式(5),简单计算后得到的公式如下:

$$\ln[h_1(n) \cdot x^{n+1}] = (B + \ln x)n + A_1 + \ln x \quad (6)$$

由式(6)可知,若要使等式左边成为与 n 无关的函数,等式右边的 $B + \ln x$ 必须等于 0。由此可得 $x = \exp(-B)$,将该值记为 x_0 ,代入 $h_1(n) \cdot x^{n+1}$ 即得到与 n 无关的塑性解,亦即 $h_1(n) \cdot x_0^{n+1}$ 。将该塑性解记作 h'_c ,为与原塑性解 h_1 区分,将改进后的 h'_c 命名为高温解。将高温解代入式(2)得到改

进后的 C^* 计算公式,如下:

$$\begin{cases} C^* = A t h'_c\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{R_i}{t}\right) \left[\left(P_i \cdot \frac{R_o^2 + R_i^2}{R_o^2 - R_i^2}\right)/x_0\right]^{n+1} \\ x_0 = \exp(-B) \end{cases} \quad (7)$$

2 有限元计算方法

选取内压条件下含内表面半椭圆形轴向裂纹的管道为研究对象,通过 ABAQUS 有限元软件建立模型,计算蠕变指数分别为 3,5,7,9, a/c 为 1/3, a/t 分别为 0.2,0.4,0.6 时对应的蠕变断裂参数 C^* 值,用于检验改进的 EPRI 工程估算方法的准确性。

2.1 材料模型

有限元材料模型使用的是弹性-幂率蠕变模型,蠕变本构方程为

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{E} + A \sigma^n \quad (8)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; E 为弹性模量。

材料参数选自文献^[14],如表 2 所示;表中 ν 为泊松比。

表 2 管道模型相关的材料参数

Table 2 Material parameters for pipe model

E/MPa	ν	$A/(\text{MPa}^{-n} \cdot \text{h}^{-1})$	n
200 000	0.3	5.00×10^{-12}	3
158 000	0.3	1.34×10^{-16}	5
144 000	0.3	1.90×10^{-19}	7
140 100	0.3	1.46×10^{-24}	9

2.2 几何模型

选择较常见的管道进行研究,其内半径 R_i 为 380 mm,外半径 R_o 为 418 mm,壁厚 t 为 38 mm,长度 L 为 1 140 mm,管道内表面裂纹为半椭圆形,如图 1 所示。裂纹尺寸以 a/t 和 a/c 表示, a/c 均取 1/3, a/t 分别取 0.2,0.4,0.6。考虑到管道模型的对称性,采用管道的 1/4 进行有限元建模,模型如图 2 所示。该有限元模型使用 C3D8 单元进行网格划分,并且通过了网格无关性验证与正确性验证。裂纹尖端积分路径一共设置 8 条,其中 C^* 取后 6 条积分路径的平均值。

2.3 载荷及边界条件

为模拟管道实际情况,需对模型施加对应的载荷与边界条件。在管道内表面及裂纹面上施加大小为 6.2 MPa 的内压,在远离裂纹的管道横截面上施加内压对应的轴向力,经圆筒轴向力公式^[15]计算得

到的轴向应力为 31 MPa。在管道轴向面上施加周向对称约束,在裂纹端的横截面上施加轴向对称约束。

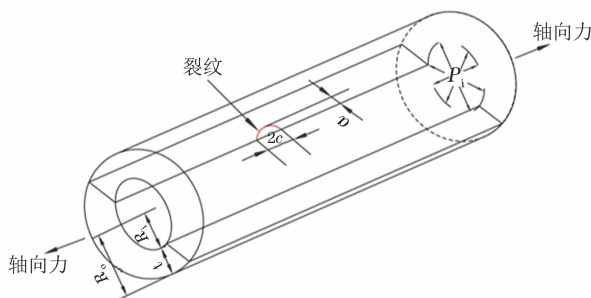


图 1 内表面半椭圆轴向裂纹示意

Fig. 1 Diagram of semi-elliptical axial crack on inner surface

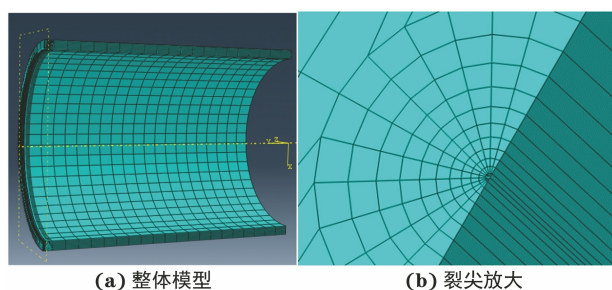


图 2 轴向裂纹管道有限元模型

Fig. 2 Finite element model for pipeline with axial crack:

(a) whole model and (b) enlargement at crack tip

3 改进方法计算结果的准确度验证

作者基于 Zahoor 理论^[10]所改进的 C^* 估算公式,给出了与 n 无关的高温解 h'_c ,该值只与 a/t 、 a/c

和 R_i/t 相关,仅通过这 3 个参数即可确定,提升了查表操作的简便性。此外,在扩充适用于不同裂纹尺寸与管道尺寸的 h'_c 值时,有限元求解更方便。但是,该方法的计算准确度还需要进行检验。一方面需要对比与有限元计算结果的差异,判断该方法所得解的准确度;另一方面需要对比与现有工程估算法在准确度上的差异,判断该方法的准确度相比其他工程估算法是否有所提升。

在 EPRI- C^* 工程估算法中,Zahoor 估算公式的准确度优于其他估算公式的准确度,因此仅将改进方法与 Zahoor 估算公式进行比对。而在参考应力法中,R6 整体解与 Kim 优化解准确度较高^[12],R6 局部解在不同裂纹尺寸 a/t 下的差异较大^[3,12],因此仅将改进方法与 R6 整体解和 Kim 优化解进行对比。

在相同的管道尺寸和裂纹尺寸下,分别采用改进方法、Zahoor 估算公式、R6 整体解和 Kim 优化解计算得到 C^* 值,改进方法计算 C^* 所需的 h'_c 及 x_0 的值见表 3;采用有限元方法得到 C_{FE}^* 值,以 C^*/C_{FE}^* 的方式进行无量纲化处理,比较改进方法计算结果的准确度,对比结果如图 3 所示。

表 3 不同裂纹尺寸下的 h'_c 和 x_0

Table 3 h'_c and x_0 of different crack size

a/c	a/t	h'_c	x_0
1/3	0.2	0.474	1.149
	0.4	1.570	1.106
	0.6	3.804	1.076

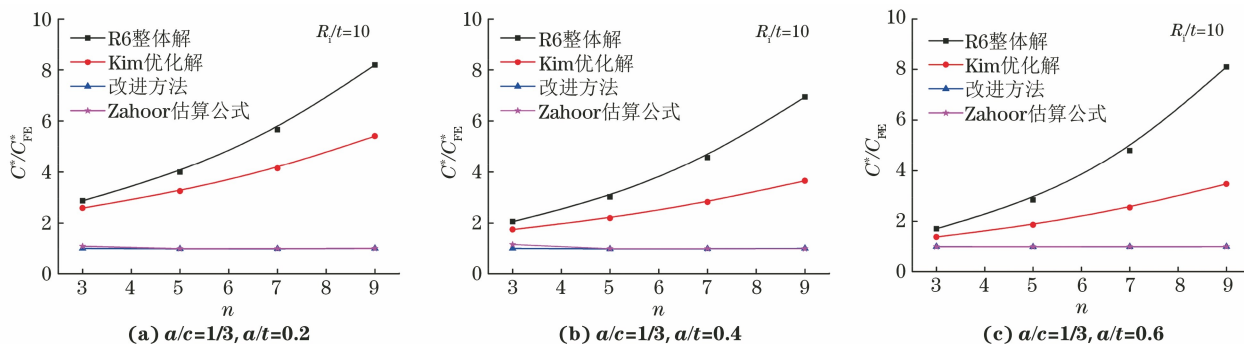


图 3 不同裂纹尺寸和不同 n 值下改进方法、Zahoor 估算公式、R6 整体解、Kim 优化解与有限元法所得 C^* 值的比值

Fig. 3 Ratios of C^* results obtained by improved solution, Zahoor solution, R6 global solution and Kim solution to those obtained by finite element solution under different crack size and different n values

由图 3 可知:不同裂纹尺寸和不同蠕变指数下,改进 EPRI- C^* 工程估算法所得 C^* 值与有限元方法所得 C_{FE}^* 值的比值始终保持在 1 附近,说明改进方法计算的准确度较高;改进方法较参考应力法(R6 整体解和 Kim 优化解)在准确度上有很大的提高,

尤其不会出现参考应力法在裂纹尺寸 a/t 和蠕变指数 n 增加时, C^* 值的保守度(估算公式所得解与有限元法所得解的偏差)大幅增大的问题^[12],参考应力法所得 C^* 值比 C_{FE}^* 值大 2~8 倍;此外,改进方法与 Zahoor 估算公式在相同条件下计算所得的

C^* 值基本都与 C_{FE}^* 值接近,并且改进方法在 n 为 3 时的计算准确度较高,随着 n 增大这 2 种方法的计算准确度趋于相同。

4 结 论

(1) 通过引入 x_0 参数使 $h_1(n) \cdot x_0^{n+1}$ 成为与蠕变指数 n 无关的函数 h'_c 来对 EPRI- C^* 工程估算法中的 Zahoor 估算公式进行改进,改进方法中的 h'_c 值仅与管道和裂纹尺寸相关,降低了原塑性解 h_1 的表格维数,提升了方法操作的便利性。

(2) 参考应力法中的 R6 整体解与 Kim 优化解所得的 C^* 值比有限元方法所得 C^* 值高 2~8 倍,且随着裂纹尺寸 a/t 和蠕变指数 n 增大,参考应力法的计算误差增大。

(3) 改进方法所得 C^* 值与有限元方法所得 C^* 值的比值始终保持在 1 左右,计算结果准确度高;相比于 Zahoor 估算公式,改进方法在蠕变指数 n 为 3 时的计算准确度略有改进,但随着 n 增大 2 种方法的计算准确度趋于相同。

参考文献:

- [1] HARPER M P, ELLISON E G. The use of the C^* parameter in predicting creep crack propagation rates[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1977, 12(3): 167-179.
- [2] GOODALL I W, AINSWORTH R A. An assessment procedure for the high temperature response of structures [M]//Creep in Structures. Heidelberg: Springer, 1991: 303-311.
- [3] WANG K, WANG G Z, TAN X M, et al. Creep fracture parameter C^* solutions for axial internal and external surface cracks in pressurized cylinders [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 231: 107026.
- [4] 张婷. 基于参考应力法的均质拉伸试样高温蠕变断裂参量特性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2010.
ZHANG T. Study on high temperature creep fracture mechanics parameter of homogeneous tension specimen based on reference stress method [D]. Nanchang: Nanchang University, 2010.
- [5] YATOMI M. Comparison among estimation methods of C^* parameter for axially oriented external surface crack in cylinders[J]. Materials at High Temperatures, 2015, 32(5): 468-474.
- [6] LANDES J D, BEGLEY J A. A fracture mechanics approach to creep crack growth [M]//Mechanics of Crack Growth. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1976: 128-148.
- [7] KUMAR V, GERMAN M D, SHIH C F. Engineering approach for elastic-plastic fracture analysis [R]. [S. l.]: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 1981.
- [8] YOON K K, KILLIAN D E. J estimation method for a semi-elliptical surface flaw in a cylinder [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1995, 117(1): 66-70.
- [9] BONG YOON K, GYU PARK T, SAXENA A. Creep crack growth analysis of elliptic surface cracks in pressure vessels [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2003, 80(7/8): 465-479.
- [10] ZAHOOOR A. Ductile Fracture Handbook; (in Three Volumes); Research Project 1757-69 [M]. [S. l.]: Electric Power Research Institute, 1989.
- [11] YAGAWA G, KITAJIMA Y, UEDA H. Three-dimensional fully plastic solutions for semi-elliptical surface cracks [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1993, 53(3): 457-510.
- [12] 孙春燕. 内压条件下含轴向裂纹管道蠕变断裂参量 C^* 计算方法研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2015.
SUN C Y. Study on calculation method of creep fracture parameters C^* for finite internal axial surface cracks in cylinders [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2015.
- [13] 孙亮, 李培宁. 等效原场应力 J 积分工程估算法 [C]//第五届全国压力容器学术会议论文集. 南京: 中国机械工程学会压力容器分会, 2001: 238-242.
SUN L, LI P N. J estimation method for equivalent primary field stress [C]// Proceedings of the 5th National Conference on Pressure Vessels. Nanjing: Pressure Vessel Branch of Chinese Mechanical Engineering Society, 2001: 238-242.
- [14] SI J, XUAN F Z, TU S T. A numerical creep analysis on the interaction of twin semi-elliptical cracks [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2008, 85(7): 459-467.
- [15] 郑津洋, 董其伍, 桑芝富. 过程设计 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
ZHENG J Y, DONG Q W, SANG Z F. Process design [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.

欢 迎 来 稿

欢 迎 订 阅

欢 迎 刊 登 广 告