

文章编号: 1000-4750(2006)02-0157-06

用 ALE 格式有限元法分析 快中子增殖堆的假想堆芯破损事故

刘 闯, 张 雄, *陆明万

(清华大学工程力学系, 北京 100084)

摘 要: 任意拉格朗日欧拉(ALE)格式具有网格划分灵活、计算精度高、适用范围广的优点, 尤其适用于处理自由液面变化剧烈的快堆假想堆芯破损事故(HCDA)的流固耦合问题。采用 ALE 格式建立了 HCDA 分析的有限元计算公式, 编制了相应的有限元计算程序, 对快堆假想堆芯破损事故进行了流固耦合分析。用国际常用于检验快堆分析程序的 CONT 标准考题进行了验证, 结果与国外多个程序的计算结果相吻合。

关键词: 快堆; 假想堆芯破损事故; 有限元; 任意拉格朗日欧拉格式; 流固耦合

中图分类号: O33; O35 **文献标识码:** A

ALE FINITE ELEMENT ANALYSIS OF HYPOTHETICAL CORE DISRUPTIVE ACCIDENT IN LIQUID-METAL FAST BREEDER REACTOR

LIU Chuang, ZHANG Xiong, *LU Ming-wan

(Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) method has many advantages, such as flexible meshing, high computational precision and wide applicability. It is especially applicable to the fluid-structure interaction problem in hypothetical core disruptive accident (HCDA) of liquid-metal fast breeder reactor. In HCDA the free surface of liquid sodium deforms severely. In present paper, the FEM equations for HCDA analysis are derived based on the ALE formulation. A relevant FEM code is developed and used to analyze the fluid-structure interaction problem of HCDA. The CONT standard examination, which is usually used to check the computational programs for LMFBR, is performed and the numerical results agree well with the available results in the open literature.

Key words: liquid-metal fast breeder reactor (LMFBR); hypothetical core disruptive accident (HCDA); finite element method (FEM); arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) method; fluid-structure interaction

液态金属快中子增殖堆(Liquid-Metal Fast Breeder Reactor 简称 LMFBR 或快堆)是一种具有较强增殖能力的原子反应堆。对等量的天然铀来

说, 快堆能发出的电力约为压水堆的 100 倍。正是由于这显著的优越性, 近年来快堆的研制及其安全性的研究一直受到科学界和工程界的高度重

收稿日期: 2004-02-10; 修改日期: 2004-05-07

基金项目: 国家高技术研究发展(八六三)计划(614-01-02)

作者简介: 刘 闯(1975), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士研究生, 从事计算固体力学研究;

张 雄(1966), 男, 宁夏盐池人, 教授, 博士, 计算力学学报编委, 北京市航空航天学会理事, 主要从事计算动力学的研究工作;

*陆明万(1939), 男, 江苏无锡, 教授, 博士, 北京市压力容器学会理事长、北京市振动工程学会副理事长, 固体力学及计算力学研究方向(E-mail: lmw-dem@tsinghua.edu.cn)。

视。

与我国已有建造和运行经验的压水堆不同,快堆以液态钠作传热介质。钠的化学反应性极强,所以防止因钠反应导致的各类爆炸事故是快堆中特有的、至关重要的核安全审评项目。其中,假想堆芯破坏事故(Hypothetical Core Disruptive Accident,简称 HCDA)是快堆可能发生的、最为严重的事故^[1],它将导致堆芯熔化并形成高压气体爆炸,产生冲击波和钠液飞溅,撞击顶盖(包括旋塞)和主容器。若顶盖、旋塞因此产生过量变形,则燃料棒和控制棒的操作将全部失灵。若主容器因此毁坏,则放射性钠液外流,后果难以设想。所以虽然该事故的发生概率很低,仍被国际上公认为快堆核安全分析与评审中必须首先考虑的最严重的事故。

在早期应用于 HCDA 力学分析的计算程序中,绝大多数的研究工作都采用拉格朗日(Lagrange)描述法(简称 L 格式)或欧拉(Euler)描述法(简称 E 格式)。例如,美国阿贡实验室的 REXCO-HEP 和 REXCO-HT、英国原子能管理局的 ASTARTE、德国的 ARES 和意大利的 EURDYN 等程序都采用拉格朗日描述法,而美国阿贡实验室的 ICECO、法国原子能委员会的 CASSIOPEE、欧洲的 SEURBNUK 和 PISCES-2DELK 等程序则采用欧拉描述法。

在 L 格式中,计算网格固定在物体上并跟随物体一起运动,即网格点与物质点在物体的变形过程中始终保持重合,因此网格点与物质点之间不存在相对运动。这样做能准确描述物体的移动界面,易于处理边界条件,有利于简化控制方程的求解过程,并可跟踪质点的运动轨迹。但在涉及大变形或流体流动问题中,物质网格的变形会导致计算网格的畸变,因而系数矩阵的条件数越来越大,致使计算精度下降、甚至失败^[2]。

在 E 格式中,网格结点固定在空间中,因而在物体变形过程中计算网格保持不变,不会因物体大变形或流动而出现网格畸变。但是变形后边界或界面点的坐标发生变化,对于运动界面处的边界条件和界面耦合条件需要引入较为复杂的数学处理,难于处理流固耦合问题。此外当使用经典迦辽金格式进行空间离散时,由于对流项的影响,有限元方程中相应的系数矩阵是非对称的,而且还可能出现数值震荡现象^[2]。

近年来任意拉格朗日-欧拉描述(Arbitrary

Lagrangian-Eulerian,简称 ALE 格式)得到了普遍重视和应用。在 ALE 格式中网格结点可以独立于物质点和空间点按照人为规定的方式运动。在运动界面上可以指定网格结点随物体一起运动(退化为 L 格式),在离开界面一定距离的域内可以指定网格结点固定在空间不动(退化为 E 格式),在其间可以根据由固定结点逐渐向运动结点过渡、且尽量避免网格畸变的原则人为地指定网格结点的运动方式,因而 ALE 格式能兼有 L 和 E 两种格式的优点,既能很好的捕捉运动界面,又能避免由大变形引起的网格过度畸变,是目前处理流固耦合问题的最佳方案。与此同时,ALE 格式也带来了需要更新网格的附加计算量,但与计算精度的提高相比这是次要的。

用于快堆 HCDA 力学分析的 ALE 型程序有:美国阿贡实验室的 ALICE、NEPTUNE、STRAW、REXALE(三维);法国的 CEA/DMT PLEXUS、EUROPLEXUS 和欧洲的 EURDYN-1M 等^[3-5]。Robbe M.F.等在文献[5]中介绍了法国最新开发的 ALE 型程序 EUROPLEXUS,其理论基础是把快堆内部液态金属钠、氩气覆盖层和由钠反应形成的急剧膨胀的气泡等分区都采用混合介质本构模型来描述。文中给出了 HCDA 演化过程的详细数值模拟结果,并和法国 MARA 系列模型试验(它是法国“超凤凰”快堆 1/30 的缩比例试验模型)的结果以及较老的 SIRIUS 和 CASTEM-PLEXUS 程序的计算结果进行了比较,验证了新程序的精度有较大的提高。

基于 ALE 格式的计算程序在其他科学与工程领域中也得到了广泛的应用。例如,王建军^[6]、徐刚^[7]等将其应用于地震载荷作用下反应堆内自由液面晃动的流固耦合分析;Souli M.等^[8]研究了 ALE 方法中重分网格的处理技术,完成了曲壁油罐中液面晃动问题和水下爆炸波对厚板冲击问题的流固耦合算例以及泰勒杆冲击问题的弹塑性大变形算例,并和 L 格式的计算程序进行了比较。结果表明,对大变形情况 L 格式不仅要求取很小的时间步长,计算十分费时,而且往往出现中途发散,无法计算到底,而 ALE 格式则能稳定地、较快地地完成计算。Hong Luo 等^[9]将 ALE 应用于单相与多相激波管的计算和水下爆炸模拟。Qun Zhang 和 Toshiaki Hisada^[10]用 ALE 格式研究了与结构屈曲有关的流固耦合问题,并对人造心脏的跳动过程进

行了数值模拟。Henning Braess 和 Peter Wriggers^[11]提出一种用于 ALE 格式的鲁棒结点重定位算法,并基于有限元法成功地对浅水波自由液面运动进行了数值模拟。Nomura T.和 Hughes T.J.R.^[12]用基于 ALE 格式的迎风 Petrov-Galerkin 有限元法分析了弹簧-刚体系统在不可压粘性流体中运动的流固耦合问题,计算了圆柱体在流体中的附加质量和附加阻尼,并对由漩涡脱落诱发的圆柱体振动现象进行了数值模拟。

1 HCDA 分析的任意拉格朗日-欧拉 (ALE) 格式

用 X 和 x 分别表示固结在物体上的随体坐标和固定在空间中的空间坐标。有两种描述物体运动规律的基本方法:拉格朗日描述(L 描述)以初始构形 Ω_X 为参考构形,以随体坐标为基本变量来研究物体运动规律,即 $x = x(X, t)$; 而欧拉描述(E 描述)则是以现时构形 Ω_x 为参考构形,以空间坐标为基本变量来研究物体运动规律,即 $X = X(x, t)$, 如图 1 所示。不同于 L 描述和 E 描述, ALE 描述引入一个可以独立运动的网格构形 Ω_ξ 。在物体变形过程中,观察者始终跟随网格构形运动。引入网格坐标 ξ , 则有 $\xi = \xi(X, t)$ 和 $x = x(\xi, t)$ 。网格构形的运动规律可以任意给定,记网格运动速度为 v_m , 当 $v_m \neq v \neq 0$ 时,网格在空间中独立运动,对应于一般 ALE 描述;当 $v_m = 0$ 时,网格在空间中固定不动,退化为 E 描述;当 $v_m = v$ 时,网格随同物体一起运动,退化为 L 描述。

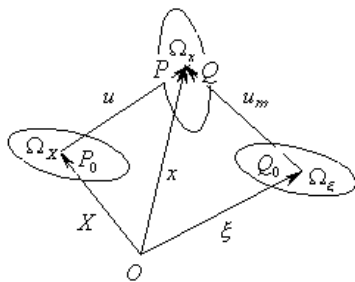


图 1 ALE 描述的映射关系图

Fig.1 Domains and mapping for ALE description

对于不可压粘性流体的流动问题, N-S 方程、不可压条件和应力、应变公式分别为:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) - \nabla \cdot \sigma = \rho f \quad \text{在 } \Omega \times (0, T) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot v = 0 \quad \text{在 } \Omega \times (0, T) \text{ 中} \quad (2)$$

$$\sigma = -pI + 2\mu\varepsilon(v) \quad (3)$$

$$\varepsilon(v) = \frac{1}{2}(\nabla v + (\nabla v)^T) \quad (4)$$

式中, v 和 p 是流体的速度和压力, f 是体力, σ 和 ε 是应力和应变, ρ 和 μ 是流体密度和运动粘度系数。

相应的 Dirichlet 边界条件和 Neumann 边界条件为

$$v = g \quad \text{在 } \Gamma_g \text{ 上} \quad (5)$$

$$n \cdot \sigma = h \quad \text{在 } \Gamma_h \text{ 上} \quad (6)$$

式中 Γ_g 和 Γ_h 是边界 Γ 的互补子集。

初始条件为

$$\begin{aligned} v(x, 0) &= v_0 \\ \nabla \cdot v_0 &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

在上述方程的基础上,可以导出不可压粘性流体的 ALE 格式有限元方程如下:

$$M\dot{v} + Kv + N(v - v_m) - Gp = F \quad (8)$$

$$G^T v = 0 \quad (9)$$

式中, M 为流体质量矩阵, K 为粘性矩阵, N 为非线性对流列阵, G 为梯度算子, F 为集成力列阵,它们的具体表达式为:

$$M = \sum_{e=1}^{N_e} \int \rho N_v^T N_v \, d\Omega \quad (10)$$

$$K = \sum_e \int_{\Omega_e} \mu B_v^T D B_v \, d\Omega \quad (11)$$

$$N = \sum_{e=1}^{N_e} \int \rho N_v^T [N_v(v - v_m) \cdot \nabla] N_v \, d\Omega \quad (12)$$

$$G = \sum_{e=1}^{N_e} \int N_v^T (\nabla \cdot N_p) \, d\Omega \quad (13)$$

$$F = \sum_{e=1}^{N_e} \int \rho N_v^T f \, d\Omega + \sum_{e=1}^{N_h} \int_{\Gamma_{he}} N_v^T h \, d\Gamma \quad (14)$$

$$D = \text{diag}(1, 1, 1, 0.5, 0.5, 0.5) \quad (15)$$

$$B_v = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \end{bmatrix} N_v \quad (16)$$

式中, N_v 和 N_p 分别是单元速度场和压力场的形函数矩阵, N_h 是 Γ_h 上的单元数。 v_m 为网格速度。

在求解以上方程时采用 Newmark-压力修正数值积分方法。

由于 HCDA 的物理过程十分复杂,目前尚没有一个把反应堆物理、热工和力学分析完全耦合在一起的分析方法。在实际进行 HCDA 分析的过程中,首先要建立一个作为力学分析之已知条件的载荷模型。作者采用国际上常用的将 HCDA 过程简化为堆芯处气泡急剧膨胀的“低速爆炸载荷模型”,提出了根据 HCDA 过程中总释放能量的大小用“5%截断准则”来确定载荷模型中的初始压力的计算方案。气泡急剧膨胀导致液面快速上升,这一过程采用本文的 ALE 流固耦合有限元公式,作者开发了相应的计算机程序,并完成了计算。最终液态金属钠的自由液面会出现飞溅现象以及飞溅液团冲击快堆主容器顶盖的问题。关于处理液面飞溅和液团撞击容器顶盖问题的基本理论和分析方法作者将作为专门问题在另一篇论文中介绍。

2 计算实例

图2是欧共体委员会(CEC)容器专家组(CONT)拟定的用于考核各国快堆计算程序的典型池式快堆标准考题(图中的尺寸单位为米)。

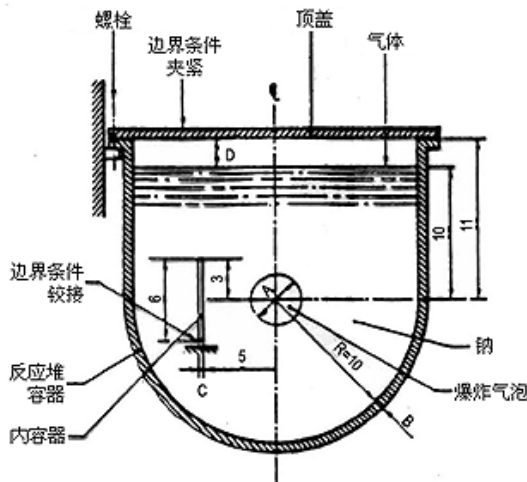


图2 CONT 的典型池式快堆标准考题几何图

Fig.2 Geometry of the CONT benchmark problem

表1给出了CONT制定的标准考题的计算参数,其中除了标准值以外还附有参数的可选变化范围^[3,13]。

CONT 拟定的标准考题是一个 1200 MW 电功率的典型池式快堆。顶盖是固定在地基上的刚性板。主容器上部固定在顶盖上。堆芯区周围有不锈钢的圆柱形内壳。内壳下端在垂直方向固定,径向可以滑动。膨胀的燃料蒸汽按气泡处理。HCDA 的特征参数取为:能量释放率为 600 MJ,气泡初始压

力为 10 MPa,膨胀后降到准静态压力 0.1 MPa。这些假设均被欧共体委员会整体堆芯事故规范(Whole Core Accident Code,简称 WAC)专家组确认为可接受的。

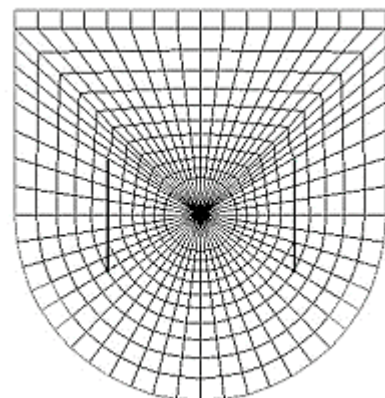
本文采用 ALE 描述格式,编制了相应的计算程序,并按照 CONT 标准考题的标准计算参数完成了数值计算,计算结果如图3。图3(a)为计算网格,采用轴对称模型,其中自由液面和气泡界面为 L 描述,壳壁上垂直方向为 L 描述,切向为 E 描述,而液体内部的单元结点采用插值来确定计算网格的速度 v_m 。为了和国外相应计算结果进行比较,参照国外算例确定划分网格的疏密程度。液体部分为不可压缩的轴对称粘性流体单元,划分单元 282 个,结点数为 320 个。气泡部分为三角形单元,共 28 个单元、30 个结点。上层气体部分为一层四边形单元,8 个单元、18 个结点。固体壳壁为轴对称实体弹塑性单元,共 42 个单元、66 个结点。计算时间步长取为 2 毫秒。计算参数如表 1。

表1 CONT 制定的标准考题计算参数

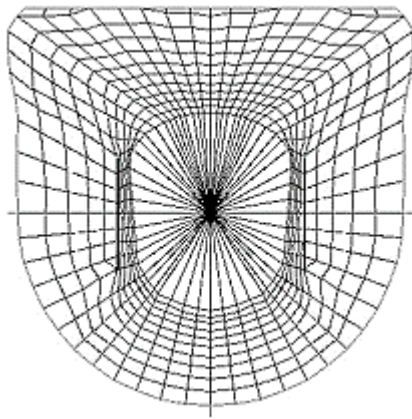
Table 1 Material properties of the CONT benchmark problem

参数名称	标准值	变化范围
气泡能量	600 MJ	200-1000 MJ
气泡压力	10 MPa	5-15 MPa
覆盖气体层的高度	1 m	0.2-1.8 m
顶盖质量	100 MN/m ²	50-150 MN/m ²
屈服应力	105 MPa	70-140 MPa
塑性模量	3 GPa	1.5-4.5 GPa

图3(b)为计算结果的网格图,可以看到网格并没有发生特别大的畸变,形态保持得较好。



(a)



(b)

图 3 计算的初始网格及变形网格

Fig.3 Initial and deformed meshes

图 4 为计算的壳壁变形结果。其中△为 Lagrange 描述计算结果，○和+为 ALE 描述的计算结果，均为 CONT 考题给出的结论，图 4 中的虚线为 CONT 考题允许的计算结果变化范围，■为本程序计算结果，可以看到，与 CONT 考题给出的标准结果吻合得很好。

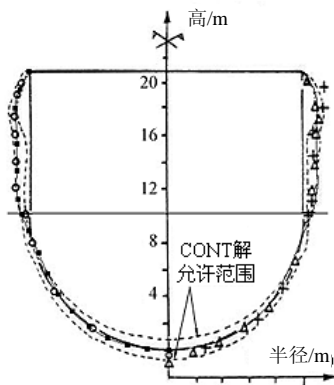


图 4 壳壁变形结果与 CONT 结果的比较(变形放大 5 倍)

Fig.4 Comparison of final tank shapes (displacements magnified 5 times)

在 HCDA 过程中，钠液通过飙升和飞溅，穿过氩气层而撞击顶盖，根据钠液撞击顶盖时传递给顶盖的能量计算出顶盖所受的冲击载荷。图 5 中的“—△—”线是我们得到的结果，与国外的计算结果符合得很好。

表 2 为三种格式所花费的计算时间比较，由于计算过程中液体发生较大的变形，L 格式和 E 格式均难以计算到最后，所以表中所列的是反应进行到 40ms 时所费的机时。计算机配置为 CPU: PIV2.6G 加 512M 内存。表中 ALE 格式的机时较 L 格式和 E 格式都多，继续往后计算时，L 格式和 E 格式的迭

代收敛次数不断增加，效率降低，最后因发散而不能计算到底。

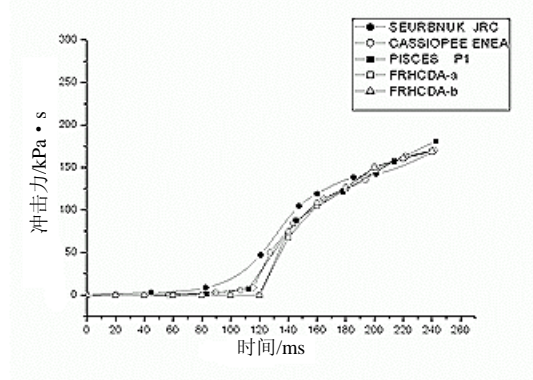


图 5 对顶盖的冲击载荷比较

Fig.5 Comparison of impulses

表 2 三种描述方法的计算时间比较

Table 2 The computational time of 3 descriptions

描述方案	L 描述	E 描述	ALE 描述
计算时间/s	142	167	235

3 结论

通过以上的计算分析可以得到以下结论：

(1) 基于任意拉格朗日-欧拉(ALE)描述方法的力学分析兼有拉格朗日和欧拉两种格式的优点，网格划分灵活、计算精度高、适用范围广，比较适用于处理 HCDA 流固耦合问题。

(2) 比较计算结果可以看到：采用本文编制的基于 ALE 格式的 HCDA 计算程序对标准考题的计算结果和国外快堆 HCDA 分析程序的计算结果无论从曲线的变化趋势或具体数值大小上都符合得较好，因而程序是可靠的，可以应用于实际问题的计算和数值模拟。

参考文献：

[1] 苏著亭, 叶长源, 阎凤文. 钠冷快增殖堆[M]. 北京: 原子能出版社, 1991.
Su Zhuting, Ye Changyuan, Yan Fengwen. Liquid-sodium fast breeder reactor [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1991. (in Chinese)

[2] Chung-Yi Wang. Analysis of high-energy excursions using the implicit continuous-fluid Eulerian containment code (ICECO) [J]. Nuclear Technology, 1980, 51 MID-DEC: 400~413.

[3] F Casadei, A Daneri, G Toselli. Use of PLEXUS as a LMFBF primary containment code for the CONT benchmark problem [A]. Trans. SMiRT-10, E [C]. USA,

1989. 299~304.
- [4] Han Y Chu. Arbitrary Lagrangian-Eulerian method for transient fluid-structure interactions [J]. Nuclear Technology, 1980, 51 MID-DEC: 363~377.
- [5] M F Robbe, M Lepareux, E Treille, Y Cariou. Numerical simulation of a hypothetical core disruptive accident in a small-scale model of a nuclear reactor [J]. Nuclear Engineering and Design, 2003, 223: 159~196.
- [6] 王建军. 快中子增殖堆主容器流固耦合非线性数值分析[D]. 北京: 清华大学工程力学系, 1998.
Wang Jianjun. Nonlinear numeral analysis of fluid-structure interaction of liquid-metal fast breeder reactor [D]. Beijing: Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, 1998. (in Chinese)
- [7] 徐刚. 大型薄壁结构与大晃动粘性流体的流固耦合数值分析研究[D]. 北京: 清华大学工程力学系, 2003.
Xu Gang. Numerical study of fluid-structure interaction between large-scale thin-walled structures and viscous fluid with large sloshing [D]. Beijing: Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, 2003. (in Chinese)
- [8] Souli M, Ouahsine A, Lewin L. ALE formulation for fluid-structure interaction problems [J]. Comput. Methods. Appl. Mech. Engrg., 2000, 190: 659~675.
- [9] Hong Luo, Joseph D. Baum, Rainald Leohner. On the computation of multi-material flows using ALE formulation [J]. Journal of Computational Physics, 2004, 194: 304~328.
- [10] Qun Zhang, Toshiaki Hisada. Analysis of fluid-structure interaction problem with structural buckling and large domain changes by ALE finite element method [J]. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 2001, 190: 6341~6357.
- [11] Henning Braess, Peter Wriggers. Arbitrary Lagrangian Eulerian finite element analysis of free surface flow [J]. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 2000, 190: 95~109.
- [12] Nomura T, Hughes T J R. An arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method for interaction of fluid and a rigid body [J]. Comput. Methods. Appl. Mech. Engrg., 1992, 95: 115~138.
- [13] W Balz J Dufresne. Main Results of Activities Performed by the CEC LMBR Containment Expert Group [A]. Trans.SMiRT-10, E [C], USA, 1989. 269~292.

(上接第 176 页)

- [10] Xu T, Lauridsen B and Bai Y. Wave-induced fatigue of multi-span pipelines [J]. Marine Structures, 1999, 12: 83~106.
- [11] Maltby T C and Calladine C R. An investigation into upheaval buckling of buried pipelines-I. Experimental apparatus and some observations [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1995, 37(9): 943~963.
- [12] Maltby T C and Calladine C R. An investigation into upheaval buckling of buried pipelines-II. Theory and analysis of experimental observations [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1995, 37(9): 965~983.
- [13] Croll J G A. A simplified analysis of imperfect thermally buckled subsea pipelines [J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 1998, 8(4): 283~291.
- [14] Miles D J and Calladine C R. Lateral thermal buckling of pipelines on the sea bed [J]. Journal of Applied Mechanics, 1999, 66: 891~897.
- [15] Viggo T and Alan N. On localized thermal track buckling [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1981, 23(10): 577~587.
- [16] Smith T E and Herrmann G. Stability of a beam on an elastic foundation subjected to a follower force [J]. Journal of Applied Mechanics, June, 1972, 39(2): 628~629.
- [17] Sumer B M and Fredsoe J. A review on vibrations of marine pipelines [J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 1995, (5-2): 81~90.
- [18] Hetenyi M. Beams on elastic foundation [M]. University of Michigan, 1955.