

Richtmyer-Meshkov 不稳定性流体混合区发展的实验研究¹⁾

施红辉^{*1,2)} 卓启威[†]

^{*}(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

[†](中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 使用矩形激波管, 在马赫数分别为 $M = 1.5$ 和 1.7 的条件下实验研究了气/液界面上 (即 Atwood 数 A 接近 1 时) 由 Richtmyer-Meshkov 不稳定性引起的流体混合现象. 得到了气/液界面上 Richtmyer-Meshkov 不稳定性后期流体混合区域宽度随时间的发展呈现出线性关系的结果, 即 $h \propto t$. 比较了不同马赫数和初始扰动下的发展情况, 发现当马赫数增加时, 同一时间混合区域宽度随之增加, 混合区域宽度增长变快; 而相比于波长差别不大的弱多模态初始扰动 (无人为干扰界面), 当界面初始扰动获得随机外界干扰时, 界面混合区域具有较大的宽度以及增长速度. 并且增加激波马赫数和初始扰动多模态性, 流体混合程度更为剧烈.

关键词 Richtmyer-Meshkov 不稳定性, 混合区域宽度, 初始扰动, 激波管

中图分类号: O353.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0459-1879(2007)03-0417-05

引言

当激波经过两种不同密度流体的界面时, 界面获得一个有限的速度, 界面上的扰动随着时间发展, 最终导致两种流体强烈混合的现象称为 Richtmyer-Meshkov(RM) 不稳定性^[1,2]. 它无论在自然现象中还是技术应用上都具有重要的研究价值^[3]. 当初始扰动波长单一, 称之为单模态扰动, 而在实际问题中初始扰动的波长分布往往是多模态的和随机的. 根据扰动振幅 a 与扰动波长 λ 的比较, 当 $a \ll \lambda$ 时扰动线性发展, 随着 a 逐渐增大, 扰动增长进入非线性阶段, 波形界面逐渐发展形成尖钉和气泡, 由于受到 Kelvin-Helmholtz 不稳定性的影响, 界面扭曲变形、破裂, 微小部分流体相互渗透, 尤其是多模态扰动的时候, 气泡之间还会发生竞争和吞并现象, 两种流体最终会在界面处形成湍流混合.

以往的实验主要针对气/气界面^[4~7], 然而对于混合区域宽度随时间幂率增长的指数值却很不统一, 甚至可以说非常分散, 介于 0.25 和 1 之间^[8]. 这主要是由于在构造气/气界面时往往在两种流体之间使用隔膜隔开, 在激波经过时隔膜破裂对流场

会造成不可避免的影响. 施红辉等^[9] 在圆柱形激波管中研究了气/液界面上 RM 不稳定性后期形成的尖钉和气泡的发展规律, 本文使用垂直放置的矩形激波管和数字摄影系统研究了气/液界面上 RM 不稳定性后期阶段形成的流体混合现象.

1 实验装置和方法

图 1(a) 是实验装置的照片, 而图 1(b) 是实验装置示意图. 装置主体为一垂直放置的矩形激波管, 内方边长 35 mm. 主要有 3 部分组成: 第 1, 位于顶部长 200 mm, 充满氢气的高压气体室; 第 2, 位于中部长 750 mm, 处于大气状态的低压室; 第 3, 位于底部长 200 mm, 向外界开放的液体排放室. 在排放室下面应设置一容器并放入海绵等物体, 防止在接收液体时发生飞溅. 激波管的低压室又可分为两个部分: 上部是长 500 mm 的不锈钢制成的不透明段, 下部是长 250 mm 的一对侧面使用透明有机玻璃、另一对侧面使用不锈钢制成的观察段. 在观察段透明的有机玻璃壁面两侧分别放置光源和数字摄影仪. 摄影仪使用德国制 Basler-A310b 型 CCD 摄像头及其软件系统, 每秒可以拍摄 100 张图片, 摄影仪所拍摄

2006-02-10 收到第 1 稿, 2006-11-06 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金 (10672144), 中国科学院高温气体动力学重点实验室开放课题及中国科学院“百人计划”基金资助项目.

2) E-mail: hhshi@zstu.edu.cn

图片会即时存入与其相联接的计算机以供处理. 由于拍摄要求准确记录运动界面位置, 经过调试后实验中将曝光时间设为 $20\mu\text{s}$; 这样当界面以 1 m/s 速度运动时, 误差仅为 0.02 mm , 不会影响到数据测量的准确性. 但当曝光时间很短时, 在自然光线下, 摄影仪 CCD 采集不到足够感光点, 照片会很模糊. 此时就需要添加辅助光源, 本实验采用长 300 mm , 可

调节的白炽灯管, 实验时调节灯管亮度, 直至取得满意的结果. 在高压室和低压室的接口处用厚度为 $36\mu\text{m}$ (或 $60\mu\text{m}$) 的铝膜隔开, 低压室和排放室的接口处使用厚度为 $15\mu\text{m}$ 铝膜隔开, 并且要在上面放上一块厚 1 cm 的聚四氟乙烯方板, 目的是为了使得液柱下端在运动过程中能够始终保持水平.

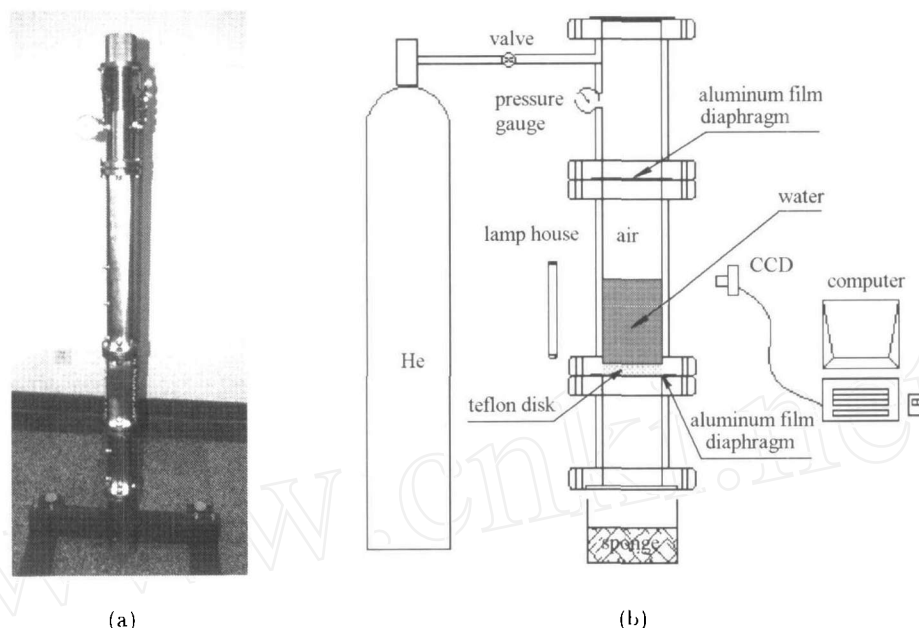


图 1 实验装置照片及示意图

Fig.1 Schematic and photo of experimental device

本文在构造气 / 液界面时使用空气和水, 25°C 时其密度分别为: $\rho_1 = 1.2 \times 10^{-3}\text{ g/cm}^3$, $\rho_2 = 1.0\text{ g/cm}^3$. 具体实验方法如下: (1) 安装固定两处铝膜, 在观察段注入适量的液体水, 打开光源, 启动计算机; (2) 旋开高压气瓶和高压室之间的阀门, 向高压室充气, 高压室内压强由压力表读得, 在达到预计破膜压强之前启动数字摄影仪, 而后继续充气直至破膜, 并记下破膜瞬间的压强值; (3) 实验结束后, 关闭阀门, 保存数据. 根据激波管理论^[10], 实验中破膜压强 0.37 MPa 和 0.56 MPa 分别对应激波马赫数为 1.5 和 1.7 , 而且激波自上而下到达界面时经过距离约为 $15D$ (D 为激波管内径), 已经发展为平面激波. 为了获得不同的初始扰动, 实验分为两种: (1) 激波管被紧固在支架上, 在无人为干扰的情况下 (液面处于静止状态) 进行实验. 我们称这种情况下的界面初始扰动为弱多模态初始扰动; (2) 适当调整激波管的固紧程度, 用外力敲击振动激波管后再进行实验. 我们称这种情况下的界面初始扰动为强

制初始扰动. 一般情况下, 外力作用的随机性将反映在液面的随机运动上.

2 实验结果与分析

2.1 混合区域宽度

图 2 和图 3 分别是当激波马赫数为 1.5 和 1.7 时, 弱多模态初始扰动情况下拍摄的 RM 不稳定性照片; 照片中上部是空气, 下部是水, 激波自上而下运动. 流体中没有添加染色剂. 图 4 是当激波马赫数为 1.5 时, 强制初始扰动情况下拍摄的 RM 不稳定性照片, 界面仍然由空气 / 水组成, 激波自上而下运动. 将 3 组实验分别记作 Exp1, Exp2 和 Exp3, 3 组照片中相邻两张照片之间的时间间隔皆为 10 ms . 由于尖钉和气泡 (重流体侵入轻流体部分称为尖钉, 反之称作气泡) 运动方向相反, 界面变形过程中无疑会受到 Kelvin-Helmholtz 不稳定性的影响, 而且对于尖钉来说, 受到表面张力的作用也更为明显, 其顶部会逐渐发生断裂、破碎, 图 2 中的照片 (f) 以及图 3

中照片 (c) 都可以清晰地看到这一点. 图 3(c) 中的黑色方框示出了尖钉破碎后产生的液滴. 从图 4 可以看出, 强制初始扰动在气 / 液界面上诱导了随机分布的扰动波长和振幅不均匀的形状. 图 4 中示出了这一随机的运动导致的形状更为复杂的界面, 即由于不同波长气泡之间发生的竞争和吞并现象. 最终两种流体在界面处会发生不同程度的混合现象.

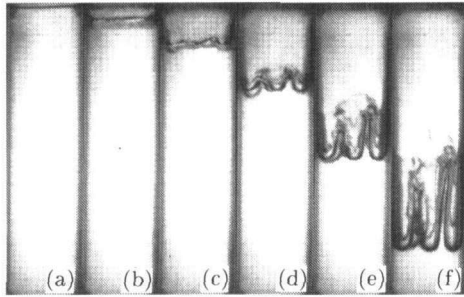


图 2 马赫数 1.5 时弱多元扰动实验照片 ($\Delta t = 10$ ms)
Fig.2 Photo of weak multimode experiment when Mach number is 1.5 ($\Delta t = 10$ ms)

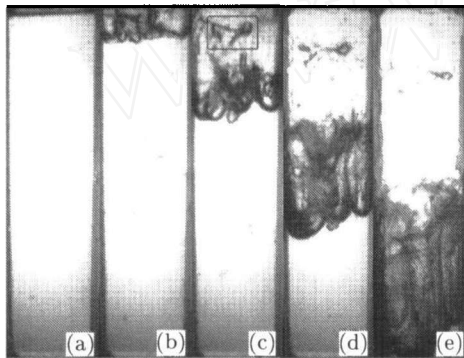


图 3 马赫数 1.7 时弱多元扰动实验照片 ($\Delta t = 10$ ms)
Fig.3 Photo of weak multimode experiment when Mach number is 1.7 ($\Delta t = 10$ ms)

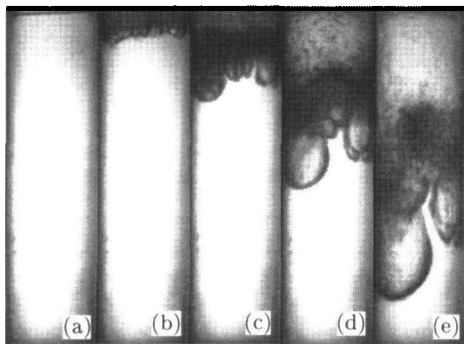


图 4 马赫数 1.5 时随机扰动实验照片 ($\Delta t = 10$ ms)
Fig.4 Photo of random initial perturbations experiment when Mach number is 1.5 ($\Delta t = 10$ ms)

对于流体混合, 定义尖钉顶端和气泡顶端之间为混合区域. 在多模态扰动中, 由于不同波长的扰动具有不同的发展速度, 混合区域宽度并不均匀, 本文采用测量不同位置进行取平均值的方法得到混合区域宽度. 3 组不同实验中的界面位置 Z 和混合区域宽度 h 随时间 t 的变化关系如图 5、图 6 所示. 除去重力加速度的影响, 界面经过一段时间的加速, 约在 20 ms 以后将匀速直线运动. 为了解 RM 不稳定性后期混合区域宽度随时间的变化规律, 首先要来讨论一下 Rayleigh-Taylor(RT) 不稳定性^[11]. 这两种不稳定性有着很大的联系, 只是前者为界面受

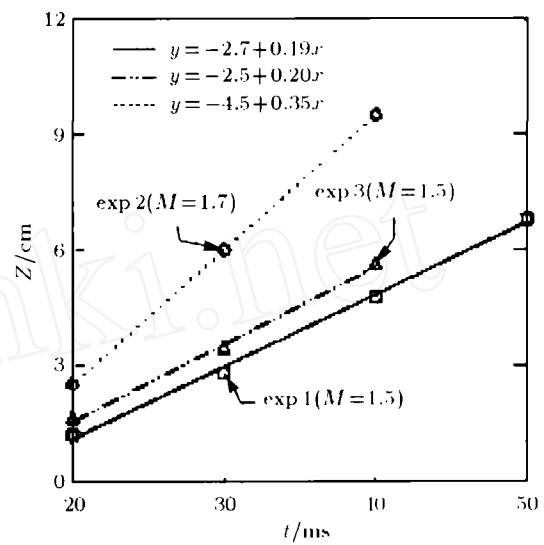


图 5 界面位置随时间变化关系
Fig.5 Relationship between Z and t

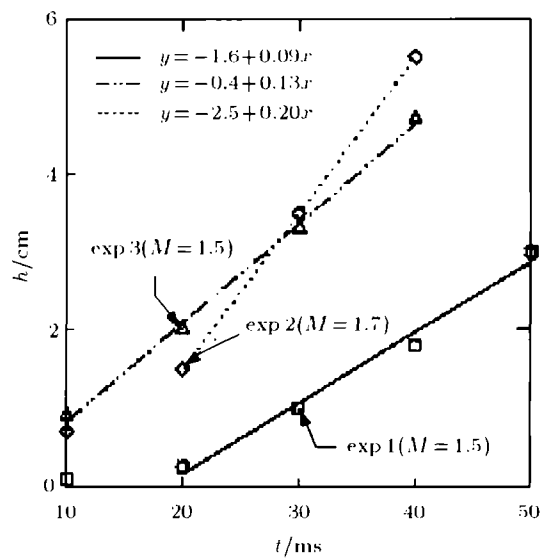


图 6 混合区域宽度随时间变化关系
Fig.6 Relationship between h and t

到瞬时加速的情况下发生的不稳定性, 后者为界面受到持续加速的情况下发生. 对于 RT 不稳定性后期形成的混合区域宽度 h , 由文献 [12] 可知

$$h = \alpha A g t^2 \quad (1)$$

其中 α 为一常数, A 即 Atwood 数, $A = (\rho_2 - \rho_1)/(\rho_2 + \rho_1)$, ρ_2 为重流体密度, ρ_1 为轻流体密度, g 是加速度; 在激波加速的情况下, g 可以看作 δ 函数, 这样在 RM 不稳定性中可以得到 [13]

$$h = 2\alpha \Delta v A t \quad (2)$$

其中 Δv 为激波经过界面时, 界面获得的速度. 但这种变换仅适用于激波经过界面的瞬间, 也就是 RM 不稳定性的线性阶段. 而对于后期非线性阶段, Ramshaw [14] 使用拉格朗日能量公式推导出零耗散时混合区域宽度

$$h = \beta (K/\bar{\rho})^{1/3} t^{2/3} \quad (3)$$

β 只与 A 有关, K 为单位面积界面在激波经过时获得的能量, $\bar{\rho} = (\rho_1 + \rho_2)/2$. 也就是 $h \propto t^\theta$, 在没有能量耗散的情况下 $\theta = 2/3$. 从图 6 可以看出, 本实验中不同条件下气 / 液界面上 RM 不稳定性后期的混合区域宽度皆满足 $h \sim t$, 这比 Ramshaw 的 $2/3$ 略大. U. Alon 等人 [15,16] 没有直接研究混合区域宽度 h , 而是将 h 分为尖钉高度 h_s 和气泡高度 h_b , 得到在任何 A 的情况下, $h_b \propto t^{0.4}$, 而当 $A = 1$ 时, $h_s \propto t$. 由此可知在 20 ms 以后, 气泡高度相对于尖钉高度仅为其十分之一, 此时混合区域宽度 $h \propto h_s \propto t$.

2.2 不同实验之间的比较

图 2 和图 3 都是在界面上初始扰动波长差别不大的弱多模态扰动情况下拍摄的照片, 这两组实验中初始扰动相同, 只是激波马赫数从 1.5 增加到 1.7. 当气 / 液界面在实验前处于静止的情况下, 矩形激波管内的 4 个直角处, 不锈钢壁面和液面之间的接触角, 构成了 4 个初始扰动源, 尽管有机玻璃壁面几乎与界面成 90° 而使得这里的扰动可以忽略不计. 从图 5 可以看出, 马赫数从 1.5 增加到 1.7 时, 界面获得了更大的加速度, 在匀速运动阶段具有更大的速度, 进而混合区域也产生了不同的发展情况. 如图 6 所示, 马赫数 1.7 时界面混合区域同一时间具有较大的宽度, 且增长速度较快. 同时比较图 2 和图 3, 由于马赫数增加时尖钉具有较大的发展速度,

受到 Kelvin-Helmholtz 不稳定性 and 表面张力作用的影响更为明显, 很快出现了尖钉断裂、破碎, 混合程度也更为剧烈.

图 2 和图 4 所拍摄的实验使用了相同的激波马赫数, 而后者界面上的扰动却是随机的强制初始扰动. 虽然两实验中界面在激波的冲击下获得的速度 Δv 应该差别不大, 但是混合区域发展形貌却存在很大的不同. 公式 (2) 认为, 在随机扰动中, 由于初始的扰动在发展过程中不断出现竞争和吞并现象, 初始扰动的波长分布将被忘记, 所以混合区域宽度和初始扰动的波长没有关系. 但如图 6 所示, 事实上并不是这样的, 波长随机分布的界面无论是在混合区域宽度, 还是混合区域宽度的增长速度上相对于波长差别不大的初始扰动界面 (无人为干扰界面) 都要更大. 同时, 在引入强制初始扰动之后, 不同波长扰动互相吞并, 其混合程度也较剧烈.

如式 (3) 所述, 这些差别显然和激波经过界面时界面上扰动获得的能量有关. 当激波经过界面时, 会在界面上沉积涡量, 涡量诱导界面发展变形. 扰动增长和沉积的涡量直接相关. 如图 7 所示, 压强梯度指向激波来流方向, 密度梯度则垂直于界面, 从密度低的一方指向密度大的一方. 由 Navier-Stokes 方程出发所导出的速度环量的随体导数公式在理想流体不正压, 外力有势的情况下可简化为

$$\frac{d\Gamma}{dt} = \int_s \frac{1}{\rho^2} (\nabla\rho \times \nabla p) \cdot dS$$

可见 $\nabla\rho \times \nabla p$ 决定了涡通量的变化. 当激波马赫数较大, 扰动波长较小时, $\nabla\rho \times \nabla p$ 都具有较大值, 所以界面上的扰动获得了更多的能量, 混合区域宽度越大, 混合越剧烈.

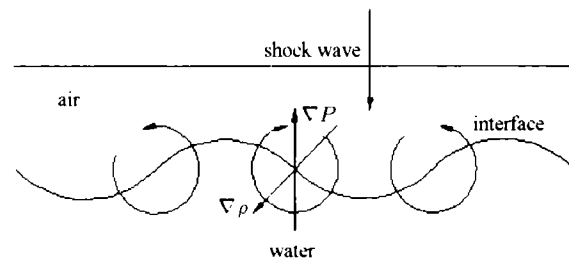


图 7 激波与界面作用示意图

Fig.7 Schematic showing the shock-interface interaction

3 结 论

(1) 气 / 液界面上 RM 不稳定性后期出现的流体混合现象中, 混合区域宽度 $h \propto t$, 激波马赫数以及初始扰动改变时, 没有改变这一发展规律;

(2) 在初始扰动相同的情况下, 激波马赫数略有增加时, 同一时间的混合区域宽度随之变大, 混合区域宽度增长变快. 马赫数的增加加速了尖钉的断裂和破碎, 使得气液两种流体之间具有较强混合强度;

(3) 相同马赫数时, 随机的强制初始扰动的界面相对于弱多模态扰动的界面具有较大的混合区域宽度和增长速度, 混合也更为强烈.

参 考 文 献

- 1 Richtmyer RD. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids. *Commun Pure Appl Math*, 1960, 13: 297~319
- 2 Meshkov EE. Instability of the interface of two gases accelerated by a shock wave. *Fluid Dynamics*, 1969, 4: 101~104
- 3 王继海. 二维非定常流和激波. 北京: 科学出版社, 1994. 348~478 (Wang Jihai. Two-Dimensional Unsteady Flow and Shock Waves. Beijing: Science Press, 1994. 348~478 (in Chinese))
- 4 Sadot O, Erez L, Alon U, et al. Study of nonlinear evolution of single-model and two-bubble interaction under richtmyer-meshkov instability. *Physical Review Letters*, 1998, 80(8): 1654~1657
- 5 Brouillette M, Sturtevant B. Growth induced by multiple shock waves normally incident on plan gaseous interface. *Physica D*, 1989, 37: 248~263
- 6 Houas L, Chemouni I. Experimental investigation of Richtmyer-Meshkov instability in shock tube. *Physics of Fluids*, 1996, 8: 614~627
- 7 Poggi E, Thoremby MH, Rodriguz G. Velocity measurements in turbulent gaseous mixtures induced by Richtmyer-Meshkov instability. *Physics of Fluids*, 1998, 10: 2698~2700
- 8 Brouillette M. The Richtmyer-Meshkov instability. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2002, 34: 445~468
- 9 施红辉, 岸本薰实. 瞬态加速液柱的流体力学问题研究. 爆炸与冲击, 2003, 23(5): 391~397 (Shi Honghui, Kishimoto Masami. Fluid mechanics in the transient acceleration of a liquid column. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(5): 391~397(in Chinese))
- 10 White DR. Influence of diaphragm opening time on shock-tube flows. *J Fluid Mech*, 1958, 4: 585~599
- 11 Taylor GI. The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. I *Proc R Soc Lond A*, 1950, 201: 192~196
- 12 Youngs DL. Numerical simulation of turbulent mixing by Rayleigh-Taylor instability. *Physica D*, 1984, 12: 45~58
- 13 Mikaelian KO. Turbulent mixing generated by Rayleigh-Taylor and Richtmyer-Meshkov instability. *Physica D*, 1989, 36: 343~357
- 14 Ramshaw JD. Simple model for linear and nonlinear mixing at unstable fluid interfaces with variable acceleration. *Physical Review E*, 1998, 58: 5834~5840
- 15 Alon U, Hecht J, Mukamel D, et al. Scale invariant mixing rates of hydrodynamically unstable interface. *Physical Review Letters*, 1994, 72: 2867~2870
- 16 Alon U, Hecht J, Ofer D, et al. Power law and similarity of Rayleigh-Taylor and Richtmyer-Meshkov mixing fronts at all density ratios. *Physical Review Letters*, 1995, 74(4): 534~537

EVOLUTION OF THE FLUID MIXING ZONE IN RICHTMYER-MESHKOV INSTABILITY AT A GAS/LIQUID INTERFACE¹⁾

Shi Honghui*^{†,2)} Zhuo Qiwei[†]

* (College of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310018, China)

[†] (Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract This paper presents an experimental study on fluid mixing induced by Richtmyer-Meshkov (RM) instability at an interface between water and air using a rectangular shock tube. The length of mixing zone is found to obey a linear law $h \propto t$ when the Atwood number approaches to 1 under different Mach numbers and initial perturbations. However, the length of mixing zone increases when Mach number increases from 1.45 to 1.7, also increases when initial perturbations are random., and the mixing goes more tempestuously.

Key words Richtmyer-Meshkov instability, mixing zone, initial perturbations, shock tube

Received 10 February 2006, revised 6 November 2006.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (10672144), the Open Research Funding of LHD of Institute of Mechanics of CAS and the "Bairen Plan" of Chinese Academy of Sciences.

2) E-mail: hhshi@zstu.edu.cn