

黏性液体中激光空泡脉动特性的 理论和实验研究*

赵 瑞¹⁾ 徐荣青²⁾ 沈中华¹⁾ 陆 建¹⁾ 倪晓武^{1)†}

1) 南京理工大学应用物理系, 南京 210094)

2) 江苏科技大学电子信息学院, 镇江 212003)

(2005 年 12 月 30 日收到, 2006 年 1 月 26 日收到修改稿)

通过自行研制的光偏转测试系统对黏性液体中激光空泡脉动特性进行了实验, 获得了激光等离子体空泡前两次脉动全过程, 从而判定了空泡在脉动过程中对应的最大和最小泡半径, 并将不同黏性系数下空泡脉动结果与基于空泡溃灭理论的计算结果进行了对比. 结果表明, 液体黏性对空泡生存周期、空泡半径, 以及泡壁的运动速度等均有影响. 受液体黏性影响, 空泡膨胀或收缩过程明显变缓, 其相应的生存周期也越长. 这一研究结果不仅可促进空化研究的深入, 也可为合理利用空化现象提供参考.

关键词: 激光泡, 脉动特性, 黏性, 光纤传感器

PACC: 4755B

1. 引 言

空泡现象是高速运动的液体所特有的物理现象, 它的初生与发展取决于很多复杂的因素. 空化现象的存在对水利机械设备、高速运动物体的水动力特性等有着重要的影响, 如降低机械的性能, 侵蚀破坏液力机械的叶片等. 因此, 空化现象一直是人们研究的热点问题之一^[1-4].

空化问题的理论研究最早可追溯到 1917 年 Rayleigh 提出的球对称空泡运动方程, 由该方程可以求出空泡溃灭时周围流场内压强的瞬态分布以及泡径随时间的变化规律^[5]. 后来人们对空泡溃灭研究逐渐深入, 但在很大程度上仍局限于 Rayleigh 方程或在无黏流场中求解, 这显然离解决实际问题尚有一定的距离. 考虑到液体黏性是影响空泡脉动的重要因素之一, 尤其对空泡膨胀(收缩)最后阶段的作用效果尤为明显, 它将直接决定空泡的最小泡半径、收缩周期和收缩的剧烈程度. 目前, 国内外关于液体黏性对空泡脉动影响的研究尚不多见.

在对空泡及空蚀效应的实验检测方面, 文献报

道的非扰动诊断的方法主要有拍摄阴影图的高速摄影法^[6,7]、条纹摄像法^[8]、Mach-Zehnder 瞬态干涉法^[9]和光束偏转法^[10,11]等. 其中高速摄影、干涉法和纹影法使空泡溃灭研究取得了很大进展, 但尚存在一些难以逾越的困难, 如空泡溃灭过程中出现凹陷, 上述方法就不易观察到其内部的后发展情况. 本文自行研制了基于光偏转原理的光纤传感器, 其中利用单模光纤替代一般光偏转法中所用的小孔光阑或刀口作为位置敏感探测器件, 从而提高了光束偏折探测系统的灵敏度. 相比较其他探测装置而言, 该装置具有造价低、结构简单、调节方便、频响高等诸多优点. 本文采用该传感器探测了在不同黏性液体中单空泡脉动规律, 进而结合空泡溃灭理论得到液体黏性系数对空泡脉动特性的影响. 该研究结果不仅可以促进相关检测技术的发展和空化研究的深入, 从而避免空化可能带来的危害; 同时也可为合理利用空化现象提供理论依据.

2. 基本理论方程及其求解

在脉动过程中, 空泡将在液体惯性, 以及周围液

* 国家自然科学基金(批准号: 60578015, 60208004), 江苏省自然科学基金(批准号: 05KTB510028), 教育部高校优秀青年教师奖励计划和博士点基金(批准号: 20050288025)资助的课题.

† 通讯联系人, E-mail: nxw@mail.njust.edu.cn

体和空泡内压力差的作用下产生、发育、溃灭和反弹等行为.在忽略液体表面张力的情况下,研究无穷域的静止状态、不可压缩黏性流体中球形单空泡的生长和溃灭运动.空泡壁的运动方程可以表示为^[5]

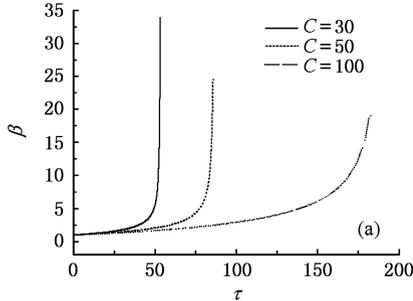
$$R \cdot \dot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left(P_R - P_\infty - 4\mu \frac{\dot{R}}{R} \right), \quad (1)$$

式中 P_R 为泡内压强; P_∞ 为液体中无限远处的压强; σ 为液体的表面张力系数; ρ 为液体的密度; R 为空泡半径; \dot{R} 为泡壁的运动速度; \ddot{R} 为泡壁运动的加速度; μ 为液体的黏性系数.

为了考虑液体黏性对空泡脉动的影响,假设泡内含气量 P_R 是常数.显然,当 $P_\infty > P_R$ 时,气泡收缩;反之,当 $P_\infty < P_R$ 时,气泡膨胀.引进无量纲分析方法将方程无量纲化:长度尺度为 R_0 ,时间尺度为 $R_0/\sqrt{\rho(P_\infty - P_R)}$ ^[12].

在空泡压缩情况下,设 $\beta = \frac{R}{R_0}$, $\tau = \frac{t}{R_0}$

$$\times \sqrt{\frac{P_\infty - P_R}{\rho}}, C = \frac{4\mu}{R_0 \sqrt{\rho(P_\infty - P_R)}}; \text{则(1)式可改}$$



写为无量纲方程

$$\beta \ddot{\beta} + \frac{3}{2} \dot{\beta}^2 = -1 - \frac{C\dot{\beta}}{\beta}. \quad (2)$$

在空泡膨胀情况下,令 $\beta = \frac{R}{R_0}$, $\tau = \frac{t}{R_0}$

$$\times \sqrt{\frac{P_R - P_\infty}{\rho}}, C = \frac{4\mu}{R_0 \sqrt{\rho(P_R - P_\infty)}}; \text{此时(1)式可}$$

改写为

$$\beta \ddot{\beta} + \frac{3}{2} \dot{\beta}^2 = 1 - \frac{C\dot{\beta}}{\beta}. \quad (3)$$

当初始条件 $\tau = 0$ 时 $R = R_0$, 则有

$$\beta = 1, \quad (4)$$

$$\dot{\beta} = \ddot{\beta} = 0. \quad (5)$$

根据给定的初始条件(4)和(5),利用(2)和(3)式可以计算出不同黏性液体中空泡膨胀及收缩情况(如图1所示),从而得到黏性系数对空泡脉动特性的影响.由该图可见,液体黏性的作用使气泡收缩时间延长,且黏性系数越大,空泡收缩越缓慢,同时,黏性对气泡膨胀运动起到减缓作用.

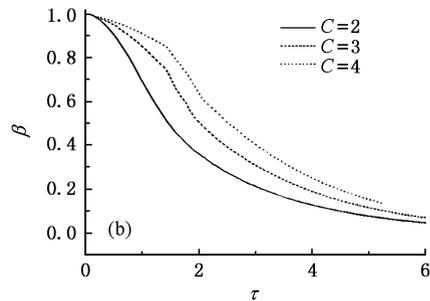


图1 液体黏性对空泡脉动影响的数值计算结果 (a)膨胀情况 (b)压缩情况

3. 实验装置与结果分析

3.1. 实验装置

实验装置示意图见图2.调Q固体Nd:YAG脉冲激光器1,可输出波长1.06μm、脉宽10ns(FWHM)最大能量500mJ的单模(TEM₀₀)激光束;2为分光镜,其反射部分光由PIN光电二极管16(上升时间100ps)采集,作为示波器采集数据的同步触发信号;通过衰减片组3可以调节作用于靶材所需的激光能量而不改变其空间和时间分布;元件4(凹透镜,焦距50mm)和5(凸透镜,焦距150mm)构成了

光学扩束系统,其作用是将脉冲激光扩束并垂直聚焦于液体中铝靶6的表面上;元件7为尺寸100mm×100mm×150mm,装有不同配比甘油的水槽.实验时室温15℃,不同甘油配比(容积配比)液体的黏度如表1所列^[12].

表1 不同黏度液体的黏滞系数 μ

容积	蒸馏水	100	80	60	40	20	0
配比	甘油	0	20	40	60	80	100
黏滞系数 μ		0.0113	0.0314	0.0595	0.2052	0.69	1.10
(10 ³ kg/m ³)							

图2中用于测试空泡及其脉动特性的传感器是基于光偏转原理的光纤传感器,即由He-Ne激光器

8、聚焦透镜 9、显微物镜 10、干涉滤波片 11、光纤调节架 12、单模光纤 13 以及光电倍增管 14 等组成. 探测组件 8—12 被固定在二维可移动平台 17 上, 如图 2 中虚框所示. 探测光束与靶面之间的距离可直接从二维平台上的刻度尺读取, 该平台沿靶面法线方向的移动精度为 $10\mu\text{m}$.

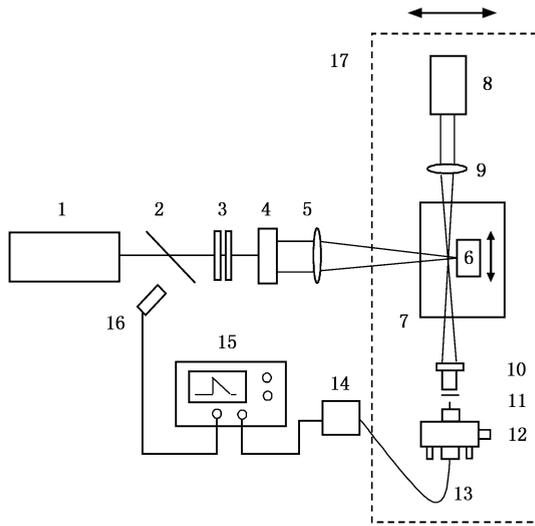


图 2 基于光偏转原理的实验装置示意图

He-Ne 激光器发射的波长 $0.63\mu\text{m}$ 、功率 5mW 的连续激光, 通过焦距为 50mm 的透镜聚焦于靶面焦点的正前方, 该光束与冲击波或空泡相互作用时产生的微小改变也将使原光束传播方向发生偏转, 再通过 20 倍的显微物镜聚焦于单模光纤的端面上. 当然, 光纤与探测光的耦合可通过光纤微调架进行调节. 光电倍增管则用来将光纤出射的光强变化转变成电信号输出至数字存储示波器 15. 图形的分析和处理则通过计算机来完成.

实验中铝靶被预先置于作用激光的前焦区, 同时采用光学扩束装置以增大会聚角, 这样可有效地防止液体先被激光击穿, 从而保证初始的激光等离子体空泡具有较好的半球状, 且其泡心始终位于靶材表面. 当这束强脉冲激光聚焦于液体中靶材时, 会在作用区产生等离子体、冲击波和空泡等一系列现象. 为研究激光空泡脉动规律, 我们通过移动二维平台 (移动方向如图 2 中箭头所示) 可以调节探测光与靶表面之间的距离, 并将空间“零”位置定义为当探测光刚好被靶材挡去一半时所对应的位置, 即输出信号幅值为最大信号的一半 (这可以直接从示波器上的波形幅值进行判定).

3.2. 测试方法

图 3 给出了根据数值模拟结果^[13]得到的脉动空泡半径随时间变化关系示意图. 结合我们实验时将探测光向着靶面移动过程中, 探测光将经过不同的空泡区域. 实验结果表明: 随着探测距离 d (探测光束到靶材表面) 的不同, 所得到的光偏转信号也将发生变化. 具体可分为几种情况: 当探测光离靶面距离 d 大于最大泡半径 R_{max} 时, 信号中只有冲击波脉

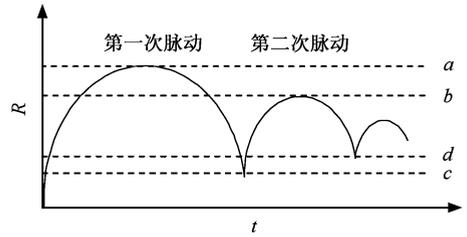


图 3 探测光通过脉动空泡的示意图

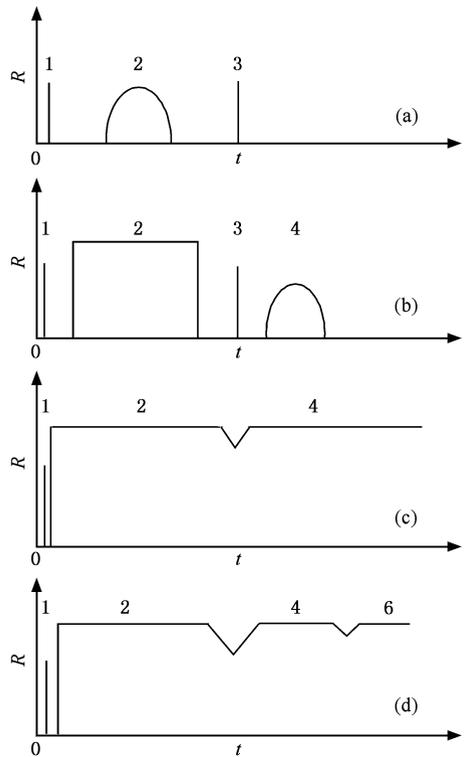


图 4 不同阶段典型光偏转信号

冲信号, 包括激光等离子体冲击波和空泡溃灭时发出的冲击波信号, 并无因探测光经过空泡而产生的信号. 当探测距离 d 移至刚好小于最大泡半径 R_{max} 时, 如图 3a 所示位置时, 将出现由空泡引起的光偏转信号, 其波形示意图对应图 4(a). 因此, 在实验中

以恰好出现空泡第一次脉动所引起的光偏转信号为依据,判定该位置 d 即为空泡最大泡半径 $R_{1\max}$. 当探测光继续向着靶面移动时,由于泡内折射率梯度的增大使得经过空腔的探测光逐步偏离光纤芯径,进而引起空泡光偏转信号趋于饱和. 当探测光刚好移至图 3b 位置,信号中将出现空泡二次脉动所引起的偏转信号,此处即对应于 $R_{2\max}$. 反之,探测光由靶面移向远处. 随着探测距离 d 增大至最小收缩泡半径 $R_{1\min}$ 时,由于介质折射率发生突变,造成在饱和信号上首先出现一个“凹陷”,如图 3c 所示. 从该“凹陷”出现的时间可以判定该处对应的空间位置为空泡第一次脉动过程中收缩的最小泡半径 $R_{1\min}$. 当探测距离继续增大到图 3 位置 d 时,饱和信号上又出现第二个“凹陷”,根据其出现时间可知其对应于空泡第二次收缩的最小泡半径 $R_{2\min}$. 仔细调节探测光

的位置,以标志性的信号出现概率为 1/2 处的位置判定为各次脉动所对应的最大或最小泡径,同时根据实验获得的序列图还可直接得到各次脉动所对应的空泡生存周期.

由此可见,采用该光纤传感器不仅可以得到在不同黏性液体中单空泡膨胀和收缩运动全过程对应的波形,同时还可以得到空泡各次脉动过程中对应的最大、最小泡半径及生存周期.

3.3. 实验结果与讨论

在实验中,脉冲激光单脉冲能量为 60mJ,探测距离从 0mm 变化到 3mm,容积配比为 0, 20%—100% 的甘油纯净水的混合溶液. 为了消除随机误差,实验中空间每一探测距离平均采样 5 次,实验数据为 5 次的平均值.

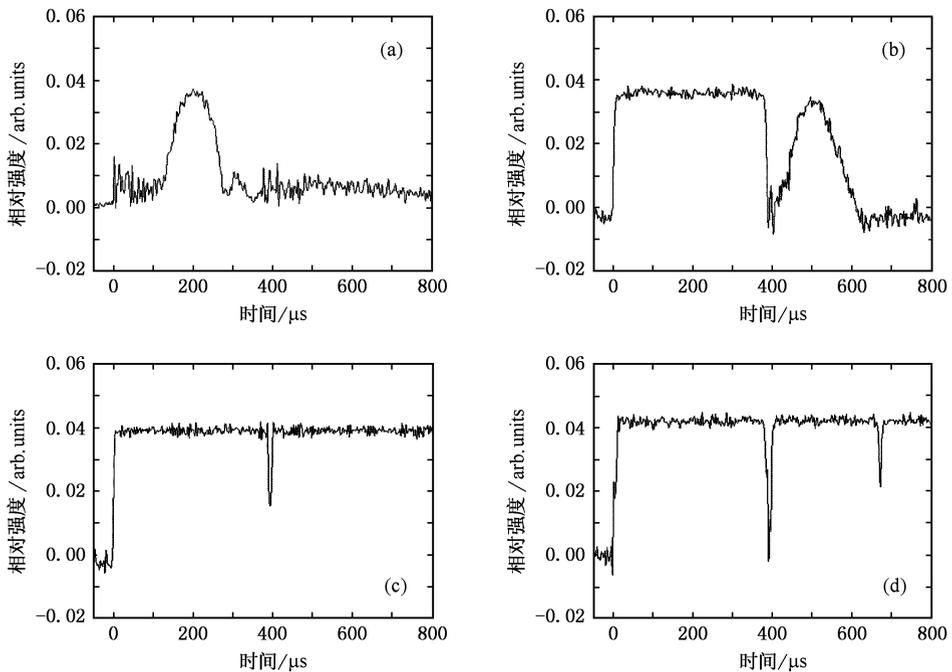


图 5 实验获得的光偏转典型信号 (a) $d = 2.099\text{mm}$ (b) $d = 1.445\text{mm}$ (c) $d = 0.428\text{mm}$ (d) $d = 0.360\text{mm}$

图 5 为 20% 甘油配比溶液中激光等离子体空泡脉动序列波形中的典型图. 根据 3.2 节阐述的测试方法,测得 20% 甘油配比溶液中激光空泡前两次脉动过程对应的最大和最小半径及其对应的生存周期分别为 $R_{1\max} = 2.099\text{mm}$, $R_{1\min} = 0.428\text{mm}$; $R_{2\max} = 1.445\text{mm}$, $R_{2\min} = 0.360\text{mm}$; $T_1 = 397\mu\text{s}$, $T_2 = 272\mu\text{s}$.

在实验获得的激光等离子体空泡随探测距离变化的发展序列波形基础上,通过跟踪各次脉动中空

泡膨胀壁和收缩壁到达的时间,可以得到空泡半径随时间的变化关系,即 $R = R(t)$ 曲线. 图 6 为不同黏性系数液体中空泡膨胀、收缩半径随时间变化的实验曲线. 结果表明,黏性作用将明显地减缓空泡的膨胀收缩过程,增大空泡的生存周期;液体黏性越大,空泡对应的最大泡半径越小而收缩所能达到的最小泡半径越大;在初期,液体黏性影响不甚明显;愈到后期,受黏性影响因而过程变缓的现象愈明显.

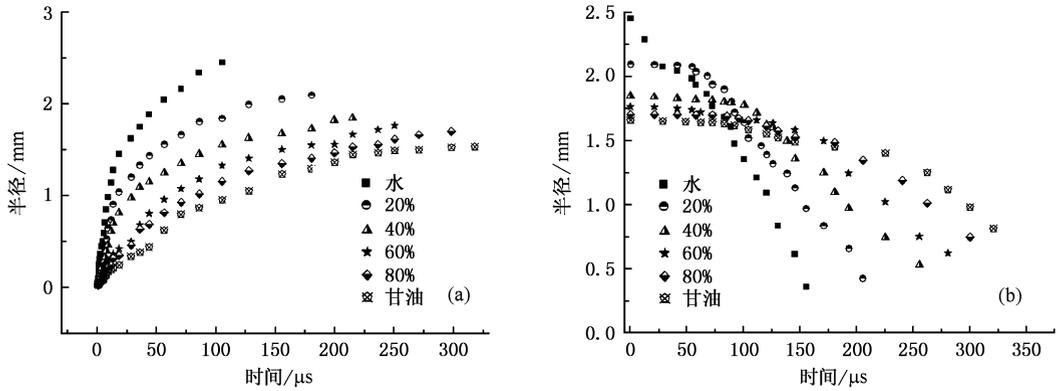


图6 液体黏性对空泡脉动影响的实验结果 (a) 膨胀情况 (b) 收缩情形

4. 结 论

本文采用基于光偏转原理的高灵敏度光纤传感器研究了激光等离子体空泡在不同黏性液体中的运动特性. 研究表明, 激光等离子体空泡在靶表面主要经历两次膨胀和收缩的脉动过程. 基于实验序列图, 判定了空泡在两次脉动中对应的最大和最小泡半径. 同时结合空泡溃灭理论, 研究了黏性系数对空泡脉动特性的影响. 理论计算与实验结果均表明:

液体黏性对空泡的运动起阻尼作用; 受液体黏性影响, 空泡膨胀收缩过程明显变缓; 在初期, 液体黏性影响不甚明显, 愈到后期, 受黏性影响过程变缓的现象愈明显. 黏性系数越大, 空泡膨胀的最大泡半径越小而收缩的最小泡半径越大; 此外, 黏性作用将明显地增大空泡的生存周期. 该研究结果不仅可以促进空化研究的深入, 从而避免空泡可能带来的危害; 同时也可合理为利用空化现象提供理论和实验依据. 当然, 这一结论也可供提高液体介质中激光加工效率的研究领域参考.

- [1] Vogel A, Busch S, Parlitz U 1996 *J. Acoust. Soc. Am.* **100** 148
 [2] Shaw S J, Schiffrers W P, Gentry T P, Emmony D C 2000 *J. Acoust. Soc. Am.* **107** 3065
 [3] Tomita Y, Kodama T 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 2809
 [4] Xu R Q, Chen X, Chen J P, Shen Z H, Lu J, Ni X W 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1413 (in Chinese) [徐荣青、陈笑、陈建平、沈中华、陆建、倪晓武 2004 物理学报 **53** 1413]
 [5] Rayleigh L 1917 *Phil. Mag.* **34** 94
 [6] Philipp A, Lauterborn W 1998 *J. Fluid Mech.* **361** 75
 [7] Ohl C D, Kurz R T, Geisler, Lindau O 1999 *Phil. Trans. R. Soc.*

- Lond.* **A 357** 269
 [8] Tomita Y, Shima A 1986 *J. Fluid Mech.* **169** 535
 [9] Ward B, Emmony D C 1991 *Appl. Phys. Lett.* **59** 2228
 [10] Doukas A G, Zweig A D, Frisoli J K 1991 *Appl. Phys. B* **53** 237
 [11] Chen X, Xu R Q, Shen Z H, Lu J, Ni X W 2004 *Chin. Phys.* **13** 505
 [12] Huang J T 1996 *Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture* **10** 124 (in Chinese) [黄继汤 1996 北京建筑工程学院学报 **10** 124]
 [13] Shaw A 1997 *Shock Waves* **7** 33

The collapse and rebound of laser-induced cavitation bubble in viscous fluid^{*}

Zhao Rui¹⁾ Xu Rong-Qing²⁾ Shen Zhong-Hua¹⁾ Lu Jian¹⁾ Ni Xiao-Wu^{1)†}

1) (*Department of Applied Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China*)

2) (*Department of Electronics & Information, East China Shipbuilding Institute, Zhenjiang 212003, China*)

(Received 30 December 2005 ; revised manuscript received 26 January 2006)

Abstract

The oscillation property of a laser-induced cavitation bubble in a viscous fluid is investigated by a sensitive fiber-optic sensor based on optical beam deflection. The temporal and spatial evolutions of the bubble wall during the expansion and collapse are traced according to sequential waveforms induced by the bubble oscillation. Both the maximum and minimum bubble radii at each oscillation cycle are determined by experiment. Further, in combination with the theoretical analysis and numerical calculation, the variation of the maximum and minimum radii during oscillation and life-time of the bubble in different viscous fluids is obtained. The experimental results indicate that the liquid viscosity has an obvious influence on the bubble oscillation; larger viscosity makes the bubble contract more slowly, and the corresponding minimum radius and the bubble life-time become larger and longer, while the maximum radius is smaller.

Keywords : laser-induced cavitation bubble, oscillation, viscosity, optical sensor

PACC : 4755B

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60578015, 60208004), the Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions, China (Grant No. 05KTB510028), the Teaching and Research Award Program for Outstanding Young Professor in Higher Education Institute. MOE, China and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20050288025).

[†] Corresponding author. E-mail : nxw@mail.njust.edu.cn