

文章编号: 1007-4627(2017)03-0534-05

近垒及垒下能区 $^{28}\text{Si}+^{174}\text{Yb}$ 体系的裂变碎片质量分布

王东玺, 林承键[†], 贾会明, 杨峰, 徐新星, 杨磊, 马南茹, 孙立杰, 包鹏飞, 张焕乔, 刘祖华
(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 使用两块大面积平行板雪崩计数器, 测量了近垒及垒下 $^{28}\text{Si}+^{174}\text{Yb}$ 熔合裂变碎片质量-角度关联分布及质量分布。质量-角度二维图显示在该反应能量区间内并没有发现明显的准裂变成分。运用单高斯曲线拟合了裂变碎片的质量分布并抽取了质量宽度。结果表明: 在库仑势垒以上, 质量宽度随着反应能量的升高而增大; 在库仑势垒以下能区, 发现质量宽度随着反应能量的降低而呈现轻微增大的趋势。运用鞍点统计模型对本次实验数据拟合发现, 需用比文献给出的更大的刚度系数才能重现实验结果, 其物理原因还需要进一步研究。

关键词: 熔合裂变; 准裂变; 裂变碎片质量分布; 鞍点统计模型

中图分类号: O571.53 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.03.534

1 引言

近库仑势垒能区重离子熔合裂变反应中不断发现新现象^[1], 促使人们不断从实验和理论上进一步研究更深层次的核反应机制。20世纪60年代后期, 原子核理论预言在超重核区存在长寿命核素构成的稳定岛^[2, 3]。从此以后, 合成长寿命超重核就成为原子核物理研究的重要前沿问题之一。近半个世纪以来人们一直致力于并成功合成了 $Z = 113$ ^[4], $Z = 114$ ^[5], $Z = 116$ ^[6] 和 $Z = 118$ ^[7] 等超重核。由于熔合蒸发反应是现有超重核的唯一合成方法, 而在熔合反应合成超重核的过程中涉及到熔合裂变与准裂变反应的竞争, 所以研究有关物理因素来降低由于准裂变引起的熔合压低是合成超重核的一个关键问题。很多国际著名的核物理实验室, 包括俄罗斯的 JINR^[8]、澳大利亚的 ANU^[9]、日本的 JAEA^[10] 和印度的 BARC^[11]、IUAC^[12] 等国际知名科研机构都在长期进行熔合裂变相关的实验和理论研究。

对于重离子熔合裂变过程, 由于其中涉及的所有自由度都达到了统计平衡, 因此其质量分布呈典型的高斯形状且质量分布宽度符合统计模型的预言, 如断点模型^[13, 14]或鞍点统计模型^[15]等。另外, 研究发现对于非常重的反应体系裂变还会出现准裂变过程^[16-19], 与熔合裂变过程相比, 准裂变过程中某些自由度没有达到统计平衡, 是一个还未形成紧凑复合核的快动力学过程。

特别是准裂变过程中质量自由度未能够完全弛豫, 对入射道如弹核、靶核的质量保有记忆, 相比于熔合裂变过程, 准裂变过程的质量分布宽度会更宽^[20]。因此质量自由度是鉴别准裂变过程与熔合裂变过程的重要标准^[21]。

对于那些裂变碎片质量分布宽度展宽的体系, 还会在质量-角度二维图中呈现很强的关联^[9, 17-19]。质量角度的关联表明弹核与靶核组成的双核体系还存有参与核质量和形变方向的信息, 所以该双核体系会分裂成两个质量不对称的裂变碎片。因此质量-角度关联的贡献来源于复合核某些自由度还未完全弛豫的准裂变过程, 而非各个自由度达到统计平衡的复合核的熔合裂变过程^[18, 19]。

基于该认识, 在近垒及垒下能区测量了 $^{28}\text{Si}+^{174}\text{Yb}$ 体系 ($V_B=113.82$ MeV) 的裂变碎片质量-角度关联分布以及质量分布, 并用单高斯拟合抽取裂变碎片质量宽度来研究其裂变机制。

2 实验装置

实验是在中国原子能科学研究院的 HI-13 串列加速器上完成的, 使用实验室系能量为 118.53~161.52 MeV 的 ^{28}Si 轰击厚度为 $130 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的 ^{174}Yb 靶, 靶衬为 $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的碳膜, 背对束流, 靶面与束流成 30° 角。

通常测定裂变碎片质量的方法有双能量法、双速度

收稿日期: 2016-12-07; 修改日期: 2017-03-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2013CB834404); 国家自然科学基金资助项目(11375268, 11475263, U1432246, U1432127, 11505293, 11635015)

作者简介: 王东玺(1990-), 河北唐山人, 硕士研究生, 从事粒子物理与原子核物理研究, E-mail: wangdongxi@ciae.ac.cn

[†] 通信作者: 林承键, E-mail: cjlin@ciae.ac.cn.

法和时间差法等。由于双能量法所需的硅探测器在测量低能重离子时会出现脉冲幅度亏损导致很难精确测量粒子能量, 另外 HI-13 串列加速器无法提供双速度法定时所需的高品质脉冲束流, 所以本次实验采用时间差方法得到出射粒子的质量。

实验室系下, 根据动量守恒、质量守恒以及时间差信息, 有

$$m_P \cdot v_P = m_{CN} \cdot v_{CN} = \cos \theta_1 \cdot m_1 \cdot v_1 + \cos \theta_2 \cdot m_2 \cdot v_2, \quad (1)$$

$$\sin \theta_1 \cdot m_1 \cdot v_1 = \sin \theta_2 \cdot m_2 \cdot v_2, \quad (2)$$

$$\Delta T = \frac{r_1}{v_1} - \frac{r_2}{v_2}, \quad (3)$$

$$m_{CN} = m_1 + m_2 = m_P + m_T, \quad (4)$$

其中 m , v 和 θ 分别表示粒子的质量、速度和发射角; ΔT 为一对互补出射粒子的飞行时间的差值; r 为出射粒子从反应点到探测器间的飞行距离; 下角标 P, T, CN 和数字 1, 2 分别表示炮弹、靶核、复合核和互补出射粒子。联立可得

$$m_1 = \frac{r_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) + \Delta T \cdot v_{CN} \cdot \sin \theta_1}{r_1 \cdot \sin \theta_1 + r_2 \cdot \sin \theta_2} \cdot \frac{\sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} m_{CN}, \quad (5)$$

$$m_2 = \frac{r_1 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) - \Delta T \cdot v_{CN} \cdot \sin \theta_2}{r_1 \cdot \sin \theta_1 + r_2 \cdot \sin \theta_2} \cdot \frac{\sin \theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} m_{CN}, \quad (6)$$

$$v_1 = \frac{r_1 \cdot \sin \theta_1 + r_2 \cdot \sin \theta_2}{r_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) + \Delta T \cdot v_{CN} \cdot \sin \theta_1} \cdot v_{CN}, \quad (7)$$

$$v_2 = \frac{r_1 \cdot \sin \theta_1 + r_2 \cdot \sin \theta_2}{r_1 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) - \Delta T \cdot v_{CN} \cdot \sin \theta_2} \cdot v_{CN}. \quad (8)$$

最后总动能 (TKE) 计算公式为

$$TKE = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2. \quad (9)$$

可以看到, 时间差方法只需要测量一对互补出射粒子的飞行时间的差值和位置信息, 利用时间信号通过运动学重构即可得到有关裂变碎片质量分布的信息。这个方法对探测器要求不高, 定时性能好且有良好的位置分辨即可, 有利于开展实验。由于 HI-13 串列加速器提供的束流是连续束, 时间差的绝对刻度不容易实现, 需要根据实验中的结果在数据分析的过程中进行反推。

采用两块平行板雪崩计数器 PPAC (Parallel Plate Avalanche Counter) 分别置于前、后角, 测量一对互补反应产物。两个反应产物的发射角 θ_F 和 θ_B 分别为前、后角 PPAC 探测到的粒子与束流线的夹角, φ_F , φ_B 为两个反应产物出射面与水平面的夹角。前角 PPAC 探测器中心在束流平面上, 且探测器中心与束流线的夹角为 45° , 中心距离靶心 155 mm, 其灵敏面积为 $180 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 覆盖 $14.9^\circ \leq \theta_F \leq 75.1^\circ$, φ_F 为 $\pm 27^\circ$; 后角 PPAC 探测器中心位于束流平面上, 且探测器中心与束流线夹角为 105° , 中心距离靶心 125 mm, 其灵敏面积为 $250 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 覆盖 $60^\circ \leq \theta_B \leq 150^\circ$, φ_B 为 $\pm 30^\circ$ 。探测器的工作气体为异丁烷, 气压 3.8 Torr。用 ^{252}Cf 源对 PPAC 探测器进行刻度, PPAC 探测器整体的时间分辨约为 0.5 ns, 而其中单个像素的时间分辨约为 0.3 ns。

两个反应产物分别穿过两个探测器, 由后角 PPAC 拾取开始时间, 由前角 PPAC 经适当延迟拾取停止时间可以得到两个反应产物的飞行时间差 ΔT 。另外两个反应产物穿过 PPAC 探测器后会分别在前角和后角探测器中沉积部分能量 ΔE_F 和 ΔE_B 。图 1(a) 是 $^{28}\text{Si}+^{174}\text{Yb}$ 体系能量为 $E_{c.m.}/V_B = 1.25$ 时, $\Delta E_F + \Delta E_B$ 与 ΔT 的二维图, 从图中可以清晰地区分出裂变成分与散射成分。另外, 利用核反应运动学的不

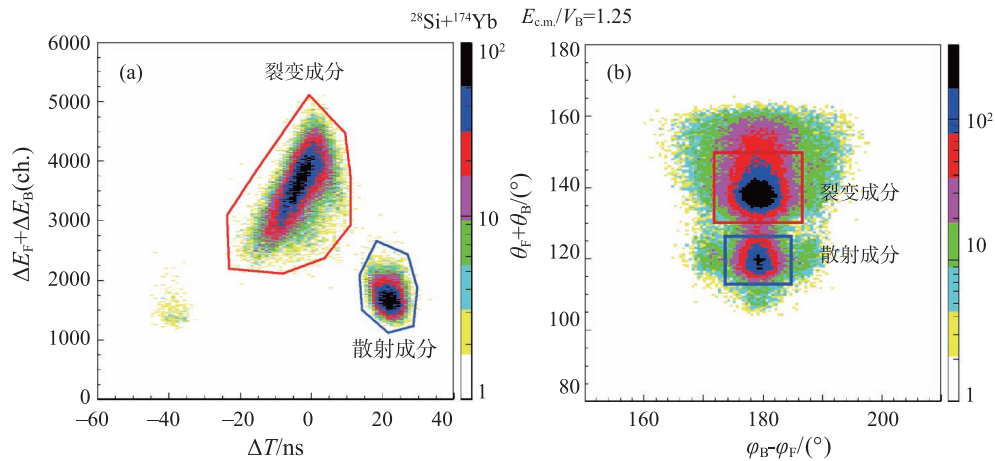


图 1 (在线彩图) $^{28}\text{Si}+^{174}\text{Yb}$ 体系能量为 $E_{c.m.}/V_B = 1.25$ 时 $\Delta E_F + \Delta E_B$ 与 ΔT 的二维图 (a), $\theta_F + \theta_B$ 与 $\varphi_B - \varphi_F$ 的二维图 (b)

同也可以鉴别出裂变碎片与散射成分,如图 1(b) $\theta_F + \theta_B$ 与 $\varphi_B - \varphi_F$ 的二维图所示。

3 实验结果及分析

图 2 是 $^{28}\text{Si} + ^{174}\text{Yb}$ 体系能量为 $E_{c.m.}/V_B = 1.04$ 时反应产物质量-角度二维图。用半靶厚度近似的方法对反应能量和反应产物作了能量损失修正,同时又对裂变碎片动能进行迭代计算,修正其在靶核中的能量损失。图中纵轴为质心系下反应产物的出射角 $\theta_{c.m.}$, 横轴为反应产物的质量数。从质量上,可以将产物明显的区分成三部分:即质量数集中在 $A=28$ 的类弹核,质量数集中在 $A=174$ 的类靶核以及质量数在 $A=101$ 附近的裂变碎片。裂变成分在垂直方向上整体保持竖直,说明质量和角度的关联性不大,准裂变成分不明显。

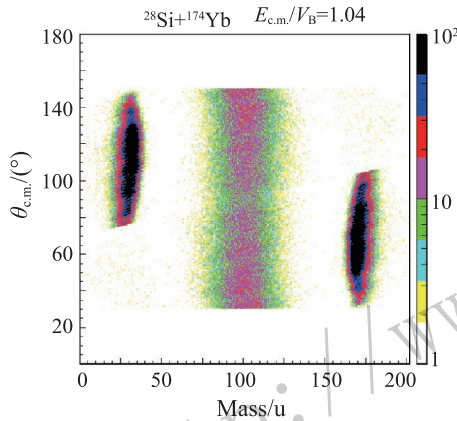


图 2 (在线彩图) 能量为 $E_{c.m.}/V_B = 1.04$ 时 $^{28}\text{Si} + ^{174}\text{Yb}$ 体系质量与角度的二维图

图 3 显示的是 $^{28}\text{Si} + ^{174}\text{Yb}$ 体系在不同能量下得到的裂变碎片的质量分布。各个能量下的质量分布与单高斯拟合曲线符合地很好且中心值在复合核质量数的一半处表明复合核对称裂变。对每个反应能量下的质量分布进行单高斯拟合得到拟合最佳时的标准差 σ_M , 进而可以得到质量分布宽度随反应能量的变化关系,如图 4 所示。从图中可以看出,在库仑势垒以上能区,质量分布宽度随着反应能量的下降而减小,但是在低于熔合势垒之后,质量分布宽度随着反应能量的降低并没有继续减小且有上升的趋势。

由鞍点统计模型可知,裂变碎片质量分布宽度为

$$\sigma_M^2 = \frac{T}{k} = \frac{1}{k} \cdot \sqrt{\frac{E_x^{\text{sad}}}{a}}, \quad (10)$$

其中 T 为鞍点处的核温度, k 是刚度系数, a 为能级密度参量,鞍点统计模型下 $a = A/10 \text{ MeV}^{-1}$, A 是复合核质量数。 E_x^{sad} 为鞍点激发能,其计算公式如下:

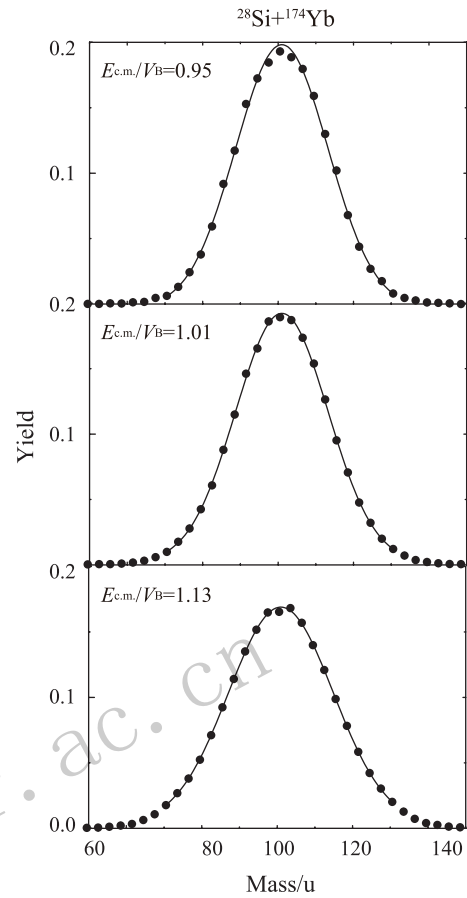


图 3 能量为 $E_{c.m.}/V_B = 0.95, 1.01$ 以及 1.13 时 $^{28}\text{Si} + ^{174}\text{Yb}$ 体系裂变碎片的质量分布,图中实线为单高斯拟合结果

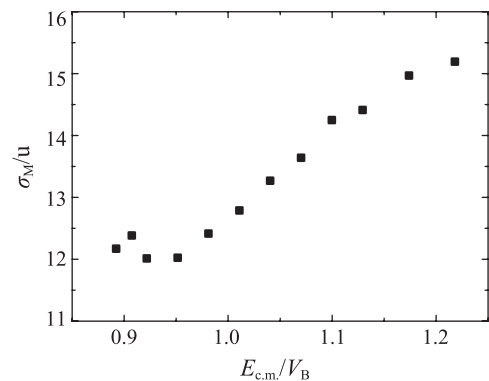


图 4 $^{28}\text{Si} + ^{174}\text{Yb}$ 体系裂变碎片质量分布宽度与反应能量的关系图,图中实验数据的误差为拟合误差(小于数据点)

$$E_x^{\text{sad}} = E_{c.m.} + Q_{\text{fus}} - B_f - E_{\text{pre}}^{\text{sad}} - E_{\text{rot}}^{\text{sad}}, \quad (11)$$

其中 $E_{c.m.}$ 为质心系能量, Q_{fus} 为原子核基态时的熔合 Q 值, B_f 为裂变势垒高度, $E_{\text{pre}}^{\text{sad}}$ 为鞍点前发射中子能量, $E_{\text{rot}}^{\text{sad}}$ 为鞍点处的转动能。由于 B_f 与 $E_{\text{rot}}^{\text{sad}}$ 与复合核总自旋有关,所以采用液滴模型进行计算^[22]。另

外根据 Möller 等^[23] 的计算修正了 B_f 在零自旋时的数值。运用 CCFULL 程序^[24] 对复合核的总自旋进行了计算, 计算过程中考虑了弹核和靶核的形变效应。图 5 是 $^{28}\text{Si}+^{174}\text{Yb}$ 体系质量分布宽度随鞍点激发能的变化关系, 其中虚线和实线为鞍点统计模型计算结果。通过实验数据与鞍点统计模型计算结果对比发现, 根据文献^[25], 若刚度系数 $k=0.0048 \text{ MeV/u}^2$ 时(虚线), 不能重现本次实验数据。而把 k 设置为 0.0077 MeV/u^2 时(实线), 鞍点统计模型计算结果与本次实验数据基本符合。其中的原因还需要进一步地研究。

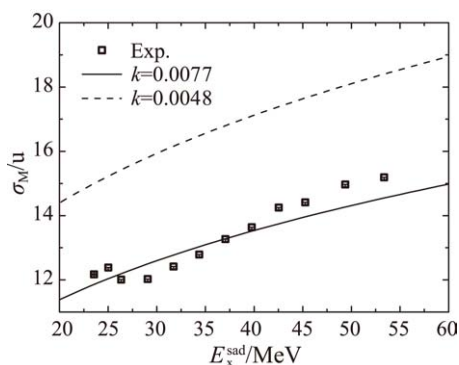


图 5 $^{28}\text{Si}+^{174}\text{Yb}$ 体系裂变碎片质量分布宽度与鞍点激发能的关系图以及鞍点统计模型模型的计算结果, 图中实验数据的误差为拟合误差

4 结论

在近库仑势垒能区用两块平行板雪崩计数器符合测量了 $^{28}\text{Si}+^{174}\text{Yb}$ 体系的裂变碎片, 利用时间差法得到了裂变碎片的质量分布。在质量-角度二维图中没有观测到明显的准裂变事件。用单高斯拟合抽取了裂变碎片质量分布宽度, 得到裂变碎片质量分布宽度随鞍点激发能的变化关系。通过实验数据与鞍点统计模型的分析, 发现文献中给出的刚度系数 $k=0.0048 \text{ MeV/u}^2$ 不能重现本次实验结果, 需要更大的参数才能重现本次实验结果, 其物理原因还需要进一步分析研究。

参考文献:

[1] BECKERMAN M. Phys Rep, 1985, **129**: 145.

- [2] SOBICZEWSKI A, GAREEV F A, KALINKIN B N. Phys Lett, 1966, **22**: 500.
- [3] ARMBRUSTER P. C R Phys, 2003, **4**: 571.
- [4] MORITA K, MORIMOTO K, KAJI D, *et al.* J Phys Soc Jpn, 2004, **73**: 2593.
- [5] OGANESSIAN YU TS, YEREMIN A V, POPEKO A G, *et al.* Nature (London), 1999, **400**: 242.
- [6] OGANESSIAN YU TS, UTYONKOV V K, LOBANOV YU V, *et al.* Phys Rev C, 2000, **63**: 011301(R).
- [7] OGANESSIAN YU TS, UTYONKOV V K, LOBANOV YU V, *et al.* Phys Rev C, 2006, **74**: 044602.
- [8] CHIZHOV A YU, ITKIS M G, ITKIS I M, *et al.* Phys Rev C, 2003, **67**: 011603(R).
- [9] HINDE D J, THOMAS R G, DU RIETZ R, *et al.* Phys Rev Lett, 2008, **100**: 202701.
- [10] NISHIO K, ANDREYEV A N, CHAPMAN R, *et al.* Phys Lett B, 2015, **748**: 89.
- [11] PANT L M, CHOUDHURY R K, SAXENA A, *et al.* Eur Phys J A, 2001, **11**: 47.
- [12] DUBEY R, SUGATHAN P, JHINGAN A, *et al.* Phys Lett B, 2016, **752**: 338.
- [13] BOND P D. Phys Rev Lett, 1984, **52**: 414.
- [14] ROSSNER H H, HUIZENGA J R, SCHRÖDER W U. Phys Rev Lett, 1984, **53**: 38.
- [15] VANDENBOSCH R, HUIZENGA J R, Nuclear Fission, New York: Academic Press, 1973.
- [16] HINDE D J, MORTON C R, DASGUPTA M, *et al.* Nucl Phys A, 1995, **592**: 271.
- [17] BOCK R, CHU Y T, DAKOWSKI M, *et al.* Nucl Phys A, 1982, **388**: 334.
- [18] TÖKE J, BOCK R, DAI G X, *et al.* Nucl Phys A, 1985, **440**: 327.
- [19] SHEN W Q, ALBINSKI J, GOBBI A, *et al.* Phys Rev C, 1987, **36**: 115.
- [20] KNYAZHEVA G N, KOZULIN M E, SAGAIK R N, *et al.* Phys Rev C, 2007, **75**: 064602.
- [21] TSANG M B, ARDOUIN D, GELBKE C K, *et al.* Phys Rev C, 1983, **28**: 747.
- [22] SIERK A J. Phys Rev C, 1986, **33**: 2039.
- [23] MÖLLER P, SIERK A J, ICHIKAWA T, *et al.* Phys Rev C, 2009, **79**: 064304.
- [24] HAGINO K, ROWLEY N, KRUPPA A T. Comput Phys Commun, 1999, **123**: 143.
- [25] BACK B B, FERNANDEZ P B, GLAGOLA B G, *et al.* Phys Rev C, 1996, **53**: 1734.

Research of Fission Fragment Mass Distribution for $^{28}\text{Si}+^{174}\text{Yb}$ at Energies near the Coulomb Barrier

WANG Dongxi, LIN Chengjian[†], JIA Huiming, YANG Feng, XU Xinxing, YANG Lei, MA Nanru, SUN Lijie,
BAO Pengfei, ZHANG Huanqiao, LIU Zuhua

(*China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

Abstract: In order to study the fission mechanism, the mass distributions and mass-angle distributions of the fission fragments for $^{28}\text{Si}+^{174}\text{Yb}$ were measured near the Coulomb barrier. The mass-angle correlations do not indicate any possible quasi-fission events in this bombarding energy range. The mass distributions were fitted by the single Gaussian distribution and then the mass widths were extracted. At above-barrier energies, the mass widths were found to increase with the energy. However, the mass widths show slight increase with decreasing energy below the barrier. Additionally, the mass widths can not be reproduced in the framework of the saddle statistic model with the given parameter, so further study is still needed.

Key words: fusion fission; quasi-fission; fission fragment mass distribution; saddle statistic model

<http://www.npr.ac.cn>

Received date: 7 Dec. 2016; **Revised date:** 27 Mar. 2017

Foundation item: National Basic Research Program of China(2013CB834404); National Natural Science Foundation of China(11375268,11475263,U1432246,U1432127,11505293,11635015)

[†] **Corresponding author:** LIN Chengjian, E-mail: cjlin@ciae.ac.cn.