

化学不稳定性和同位素分布的同位旋效应^{*}

李文飞^{1 2)} 张丰收^{1 2 4)} 陈列文^{1 2 3)}

¹⁾ 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 ,兰州 730000)
²⁾ 中国科学院近代物理研究所 ,兰州 730000)
³⁾ 上海交通大学应用物理系 ,上海 200030)
⁴⁾ 中国高等科学技术中心 ,北京 100080)
(2000 年 10 月 31 日收到 ,2000 年 11 月 27 日收到修改稿)

采用同位旋相关的量子分子动力学模型 ,研究了在轰击能量为 40 MeV/u 和 100MeV/u 时 ,¹¹²Sn + ¹¹²Sn 和¹²⁴Sn + ¹²⁴Sn 反应产物的同位素分布 .发现在 40MeV/u 时 ,同位素分布与入射体系的同位旋密切相关 ,而在 100MeV/u 时 ,对这两种不同同位旋体系给出几乎相同的同位素分布 .这种同位素分布的能量依赖性为研究化学不稳定性及其与力学不稳定性的竞争提供了新途径 .

关键词 :化学不稳定性 ,同位旋效应 ,同位素分布 ,同位旋相关的量子分子动力学
PACC :2570 ,2587

1 引 言

随着中能重离子加速器的出现 ,人们能够在实验室产生高温、偏离正常密度($T > 0$, $\rho \neq \rho_0$, ρ_0 为饱和密度)的核物质 ,并且发现了一种新的原子核退激发机制 ,即多重碎裂^[1] .研究表明 ,这种多重碎裂反应机制主要是由密度涨落导致的 ,人们把这种由密度涨落导致的不稳定性称之为力学不稳定性^[2,3] .近年来 ,随着世界上一批放射性束流装置的建成 ,人们可以在实验室产生远离 β 稳定线的原子核 .远离 β 稳定线的原子核引起的反应不仅可以产生偏离正常温度、密度的核物质 ,而且可以产生同位旋非对称的核物质($\delta^2 > 0$, δ 为相对中子过剩) .这已发展成为一门新的学科 ,即放射性核束(RNB)物理学 .关于力学不稳定性导致的原子核多重碎裂 ,人们已经做了许多研究 ,但对化学不稳定性的知识还很缺乏 .RNB 的发展为人们在同位旋自由度上开展研究提供了机遇 ,同时也使人们能够研究化学不稳定性及其相关的物理现象^[4] .

1996 年 ,MSU 实验组通过研究在入射能量 $E = 40\text{MeV/u}$ 时¹¹²Sn + ¹¹²Sn 和¹²⁴Sn + ¹²⁴Sn 反应 ,发现丰中子系统¹²⁴Sn + ¹²⁴Sn 产生的平均中等质量碎片多重

性 N_{IMF} 系统地大于系统¹¹²Sn + ¹¹²Sn 产生的平均中等质量碎片多重性 N_{IMF} ,从而表现出明显的同位旋效应^[5] .最近 ,MSU 实验组通过研究不同入射能量的反应⁵⁸Ni + ⁵⁸Ni 和⁵⁸Fe + ⁵⁸Fe ,发现当 $E = 75$ 到 105MeV/u 时 ,多重碎裂的同位旋效应已经消失^[6] .这说明多重碎裂的同位旋效应是与能量密切相关的 .人们自然会想到 ,这种能量依赖性会不会在反应产物的同位素分布中体现出来呢 ? 在以前的工作中 ,利用同位旋相关的量子分子动力学模型(IQMD)分析了 $E = 40\text{MeV/u}$ 时 ,¹¹²Sn + ¹¹²Sn 和¹²⁴Sn + ¹²⁴Sn 反应中的多重碎裂 ,发现在 $E = 40\text{MeV/u}$ 时 ,表现出明显的同位旋效应 ,与 MSU 的实验结果相符^[7] .本文利用 IQMD 模型研究了入射能量 $E = 40\text{MeV/u}$ 和 100MeV/u 时中心碰撞系统¹¹²Sn + ¹¹²Sn 和¹²⁴Sn + ¹²⁴Sn 中元素 Li ,Be ,Ne 和 Na 的同位素分布 ,发现在 $E = 40\text{MeV/u}$ 时丰中子体系¹²⁴Sn + ¹²⁴Sn 的同位素分布较体系¹¹²Sn + ¹¹²Sn 更趋于丰中子的一边 ,而在 $E = 100\text{MeV/u}$ 时这种差别基本消失 ,并指出这是由于不同能量下力学不稳定性与化学不稳定性相互竞争的结果 .

2 理论模型

IQMD 模型包含了同位旋自由度 ,即同位旋相

^{*} 国家自然科学基金(批准号 :19875068 ,19847002) ,国家重点基础研究发展规划(批准号 :G2000077407)和中国科学院基金资助的课题 .

关的核子-核子碰撞截面、对称能项、库仑势及同位旋相关的泡利阻塞.另外在初始化过程中也严格地区分了中子和质子.在 IQMD 模型中原子核的平均场可以用下式描述^[7,8]:

$$U(\rho, T_z) = \alpha(\rho/\rho_0) + \beta(\rho/\rho_0)^\gamma + \frac{1}{2}(1 - T_z)V_c + C \frac{(\rho_n - \rho_p)}{\rho_0} T_z + U^{\text{Yuk}}, \quad (1)$$

式中 ρ_0 是正常核物质密度, ρ , ρ_n , ρ_p 分别是总的、中子的和质子的相互作用密度. T_z 是同位旋自由度的 z 分量,对于中子和质子,相应的 T_z 为 1 和 -1. V_c 和 U^{Yuk} 分别为库仑势和有限程的 Yukawa 表面作用势.本文中参数 α, β, γ 选用了不可压缩系数 $K = 200$ MeV 的所谓的软势,对称能强度 $C = 32$ MeV.在 IQMD 模型的初始化过程中,使用了非线性相对论平均场理论计算的中子和质子密度^[9],再用 Monte-Carlo 方法对 ^{124}Sn 和 ^{124}Ba 的基态进行抽样,同时消除了非物理的集体转动.

对于中能重离子碰撞中所形成的密度为 ρ 、温度为 T 和中子过剩度为 δ 的非对称核物质,其稳定的充要条件可以表示为下列不等式:

$$\left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_{\rho, \delta} \geq 0, \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_{T, \delta} \geq 0, \quad (3)$$

$$\left(\frac{\partial \mu_n}{\partial \delta}\right)_{T, P} \geq 0, \quad (4)$$

其中 E, P 和 μ_n 分别表示每核子能量、压强和中子的化学势.(2)式保证了核物质的热力学稳定性.(3)式排除了由于密度涨落而导致的力学不稳定性.(4)式排除了由于中子的增加而导致的化学不稳定性.如果在碰撞过程中(3)式被破坏,则反应系统将进入力学不稳定区,而如果(4)式被破坏,则反应系统将进入化学不稳定区.在温度较高时,中子和质子的化学势可以解析地表示为^[10]

$$\mu_q = V_q + T \left[\ln \left(\frac{\lambda_T^3 \rho_q}{2} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n+1}{n} b_n \left(\frac{\lambda_T^3 \rho_q}{2} \right)^n \right], \quad (5)$$

$q = n, p,$

其中热波长为

$$\lambda_T = \left(\frac{2\pi \hbar^2}{mT} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

式中 m 为核子质量, b_n 为维里展开系数, V_q 为单粒子势能.在当前的模型计算中,如果忽略库仑势及表面相互作用,则单粒子势能可以表示为

$$V_q(\rho, \delta) = \alpha \frac{\rho}{\rho_0} + \beta \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma + C \frac{\rho}{\rho_0} \delta \tau_q. \quad (7)$$

根据 Gibbs-Duhem 关系

$$\frac{\partial P}{\partial \rho} = \frac{\rho}{2} \left[(1 + \delta) \frac{\partial \mu_n}{\partial \rho} + (1 - \delta) \frac{\partial \mu_p}{\partial \rho} \right], \quad (8)$$

可以得到

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial P}{\partial \rho} \right|_{T, \delta} &= \frac{T}{2} \left[2 + \sum_{n=1}^{\infty} (n+1) b_n \left(\frac{\lambda_T^3}{4} \right)^n ((1 + \delta)^{n+1} \right. \\ &\quad \left. + (1 - \delta)^{n+1}) \rho^n \right] + \alpha \frac{\rho}{\rho_0} + \beta \gamma \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma \\ &\quad + C \frac{\rho}{\rho_0} \delta^2, \end{aligned} \quad (9)$$

上式中,右边第一部分为动能部分的贡献,其余为势能部分的贡献.对中子的化学势 μ_n 有如下关系:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \mu_n}{\partial \delta} \right|_{T, \rho} &= \left. \frac{\partial \mu_n}{\partial \delta} \right|_{T, \rho} - \left. \frac{\partial \mu_n}{\partial P} \right|_{T, \delta} \cdot \left. \frac{\partial P}{\partial \delta} \right|_{T, \rho} \\ &= \left. \frac{\partial \mu_n}{\partial \delta} \right|_{T, \rho} - \left. \frac{\partial \mu_n}{\partial \rho} \right|_{T, \delta} \cdot \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)^{-1} \Big|_{T, \delta} \\ &\quad \cdot \left. \frac{\partial P}{\partial \delta} \right|_{T, \rho}, \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $(\partial P / \partial \rho)^{-1}|_{T, \delta}$ 已由(9)式给出,

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \mu_n}{\partial \delta} \right|_{T, \rho} &= T \left[\frac{1}{1 + \delta} + \sum_{n=1}^{\infty} (n+1) b_n \left(\frac{\lambda_T^3}{4} \right)^n \right. \\ &\quad \left. \cdot (1 + \delta)^{n-1} \rho^n \right] + C \frac{\rho}{\rho_0}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \mu_n}{\partial \rho} \right|_{T, \delta} &= T \left[\frac{1}{\rho} + \sum_{n=1}^{\infty} (n+1) b_n \left(\frac{\lambda_T^3}{4} \right)^n \right. \\ &\quad \left. \cdot (1 + \delta)^n \rho^{n-1} \right] + \alpha \frac{1}{\rho_0} + \frac{\beta \gamma}{\rho_0^\gamma} \rho^{\gamma-1} + C \frac{\delta}{\rho_0}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial P}{\partial \delta} \right|_{T, \rho} &= \frac{T}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (n+1) b_n \left(\frac{\lambda_T^3}{4} \right)^n ((1 + \delta)^n \\ &\quad - (1 - \delta)^n) \rho^{n+1} + C \rho_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^2 \delta. \end{aligned} \quad (13)$$

(9)式和(10)式能够表征有限温度下体系的力学和化学稳定性情况.

3 结果与讨论

图 1 给出了 $E = 40$ 和 100MeV/u 时中心碰撞系统 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 和 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 中元素 Li, Be, Ne 和 Na 的同位素分布,图中同时给出了每种同位素分布的如下形式的 Gaussian 拟合:

$$y = y_0 + A_0 \exp \left[- \frac{(x - x_c)^2}{2w^2} \right], \quad (14)$$

式中 $(y_0 + A_0)$ 代表了同位素分布的峰值, x_c 表示最可几同位素质量,而 w 为同位素分布的宽度.从图 1 中可以清楚地看到,在 $E = 40\text{ MeV/u}$ 时碰撞系统 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 较 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 产生的同位素分布有较高的峰值、较大的最可几同位素质量以及较宽的同位素分布宽度,而这种差别在 $E = 100\text{ MeV/u}$ 时已基本消失了.以 Ne 为例,碰撞系统 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ ($^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$)在 $E = 40\text{ MeV/u}$ 时 $(y_0 + A_0)$, x_c 和 w 分别为 $0.0065(0.0035)$, $24.16(22.19)$ 和 $3.39(3.117)$,而当 $E = 100\text{ MeV/u}$ 时,它们分别为 0.01246

(0.01197) , $22.48(22.041)$ 和 $2.88(2.815)$.这说明在 40 MeV/u 时同位旋分布有较强的同位旋效应,而在 100 MeV/u 时同位旋效应消失.

既然原子核的多重碎裂现象是由核物质状态方程的不稳定因素造成的,为了探索同位素分布的同位旋效应在能量较高时消失的物理机制,有必要研究中能重离子碰撞过程中力学和化学不稳定性的时间演化.事实上,如果知道了密度 ρ 、温度 T 以及相对中子过剩 δ 的时间演化,即可由(6)(8)(9)(10)及(11)式得到重离子碰撞中力学和化学不稳定

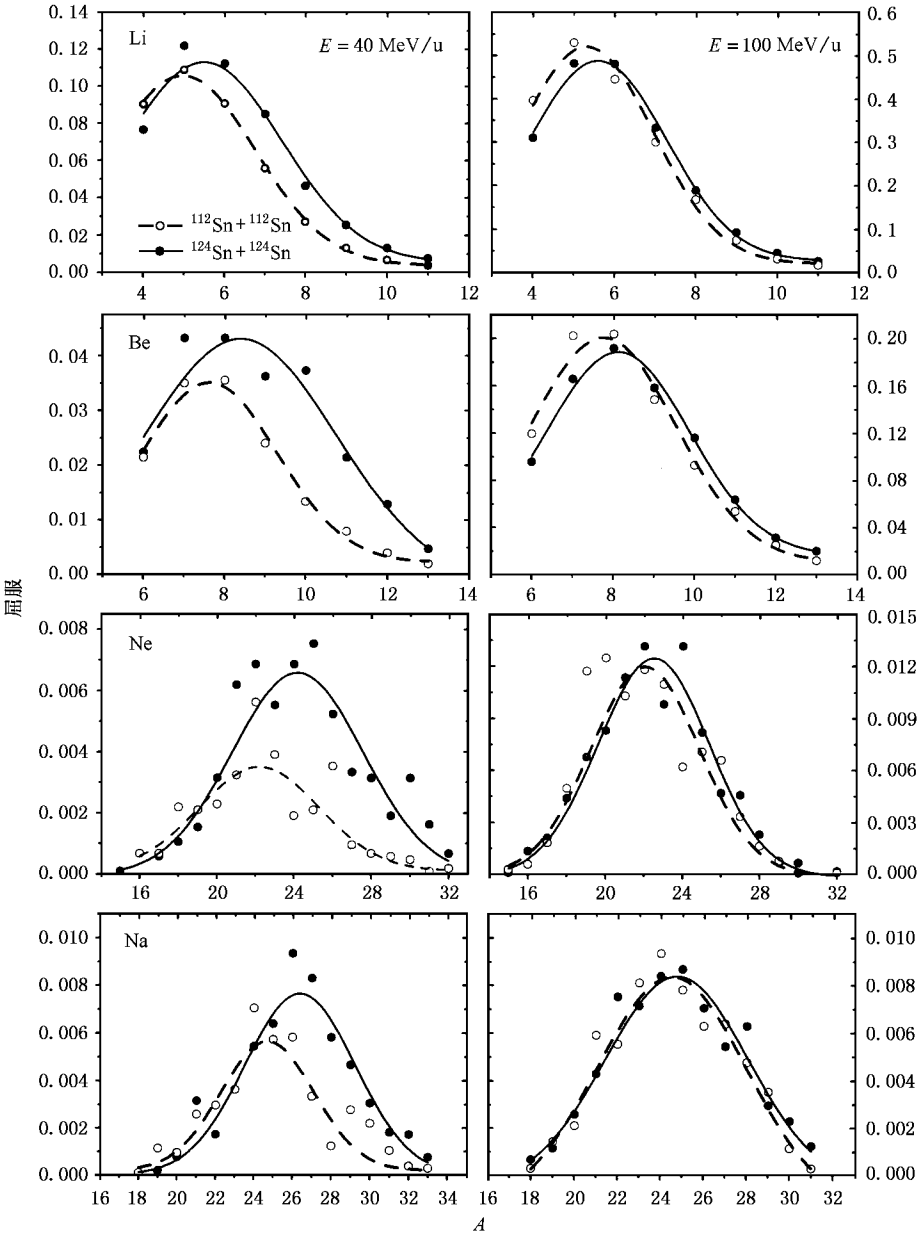


图 1 IQMD 模型预言的 $E = 40$ 和 100 MeV/u 时中心碰撞系统 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 和 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 中元素 Li, Be, Ne 和 Na 的同位素分布,实线和虚线为 Gaussian 拟合的结果

性的时间演化.在重离子碰撞的动力学演化过程中,反应系统的中心区域最具代表性,其密度 ρ 和相对中子过剩 δ 的时间演化是很容易给出的,但是如何合理自洽地给出动力学演化过程中温度 T 的时间演化将是一个比较复杂的问题.我们知道,声速的平方可以简单地由下式得到^[21]:

$$v_s^2 = \frac{1}{m} \frac{\partial P}{\partial \rho} \Big|_{T, \delta} = \frac{1}{m} \left[\frac{10}{9} < E_k(\rho, T, \delta) > + \alpha \frac{\rho}{\rho_0} + \beta \gamma \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma + C \frac{\rho}{\rho_0} \delta^2 \right], \quad (15)$$

其中 E_k 为每核子的平均动能.由(9)式与(15)式的比较可以得到

$$\frac{T}{2} \left[2 + \sum_{n=1}^{\infty} (n+1) b_n \left(\frac{\lambda_T^3}{4} \right)^n ((1+\delta)^{n+1} + (1-\delta)^{n+1}) \rho^n \right] = \frac{10}{9} < E_k(\rho, T, \delta) >. \quad (16)$$

可见,只要知道每核子的平均动能,即可由(16)式自洽地求得系统的温度 T .

在本文的计算中,研究了 $E = 40$ 和 100 MeV/u 时 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 和 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 反应中围绕质心半径为 2 fm 的球内,平均密度 ρ 、平均相对中子过剩 δ 以及平均温度 T 的动力学演化,并根据(9)和(10)式得到

了 $(\partial \mu_n / \partial \delta)|_{T, \rho}$ 以及 $(\partial P / \partial \rho)|_{T, \delta}$ 的时间演化,如图2所示.从图2左边可以看到,当 $E = 40 \text{ MeV/u}$ 时,碰撞系统 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 和 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 在 $t = 90 \text{ fm/c}$ 时都进入了力学不稳定区 $((\partial P / \partial \rho)|_{T, \delta} < 0)$,这将导致系统的多重碎裂^[3].同时可以看到,对于丰中子碰撞系统 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 在 $t = 90 \text{ fm/c}$ 时进入了化学不稳定区 $((\partial \mu_n / \partial \delta)|_{T, \rho} < 0)$,而碰撞系统 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 未能进入化学不稳定区.而当 $E = 100 \text{ MeV/u}$ 时,从图2右边可以看到,两个反应系统 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 和 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 分别在 $t = 68$ 和 72 fm/c 时进入了力学不稳定区,但都未能进入化学不稳定区.从物理上直观地来讲,化学不稳定性意味着系统的同位旋自由度将向着使系统的自由能降低的方向改变.就当前的情况而言,进入化学不稳定区后,系统的相对中子过剩将变得更大.丰中子系统发射的中等质量碎片必然是趋向丰中子一边的^[11-14],于是作为一个直接的实验可观现象,在 $E = 40 \text{ MeV/u}$ 时,碰撞系统 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 较 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 产生的同位素分布将会更趋向于丰中子一边,从而导致所观察到的同位素分布的同位旋相关性.而当 $E = 100 \text{ MeV/u}$ 时,由于两个系统都未进入化学不稳定区,这种差别应该消失,从而导致了同位素分布同位旋效应的消失.

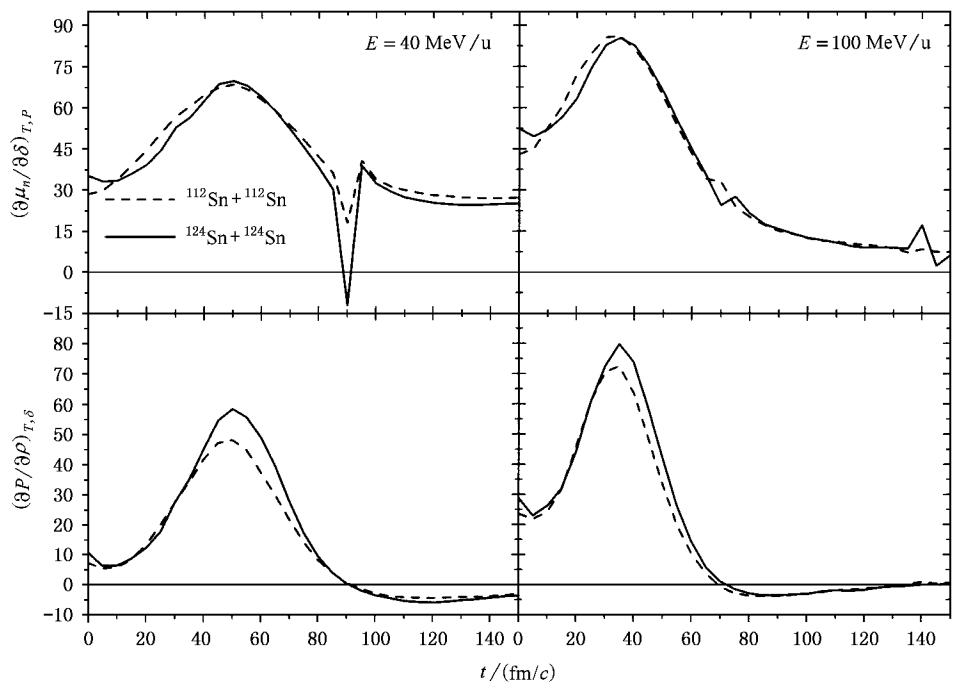


图2 IQMD 模型预言的 $E = 40$ 和 100 MeV/u 时中心碰撞系统 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 和 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 中心区域的 $(\partial \mu_n / \partial \delta)|_{T, \rho}$ 以及 $(\partial P / \partial \rho)|_{T, \delta}$ 的时间演化

4 结 论

总的来说,在 IQMD 模型框架下研究了 $E = 40$ 和 100 MeV/u 的 $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ 和 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 反应,结果发现入射能量 $E = 40 \text{ MeV/u}$ 时,丰中子系统 $^{124}\text{Sn} +$

^{124}Sn 产生的同位素分布更趋于丰中子的一边,而在 $E = 100 \text{ MeV/u}$ 时,这种差别基本消失.通过计算不同能量下力学不稳定性与化学不稳定性的时间演化说明同位素分布的这种能量依赖性是由于不同能量下化学不稳定性与力学不稳定性相互竞争所导致的.

[1] F. S. Zhang , L. X. Ge , Nuclear Multifragmentation (Science Press , Beijing , 1998) [in Chinese] , p. 242 [张丰收、葛凌霄 , 原子核多重碎裂(科学出版社 , 北京 , 1998) 242].

[2] W. Bauer , G. F. Bertsch , H. Schulz , *Phys. Rev. Lett.* , **69**(1992) , 1888.

[3] Y. Abe , S. Ayik , P. G. Reinhard , E. Suraud , *Phys. Rep.* , **275** (1996) 49.

[4] Q. F. Li , Z. X. Li , G. J. Mao , *Phys. Rev.* , **C62**(2000) 014606.

[5] G. J. Kunde , S. J. Gaff , C. K. Gelbke *et al.* , *Phys. Rev. Lett.* , **77** (14) (1996) 2897.

[6] M. L. Miller , O. Bjarki , D. J. Magestro *et al.* , *Phys. Rev. Lett.* , **82** (7) (1999) 1399.

[7] F. S. Zhang , L. W. Chen , Z. Y. Ming *et al.* , *Phys. Rev.* , **C60** (1999) 064604.

[8] L. W. Chen , F. S. Zhang , G. M. Jin *et al.* , *Phys. Lett.* , **B459** (1999) 21.

[9] Z. Y. Zhu , W. Q. Shen , Y. H. Cai *et al.* , *Phys. Lett.* , **B328**(1994) , 1.

[10] B. A. Li , C. M. Ko , W. Bauer. , *Inte. J. Mod. Phys.* , **E7**(2) (1998) 147.

[11] S. J. Yennello , J. A. Winger , H. Johnston *et al.* (TAMU Prog. Res. , 1994) 1 - 7.

[12] S. J. Yennello , B. Young , J. Yee *et al.* , *Phys. Lett.* , **B321**(1994) , 15.

[13] Y. G. Ma *et al.* , *Acta Physica Sinica* **49**(2000) 654(in Chinese) [马余刚等 , 物理学报 **49**(2000) 654].

[14] D. Q. Fang , W. Q. Shen , J. Feng *et al.* , *Phys. Rev.* , **C61**(2000) , 044610.

CHEMICAL INSTABILITY AND ISOSPIN EFFECTS
IN ISOTOPIC DISTRIBUTIONS*

LI WEN-FEI^{1 2)} ZHANG FENG-SHOU^{1 2 3)} CHEN LIE-WEN^{1 2 3)}

¹⁾ Center of Theoretical Nuclear Physics ,National Laboratory of Heavy Ion Accelerator ,Lanzhou 730000 ,China)

²⁾ Institute of Modern Physics ,Chinese Academy of Sciences ,Lanzhou 730000 ,China)

³⁾ Department of Applied Physics ,Shanghai Jiaotong University ,Shanghai 200030 ,China)

⁴⁾ CCAST (World Laboratory) Beijing 100080 ,China)

(Received 31 October 2000 ; revised manuscript received 27 November 2000)

ABSTRACT

Within the framework of isospin-dependent quantum molecular dynamics model ,isotopic distributions in the reactions of $^{112}\text{Sn} + ^{112}\text{Sn}$ and $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ at 40 and 100 MeV/u are investigated. It is found that the isotopic distribution has a significant isospin effect at 40 MeV/u ,but the isospin effect disappears at 100 MeV/u. By investigating mechanical and chemical instabilities at different energies ,we find that the energy dependence of isospin effects on isotopic distributions results from the competition between mechanical instabilities and chemical instabilities at different energies.

Keywords : chemical instability ,isospin effects , isotopic distributions , isospin-dependent quantum molecular dynamics

PACC : 2570 , 2587

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 19875068 ,19847002) ,the Key Basic research development Program (Grant No. G2000077407) , and the Science Foundation of the Chinese Academy of Sciences.