

近垒能区 $^{32}\text{S}+^{90,96}\text{Zr}$ 势垒分布的研究*

吴秀坤¹⁾ 林承键 杨峰 刘祖华 张焕乔 张春雷 周平

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 精确测量了 $^{32}\text{S}+^{90,96}\text{Zr}$ 两系统的背角准弹散射激发函数, 总体误差小于1%, 从中分别抽取了它们的势垒分布, 对比观测到 $^{32}\text{S}+^{96}\text{Zr}$ 的势垒结构扁平且向低能区展宽, 这种势垒可导致在垒下能区该体系的熔合截面的大大增强. $^{32}\text{S}+^{96}\text{Zr}$ 与 $^{32}\text{S}+^{90}\text{Zr}$ 相比存在较强的中子转移反应, 且转移 Q 值为正. $^{32}\text{S}+^{96}\text{Zr}$ 势垒的扁平结构可能是中子转移道耦合所致, 这会导致 $^{32}\text{S}+^{96}\text{Zr}$ 垒下熔合截面大的增强.

关键词 准弹激发函数 势垒分布 中子转移

1 引言

在垒下熔合反应中转移道的耦合, 特别是转移 Q 值为正的中子转移道的耦合使得熔合势垒分布变得扁平且向低能展宽, 导致垒下熔合截面大大增强. 已有实验表明, 在某些系统中如不考虑中子转移, 就不能解释垒下熔合截面的几个数量级的增强^[1], 而质子转移道的耦合却对熔合截面影响甚微^[2, 3]. 转移道的耦合具有一种全然不同于核的其他内部自由度耦合的物理图像, 对其机制目前存在不同的解释. 搞清楚这种耦合机制, 有助于建立统一的耦合道模型, 并为近年来人们利用熔合反应合成超重核提供线索和手段. 我们选用可比性较强的 $^{32}\text{S}+^{90,96}\text{Zr}$ 作为研究对象, 对于 $^{32}\text{S}+^{96}\text{Zr}$ 其主要转移道从 $1n$ 到 $6n$ 转移反应 Q 值均为正, 且质子转移 Q 值均为负, 而对作为参照系的 $^{32}\text{S}+^{90}\text{Zr}$, 其相应转移道的反应 Q 值均为负, 因此这两个体系是研究中子转移道对势垒分布影响比较理想的体系.

Rowley 等人^[4]提出, 可以直接从精确测量熔合激发函数来确定熔合势垒分布, 它相应于能量与熔合反应截面乘积对能量的二次微商:

$$D(B) = \frac{d^2(E\sigma^{\text{fus}}(E))}{dE^2}. \quad (1)$$

但由于实验上熔合势垒分布的误差正比于熔合截面, 因此随着能量的增加误差迅速增大, 使得垒上部分

的势垒结构仍难以确定. 为此 Timmer^[5]和 Rowley 等人^[6]又进一步提出, 在耦合道理论框架下, 用背角准弹散射和弹性散射激发函数抽取势垒分布的方法:

$$D^{\text{qel}}(E) = -\frac{d}{dE} \left(\frac{d\sigma^{\text{qel}}}{d\sigma^{\text{R}}}(E) \right), \quad (2)$$

$$D^{\text{el}}(E) = -\frac{d}{dE} \left(\frac{d\sigma^{\text{el}}}{d\sigma^{\text{R}}}(E) \right)^{1/2}. \quad (3)$$

在本次实验中, 精确测量了 $^{32}\text{S}+^{90,96}\text{Zr}$ 两体系的背角准弹激发函数并抽取势垒分布, 比较两体系的势垒分布结构得出一些结论.

2 实验安排

这次实验是在中国原子能科学研究院 HI-13 型静电式串列加速器上进行的. 实验中, 在背角用 5 组 $\Delta E-E_{\text{R}}$ 望远镜探测器和两组 Si(Au) 金硅面垒半导体探测器实现准弹散射微分截面的测量, 每组探测器位于不同的角度, 可以从 154.83° , 158.14° , 159.07° , 160.00° , 160.93° , 161.86° , 165.17° 7 个角度同时测量, 在前角 $\pm 20^\circ$ 安置了 2 块 Si(Au) 面垒探测器作监视器用以束流监视和截面归一. 实验装置如图 1 所示, 探测器的几何表示在图上. 利用 CAMAC-MBD-MVAXR 系统在线获取, 并把最后得到事件文件转移到微机上用 PAW (Physics Analysis Workstation) 进行处理分析. 这次

2005-06-13 收稿, 2005-09-05 收修改稿

* 国家自然科学基金(10235030, 10275095)资助

1) E-mail: kunkunge@iris.ciae.ac.cn

实验测量了能量范围在80—122MeV之间共28个能点, 步长在1MeV左右.

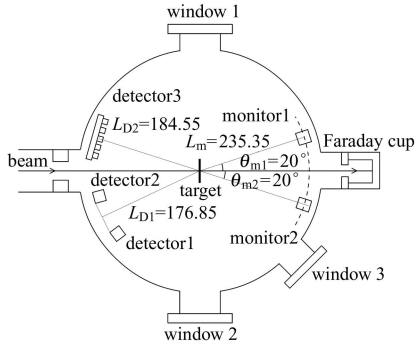


图1 实验中探测器、监视器和束流位置关系示意图

3 数据分析

用微机版PAW处理了这次实验所得的数据, 对Si(Au)金硅面垒半导体探测器检测到的一维谱数据采用不对称高斯拟合, 不对称高斯拟合形式如下:

$$ASY(x) = P_1 \exp \left[-\frac{1}{2} \times \left(\frac{x - P_2}{\sigma} \right)^2 \right], \quad \begin{cases} \sigma = P_3, & x < P_2 \\ \sigma = P_4, & x \geq P_2 \end{cases} \quad (4)$$

这里 P_1, P_2, P_3, P_4 是不对称高斯拟合的参数, 分别代表峰高、峰位和峰两边的半高宽度. 这样得到的峰的面积

$$N = \sqrt{\frac{\pi}{2}} P_1 (P_2 + P_4) \approx 1.253 P_1 (P_2 + P_4). \quad (5)$$

由 $\Delta E - E_R$ 望远镜探测器得到的数据是在二维谱上开窗得到, 如图2所示.

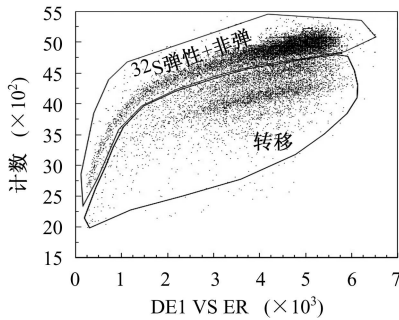


图2 二维谱处理

在实验过程中, 束流在穿过靶时会有一定的能量损失, 在数据处理时针对这种情况做了能量修正. 准弹性散射即弹性散射、非弹性散射和转移反应之和, ^{32}S 有两个主要的激发态 2^+ 和 3^- 态, ^{90}Zr 和 ^{96}Zr 主要的激发态也是 2^+ 和 3^- 态, 但值得强调的是 ^{96}Zr 的 3^- 态有较大的形变其 β 值为0.27, 且激发能较低, $^{32}\text{S} + ^{96}\text{Zr}$ 存在较强的中子转移, 中子拾取从 $1n$ 到 $6n$

Q 值都为正, 基于这些主要原因 $^{32}\text{S} + ^{96}\text{Zr}$ 的准弹截面下降较缓慢并且在垒上逐渐超过 $^{32}\text{S} + ^{90}\text{Zr}$, 如图3所示.

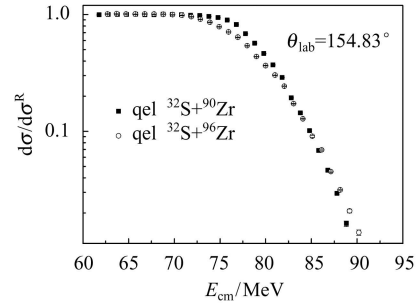


图3 $\theta_{\text{lab}}=154.83^\circ$ 处 $^{32}\text{S} + ^{90,96}\text{Zr}$ 准弹激发函数

根据公式(2)在实验上可以用差分的方法从准弹激发函数中抽取反应系统的势垒分布, 即

$$D^{\text{qel}} \cong - \frac{\frac{d\sigma^{\text{qel}}}{d\sigma^{\text{R}}(E+0.5\Delta E)} - \frac{d\sigma^{\text{qel}}}{d\sigma^{\text{R}}(E-0.5\Delta E)}}{\Delta E}. \quad (6)$$

在这次势垒抽取中 ΔE 取值在2MeV左右, 得到的具体结果如图4所示, $^{32}\text{S} + ^{90}\text{Zr}$ 的势垒分布较为规则, 有一个较为明显的峰, 且宽度较窄, 而 $^{32}\text{S} + ^{96}\text{Zr}$ 的势垒形状较为扁平, 且向低能区移动了约5个MeV. 在理论方面, 在现有的耦合道理论模型下, 用耦合道计算程序CCDEF作了理论计算用以与实验结果作比较, 图中虚线和实线部分是理论计算结果, 对于 $^{32}\text{S} + ^{90}\text{Zr}$ 依次考虑了 ^{32}S 和 ^{90}Zr 的 $2^+, 3^-$ 激发态, 对 $^{32}\text{S} + ^{96}\text{Zr}$ 同样是依次考虑了弹核和靶核的 $2^+, 3^-$ 激发态, 各参数的详细信息见表1. 结果表明 $^{32}\text{S} + ^{90}\text{Zr}$ 体系理论计算和实验结果符合相当好, 而 $^{32}\text{S} + ^{96}\text{Zr}$ 的理论计算结果和实验相差较远, 特别是对低能区的展宽未能描述, 这与 $Q > 0$ 的中子转移相关.

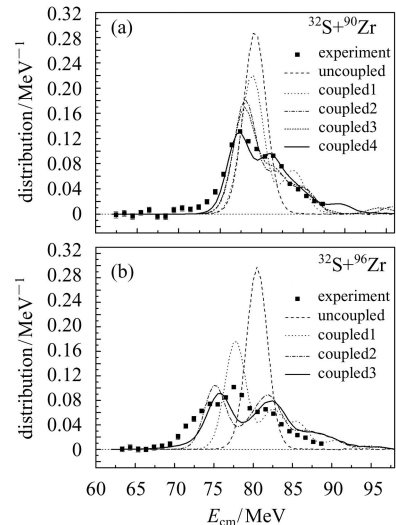


图4 $\theta_{\text{lab}}=154.83^\circ$ 处 $^{32}\text{S} + ^{90,96}\text{Zr}$ 势垒分布

表 1

Nucleus	E_x/MeV	λ^π	$B(E\lambda) \downarrow$	β_λ
^{32}S	2.230	2^+	10.1	0.32
	5.006	3^-	17.0	0.40
^{90}Zr	2.186	2^+	5.2	0.09
	2.748	3^-	32.1	0.22
^{96}Zr	1.751	2^+	4.3	0.08
	1.897	3^-	48.0	0.27

注: E_x 为激发能; λ^π 是振动极次; $B(E\lambda)$ 是约化跃迁几率; β_λ 是形变参数.

图 4(a) 中是 $^{32}\text{S}+^{90}\text{Zr}$ 由准弹散射激发函数抽取的势垒分布与 CCDEF 计算结果的比较, 散点 experiment 是本次实验值, uncoupled 是 CCDEF 计算中没有考虑任何耦合因素, coupled1 是 CCDEF 计算中考虑了弹核 ^{32}S 激发的 2^+ 态, coupled2 是 CCDEF 计算中考虑了弹核 ^{32}S 激发的 2^+ 态和 3^- 态, coupled3 是 CCDEF 计算中考虑了弹核 ^{32}S 激发的 2^+ 态和 3^- 态和靶核 ^{90}Zr 激发的 2^+ 态, coupled4 是 CCDEF 计算中考虑了弹核 ^{32}S 激发的 2^+ 态和 3^- 态和靶核 ^{90}Zr 激发的 2^+ 态和 3^- 态. 图 4(b) 中是 $^{32}\text{S}+^{96}\text{Zr}$ 由准弹散射激发函数抽取的势垒分布与 CCDEF 计算结果比较, 散点 experiment 是本次实验值; uncoupled 是 CCDEF 计算中没有考虑任何耦合因素, coupled1 是 CCDEF 计算中考虑了弹核 ^{32}S 激发的 2^+ 态和 3^- 态, coupled2 是

CCDEF 计算中考虑了弹核 ^{32}S 激发的 2^+ 态、 3^- 态和靶核 ^{96}Zr 激发的 2^+ 态和 3^- 态, coupled3 是 CCDEF 计算中考虑了弹核 ^{32}S 激发的 2^+ 态、 3^- 态和靶核 ^{96}Zr 激发的 2^+ 态和 3^- 态以及所有转移 Q 值为正的中子转移道.

通过图中实验与理论结果的比较发现对于 $^{32}\text{S}+^{90}\text{Zr}$ 这个体系实验值和理论值符合的非常好, 而对于 $^{32}\text{S}+^{96}\text{Zr}$ 理论计算值和实验结果差距较大, 即使考虑了弹核和靶核的主要激发态再加上所有的转移道耦合因素, 还是和实验相差甚远, 由此可以得出这样一个初步的结论, $^{32}\text{S}+^{96}\text{Zr}$ 体系较为复杂的势垒结构是中子转移造成的, 且现有的耦合道理论还不能合理解释这种现象.

4 结论

Q 值为正的中子转移道的耦合使得反应体系的势垒分布出现劈裂, 呈现出较为复杂的结构, 其位置也向垒下能区延伸. 这样的势垒分布会导致反应体系在垒下能区熔合截面的大的增强, 计划在下一步工作中精确测量 $^{32}\text{S}+^{90,96}\text{Zr}$ 的熔合激发函数并加以比较垒下能区截面以验证本次实验的结论.

参考文献(References)

- 1 Timmers H et al. Nucl. Phys., 1998, **A633**: 421
- 2 Mukherjee A et al. Phys. Rev., 2002, **C66**: 034607
- 3 Scarlassara F et al. Progress of Theoretical Physics, 2004, **154**: 31
- 4 Rowly N et al. Phys. Lett., 1991, **B254**: 25
- 5 Timmers H et al. Nucl. Phys., 1995, **A584**: 190
- 6 Rowly N et al. Phys. Lett., 1996, **B373**

Near-Barrier Quasi-elastic Cross Sections and Barrier Distribution of $^{32}\text{S}+^{90,96}\text{Zr}^*$

WU Xiu-Kun¹⁾ LIN Cheng-Jian YANG Feng LIU Zu-Hua ZHANG Huan-Qiao
ZHANG Chun-Lei ZHOU Ping
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract Quasi-elastic cross sections have been measured for $^{32}\text{S}+^{90,96}\text{Zr}$ with high accuracy near the Coulomb barrier at backward angles and the barrier distributions are extracted from them. We find that barrier distribution of $^{32}\text{S}+^{96}\text{Zr}$ is flat and extends to low energies. The sub-barrier fusion cross sections are strongly enhanced because of such barrier distribution. Compared with the reaction of $^{32}\text{S}+^{90}\text{Zr}$, $^{32}\text{S}+^{96}\text{Zr}$ has stronger neutron transfers up to the six-neutron pickup, which is due to the positive Q values of neutron transfers in the latter. This indicates that the neutron transfer may play a role in the enhancement of sub-barrier fusion for $^{32}\text{S}+^{96}\text{Zr}$.

Key words quasi-elastic cross section, barrier distribution, neutron transfer

Received 13 June 2005, Revised 5 September 2005

*Supported by NSFC (10235030, 10275095)

1) E-mail: kunkunge@iris.ciae.ac.cn