

# 弱束缚弹核引起的熔合反应\*

刘祖华<sup>1)</sup>

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

**摘要**  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$  为弱束缚核. 通过弱束缚弹核  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$  轰击靶核  ${}^{208}\text{Pb}$ ,  ${}^{208}\text{Bi}$  的实验熔合激发函数与理论预言的比较, 讨论了弱束缚弹核破裂对熔合过程的影响. 比较结果显示, 弱束缚弹核与重靶核的完全熔合截面在垒上能区明显压低. 由部分熔合截面与完全熔合截面之和得到总熔合截面. 研究表明, 破裂对总熔合截面几乎没有影响. 由此可见, 弱束缚核的部分熔合可能发生在强吸收区域附近. 最后还给出了全熔合截面与部分熔合截面之间的关系.

**关键词** 弱束缚核 弹核破裂 全熔合 部分熔合

## 1 引言

弱束缚弹核引起的熔合反应与超重核合成及感兴趣的天体反应有关, 因此目前从理论<sup>[1-6]</sup>和实验<sup>[7-16]</sup>两方面进行着广泛的研究. 理论上存在着两种矛盾的预言, 即通过碰撞核相对运动与破裂道的耦合使全熔合截面压低<sup>[1-4]</sup>或增强<sup>[5]</sup>. 最近, Hagino<sup>[6]</sup>做了一改进的耦合道模型计算, 试图调和两种相冲突的处理. 他的理论处理预言, 在库仑位垒以下能区破裂使全熔合截面增强, 而在垒上能区, 破裂使全熔合截面压低. 不同的理论预言需要精确可靠的实验作判断. 为此目的, 利用晕核( ${}^6\text{He}$ ,  ${}^{11}\text{Be}$ )<sup>[7-10]</sup>和弱束缚核( ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{17}\text{F}$ )<sup>[11-16]</sup>做了许多实验. 虽然作了广泛的研究, 破裂对熔合的影响, 尤其是与部分熔合的关系, 至今尚未确定的结论<sup>[17]</sup>. 因此破裂效应在实验上和理论上仍然是一重要的研究课题. 本文讨论弱束缚弹核  ${}^6\text{Li}$  和  ${}^9\text{Be}$  与重靶核  ${}^{208}\text{Pb}$  和  ${}^{209}\text{Bi}$  在垒上能区的熔合反应中的破裂效应.

## 2 全熔合反应中的弹核破裂效应

众所周知, 在库仑位垒以下能区, 碰撞核的内部自由度强烈影响熔合反应过程<sup>[16]</sup>. 相对运动与内部自

由度的耦合使单一的熔合位垒劈裂, 导致熔合位垒高度形成一个分布<sup>[18]</sup>, 因而使近垒和垒下能区熔合截面明显增强. 另一方面, 与相互作用核的内部自由度的耦合道效应在垒上能区减弱. 当能量明显高于库仑位垒时, 耦合道效应消失. 因此, 在垒上能区, 紧束缚核的熔合截面可以满意地表达为

$$\sigma_{\text{fus}}(E) = \pi R_B^2 \left(1 - \frac{V_B}{E}\right), \quad (1)$$

其中  $R_B$  和  $V_B$  分别为熔合位垒的半径和高度,  $E$  为质心系能量. 我们可以把公式(1)改写为

$$\frac{\sigma_{\text{fus}}(E)E}{\pi R_B^2} = E - V_B, \quad (2)$$

此处  $(\sigma_{\text{fus}}E)/(\pi R_B^2) = \sigma_{\text{fus}}^{\text{red}}$  为约化截面. 公式(2)在  $\sigma_{\text{fus}}^{\text{red}}$  相对于  $(E - V_B)$  标度中代表一条直线.

对于弱束缚核, 情况较为复杂. 在垒下能区, 与破裂道的耦合可能使垒下熔合截面增强. 而另一方面, 由于弹核破裂, 靶核可能只俘获弹核的一部分, 因而使垒下全熔合截面减小. 这两种效应在垒下能区可能互相抵消或部分抵消. 然而在垒上能区, 由于耦合道效应减弱, 甚至消失, 破裂俘获或削裂过程可能显现其在完全熔合中的效应. 以下, 我们将通过实验激发函数与标准熔合理论模型, 即公式(2)的比较, 讨论熔合反应中的破裂效应. 在图 1 中, 我们

2005 - 01 - 28 收稿

\* 国家自然科学基金(10235030)资助

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

比较了  ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ <sup>[17]</sup>,  ${}^6\text{Li}+{}^{209}\text{Bi}$ <sup>[11]</sup>,  ${}^9\text{Be}+{}^{208}\text{Pb}$ <sup>[12]</sup> 和  ${}^9\text{Be}+{}^{209}\text{Bi}$ <sup>[13]</sup> 4 个反应系统, 其中所用的熔合位垒半径 ( $R_B$ ) 和位垒高度 ( $V_B$ ) 列于表 1 中. 这些参数的数值分别取自所列的参考文献.

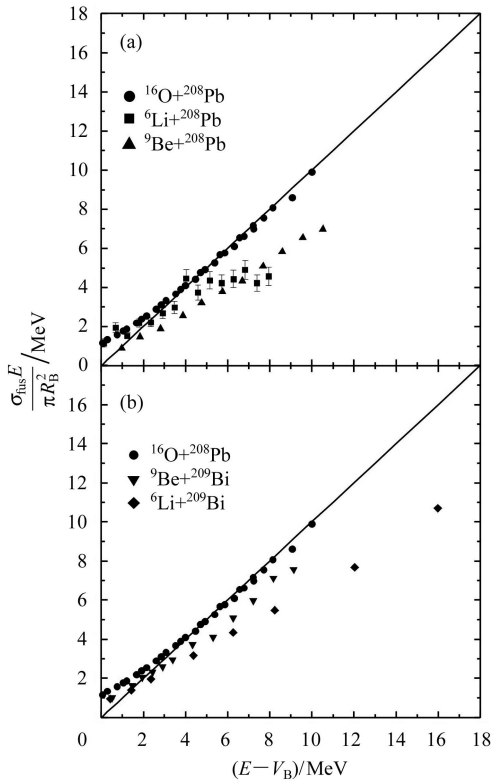


图 1 作为  $(E-V_B)$  函数的约化全熔合截面  
实线代表公式(2).

表 1 熔合位垒半径和高度

反应系统	$V_B/\text{MeV}$	$R_B/\text{fm}$	参考文献
${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$	30.3	11.0	[17]
${}^6\text{Li}+{}^{209}\text{Bi}$	30.6	11.1	[11]
${}^9\text{Be}+{}^{208}\text{Pb}$	38.3	11.28	[12]
${}^9\text{Be}+{}^{209}\text{Bi}$	39.7	11.90	[13]
${}^{16}\text{O}+{}^{208}\text{Pb}$	74.9	11.76	[19]

对于紧束缚核, 通常认为在反应中破裂几率很小, 因而弹核破裂对熔合反应的影响可以忽略.  ${}^{16}\text{O}+{}^{208}\text{Pb}$ <sup>[19]</sup> 系统正是这种情况. 由图 1 可见, 在垒上能区,  ${}^{16}\text{O}+{}^{208}\text{Pb}$  的熔合激发函数与公式(2)所代表的直线一致. 因此  ${}^{16}\text{O}+{}^{208}\text{Pb}$  系统可作为讨论熔合反应中的弹核破裂效应的参考系统. 而对于弱束缚的弹核  ${}^6\text{Li}$  和  ${}^9\text{Be}$ , 完全熔合激发函数明显偏离直线. 由此, 非常直观地呈现了弹核破裂导致垒上全熔合截面压低.

### 3 全熔合与部分熔合

在弱束缚核熔合中, 存在两种熔合过程, 即全熔合(CF)和不完全熔合或部分熔合(ICF). 前者是弹

核全部被靶核俘获, 后者是靶核俘获弹核的一部分, 而弹核的另一部分飞离靶核的势场成为出射粒子. 部分熔合过程可能比较复杂, 其反应机制有待深入研究. 总熔合截面是两者之和. 在图 2 中除了画出全熔合激发函数以外, 还同时画出了  ${}^6\text{Li}+{}^{209}\text{Bi}$ <sup>[11]</sup> 和  ${}^9\text{Be}+{}^{208}\text{Pb}$ <sup>[12]</sup> 两个反应系统的总熔合截面, 如空心符号所示. 由图可见, 这两个系统的总熔合激发函数与公式(2)所代表的直线一致. 换句话说, 全熔合截面的减小与观察到的部分熔合截面有关, 即

$$\sigma_{\text{CF}} + \sigma_{\text{ICF}} \cong \pi R_B^2 \left(1 - \frac{V_B}{E}\right), \quad (3)$$

这意味着, 全熔合截面的丢失部分可在部分熔合中找到. 最近 Ding-Torres 等人<sup>[20]</sup> 用 CDCC(continuum discretized coupled channel)方法研究了熔合过程中的弹核破裂效应. 他们发现破裂使位垒附近的总熔合截面增强, 而且在明显高于位垒的能区, 破裂对总熔合截面几乎没有影响. 因此, 他们的理论研究支持了我们以上的观察. 总之, 我们用公式(3)简洁地给出了垒上能区全熔合与部分熔合的关系. 根据(3)式, 由实验测得的全熔合截面可推算部分熔合截面. 因此, 公式(3)是一有意义的结果.

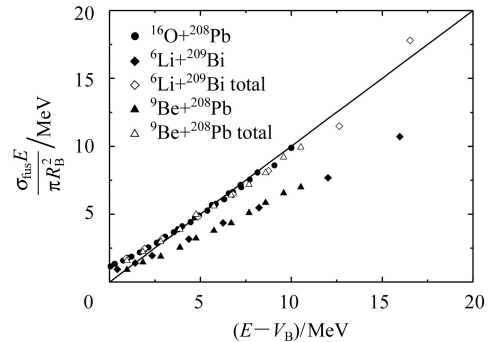


图 2 总熔合约化截面与标准理论预言的比较

### 4 讨论与结论

如上所述, 部分熔合可能是一复杂的过程, 其反应机制至今尚不很清楚. 然而, 由公式(3)我们可以推测部分熔合很可能发生在靶核的强吸收边缘区域. 相对这一区域的分波, 弹核破裂后, 其一部分(往往是较轻的一块)被靶核俘获, 而另一部分飞离靶核的势场成为出射粒子. 如果是紧束缚的弹核不发生破裂, 这些分波也贡献于全熔合截面. 当然这只是猜测. 利用晕核或弱束缚核从实验和理论上对上述过程进行深入研究会很有意义.

总之, 我们通过  ${}^6\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ ,  ${}^9\text{Be}+{}^{208}\text{Pb}$ ,  ${}^6\text{Li}+{}^{209}\text{Bi}$ ,  ${}^9\text{Be}+{}^{209}\text{Bi}$  4 个反应系统的实验激发函数与经典理论预言的比较, 直观地显示了在垒上能区, 弹核

破裂使全熔合截面减少, 而弹核破裂对总熔合截面几乎没有影响. 由此我们得出了全熔合截面与部分截面之间的关系, 即公式(3).

### 参考文献(References)

- 1 Hussein M S, Pato M P, Canto L F et al. Phys. Rev., 1992, **C46**: 377; 1993, **47**: 2398
- 2 Canto L F, Donangeto R, Lotti P et al. Phys. Rev., 1995, **C52**: R2848
- 3 Takigawa N, Kuratani M, Sagawa H. Phys. Rev., 1993, **C47**: R2470
- 4 Yabana K. Prog. Theor. Phys., 1997, **97**: 437
- 5 Dasso C H, Vitturi A. Phys. Rev., 1994, **C50**: R12
- 6 Hagino K, Vitturi A, Dasso C H et al. Phys. Rev., 2000, **C61**: 037602
- 7 Kolata J J et al. Phys. Rev. Lett., 1998, **81**: 4580
- 8 Trotta M et al. Phys. Rev. Lett., 2000, **84**: 2342
- 9 Yoshida A et al. Phys. Lett., 1996, **B389**: 457
- 10 Signorini C et al. Eur. Phys. J., 1998, **A2**: 227
- 11 Dasgupta M et al. Phys. Rev., 2002, **C66**: R041602
- 12 Signorini C et al. Eur. Phys. J., 1999, **A5**: 7
- 13 Dasgupta M et al. Phys. Rev. Lett., 1999, **82**: 1395
- 14 Rehm K E et al. Phys. Rev. Lett., 1998, **81**: 3341
- 15 Beck C et al. Phys. Rec., 2003, **C67**: 054602
- 16 Beckman M. Rep. Prog. Phys., 1998, **51**: 1047
- 17 WU Y W et al. Phys. Rev., 2003, **C68**: 044605
- 18 Dasso C H et al. Nucl. Phys., 1992, **A405**: 381
- 19 Morton R et al. Phys. Rev., 1999, **C60**: 044608
- 20 Diaz-Torres A, Thompson I J, Beck C. Phys. Rev., 2003, **C68**: 044607

## Fusion Reactions Induced by Weakly Bound Projectile<sup>\*</sup>

LIU Zu-Hua<sup>1)</sup>

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

**Abstract** The effect of breakup on fusion for weakly bound projectiles  ${}^6\text{Li}$  and  ${}^9\text{Be}$  incident on  ${}^{208}\text{Pb}$  or  ${}^{209}\text{Bi}$  targets has been discussed by comparing experimental fusion excitation functions to the prediction of stranded theory. It is shown intuitively by this comparison that complete fusion of weakly bound projectile with heavy target is suppressed, whereas breakup has every little effect on the total fusion at energies above the barrier. The result indicates that partial fusion of weakly bound nuclei most likely takes place near the absorption region. By means of our observation, we have put forward a relationship between the cross sections of complete fusion and partial fusion.

**Key words** weakly bound nucleus, projectile breakup, complete fusion, partial fusion

Received 28 January 2005

<sup>\*</sup>Supported by National Natural Science Foundation of China (10235030)

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