

核物理主题数据: 实验、理论与应用专题

## 基于双核模型的超重原子核合成截面系统研究\*

邓祥泉<sup>1)2)</sup> 周善贵<sup>2)1)†</sup>

1) (中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049)

2) (中国科学院理论物理研究所, 北京 100190)

(2025年9月23日收到; 2025年10月20日收到修改稿)

超重原子核的合成是当前核物理领域的前沿问题. 反应体系的选取和最佳入射能量的确定对超重核的实验合成至关重要. 利用稳定弹核能够合成的超重核非常有限, 而放射性弹核熔合蒸发反应有望成为合成超重核的新途径, 有必要对这类反应进行全面、深入的探索. 本文基于双核模型, 开展放射性弹核熔合蒸发反应系统研究. 根据合成  $Z = 104-122$  超重元素同位素的 4969 个反应体系的计算结果, 建立了超重核合成截面数据集. 数据集包含这些反应体系 2—5 中子蒸发道合成的超重核素、最佳入射能和最大蒸发剩余截面. 这一数据集可为实验合成超重新核素乃至超重新元素提供关键支撑, 具有较大应用价值. 本文深入探讨了计算结果中蕴含的系统性规律. 结果表明, 众多反应体系的合成截面差异甚大, 复合体系的内熔合位垒和复合核的裂变位垒是影响反应体系截面的重要因素. 本文数据集可在 <http://www.doi.org/10.57760/sciencedb.27854> 中访问获取.

**关键词:** 超重原子核, 重离子熔合蒸发反应, 放射性束流, 双核模型**DOI:** 10.7498/aps.75.20251309**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251309

## 1 引言

探索超重原子核的性质、在实验室合成超重原子核是当前核物理研究的前沿领域<sup>[1-11]</sup>. 随着原子核不断变重, 裂变成为限制其稳定存在的主要因素<sup>[12]</sup>. 经典的液滴模型<sup>[13]</sup>预言, 当原子核的电荷数  $Z$  接近 104 时, 在其形变-势能曲面上, 裂变位垒近乎消失, 导致这些核极易发生裂变, 无法稳定存在. 然而量子壳效应会显著影响这些核的结构性质, 导致它们对于裂变具有额外的稳定性<sup>[14,15]</sup>. 通常, 人们将  $Z \geq 104$  的原子核称为超重原子核, 对应的元素称为超重元素. 基于宏观-微观模型和自洽的微观模型, 可以探寻  $^{208}\text{Pb}$  之后的质子幻数和中子幻数: 质子幻数是  $Z = 114, 120, 126$  等; 中子

幻数是  $N = 184$  等<sup>[16-18]</sup>. 核子数接近这些幻数的原子核对于裂变更为稳定, 人们预言在稳定核素大陆之外可能存在一个“超重稳定岛”<sup>[19-25]</sup>. 如何合成超重新核素进而登上超重稳定岛, 是当前核物理的重要研究内容. 不断突破超重核电荷数的上限, 合成新的超重元素, 是另一重要目标. 目前已合成最重的元素是 118 号元素 Og, 继续合成超重新元素, 将开启元素周期表第八周期, 具有重大的科学意义. 因此, 目前世界多国正围绕 119 和 120 超重新元素的合成展开激烈的竞争.

在实验室中, 主要利用重离子熔合蒸发反应合成超重原子核, 冷熔合和热熔合是两类重要的合成途径<sup>[26,27]</sup>. 冷熔合反应以  $^{208}\text{Pb}$  和  $^{209}\text{Bi}$  为靶核, 形成的超重复合核激发能较低, 可以通过蒸发 1—2 个中子退激发. 107—113 号超重元素是利用冷熔

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2023YFA1606500, 2024YFE0109800)、国家自然科学基金 (批准号: 12447101, 12375118, 12435008, W2412043) 和中国科学院 B 类先导科技专项 (批准号: XDB0920000, XDB1550000) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [sgzhou@itp.ac.cn](mailto:sgzhou@itp.ac.cn)

合反应合成的<sup>[28,29]</sup>. 热熔合反应通常以<sup>48</sup>Ca为弹核, 锕系核素为靶核, 形成的复合核具有较高的激发能, 通常蒸发3—5个中子退激发. 从2003年到2010年, 位于俄罗斯Dubna的联合核子研究所利用一系列热熔合反应, 成功合成了114—118号超重元素<sup>[30-33]</sup>. 然而, 距离上一个超重新元素的合成已有十余年之久, 目前, 合成超重新元素或更多超重新核素仍然是巨大的挑战. 这样的困难主要源于利用重离子熔合蒸发反应合成超重核的截面非常小, 同时最佳入射能量难以确定<sup>[34]</sup>.

目前主要通过不同的理论模型对合成截面和最佳入射能进行预测. 基于不同的物理图像, 已发展出多种理论模型来描述重离子熔合蒸发反应. 这些模型/方法主要包括双核模型<sup>[35-46]</sup>、多维朗之万动力学方程<sup>[26,47]</sup>、扩散-熔合模型<sup>[48,49]</sup>、两步模型<sup>[50]</sup>、经验公式<sup>[51-59]</sup>、微观的含时动力学方法<sup>[60]</sup>等. 其中, 考虑动力学势能曲面的双核模型 (dinuclear system model with a dynamical potential energy surface, DNS-DyPES model) 基于双核体系 (dinuclear system, DNS) 的概念<sup>[61]</sup>, 将双核体系中两原子核的动力学形变考虑在内, 能够唯象地处理反应过程中核子转移和集体运动的耦合<sup>[39]</sup>. 这一模型已被应用于研究一些合成超重核的反应体系<sup>[46,62]</sup>, 本文将利用这一模型开展超重核合成截面的系统研究. 此外, 为了同时发挥微观理论和唯象模型的优势, 降低理论计算的不确定度, 已有研究者利用微观理论约束唯象模型, 并将这种方法成功应用于计算冷/热熔合反应的合成截面<sup>[63,64]</sup>.

利用重离子熔合蒸发反应合成超重核时, 弹靶组合的选择十分关键, 我们需要探索有望应用于实验的弹靶材料. 在靶核材料方面, 目前被成功应用于超重核合成的锕系核素包括<sup>238</sup>U, <sup>237</sup>Np, <sup>242,244</sup>Pu, <sup>243</sup>Am, <sup>245,248</sup>Cm, <sup>249</sup>Bk, <sup>249</sup>Cf. 除了这些核素外, 我们希望获得更重的锕系核素作为新的靶核材料. 从镅同位素的混合物中提取的<sup>251</sup>Cf, 与<sup>249</sup>Cf相比更适合用于合成丰中子的超重核. 此外, 利用高通量反应堆生产的<sup>254</sup>Es和<sup>257</sup>Fm, 也有望用于超重新元素的合成<sup>[65-67]</sup>. 在弹核方面, 虽然利用稳定的弹核和锕系靶核可以组成一系列反应体系, 但受到弹靶质量数和蒸发中子数量的限制, 这样的反应体系往往只能合成几个特定质量数的超重核素. 例如, <sup>55</sup>Mn是锰元素唯一的稳定同位素, 若利用反应体系<sup>55</sup>Mn + <sup>243</sup>Am合成120号元素, 在复合核

蒸发3—5个中子的情况下, 仅有可能合成质量数为293, 294和295的核素. 目前, 除了已通过冷/热熔合反应成功合成的超重核素之外, 还存在着大量超重核素, 它们无法利用稳定的弹核合成. 由不稳定原子核形成的放射性束流可应用于核结构、核天体过程等方面的研究. 为了产生种类丰富且束流强度高、放射性强度的放射性束流, 在世界各地有很多新一代的大科学装置已经建成或正在建设中, 例如中国科学院近代物理研究所的强流重离子加速器装置<sup>[68,69]</sup>. 相比之下, 新一代装置的性能得到大幅提升, 能够产生更远离稳定谷的核素, 并且束流具有较高的强度和品质. 自然而然地, 我们希望将质量数分布范围更广的放射性核素作为熔合反应的弹核, 为合成更丰富的超重核素提供可能性. 作为合成超重原子核的新方法, 放射性弹核熔合蒸发反应在超重核合成领域有着广阔的应用前景, 有必要对这类反应进行系统、深入的研究.

在理论方面, 已有一些工作探索了利用放射性弹核熔合蒸发反应合成超重核. Adamian等<sup>[70]</sup>基于双核体系的概念, 研究了<sup>50</sup>Ca + <sup>241-243</sup>Am等反应体系, 对最大蒸发剩余截面和复合核的最佳激发能做出了预言. Zagrebaev<sup>[71]</sup>提出丰中子弱束缚核作为弹核时, 正 $Q$ 中子转移道使垒下熔合增强, 这种效应影响一些利用放射性束流合成超重核的反应体系, 如<sup>26</sup>F + <sup>248</sup>Cm. Zagrebaev和Greiner<sup>[26]</sup>利用多维朗之万动力学方程计算熔合概率, 他们研究了<sup>22</sup>O + <sup>248</sup>Cm等反应, 提出放射性弹核熔合反应是合成丰中子超重核的重要途径. Loveland<sup>[51]</sup>使用经验公式计算熔合截面, 系统研究了利用放射性束流合成102—120号元素的反应体系, 给出了合成这些元素的冷/热熔合反应道. 此后, 他又研究了合成106号元素丰中子同位素的反应体系, 如<sup>20</sup>O + <sup>252</sup>Cf和<sup>26</sup>Ne + <sup>248</sup>Cm<sup>[72]</sup>. Aritomo<sup>[73]</sup>探讨了<sup>60</sup>Ca + <sup>244</sup>Pu等反应, 利用这些反应可以合成双幻超重核<sup>298</sup>Fl. 聚焦双核模型, 近年来有一些工作在这一理论框架下, 研究了一些合成超重核素的放射性弹核熔合蒸发反应, 并预言了合成截面和最佳入射能等. Bao等<sup>[74]</sup>讨论了合成104—118号超重元素的一系列反应, 并与Loveland<sup>[51]</sup>的结果进行了对比. Hong等<sup>[75]</sup>研究了一些合成104—106号超重元素同位素的熔合反应. Wu等<sup>[76]</sup>选择 $Z = 16-22$ 且半衰期大于1 ms的核素作为弹核, 选取半衰期大于30 d的锕系核素作为靶核, 系统

计算了 2418 个弹靶组合并给出了其中适用于合成丰中子超重核的反应体系. Niu 等<sup>[44]</sup>研究了合成 119—122 号超重元素的反应, 其中包含以放射性核素  $^{44}\text{Sc}$ ,  $^{49}\text{V}$ ,  $^{62}\text{Fe}$  为弹核的体系. Zhang 等<sup>[77]</sup>研究了利用丰中子放射性弹核合成双幻超重核  $^{298}\text{Fl}$  和  $^{304}120$  的反应体系, 发现反应体系  $^{58}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$  和  $^{58}\text{V} + ^{249}\text{Bk}$  适合用于合成这两个超重核.

可见, 上述大多数工作针对少数放射性弹核熔合反应体系开展研究, 系统研究工作较少. 已有的系统研究<sup>[76]</sup>主要关注丰中子超重核的合成, 选取电荷数不多于 22 的一些放射性核素作为弹核, 并且尚未讨论合成 118 号后新元素的反应体系. 邓祥泉<sup>[78]</sup>选取了一系列铜系靶核和放射性弹核, 利用考虑动力学势能曲面的双核模型, 对合成 104—122 号超重元素同位素的大量反应体系进行了系统研究, 并详尽探讨了这些反应中蕴含的系统性规律. 基于该工作的系统计算, 本文归纳、整理了其中 4969 个反应体系的结果, 构建了超重核合成截面数据集. 这一数据集涵盖了这些反应体系  $2n$  到  $5n$  道的最佳入射能和最大蒸发剩余截面等数据, 可作为实验合成超重核的有力支撑. 为方便读者使用超重核合成截面数据集, 本文选取典型反应体系, 详细介绍了该体系的计算结果. 为加深对超重核合成理论的认识, 本文凝练了对大量反应体系中系统性规律的讨论<sup>[78]</sup>, 突出重要结论, 进一步探讨了利用放射性弹核熔合蒸发反应合成超重核的物理机制. 本工作揭示了影响反应体系截面的重要因素, 这些结果可为相关理论研究提供参考.

## 2 理论框架

在重离子熔合蒸发反应中, 弹核与靶核碰撞产生超重核的过程可以视为一个三步过程<sup>[79]</sup>. 第一步是俘获过程, 弹核克服它与靶核之间的库仑位垒而被靶核俘获, 形成一个复合体系. 在这一阶段, 弹核也有可能未越过库仑位垒而被散射. 第二步是熔合过程, 上一阶段形成的复合体系随着时间演化以一定概率发生熔合. 复合系统未能熔合而分裂为两部分的过程称为准裂变. 第三步是存活过程, 复合体系熔合形成的复合核带有一定的激发能, 它会以较小的概率通过蒸发若干中子退激发, 最终形成冷的超重核. 在这个阶段, 处于激发态的复合核有更大概率发生裂变. 显然, 只有三步过程连续地发

生, 才能最终合成冷的超重核. 在这样的物理图像下, 可以用下式计算反应的蒸发剩余截面:

$$\sigma_{\text{ER},xn}(E_{\text{c.m.}}) = \sum_J \sigma_{\text{cap}}(E_{\text{c.m.}}, J) P_{\text{CN}}(E_{\text{c.m.}}, J) \times W_{\text{sur},xn}(E_{\text{c.m.}}, J), \quad (1)$$

其中,  $E_{\text{c.m.}}$  是质心系中的入射能;  $\sigma_{\text{cap}}$  是俘获截面;  $P_{\text{CN}}$  是熔合概率;  $W_{\text{sur},xn}$  是存活概率;  $J$  是弹核与靶核之间的相对角动量, 系统研究中各个反应体系的角动量计算范围是  $0-180\hbar$ .

本文利用经验耦合道 (empirical coupled-channel, ECC) 模型<sup>[80]</sup>计算俘获截面. 这一模型基于非对称高斯分布形式的位垒分布, 发展了确定位垒分布参数的经验公式, 对于大量反应体系, 能够在库仑位垒附近能区很好地重现俘获截面的实验值. 在 ECC 模型中, 角动量为  $J$  的分波的俘获截面由下式给出:

$$\sigma_{\text{cap}}(E_{\text{c.m.}}, J) = \frac{\pi\hbar^2}{2\mu E_{\text{c.m.}}} (2J+1) T(E_{\text{c.m.}}, J), \quad (2)$$

其中, 穿透概率为

$$T(E_{\text{c.m.}}, J) = \int dB f(B) \left\{ 1 + \exp \left[ \frac{2\pi}{\hbar\omega_B(J)} (B_{\text{eff}} - E_{\text{c.m.}}) \right] \right\}^{-1}, \quad (3)$$

$$B_{\text{eff}} = B + \frac{\hbar^2}{2\mu R_B^2} J(J+1), \quad (4)$$

其中,  $\mu$  是弹靶体系的约化质量,  $B$  和  $R_B$  分别为库仑位垒的高度和位置,  $B_{\text{eff}}$  是有效位垒的高度,  $\hbar\omega_B$  是倒抛物线近似下库仑位垒的宽度. 弹核与靶核之间相互作用势的详细计算方法和参数选取方式可参考文献<sup>[80]</sup>.  $f(B)$  是位垒分布函数, 这一 ECC 模型采用非对称高斯位垒分布:

$$f(B) = \frac{1}{N} \begin{cases} \exp \left[ - \left( \frac{B - B_m}{\Delta_1} \right)^2 \right], & B < B_m, \\ \exp \left[ - \left( \frac{B - B_m}{\Delta_2} \right)^2 \right], & B > B_m, \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $B_m$  是位垒分布的最概然值,  $\Delta_1$  为左宽度,  $\Delta_2$  为右宽度, 这些参数利用经验公式<sup>[80]</sup>确定. 位垒分布函数  $f(B)$  通过系数  $N$  归一化. 通过将各个分波  $J$  的俘获截面求和, 得到反应体系的俘获截面

$$\sigma_{\text{capture}}(E_{\text{c.m.}}) = \sum_J \sigma_{\text{cap}}(E_{\text{c.m.}}, J). \quad (6)$$

熔合概率利用 DNS-DyPES 模型计算, 这一模型考虑了反应过程中体系的动力学形变效应. 双核模型假设, 在弹核被靶核俘获后, 二者形成一个初始双核体系. 双核体系中的两原子核保持各自的独立性, 两核之间发生一系列的核子转移, 随着转移的不断进行, 体系有可能发生熔合. 可以利用如下的主方程描述双核体系概率分布随时间的演化:

$$\frac{dP(A_1, t)}{dt} = \sum_{A'_1} W_{A_1 A'_1}(t) [d_{A_1}(t) P(A'_1, t) - d_{A'_1}(t) P(A_1, t)] - A_{A_1}^{\text{qf}}(t) P(A_1, t), \quad (7)$$

其中  $P(A_1, t)$  是双核体系 DNS( $A_1, A_2$ ) 随时间  $t$  的概率分布,  $A_1$  和  $A_2$  为双核体系中两个核的质量数.  $W_{A_1 A'_1}(t)$  是体系 DNS( $A_1, A_2$ ) 和 DNS( $A'_1, A'_2$ ) 之间的平均跃迁概率,  $d_{A_1}(t)$  是体系的微观维度, 这些物理量的计算方法和主方程的数值求解等详细内容可参考文献 [81–83].  $A_{A_1}^{\text{qf}}(t)$  为双核体系的准裂变率, 由一维 Kramer 方程 [84] 给出:

$$A_{A_1}^{\text{qf}}(t) = \frac{\omega}{2\pi\omega^{B_{\text{qf}}}} \left[ \sqrt{\left(\frac{\Gamma}{2\hbar}\right)^2 + (\omega^{B_{\text{qf}}})^2} - \frac{\Gamma}{2\hbar} \right] \times \exp\left(-\frac{B_{\text{qf}}(A_1)}{\Theta(t)}\right). \quad (8)$$

双核体系沿两核质心距离  $R$  方向的势能曲线存在一“口袋”势阱和一准裂变位垒. (8) 式中,  $B_{\text{qf}}$  为准裂变位垒高度,  $\omega$  为势阱底部做谐振子近似的频率,  $\omega^{B_{\text{qf}}}$  为准裂变位垒做倒谐振子近似的频率,  $\Gamma$  为单粒子态的双倍平均宽度,  $\Theta$  为局域温度. 在本文的计算中, 将这些参数选取为  $\hbar\omega = 2.0$  MeV,  $\hbar\omega^{B_{\text{qf}}} = 1.0$  MeV,  $\Gamma = 2.8$  MeV [35].

双核模型理论框架下, 驱动势是一个非常重要的势, 它是双核体系沿质量不对称自由度  $\eta = (A_1 - A_2)/(A_1 + A_2)$  方向的势能. 双核体系中两核之间的相互作用势为

$$V_{\text{DNS}}(A_1, R, t) = V_{\text{N}}(A_1, R, t) + V_{\text{C}}(A_1, R, t), \quad (9)$$

其中,  $V_{\text{N}}$  是核相互作用势, 利用双折叠法 [85] 计算;  $V_{\text{C}}$  是库仑相互作用势, 由 Wong 公式 [86] 给出. 双核模型假设双核体系在沿  $R$  方向势能曲线的口袋处形成, 在核子转移的过程中, 两核质心间距离始终保持为  $R = R_{\text{pocket}}$ . 因此, 可以定义在此距离处的相互作用势

$$V_{\text{DNS}}(A_1, t) \equiv V_{\text{DNS}}(A_1, R, t)|_{R=R_{\text{pocket}}}. \quad (10)$$

进一步, 可定义体系的驱动势为

$$V_{\text{PES}}(A_1, t) \equiv V_{\text{DNS}}(A_1, t) + (M_1 + M_2 - M_{\text{T}} - M_{\text{P}})c^2, \quad (11)$$

式中  $M_1$  和  $M_2$  为双核体系中两原子核的质量,  $M_{\text{P}}$  和  $M_{\text{T}}$  为弹核和靶核的质量. 本文计算驱动势使用的核质量取自文献 [87], 对于该文献未给出质量的原子核, 质量取自文献 [88]. 双核体系中两核取向为 tip-tip, 原子核的基态四极形变取自文献 [88], 质量数不高于 16 或质子数小于 8 的核被假设为球形. 双核体系的局域激发能  $E_{\text{DNS}}^*$  是一关键物理量, 它影响主方程中  $W_{A_1 A'_1}$ ,  $d_{A_1}$  和  $A_{A_1}^{\text{qf}}$  等量的计算.  $E_{\text{DNS}}^*$  由下式确定:

$$E_{\text{DNS}}^*(A_1, t) + V_{\text{PES}}(A_1, t) = E_{\text{c.m.}} - E_{\text{DNS}}^{\text{rot}}(t), \quad (12)$$

其中  $E_{\text{DNS}}^{\text{rot}}$  为体系的转动能.

DNS-DyPES 模型假设双核体系中两核的动力学形变满足以下关系:

$$\delta\beta_1^2 C_1/A_1 = \delta\beta_2^2 C_2/A_2, \quad (13)$$

其中,  $\beta_1$  和  $\beta_2$  为两核的四极形变,  $C_1$  和  $C_2$  为两核的刚度系数 [89]. 可将双核体系的形变定义为

$$\delta\beta \equiv (\delta\beta_1 + \delta\beta_2)/2. \quad (14)$$

假设这一形变以过阻尼的形式随时间演化:

$$\delta\beta(t) = \delta\beta_{\text{max}} \left(1 - e^{-t/\tau_{\text{def}}}\right), \quad (15)$$

其中, 弛豫时间为  $\tau_{\text{def}} = 40 \times 10^{-22}$  s [90]. 体系的最大动力学形变  $\delta\beta_{\text{max}}$  通过使下式给出的总内禀能最小化得到:

$$E_{\text{int}}(A_1, \delta\beta) = V_{\text{N}}(A_1; \beta_1, \beta_2) + V_{\text{C}}(A_1; \beta_1, \beta_2) + \sum_{i=1,2} \frac{1}{2} C_i \delta\beta_i^2. \quad (16)$$

双核体系的动力学形变导致驱动势随时间演化. 为减小计算量, 模型假设驱动势随双核体系的形变线性变化:

$$V(t) = V(t=0) - \frac{\delta\beta(t)}{\delta\beta_{\text{max}}} [V(t=0) - V(t=\infty)]. \quad (17)$$

在利用各双核体系的概率分布计算熔合概率时, 模型假设越过驱动势曲线上 Businaro-Gallone (BG) 点的双核体系最终发生熔合. 对于分波  $J$ , 熔合概率为

$$P_{\text{fusion}}(E_{\text{c.m.}}, J) = \sum_{A_1=0}^{A_1=A_{\text{BG}}} P(E_{\text{c.m.}}, J; A_1, \tau_{\text{int}}), \quad (18)$$

其中,  $\tau_{\text{int}}$  是双核体系中两原子核的相互作用时间. 反应体系的熔合截面为

$$\sigma_{\text{fusion}}(E_{\text{c.m.}}) = \sum_J \sigma_{\text{cap}}(E_{\text{c.m.}}, J) P_{\text{fusion}}(E_{\text{c.m.}}, J). \quad (19)$$

对于一个确定的质心系能量  $E_{\text{c.m.}}$ , 可以利用对所有分波熔合概率的加权平均定义反应体系的熔合概率:

$$P_{\text{CN}}(E_{\text{c.m.}}) \equiv \frac{\sigma_{\text{fusion}}(E_{\text{c.m.}})}{\sigma_{\text{capture}}(E_{\text{c.m.}})}. \quad (20)$$

本文利用统计模型计算超重复合核的存活概率. 熔合反应中形成的复合核通常带有一定的激发能, 它可能发生裂变, 或通过发射轻粒子和  $\gamma$  射线退激发. 统计模型<sup>[91]</sup> 描述复合核裂变和中子蒸发等过程之间的竞争, 可以给出复合核的存活概率. 角动量为  $J$  的分波发射  $x$  个中子的存活概率为

$$W_{\text{sur},xn}(E_{\text{c.m.}}, J) = P_{\text{r.l.}}(E_{\text{CN}}^*, J, x) \times \prod_{i=1}^x \frac{\Gamma_{\text{n}}(E_i^*, J)}{\Gamma_{\text{n}}(E_i^*, J) + \Gamma_{\text{f}}(E_i^*, J)}, \quad (21)$$

式中,  $E_{\text{CN}}^*$  为超重复合核的激发能,  $P_{\text{r.l.}}$  为实现概率<sup>[92]</sup>,  $\Gamma_{\text{n}}$  为中子发射宽度,  $\Gamma_{\text{f}}$  为裂变宽度,  $E_i^*$  为第  $i$  个中子蒸发前超重核的激发能. 中子发射宽度  $\Gamma_{\text{n}}$  利用蒸发模型<sup>[82]</sup> 给出:

$$\Gamma_{\text{n}}(E_i^*, J) = \frac{2s+1}{2\pi\rho(E_i^*, J)} \frac{2m_{\text{n}}R^2}{\hbar^2} \times \int_0^{E_i^* - S_i^{\text{n}} - \frac{1}{a} - \delta} \epsilon \rho(E_i^* - S_i^{\text{n}} - \epsilon, J) d\epsilon, \quad (22)$$

其中,  $m_{\text{n}}$  为中子质量;  $R$  为复合核在蒸发第  $i$  个中子前的半径;  $s$  为中子自旋;  $S_i^{\text{n}}$  为第  $i$  个中子的分离能, 取自文献<sup>[93]</sup>. 裂变宽度由 Bohr-Wheeler 方程<sup>[12]</sup> 给出:

$$\Gamma_{\text{f}}(E_i^*, J) = \frac{1}{2\pi\rho(E_i^*, J)} \times \int_0^{E_i^* - B_i^{\text{f}} - \frac{1}{a} - \delta} \frac{\rho(E_i^* - B_i^{\text{f}} - \epsilon, J)}{1 + \exp[2\pi(\epsilon + B_i^{\text{f}} - E_i^*)/\hbar\omega]} d\epsilon, \quad (23)$$

其中位垒宽度  $\hbar\omega$  取为 2.2 MeV,  $B_i^{\text{f}}$  为蒸发  $i$  个中子前复合核的裂变位垒, 利用下式计算:

$$B_i^{\text{f}}(E_i^*) = B_{\text{f}}^{\text{LD}} + B_{\text{f}}^{\text{Mic}} \exp(-E_i^*/E_{\text{D}}), \quad (24)$$

裂变位垒的宏观部分  $B_{\text{f}}^{\text{LD}}$  可利用液滴模型计算;  $B_{\text{f}}^{\text{Mic}}$  为微观壳修正能, 取自文献<sup>[93]</sup>;  $E_{\text{D}}$  为壳衰减因子<sup>[94,95]</sup>, 由下式给出:

$$E_{\text{D}} = \frac{0.4A^{4/3}}{0.068A + 0.213A^{2/3} + 0.385A^{1/3}}. \quad (25)$$

能级密度利用费米气体模型<sup>[96]</sup> 计算:

$$\rho(E_i^*, J) = \frac{2J+1}{24\sqrt{2}a^{1/4}\sigma^3(E_i^* - \delta)^{5/4}} \times \exp\left[2\sqrt{a(E_i^* - \delta)} - \frac{(J+1/2)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (26)$$

其中

$$\sigma^2 = 6\bar{m}^2 \sqrt{a(E_i^* - \delta)}/\pi^2, \quad \bar{m}^2 = 0.24A^{2/3}. \quad (27)$$

在  $\Gamma_{\text{n}}$  和  $\Gamma_{\text{f}}$  的计算中, 能级密度参数均取为  $a = A/9 \text{ MeV}^{-1}$ . 对于偶偶核、奇  $A$  核和奇奇核, 修正能  $\delta$  分别取为  $12/\sqrt{A}$ , 0 和  $-12/\sqrt{A} \text{ MeV}$ <sup>[97]</sup>. 通过对所有分波的存活概率进行加权平均, 可得到质心系能量  $E_{\text{c.m.}}$  下复合核的存活概率:

$$W_{\text{sur},xn}(E_{\text{c.m.}}) \equiv \sigma_{\text{ER},xn}(E_{\text{c.m.}})/\sigma_{\text{fusion}}(E_{\text{c.m.}}). \quad (28)$$

## 3 结果与讨论

### 3.1 超重核合成截面数据集的组成

本文基于 DNS-DyPES 模型, 根据对大量放射性弹核熔合蒸发反应体系的系统计算结果<sup>[78]</sup> 构建了超重核合成截面数据集. 数据集涵盖了合成 104—122 号超重元素同位素的 4969 个反应体系的数据. 对于每个反应体系, 数据集给出了 2 到 5 中子蒸发道合成的超重元素同位素、最佳入射能和最大蒸发剩余截面.

在组合系统研究的反应体系时, 靶核选择为  $Z = 90—100$  的 11 个锕系核素, 分别是  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{231}\text{Pa}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{244}\text{Pu}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{248}\text{Cm}$ ,  $^{249}\text{Bk}$ ,  $^{251}\text{Cf}$ ,  $^{254}\text{Es}$  和  $^{257}\text{Fm}$ . 弹核选择为  $Z = 4—32$  元素位于质子和中子滴线<sup>[93,98]</sup> 之间的同位素, 它们大多具有放射性. 利用这些弹核和靶核组成的反应体系, 合成  $Z = 104—122$  超重元素的同位素, 且这些超重同位素位于质子和中子滴线<sup>[93]</sup> 之间. 通过大规模计算, 得到每一个反应体系  $2\text{n}—5\text{n}$  道的激发函数, 从中提取最佳入射能和最大蒸发剩余截面等信息, 构建超重核合成截面数据集. 本数据集可通过访问科学数据银行 <http://www.doi.org/10.57760/sciencedb.27854> 获取.

### 3.2 典型反应体系 $^{48}\text{Ca}+^{238}\text{U}$ 结果讨论

为了介绍本文理论框架对重离子熔合蒸发反

应的描述, 并为读者使用超重核合成截面数据集提供帮助, 本节以典型反应体系  $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$  为例, 对俘获截面、熔合概率、存活概率和激发函数的计算结果进行讨论.

图 1(a) 展示了这一反应体系俘获截面  $\sigma_{\text{capture}}$  随入射能  $E_{\text{c.m.}}$  的变化, 并与实验数据 [99] 进行了对比. 在入射道, 位垒分布的最概然值为 180.89 MeV, 图中由  $B_{\text{m}}$  标出. 当入射能远低于库仑位垒时, 弹核只有通过量子隧穿效应才能穿透库仑位垒被靶核俘获, 因而在这个能区反应的俘获截面非常低. 当入射能处于位垒分布中心值附近的能区时, 反应体系的俘获截面迅速上升. 随着入射能进一步升高, 弹核拥有足够的能量越过它和靶核之间的库仑位垒, 反应的俘获截面趋于饱和. 整体上, ECC 模型 [80] 能够重现实验测量的俘获截面随入射能的变化趋势, 但该模型高估了这一反应的俘获截面, 尤其在入射能低于 200 MeV 的区域. 反应体系的熔合概率  $P_{\text{CN}}$  与  $E_{\text{c.m.}}$  的关系如图 1(b) 所示. 可见, 熔合概率随着入射能的增加单调上升. 在双核模型框架下, 弹核的入射能较高时, 弹靶碰撞后形成的双核

体系有较高的激发能, 这有利于双核体系在随时间的演化中, 越过质量不对称 ( $\eta$ ) 自由度方向上的内熔合位垒而发生熔合. 虽然  $P_{\text{CN}}$  会随入射能的增加而增大, 但即使在图中最高的入射能 240 MeV 处, 熔合概率也仅为  $3 \times 10^{-4}$  左右. 这一结果意味着, 对于反应体系  $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ , 弹靶俘获后发生熔合相当困难. 图 1(c) 给出了  $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$  熔合形成的超重复合核  $^{286}\text{Cn}^*$  通过蒸发不同数目中子而存活概率  $W_{\text{sur},zn}$ . 与俘获截面、熔合概率的能量依赖性明显不同的是, 存活概率并不随入射能单调变化, 对于不同的蒸发中子数目, 复合核的存活概率都会在某一个能量处出现极大值. 这主要源于处于激发态的复合核蒸发中子退激发和发生裂变这两过程之间的竞争.

定性来说, 较高入射能利于弹核被靶核俘获以及复合体系熔合形成复合核, 而过高的激发能不利于复合核的存活. 这些因素共同作用, 导致对于每个中子蒸发道都存在一最佳入射能, 在这个能量下, 反应体系的蒸发剩余截面最大. 图 1(d) 展示了  $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$  的激发函数以及截面的实验值 [100].

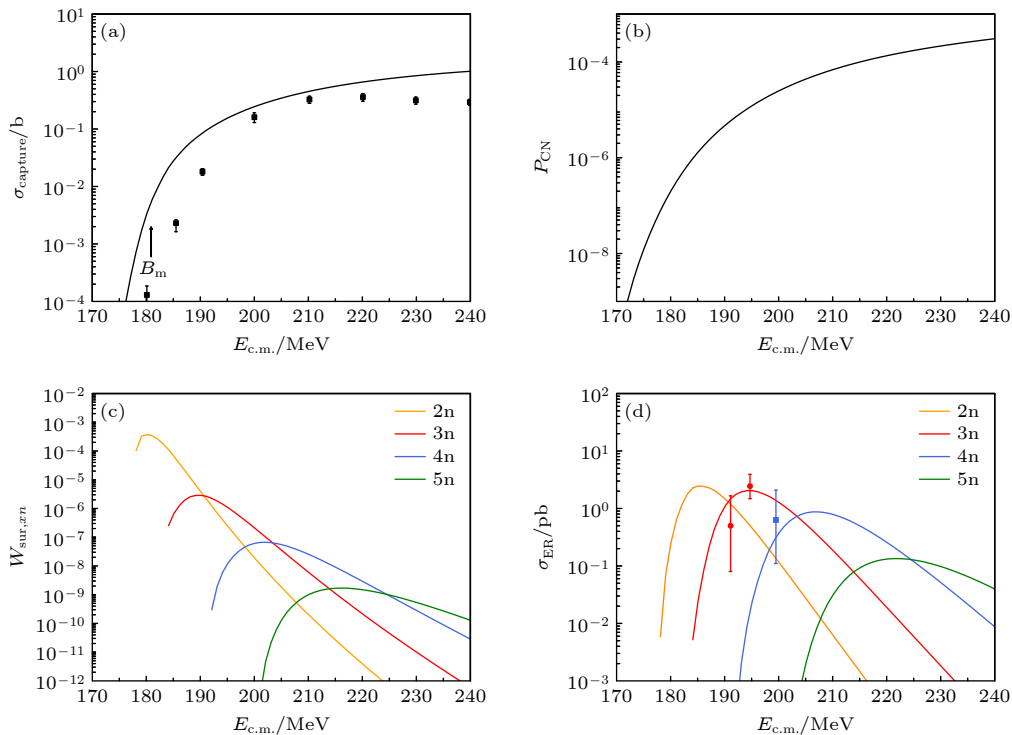


图 1 反应体系  $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$  的 (a) 俘获截面  $\sigma_{\text{capture}}$ 、(b) 熔合概率  $P_{\text{CN}}$ 、(c) 存活概率  $W_{\text{sur},zn}$  和 (d) 蒸发剩余截面  $\sigma_{\text{ER}}$  随质心系入射能  $E_{\text{c.m.}}$  的函数关系. 图 (a) 中实验数据取自文献 [99], 图 (d) 中实验数据取自文献 [100].

Fig. 1. (a) Capture cross section  $\sigma_{\text{capture}}$ , (b) fusion probability  $P_{\text{CN}}$ , (c) survival probability  $W_{\text{sur},zn}$  and (d) evaporation residue cross section  $\sigma_{\text{ER}}$  as functions of the incident energy in the center-of-mass frame  $E_{\text{c.m.}}$  for the reaction  $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ . The experimental data in panel (a) are taken from Ref. [99]. The experimental data in panel (d) are taken from Ref. [100].

在 3n 道, 这一反应体系合成的超重核为  $^{283}\text{Cn}$ , 最佳入射能为 195.11 MeV, 最大蒸发剩余截面为 2.05 pb. 从激发函数与实验数据的对比来看, 对于  $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ , 本文理论框架给出的 3n 和 4n 道的蒸发剩余截面可以较好地重现实验值. 在实验上, 以  $^{48}\text{Ca}$  为弹核, 分别以  $^{238}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{242}\text{Pu}$ ,  $^{244}\text{Pu}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{245}\text{Cm}$ ,  $^{248}\text{Cm}$ ,  $^{249}\text{Bk}$  和  $^{249}\text{Cf}$  为靶核, 合成了 112—118 号超重元素的同位素 [31,32,100–104]. 这些反应体系截面的实验数据, 可以用来验证理论模型描述重离子熔合蒸发反应的可靠性. 在此前的工作 [46] 中, 我们已利用 DNS-DyPES 模型研究了上述各反应体系的激发函数, 计算结果能较好地重现实验数据. 这表明, 本文理论框架能够较为可靠地描述合成 112—118 号超重元素同位素的反应体系, 适合用于开展超重核合成截面的系统研究.

### 3.3 超重核合成截面系统计算结果讨论

本节在已有研究 [78] 的基础上, 凝练了大量反应体系中系统性规律的一些重要结论, 并进一步深入探讨利用放射性弹核熔合蒸发反应合成超重核的物理机制. 根据超重核合成截面数据集涵盖的反应体系, 重新绘制了图 2—图 7. 首先, 以合成 108 和 119 号超重元素同位素为例, 对系统计算结果进行讨论, 可为读者使用数据集提供参考. 此后, 研究利用一确定靶核合成不同超重核素的反应性质, 讨论计算结果中蕴含的系统性规律.

图 2 展示了合成 108 号超重元素同位素的最大蒸发剩余截面和最佳反应道. 图中, 横坐标为超重核的质量数  $A_{\text{SHN}}$ , 纵坐标为靶核的质子数  $Z_{\text{T}}$ . 利用数据点的颜色标记合成这一超重核的最大蒸发剩余截面  $\sigma_{\text{ER}}$ . 数据点的形状标记最佳反应道: 叉形为 2n 道; 正方形为 3n 道; 圆形为 4n 道; 三角形为 5n 道. 数据点的纵坐标范围是 90—100, 对应本研究中选择的 11 个锕系靶核. 对于图中的每一点, 由于合成的超重核、选用的靶核和蒸发的中子数都已给出, 选用的弹核可以通过反应式推知. 利用本文研究的弹靶组合, 能合成的最轻的 Hs 同位素是  $^{255}\text{Hs}$ , 反应道是  $^{29}\text{Cl} + ^{231}\text{Pa} \rightarrow ^{255}\text{Hs} + 5\text{n}$ , 最大蒸发剩余截面为  $\sigma_{\text{ER}} = 4.54 \times 10^{-1}$  pb. 可以合成的最重的 Hs 同位素是  $^{286}\text{Hs}$ , 反应道是  $^{50}\text{S} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{286}\text{Hs} + 2\text{n}$ , 最大蒸发剩余截面  $\sigma_{\text{ER}} = 7.11 \times 10^{-5}$  pb. 显然, 利用放射性弹核可以在很大的质量范围内合成超重原子核. 特别地, 与合成其他 Hs 同位素相

比, 合形成变双幻核  $^{270}\text{Hs}$  的反应道有较大的截面. 通过在图中将合成这一核素的一纵列结果进行对比, 可知合成  $^{270}\text{Hs}$  的最佳反应道是  $^{16}\text{O} + ^{257}\text{Fm} \rightarrow ^{270}\text{Hs} + 3\text{n}$ , 这也是合成 Hs 元素的最佳反应道, 最大蒸发剩余截面为  $\sigma_{\text{ER}} = 1.89 \times 10^5$  pb.

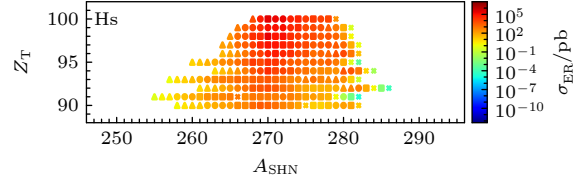


图 2 合成 108 号超重元素同位素的最大蒸发剩余截面  $\sigma_{\text{ER}}$  和最佳反应道. 横坐标为超重核的质量数  $A_{\text{SHN}}$ . 纵坐标靶核电荷数  $Z_{\text{T}} = 90-100$  对应的靶核分别为  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{231}\text{Pa}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{244}\text{Pu}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{248}\text{Cm}$ ,  $^{249}\text{Bk}$ ,  $^{251}\text{Cf}$ ,  $^{254}\text{Es}$  和  $^{257}\text{Fm}$ . 最佳反应道由数据点的形状给出: 叉形为 2n 道; 正方形为 3n 道; 圆形为 4n 道; 三角形为 5n 道

Fig. 2. Maximal evaporation residue cross section  $\sigma_{\text{ER}}$  and optimal reaction channel for synthesizing isotopes of superheavy element  $Z = 108$ . The horizontal coordinate represents the mass number of superheavy nuclei  $A_{\text{SHN}}$ . The vertical coordinate represents the charge number of target nucleus, the range  $Z_{\text{T}} = 90-100$  corresponds to target nuclei  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{231}\text{Pa}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{244}\text{Pu}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{248}\text{Cm}$ ,  $^{249}\text{Bk}$ ,  $^{251}\text{Cf}$ ,  $^{254}\text{Es}$  and  $^{257}\text{Fm}$ , respectively. Optimal reaction channels are indicated by various symbols: cross for 2n channel; square for 3n channel; circle for 4n channel; triangle for 5n channel.

图 3 给出了合成 119 号超重新元素的结果. 可见, 在合成质量数为 290—300 的同位素时, 有一些反应体系有较高的合成截面. 以合成  $^{293}119$  为例, 并非使用的靶核电荷数越大合成截面越高. 利用  $^{244}\text{Pu}$  作为靶核时的合成截面要高于以  $^{243}\text{Am}$  为靶核的截面. 而以  $^{251}\text{Cf}$ ,  $^{254}\text{Es}$ ,  $^{257}\text{Fm}$  为靶核时, 合成截面比其他靶核更高. 值得注意的是, 在合成质量数为 309 左右的同位素时, 存在一个截面较高的区域. 这些反应体系以  $^{249}\text{Bk}$ ,  $^{251}\text{Cf}$ ,  $^{254}\text{Es}$ ,  $^{257}\text{Fm}$  为靶核, 合成的超重核较为丰中子. 从图中可以找到一些弹核为稳定核素的反应道, 如  $^{54}\text{Cr} + ^{243}\text{Am} \rightarrow ^{295}119 + 2\text{n}$ , 反应截面为  $\sigma_{\text{ER}} = 9.54 \times 10^{-3}$  pb. 而图中给出的合成 119 号超重元素的最佳反应道是  $^{41}\text{K} + ^{257}\text{Fm} \rightarrow ^{295}119 + 3\text{n}$ , 反应截面  $\sigma_{\text{ER}} = 1.38 \times 10^2$  pb. 利用放射性弹核合成超重元素的截面, 可能远大于稳定弹核反应体系的合成截面. 可见, 放射性弹核熔合蒸发反应有望为超重新核素乃至新元素的合成带来新的机遇, 对这类反应的系统研究有重要意义.

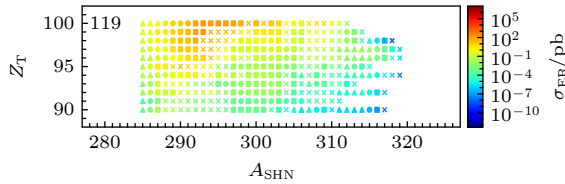


图3 合成119号超重元素同位素的最大蒸发剩余截面  $\sigma_{ER}$  和最佳反应道. 横坐标为超重核的质量数  $A_{SHN}$ . 纵坐标靶核电荷数  $Z_T = 90-100$  对应的靶核分别为  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{231}\text{Pa}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{244}\text{Pu}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{248}\text{Cm}$ ,  $^{249}\text{Bk}$ ,  $^{251}\text{Cf}$ ,  $^{254}\text{Es}$  和  $^{257}\text{Fm}$ . 最佳反应道由数据点的形状给出: 叉形为 2n 道; 正方形为 3n 道; 圆形为 4n 道; 三角形为 5n 道

Fig. 3. Maximal evaporation residue cross section  $\sigma_{ER}$  and optimal reaction channel for synthesizing isotopes of superheavy element  $Z = 119$ . The horizontal coordinate represents the mass number of superheavy nuclei  $A_{SHN}$ . The vertical coordinate represents the charge number of target nucleus, the range  $Z_T = 90-100$  corresponds to target nuclei  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{231}\text{Pa}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{244}\text{Pu}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{248}\text{Cm}$ ,  $^{249}\text{Bk}$ ,  $^{251}\text{Cf}$ ,  $^{254}\text{Es}$  and  $^{257}\text{Fm}$ , respectively. Optimal reaction channels are indicated by various symbols: cross for 2n channel; square for 3n channel; circle for 4n channel; triangle for 5n channel.

通过整合分析系统计算结果, 可以挖掘其中蕴含的系统性规律, 探寻影响超重核合成截面的主要因素. 图4展示了  $^{232}\text{Th}$  作为靶核时, 与不同放射性弹核组成反应体系, 合成  $Z = 104-122$  号超重元素同位素的最大蒸发剩余截面. 图中横轴为超重核素的中子数  $N_{SHN}$ , 纵轴为超重核素的质子数  $Z_{SHN}$ , 利用点的颜色标记反应的合成截面  $\sigma_{ER}$ . 对于图中一个确定的超重核素, 一般可以通过不同的反应体系蒸发不同数量的中子来合成. 例如,  $^{54-57}\text{Mn} + ^{232}\text{Th}$  可以通过蒸发 2—5 个中子合成超重核  $^{284}\text{Mc}$ . 对于每一个超重核, 图中给出的是这些反应道中的最大蒸发剩余截面.

图4中利用不同颜色展示了合成这些核素的最大蒸发剩余截面. 可以根据截面的大小把核素图分为4个区域, 图4中标出了这些区域的位置. 首先, 是红色至橙色的V形区域(区域  $S_1$ ), 这个区域内合成截面较大, 在  $10^2-10^4$  pb 量级. 在V形区域的左支, 弹核较为接近  $\beta$  稳定线, 典型的反应体系如  $^{37}\text{Cl} + ^{232}\text{Th} \rightarrow ^{266}\text{Bh} + 3n$ ; 在V形区域的右支, 合成的超重核更丰中子, 典型的反应体系如  $^{59}\text{Sc} + ^{232}\text{Th} \rightarrow ^{287}\text{Rg} + 4n$ . 在区域  $S_1$  中, 合成截面最大的反应道是  $^{41}\text{Si} + ^{232}\text{Th} \rightarrow ^{268}\text{Rf} + 5n$ , 截面为  $\sigma_{ER} = 5.92 \times 10^3$  pb. 第二个区域(区域  $S_2$ ) 是位于核素图右上角的浅蓝色至深蓝色区域. 这个区

域的超重核素较大的质子数和质量数, 合成截面非常小, 为  $10^{-11}-10^{-4}$  pb 量级. 典型的反应如  $^{99}\text{Ga} + ^{232}\text{Th} \rightarrow ^{329}\text{121} + 2n$ , 截面为  $\sigma_{ER} = 8.72 \times 10^{-12}$  pb. 第三个区域(区域  $S_3$ ) 是上述两个区域之间的黄色至绿色区域, 第四个区域(区域  $S_4$ ) 是V形区域以左的黄色至绿色区域. 在这两个区域, 合成截面为  $10^{-3}-10^1$  pb. 典型的反应体系如  $^{68}\text{Ni} + ^{232}\text{Th} \rightarrow ^{297}\text{Og} + 3n$ ,  $^{38}\text{Ti} + ^{232}\text{Th} \rightarrow ^{265}\text{Cn} + 5n$ .

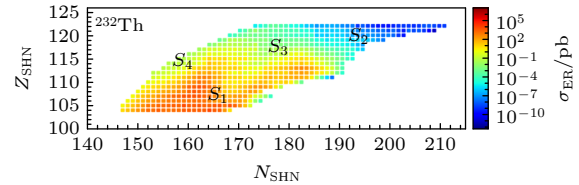


图4  $^{232}\text{Th}$  作为靶核, 不同放射性核素作为弹核的熔合蒸发反应合成 104—122 号超重元素同位素的最大蒸发剩余截面  $\sigma_{ER}$ . 横、纵坐标分别为超重核的中子数  $N_{SHN}$  和质子数  $Z_{SHN}$ . 根据截面大小可将这一核素图划分为 4 个区域, 这些区域的位置被标出

Fig. 4. Maximal evaporation residue cross section  $\sigma_{ER}$  for synthesizing isotopes of superheavy elements  $Z = 104-122$  via fusion-evaporation reactions with  $^{232}\text{Th}$  as target and different radioactive nuclides as projectiles. The horizontal and vertical coordinates represent the neutron number  $N_{SHN}$  and the proton number  $Z_{SHN}$  of superheavy nuclei, respectively. This chart of nuclides is divided into four regions according to the magnitudes of the cross sections and their locations are indicated.

不同区域的出现是这些反应体系中系统性规律的体现, 本文将探讨这种系统性规律背后的物理机制. 图5给出了图4中蒸发剩余截面对应的俘获截面. 除了少数弹靶组合以外, 大多数反应体系的俘获截面值在  $10^{-2}-10^0$  b 之间. 这些反应的俘获截面的差距, 大多数在 1 个数量级以内. 可以看到, 不同体系之间的熔合概率或存活概率之间的差异, 可以达到十几个数量级. 可见, 对于大多数反应体系, 其合成截面的差异, 主要源于熔合概率和存活概率的差异. 图6(a)和图7(a)分别给出了图4中蒸发剩余截面对应的熔合概率和存活概率. 从图6(a)可以非常明显地看到, 一部分反应体系的熔合概率相对较高, 在  $10^{-4}$  以上, 这部分反应体系在图中的分布也大致呈一个V形; 同样, 在图7(a)中也可以发现一些存活概率比较高的区域. 通过对照不难发现, 蒸发剩余截面图4中, 有较大的合成截面的区域  $S_1$ , 是图6(a)和图7(a)中高概率值区域的重叠部分. 即区域  $S_1$  中的反应体系在最佳入

射能处, 同时有较大的熔合概率和存活概率, 这使得这些反应体系与其他体系相比, 有更大的合成截面; 位于区域  $S_3$  的体系有着较高的存活概率而熔合概率很低, 位于区域  $S_4$  的体系熔合概率较高但存活概率较低. 这导致这两个区域中反应体系的合成截面低于区域  $S_1$  中反应的截面. 最后, 位于区域  $S_2$  的体系在最佳激发能处, 熔合概率和存活概率都非常小, 这使得这个区域的反应体系合成截面非常低. 以上对图 4 中不同区域的出现给出了定性的解释, 还需要进一步探讨图 6(a) 和图 7(a) 中概率值较高的区域出现的原因.

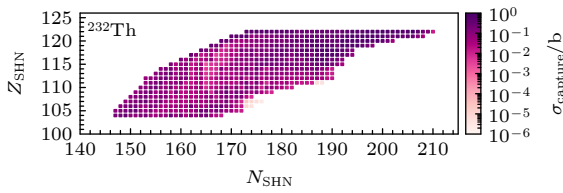


图 5 图 4 中最大蒸发剩余截面对应的俘获截面  $\sigma_{\text{capture}}$   
Fig. 5. Capture cross section  $\sigma_{\text{capture}}$  corresponds to the maximal evaporation residue cross section in Fig. 4.

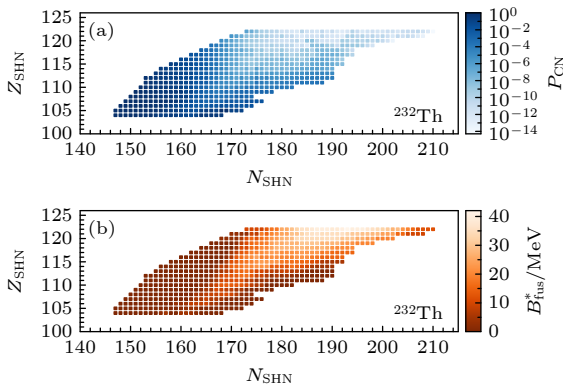


图 6 (a) 图 4 中最大蒸发剩余截面对应的熔合概率  $P_{\text{CN}}$  和 (b) 这些反应体系的内熔合位垒高度  $B_{\text{fus}}^*$   
Fig. 6. (a) Fusion probability  $P_{\text{CN}}$  corresponding to the maximal evaporation residue cross section in Fig. 4 and (b) inner fusion barrier height  $B_{\text{fus}}^*$  of these reaction systems.

图 6(b) 给出了这些反应体系在弹靶俘获后, 形成的复合体系的内熔合位垒高度  $B_{\text{fus}}^*$ . 可以看到, 在一个大致为 V 形的区域内, 复合体系的内熔合位垒较低, 这些复合体系在随时间演化的过程中, 相对易于越过内熔合位垒, 最终发生熔合. 在图 6(a) 中有高熔合概率的反应体系都属于这一类反应. 图 7(b) 展示了这些超重核的裂变位垒高度<sup>[93]</sup>. 可以清晰地看到, 在幻数核  $^{270}\text{Hs}$  和  $^{298}\text{Fl}$  附近的两个区域, 超重核的裂变位垒较高. 合成这些超重核

时, 在存活阶段, 复合核通过中子蒸发而存活下来的可能性更大. 因此, 图 7(a) 中有高存活概率的反应体系也大致分布在这样的两个区域中. 这样, 通过分析影响反应的熔合过程和存活过程的主要因素, 定性给出了反应体系有高熔合概率或高存活概率的原因, 解释了图 4 中合成截面系统性规律背后的物理机制. 系统研究结果表明, 对于众多合成超重核的反应体系而言, 复合体系的内熔合位垒和复合核的裂变位垒, 是影响一个反应体系截面的重要因素. 定性地, 满足以下条件的弹靶组有较大的合成截面: 弹靶接触后形成的复合体系的内熔合位垒低, 体系更易于熔合; 形成的超重复合核裂变位垒高, 更利于复合核存活.

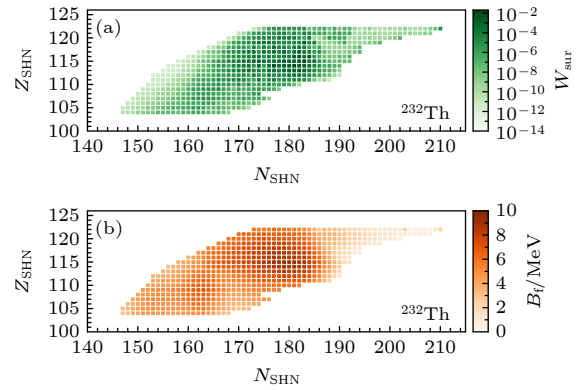


图 7 (a) 图 4 中最大蒸发剩余截面对应的存活概率  $W_{\text{sur},zn}$  和 (b) 超重核的裂变位垒高度  $B_f$ <sup>[93]</sup>  
Fig. 7. (a) Survival probability  $W_{\text{sur},zn}$  corresponding to the maximal evaporation residue cross section in Fig. 4 and (b) fission barrier height  $B_f$  of the superheavy nuclei<sup>[93]</sup>.

## 4 结 论

本文利用双核模型, 开展了基于放射性弹核进行熔合蒸发反应合成超重原子核的系统研究, 构建了超重核合成截面数据集, 探索了超重核合成的物理机制. 在系统研究中, 反应的靶核为  $Z = 90-100$  的 11 个锕系核素  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{231}\text{Pa}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{244}\text{Pu}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{248}\text{Cm}$ ,  $^{249}\text{Bk}$ ,  $^{251}\text{Cf}$ ,  $^{254}\text{Es}$  和  $^{257}\text{Fm}$ . 弹核为  $Z = 4-32$  元素位于质子和中子滴线之间的同位素, 这些弹核大多具有放射性. 利用上述弹核和靶核组合得到大量合成  $Z = 104-122$  超重元素同位素的反应体系, 通过大规模计算能给出每一个反应体系  $2n-5n$  道的激发函数. 基于系统计算结果, 利用 4969 个反应体系的数据建立了超重核

合成截面数据集. 对于每个反应体系, 数据集包含了  $2n-5n$  道合成的超重核素、最佳入射能和最大蒸发剩余截面. 这一超重核合成截面数据集可为实验合成超重新核素乃至超重新元素提供关键的理论支撑, 具有较大的应用价值.

同时, 本文研究了大量反应体系的系统计算结果, 讨论了其中蕴含的系统性规律, 从理论层面深入探索了超重核合成机制. 以典型反应体系  $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$  为例, 介绍了本文理论框架对俘获截面、熔合概率、存活概率和激发函数的计算结果. 通过将截面计算值与实验数据相对比, 验证了这一理论框架描述重离子熔合蒸发反应的可靠性. 本文以合成 108 和 119 号超重元素同位素为例, 讨论了系统计算结果, 为读者使用超重核合成截面数据集提供参考. 随后, 本文借助  $^{232}\text{Th}$  靶核体系系统计算结果, 展示了合成截面的系统性规律, 研究了利用熔合蒸发反应合成超重核的物理机制. 结果表明, 众多合成超重核的反应体系截面差异很大, 复合体系的内熔合位垒和复合核的裂变位垒, 是影响一个反应体系截面的重要因素. 定性来说, 满足下述条件的弹靶组合有较大的合成截面: 弹靶接触后形成的复合体系有较低的内熔合位垒, 体系更易于熔合; 形成的超重复合核裂变位垒较高, 更利于复合核存活. 这些结论可为超重核合成相关的理论研究提供参考.

目前, 还存在诸多问题有待进一步研究. 重离子熔合蒸发反应过程极度复杂, 目前主要利用唯象模型计算反应的最佳入射能和合成截面等. 然而, 各种唯象模型往往基于不同的物理出发点和假设, 理论计算存在很大的不确定性. 这种不确定性不仅对单个反应体系的计算结果造成影响, 甚至可能影响大量体系结果中的系统性规律. 利用物理基础更可靠的微观模型或实验结果对唯象模型做出约束, 有望优化唯象模型对反应过程的描述, 降低理论的不确定性, 进而对合成截面和最佳入射能给出更可靠的预言.

## 数据可用性说明

支撑本研究成果的数据集可在科学数据银行 <http://www.doi.org/10.57760/sciencedb.27854> 中访问获取.

本文部分计算得到中国科学院理论物理研究所高性能计算平台和中国科学院计算机网络信息中心超级计算中心的支持.

## 参考文献

- [1] Li L L, Lu B N, Wang N, Wen K, Xia C J, Zhang Z H, Zhao J, Zhao E G, Zhou S G 2014 *Nucl. Phys. Rev.* **31** 253 (in Chinese) [李璐璐, 吕炳楠, 王楠, 温凯, 夏铨君, 张振华, 赵杰, 赵恩广, 周善贵 2014 原子核物理评论 **31** 253]
- [2] Zhou S G 2014 *Physics* **43** 817 (in Chinese) [周善贵 2014 物理 **43** 817]
- [3] Oganessian Y T, Utyonkov V K 2015 *Rep. Prog. Phys.* **78** 036301
- [4] Adamian G G, Antonenko N V, Bezbakh A N, Jolos R V 2016 *Phys. Part. Nucl.* **47** 387
- [5] Zhou S G 2017 *Nucl. Phys. Rev.* **34** 318 (in Chinese) [周善贵 2017 原子核物理评论 **34** 318]
- [6] Li L, Guo L, Godbey K, Umar A S 2022 *Phys. Lett. B* **833** 137349
- [7] Gan Z G, Huang W X, Xu H S, Zhao H W 2024 *Physics* **53** 803 (in Chinese) [甘再国, 黄文学, 徐珊珊, 赵红卫 2024 物理 **53** 803]
- [8] Li L, Guo L, Godbey K, Umar A S 2024 *Phys. Rev. C* **110** 064607
- [9] Jiang Y M, Zhang D D, Zhou S G 2025 *Physics* **54** 599 (in Chinese) [姜义铭, 张丹丹, 周善贵 2025 物理 **54** 599]
- [10] Xing F Z, Le X K, Wang N, Wang Y Z 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 112301 (in Chinese) [邢凤竹, 乐先凯, 王楠, 王艳召 2025 物理学报 **74** 112301]
- [11] Zhang M H, Zhang Z Y, Gan Z G, Zhou S G, Zhang F S 2025 *Nucl. Sci. Tech.* **36** 204
- [12] Bohr N, Wheeler J A 1939 *Phys. Rev.* **56** 426
- [13] Myers W D, Swiatecki W J 1967 *Ark. Phys.* **36** 343
- [14] Strutinsky V M 1966 *Yad. Fiz.* **3** 614
- [15] Strutinsky V 1967 *Nucl. Phys. A* **95** 420
- [16] Sobiczewski A, Gareev F, Kalinkin B 1966 *Phys. Lett.* **22** 500
- [17] Meldner H 1967 *Arkiv Fysik* **36** 593
- [18] Rutz K, Bender M, Bürvenich T, Schilling T, Reinhard P G, Maruhn J A, Greiner W 1997 *Phys. Rev. C* **56** 238
- [19] Wong C Y 1966 *Phys. Lett.* **21** 688
- [20] Nilsson S G, Tsang C F, Sobiczewski A, Szymański Z, Wyczech S, Gustafson C, Lamm I L, Möller P, Nilsson B 1969 *Nucl. Phys. A* **131** 1
- [21] Mosel U, Greiner W 1969 *Z. Phys. A* **222** 261
- [22] Zhang W, Meng J, Zhang S Q, Geng L S, Toki H 2005 *Nucl. Phys. A* **753** 106
- [23] Sobiczewski A, Pomorski K 2007 *Prog. Part. Nucl. Phys.* **58** 292
- [24] Malov L A, Adamian G G, Antonenko N V, Lenske H 2021 *Phys. Rev. C* **104** 064303
- [25] Chen H J, Sheng H W, Huang W H, Wu B Q, Zhao T L, Bao X J 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 192301 (in Chinese) [陈海军, 盛浩文, 黄文豪, 吴彬琪, 赵天亮, 包小军 2025 物理学报 **74** 192301]
- [26] Zagrebaev V, Greiner W 2008 *Phys. Rev. C* **78** 034610
- [27] Hofmann S 2011 *Radiochim. Acta* **99** 405
- [28] Hofmann S, Münzenberg G 2000 *Rev. Mod. Phys.* **72** 733
- [29] Morita K, Morimoto K, Kaji D, Akiyama T, Goto S, Haba H, Ideguchi E, Kanungo R, Katori K, Koura H, Kudo H, Ohnishi T, Ozawa A, Suda T, Sueki K, Xu H S, Yamaguchi T, Yoneda A, Yoshida A, Zhao Y L 2004 *J. Phys. Soc. Jpn.* **73** 2593
- [30] Oganessian Y T, Utyonkov V K, Lobanov Y V, Abdullin F S, Polyakov A N, Shirokovsky I V, Tsyganov Y S, Gulbekian G G, Bogomolov S L, Mezentssev A N, Iliev S, Subbotin V G, Sukhov A M, Voinov A A, Buklanov G V,

- Subotic K, Zagrebaev V I, Itkis M G, Patin J B, Moody K J, Wild J F, Stoyer M A, Stoyer N J, Shaughnessy D A, Kenneally J M, Loughheed R W 2004 *Phys. Rev. C* **69** 021601(R)
- [31] Oganessian Y T, Utyonkov V K, Lobanov Y V, et al. 2004 *Phys. Rev. C* **69** 054607
- [32] Oganessian Y T, Utyonkov V K, Lobanov Y V, et al. 2006 *Phys. Rev. C* **74** 044602
- [33] Oganessian Y T, Abdullin F S, Bailey P D, et al. 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 142502
- [34] Boilley D, Cauchois B, Lü H L, Marchix A, Abe Y, Shen C W 2018 *Nucl. Sci. Tech.* **29** 172
- [35] Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W 2003 *Phys. Rev. C* **68** 034601
- [36] Jia F, Xu H S, Zheng C, Fan R R, Zhang X Y, Li J Q, Scheid W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2047 (in Chinese) [贾飞, 徐珊珊, 郑川, 樊瑞睿, 张雪莹, 李君清, Scheid W 2007 *物理学报* **56** 2047]
- [37] Huang M H, Gan Z G, Fan H M, Su P Y, Ma L, Zhou X H, Li J Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1569 (in Chinese) [黄明辉, 甘再国, 范红梅, 苏朋源, 马龙, 周小红, 李君清 2008 *物理学报* **57** 1569]
- [38] Nasirov A K, Giardina G, Mandaglio G, Manganaro M, Hanappe F, Heinz S, Hofmann S, Muminov A I, Scheid W 2009 *Phys. Rev. C* **79** 024606
- [39] Wang N, Zhao E G, Scheid W, Zhou S G 2012 *Phys. Rev. C* **85** 041601(R)
- [40] Bao X J, Gao Y, Li J Q, Zhang H F 2015 *Phys. Rev. C* **92** 034612
- [41] Li F, Zhu L, Wu Z H, Yu X B, Su J, Guo C C 2018 *Phys. Rev. C* **98** 014618
- [42] Adamian G G, Antonenko N V, Lenske H, Malov L A 2020 *Phys. Rev. C* **101** 034301
- [43] Yang X X, Zhang G, Li J J, Li B, Zhang X R, Sokhna Cheikh A T, Cheng S H, Zhang Y H, Wang C, Zhang F S 2020 *Nucl. Phys. Rev.* **37** 151 (in Chinese) [杨秀秀, 张根, 李静静, 李冰, 张欣蕊, A. T. Sokhna Cheikh, 程诗慧, 张钰海, 王晨, 张丰收 2020 *原子核物理评论* **37** 151]
- [44] Niu F, Chen P H, Feng Z Q 2021 *Nucl. Sci. Tech.* **32** 103
- [45] Li J X, Zhang H F 2022 *Phys. Rev. C* **105** 054606
- [46] Deng X Q, Zhou S G 2023 *Phys. Rev. C* **107** 014616
- [47] Zagrebaev V I, Karpov A V, Greiner W 2012 *Phys. Rev. C* **85** 014608
- [48] Liu Z H, Bao J D 2014 *Phys. Rev. C* **89** 024604
- [49] Siwek-Wilczyńska K, Cap T, Kowal M 2019 *Phys. Rev. C* **99** 054603
- [50] Liu L, Shen C W, Li Q F, Tu Y, Wang X B, Wang Y J 2016 *Eur. Phys. J. A* **52** 35
- [51] Loveland W 2007 *Phys. Rev. C* **76** 014612
- [52] Wang N, Tian J, Scheid W 2011 *Phys. Rev. C* **84** 061601(R)
- [53] Zhang J J, Wang C B, Ren Z Z 2013 *Nucl. Phys. A* **909** 36
- [54] Zhu L, Xie W J, Zhang F S 2014 *Phys. Rev. C* **89** 024615
- [55] Ghahramany N, Ansari A 2016 *Eur. Phys. J. A* **52** 287
- [56] Santhosh K P, Safoora V 2017 *Phys. Rev. C* **96** 034610
- [57] Lv X J, Yue Z Y, Zhao W J, Wang B 2021 *Phys. Rev. C* **103** 064616
- [58] Wang B, Yue Z Y, Zhao W J 2021 *Phys. Rev. C* **103** 034605
- [59] Zhu L 2023 *Phys. Rev. Res.* **5** L022030
- [60] Guo L, Shen C W, Yu C, Wu Z J 2018 *Phys. Rev. C* **98** 064609
- [61] Volkov V V 1978 *Phys. Rep.* **44** 93
- [62] Wang N, Zhao E G, Scheid W 2014 *Phys. Rev. C* **89** 037601
- [63] Sun X X, Guo L 2022 *Phys. Rev. C* **105** 054610
- [64] Sun X X, Guo L 2023 *Phys. Rev. C* **107** 064609
- [65] Roberto J B, Alexander C W, Boll R A, Burns J D, Ezold J G, Felker L K, Hogle S L, Rykaczewski K P 2015 *Nucl. Phys. A* **944** 99
- [66] Roberto J B 2018 *Prog. Nucl. Sci. Tech.* **5** 14
- [67] Robinson S M, Benker D E, Collins E D, Ezold J G, Garrison J R, Hogle S L 2020 *Radiochim. Acta* **108** 737
- [68] Yang J C, Xia J W, Xiao G Q, et al. 2013 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **317** 263
- [69] Ma X, Wen W Q, Zhang S F, Yu D Y, Cheng R, Yang J, Huang Z K, Wang H B, Zhu X L, Cai X, Zhao Y T, Mao L J, Yang J C, Zhou X H, Xu H S, Yuan Y J, Xia J W, Zhao H W, Xiao G Q, Zhan W L 2017 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **408** 169
- [70] Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W 2004 *Phys. Rev. C* **69** 044601
- [71] Zagrebaev V I 2004 *Prog. Theo. Phys. Supp.* **154** 122
- [72] Loveland W 2013 *J. Phys. Conf. Ser.* **420** 012004
- [73] Aritomo Y 2007 *Phys. Rev. C* **75** 024602
- [74] Bao X J, Gao Y, Li J Q, Zhang H F 2015 *Phys. Rev. C* **91** 064612
- [75] Hong J, Adamian G G, Antonenko N V 2017 *Phys. Rev. C* **96** 014609
- [76] Wu Z H, Zhu L, Li F, Yu X B, Su J, Guo C C 2018 *Phys. Rev. C* **97** 064609
- [77] Zhang M H, Zou Y, Wang M C, Zhang G, Niu Q L, Zhang F S 2024 *Nucl. Sci. Tech.* **35** 161
- [78] Deng X Q 2023 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [邓祥泉 2023 博士学位论文 (北京: 中国科学院理论物理研究所)]
- [79] Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W, Volkov V V 1998 *Nucl. Phys. A* **633** 409
- [80] Wang B, Wen K, Zhao W J, Zhao E G, Zhou S G 2017 *At. Data Nucl. Data Tables* **114** 281
- [81] Li W, Wang N, Li J F, Xu H, Zuo W, Zhao E, Li J Q, Scheid W 2003 *Europhys. Lett.* **64** 750
- [82] Feng Z Q, Jin G M, Fu F, Li J Q 2006 *Nucl. Phys. A* **771** 50
- [83] Wang N, Li J Q, Zhao E G 2008 *Phys. Rev. C* **78** 054607
- [84] Grangé P, Li J Q, Weidenmüller H 1983 *Phys. Rev. C* **27** 2063
- [85] Adamian G G, Antonenko N V, Jolos R V, Ivanova S P, Melnikova O I 1996 *Int. J. Mod. Phys. E* **5** 191
- [86] Wong C Y 1973 *Phys. Rev. Lett.* **31** 766
- [87] Audi G, Wapstra A H, Thibault C 2003 *Nucl. Phys. A* **729** 337
- [88] Möller P, Nix J R, Myers W D, Swiatecki W J 1995 *At. Data Nucl. Data Tables* **59** 185
- [89] Bohr A, Mottelson B R 1975 *Nuclear Structure* (Vol. II) (New York: Benjamin) p658
- [90] Wolschin G 1979 *Phys. Lett. B* **88** 35
- [91] Xia C J, Sun B X, Zhao E G, Zhou S G 2011 *Sci. China Phys. Mech. Astron.* **54** s109
- [92] Jackson J D 1956 *Can. J. Phys.* **34** 767
- [93] Möller P, Sierk A J, Ichikawa T, Sagawa H 2016 *At. Data Nucl. Data Tables* **109-110** 1
- [94] Töke J, Światecki W J 1981 *Nucl. Phys. A* **372** 141
- [95] Schmidt K H, Morawek W 1991 *Rep. Prog. Phys.* **54** 949
- [96] Ignatyuk A V, Istekov K K, Smirenkin G N 1979 *Yad. Fiz.* **29** 875
- [97] Zubov A S, Adamian G G, Antonenko N V 2009 *Phys. Part. Nucl.* **40** 847
- [98] Bhat M R 1991 *Proceedings of an International Conference*

- on *Nuclear Data for Science and Technology* Forschungszentrum Jülich, Germany, May 13–17, 1991 p817
- [99] Nishio K, Mitsuoka S, Nishinaka I, Makii H, Wakabayashi Y, Ikezoe H, Hirose K, Ohtsuki T, Aritomo Y, Hofmann S 2012 *Phys. Rev. C* **86** 034608
- [100] Oganessian Y T, Utyonkov V K, Lobanov Y V, Abdullin F S, Polyakov A N, Shirokovsky I V, Tsyganov Y S, Gulbekian G G, Bogomolov S L, Gikal B N, Mezentsev A N, Iliev S, Subbotin V G, Sukhov A M, Voinov A A, Buklanov G V, Subotic K, Zagrebaev V I, Itkis M G, Patin J B, Moody K J, Wild J F, Stoyer M A, Stoyer N J, Shaughnessy D A, Kenneally J M, Wilk P A, Loughheed R W, Il'kaev R I, Vesnovskii S P 2004 *Phys. Rev. C* **70** 064609
- [101] Oganessian Y T, Utyonkov V K, Lobanov Y V, Abdullin F S, Polyakov A N, Sagaidak R N, Shirokovsky I V, Tsyganov Y S, Voinov A A, Gulbekian G G, Bogomolov S L, Gikal B N, Mezentsev A N, Subbotin V G, Sukhov A M, Subotic K, Zagrebaev V I, Vostokin G K, Itkis M G, Henderson R A, Kenneally J M, Landrum J H, Moody K J, Shaughnessy D A, Stoyer M A, Stoyer N J, Wilk P A 2007 *Phys. Rev. C* **76** 011601(R)
- [102] Oganessian Y T, Abdullin F S, Dmitriev S N, Gostic J M, Hamilton J H, Henderson R A, Itkis M G, Moody K J, Polyakov A N, Ramayya A V, Roberto J B, Rykaczewski K P, Sagaidak R N, Shaughnessy D A, Shirokovsky I V, Stoyer M A, Stoyer N J, Subbotin V G, Sukhov A M, Tsyganov Y S, Utyonkov V K, Voinov A A, Vostokin G K 2013 *Phys. Rev. C* **87** 014302
- [103] Oganessian Y T, Abdullin F S, Alexander C, Binder J, Boll R A, Dmitriev S N, Ezold J, Felker K, Gostic J M, Grzywacz R K, Hamilton J H, Henderson R A, Itkis M G, Miernik K, Miller D, Moody K J, Polyakov A N, Ramayya A V, Roberto J B, Ryabinin M A, Rykaczewski K P, Sagaidak R N, Shaughnessy D A, Shirokovsky I V, Shumeiko M V, Stoyer M A, Stoyer N J, Subbotin V G, Sukhov A M, Tsyganov Y S, Utyonkov V K, Voinov A A, Vostokin G K 2013 *Phys. Rev. C* **87** 054621
- [104] Oganessian Y T, Utyonkov V K, Kovrizhnykh N D, Abdullin F S, Dmitriev S N, Ibadullayev D, Itkis M G, Kuznetsov D A, Petrushkin O V, Podshibiakin A V, Polyakov A N, Popeko A G, Sagaidak R N, Schlattauer L, Shirokovski I V, Shubin V D, Shumeiko M V, Solovyev D I, Tsyganov Y S, Voinov A A, Subbotin V G, Bodrov A Y, Sabel'nikov A V, Khalkin A V, Zlokazov V B, Rykaczewski K P, King T T, Roberto J B, Brewer N T, Grzywacz R K, Gan Z G, Zhang Z Y, Huang M H, Yang H B 2022 *Phys. Rev. C* **106** L031301

SPECIAL TOPIC—Thematic data in nuclear physics: Experimental, theoretical and applied research

## Systematic study of synthesis cross sections for superheavy nuclei based on dinuclear system model\*

DENG Xiangquan<sup>1)2)</sup> ZHOU Shangui<sup>2)1)†</sup>

1) (School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

2) (Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

( Received 23 September 2025; revised manuscript received 20 October 2025 )

### Abstract

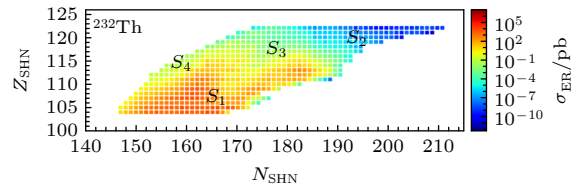
The synthesis of superheavy nuclei (SHN) is a leading research frontier in nuclear physics today. In experiments on synthesizing SHN through fusion-evaporation reactions, selecting an appropriate projectile-target combination and determining the optimal incident energy are crucial. The number of SHN that can be synthesized with stable projectiles is very small. The fusion-evaporation reaction with a radioactive projectile is one of the promising ways for SHN synthesis, and it is of great significance to conduct in-depth research on this kind of reaction. In this work, a systematic study is carried out on the fusion-evaporation reactions with radioactive projectiles. The capture cross section is calculated with the empirical coupled channel model, the fusion probability is computed by the dinuclear system model with a dynamical potential energy surface (DNS-DyPES model) and the survival probability is determined through the statistical model.

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2023YFA1606500, 2024YFE0109800), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12447101, 12375118, 12435008, W2412043), and the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant Nos. XDB0920000, XDB1550000).

† Corresponding author. E-mail: [sgzhou@itp.ac.cn](mailto:sgzhou@itp.ac.cn)

In the systematic study, 11 actinide isotopes with  $Z = 90-100$  are used as targets which are  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{231}\text{Pa}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{244}\text{Pu}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{248}\text{Cm}$ ,  $^{249}\text{Bk}$ ,  $^{251}\text{Cf}$ ,  $^{254}\text{Es}$  and  $^{257}\text{Fm}$ . Projectiles are isotopes between proton and neutron drip lines for elements  $Z = 4-32$  and most of these projectiles are radioactive. By combining these projectiles and targets, 4969 reaction systems are proposed for synthesizing the isotopes of superheavy elements  $Z = 104-122$ . Through large-scale calculations, the excitation functions for  $2n-5n$  evaporation channels of each reaction system are obtained. Using the results of these reaction systems, we establish a synthesis cross section dataset for superheavy nuclei. For each reaction system, the dataset includes the identities of the synthesized SHN, the optimal incident energies, and the maximal evaporation residue cross sections in  $2n-5n$  evaporation channels. This dataset may serve as a theoretical support for synthesizing new superheavy nuclides and elements.

Additionally, taking the reactions with  $^{232}\text{Th}$  target as examples, we discuss systematic trends in the results and explore the underlying SHN synthesis mechanism. The synthesis cross sections of these reactions are significantly different. We find that the inner fusion barrier of the compound system forms after the projectile has touched the target and the fission barrier of the compound nucleus are key factors that influence the synthesis cross section. Qualitatively, the projectile-target combinations with relatively large synthesis cross sections possess a lower inner fusion barrier in the compound system forms upon contact, which is favorable for fusion, and a higher fission barrier in the compound nucleus, thereby enhancing the survival probability. These conclusions may provide valuable references for advancing theoretical research related to the synthesis of superheavy nuclei. The dataset presented in this paper are available at <http://www.doi.org/10.57760/sciencedb.27854>.



**Keywords:** superheavy nuclei, heavy-ion fusion-evaporation reactions, radioactive beams, dinuclear system models

**DOI:** [10.7498/aps.75.20251309](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251309)

**CSTR:** [32037.14.aps.75.20251309](https://cstr.net.cn/32037.14.aps.75.20251309)