

核物理主题数据: 实验、理论与应用专题

基于 R 矩阵理论的氦氦反应截面数据评价*韩旭¹⁾ 叶涛^{2)†} 陈振鹏³⁾ 应阳君²⁾ 郭海瑞²⁾ 祖铁军¹⁾

1) (西安交通大学核科学与技术学院, 西安 710049)

2) (北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

3) (清华大学物理系, 北京 100084)

(2025年9月18日收到; 2025年10月11日收到修改稿)

基于广义约化 R 矩阵理论, 使用 RAC 程序 (R -matrix analysis code) 综合分析了 ${}^6\text{He}$ 系统中所有可以利用的实验数据, 给出了氦核入射 10^{-2} — 20 MeV 能量范围内主要反应道的评价核数据. 其中积分截面包括 $T(t, 2n){}^4\text{He}$, $T(t, n){}^3\text{He}$, $T(t, d){}^4\text{H}$; 微分截面包括 $T(t, 2n){}^4\text{He}$, $T(t, n){}^3\text{He}$, $T(t, d){}^4\text{H}$, $T(t, t)T$. 结果表明, RAC 的评价结果与实验数据和 ENDF/B-VIII.1 的评价数据整体符合良好. 重点关注 $T(t, 2n){}^4\text{He}$ 反应, 评价价值在 10^{-2} — 20 MeV 范围内与已有实验数据一致, 在 2.9 MeV 附近出现由 2^+ 能级主导的共振, 在 1.9 MeV 处, 已有实验同时测量了积分截面和角分布, 本工作的评价结果在两类数据上均表现出良好的一致性, 积分截面与微分截面的联合约束有效提升了 R 矩阵参数的稳定性和评价结果的可靠性. 基于 ${}^6\text{He}$ 系统的整体评价, 进一步补充了 $T(t, n){}^3\text{He}$ 和 $T(t, d){}^4\text{H}$ 反应的截面数据. 本工作完善了聚变反应相关的数据基础, 并为后续与镜像系统 ${}^6\text{Be}$ 系统的联合分析奠定了基础. 本文数据集可在 <https://www.doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00202> 中访问获取.

关键词: R 矩阵理论, 聚变反应截面, ${}^6\text{He}$ 系统, $T(t, 2n){}^4\text{He}$ 反应

DOI: 10.7498/aps.75.20251280

CSTR: 32037.14.aps.75.20251280

1 引言

聚变反应截面数据对于聚变能的研究和应用至关重要, 是聚变堆设计中诸多关键参数计算的基础. 此外, 精确的截面数据对于验证和完善核物理模型, 推动等离子体物理等领域的理论研究也起到了关键作用^[1-3].

目前有 5 个人工可用的聚变反应, 分别是氘氘 (DT) 反应 ($T(d, n){}^4\text{He}$)、氘氘 (DD) 反应 ($D(d, n){}^3\text{He}$ 和 $D(d, p)T$)、氘氦 ($D({}^3\text{He})$ 反应 (${}^3\text{He}(d, p){}^4\text{He}$) 和氦氦 (TT) 反应 ($T(t, 2n){}^4\text{He}$)^[4,5]. 在 5 个聚变反应中, 氦氦反应 ($T(t, 2n){}^4\text{He}$) 释放两个中子, 使得该反应在高效中子源设计与混合堆燃料

循环中展现出独特优势, 同时也是 μ 子催化聚变研究中的关键核反应^[6]. 其镜像反应 ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$ 是恒星中氢燃烧网络中的核心步骤, 是生成 ${}^4\text{He}$ 的主要反应途径之一, TT 反应在修正库仑势和同位旋差异后可为研究该反应提供一定参考^[7,8]. 此外, TT 反应还被认为参与了宇宙早期的核合成过程^[9,10].

然而, 由于实验中氦材料获取困难、成本高昂, 并且 TT 反应的反应截面相较于 DT 反应在热核聚变能区小了 2 个数量级以上, 这使得实验测量极为困难, 截面数据至今仍较为稀缺. 从评价数据上来看, 目前国际五大评价核数据库中, 只有美国的 ENDF 库给出了 5×10^{-4} — 20 MeV 能量范围内 $T(t, 2n){}^4\text{He}$ 反应的截面值, 其最新版本 ENDF/B-

* 中国工程物理研究院院长基金 (批准号: YZJJZQ2023022) 和国家自然科学基金 (批准号: 11705009) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ye_tao@iapcm.ac.cn

VIII.1 的截面数据仍然来自 1985 年 White 的评价结果^[11], 评价结果并未得到及时更新.

鉴于 TT 反应截面在聚变理论研究及工程应用中的重要作用, 以及现有评价数据长期未更新的现状, 本文围绕 TT 反应所对应的⁶He 复合核系统独立开展了新的数据评价工作. 针对⁶He 系统的深入分析有利于提高对整个 $A = 6$ 的复合核系统的认识, 加强对聚变反应数据和轻核结构的了解. 经过数十年的发展, 在聚变反应截面数据评价方面, 国内外已经开展了诸多研究工作^[12-15]. 目前而言, 评价数据库收录的聚变反应截面数据仍主要依赖于 R 矩阵方法所提供的系统性评价结果.

为了从理论上描述低能核反应的共振现象, Wigner 和 Eisenbud^[16] 提出并发展了 R 矩阵理论, 主要应用于轻核反应截面数据和中重核共振参数的评价. 基于 R 矩阵理论, 世界各国都积极发展自己的核数据评价程序, 目前主流的 R 矩阵分析程序有美国 LANL(Los Alamos National Laboratory) 发展的轻核系统评价程序 EDA^[17], ORNL (Oak Ridge National Laboratory) 发展的中重核系统评价程序 SAMMY^[18], JINA-CEE (Joint Institute for Nuclear Astrophysics-Center for the Evolution of the Elements) 发展的低能带电粒子诱导反应截面评价程序 AZURE2^[19] 等等. 本文使用的是由清华大学陈振鹏教授等基于经典约化 R 矩阵理论和协方差分析理论编写的 R 矩阵分析程序 RAC^[20]. 该程序具备高度自动化调节 R 矩阵参数的功能, 并能够高效拟合大量实验数据, 适用于分析复合核系统, 根据实验数据唯象地调节 R 矩阵参数, 最终给出一个复合核系统中设置的各个反应道截面的评价结果. RAC 程序已广泛应用于国际原子能机构 (IAEA) 组织的多项国际合作项目, 例如中子标准截面^[18]、带电粒子 R 矩阵程序^[21] 以及国际中子数据评价网络^[22] 等. 此外, RAC 程序还用于分析 $\alpha+^{12}\text{C}$ 反应的天体物理 S 因子^[23], 并取得了良好的研究成果.

基于 RAC 程序, 此前已经完成了对 DD 反应对应的⁴He 系统^[24]、DT 反应对应的⁵He 系统^[25] 和 D³He 反应对应的⁵Li 系统^[25] 的相关研究工作, 目前继续开展对⁶He 系统的研究, 着重研究 10⁻²—20 MeV 能量范围内 T(t, 2n)⁴He 反应的反应截面.⁶He 系统的评价数据按照入射粒子不同可以分为

三大类, 分别是氘核数据 (t+T)、中子数据 (n+⁵He) 和质子数据 (p+⁵H). 由于⁵He 和⁵H 都是极其不稳定的核素, 中子入射道和质子入射道的实验难度极大, 缺乏相应的实验数据信息, 所以本文仅针对氘核数据进行了系统分析.

综上所述, 本工作对⁶He 系统进行了独立的评价, 使用一套 R 矩阵参数, 同时分析⁶He 系统中所有可以利用的实验数据, 给出了⁶He 系统中氘核入射的全套评价核数据, 并与 ENDF/B-VIII.1 的评价数据和实验数据进行了系统的比较与分析.

2 理论方法

2.1 广义约化 R 矩阵理论

根据 Hauser-Feshbach 统计模型^[26], 复合核的衰变规律在理论上与其形成方式无关, 因此复合核的每个反应道是等效的, 既可以作为入射道, 也可以作为出射道. R 矩阵理论允许使用一组统一的 R 矩阵参数来描述与该复合核相关的所有二体核反应的实验数据. Lane 和 Thomas^[27] 对于整个 R 矩阵理论方法进行了扩展, 提出并发展了约化 R 矩阵的概念, 旨在解决传统 R 矩阵方法不能处理三体及三体以上反应道的问题.

假设在原子核相互作用的过程中对于每一个反应道 c , 都存在道半径 a_c , 由此把组态空间分为内、外两个区域, 其中在内部区域, 复合系统存在满足边界条件的本征解. 在 a_c 定义的超曲面上, 内外两部分波函数必须光滑连接, R 矩阵可以把内部波函数与其梯度在超曲面上联系起来, 也就是表达了内部波函数传播到超曲面时的信息. 这样, 结合 R 矩阵与碰撞矩阵 U 之间的泛函关系, 可以计算得到 S 矩阵, 进而得到反应截面. 标准 R 矩阵模型如下所示:

$$R_{cc'} = \sum_{\lambda} \frac{\gamma_{\lambda c} \gamma_{\lambda c'}}{E_{\lambda} - E}, \quad (1)$$

其中 c 和 c' 表示不同的反应道; λ 表示能级; $\gamma_{\lambda c}$ 表示约化宽度振幅; E_{λ} 表示能级位置; E 表示质心系能量.

碰撞矩阵 U 可以由内部波函数导出, R 矩阵和碰撞矩阵 U 的泛函关系为

$$U = W \left\{ 1 + G^{1/2} [1 - R(L - B)]^{-1} R G^{1/2} w \right\} W, \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} W = \sqrt{\frac{I}{O}}, \\ G = \frac{\rho}{IO}, \\ L = \rho O' O^{-1}, \\ w = O'I - I'O. \end{cases} \quad (3)$$

上述 4 个皆为对角矩阵, 其中 I 和 O 的分量 I_c 和 O_c 分别代表入射波和出射波, ρ 的分量 $\rho_c = k_c a_c$, B 表示边界条件矩阵.

由碰撞矩阵 U , 可以得到 S 矩阵元:

$$S_{c'c} = e^{-i(\sigma_{c'} + \sigma_c)} U_{c'c}, \quad (4)$$

其中 σ_c 为库仑散射相移, 针对共振机制, S 矩阵元可以用能级的宽度和位置来表示:

$$\begin{aligned} S_{c'c} &= e^{-i(\phi_{c'} + \phi_c)} \left(\delta_{c'c} + i \sum_{\lambda} \frac{\Gamma_{\lambda c'}^{1/2} \Gamma_{\lambda c}^{1/2}}{E_{\lambda} - E - \frac{i}{2} \Gamma_{\lambda}} \right) \\ &= e^{-i(\phi_{c'} + \phi_c)} \left[\delta_{c'c} + 2ip_{c'}^{1/2} \left(\sum_{\lambda\mu} \gamma_{\lambda c'} \gamma_{\mu c} A_{\lambda\mu} \right) p_c^{1/2} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

$$p_c(E) = \frac{\rho_c}{G_c^2 + F_c^2}, \quad (6)$$

其中 ϕ_c 是硬球散射相移, 这里 $\phi_c = \arctan(F_c/G_c)$, F_c 和 G_c 是正则和非正则库仑波函数, 与能量 E 有关. Γ_{λ} 和 E_{λ} 分别为第 λ 条能级的共振宽度和能级位置, $\Gamma_{\lambda c}$ 为第 λ 条能级在 c 道的共振宽度, p_c 是穿透因子, $A_{\lambda\mu}$ 是能级矩阵, $\gamma_{\lambda c}$ 是 λ 能级、 c 反应道的约化宽度振幅.

由 S 矩阵就可以计算出各个反应道的截面值, 以 $A(a, b)B$ 反应为例, 该反应的积分截面计算公式为

$$\sigma_{c',c} = \frac{\pi}{k^2} \frac{1}{(2I_a+1)(2I_A+1)} \sum_c (2J+1) |\delta_{c',c} - S_{c',c}^J|^2. \quad (7)$$

对于标准 R 矩阵模型, R 矩阵参数有三类, 分别是约化宽度振幅、能级位置和道半径. 对于约化 R 矩阵模型, 除这三类参数外, 还包括约化道宽度振幅, 各个能级的约化道宽度振幅代表该能量下所有未被考虑到的反应道的总贡献, 约化道的设置有助于将 R 矩阵分析扩展到高能部分. 在国际核数据评价领域, RAC 程序首先实际应用了约化 R 矩

阵模型, 目前已经得到了国际学术界的认可和推广.

标准 R 矩阵模型基于复合核理论发展而来, 但不是所有的粒子反应都会经历复合核的形成阶段, 例如直接反应, 两个粒子相互作用直接发生核子的交换等现象. 广义 R 矩阵理论^[27] 认为, 入射粒子和靶核相互作用后形成的核反应系统, 即使未实际经历复合核的形成阶段, 仍可采用 R 矩阵理论的相关公式去描述. 在这种情况下, 广义 R 矩阵理论就成了一种数学工具, 可用于同时拟合同一核系统中的多类核反应实验数据. 此时调整 R 矩阵参数不再需要每项参数都具备明确的物理意义, 而是以精确描述实验数据为主要目标.

综上, 这套分析一个核系统全套实验数据的理论就称为广义约化 R 矩阵理论, 广义约化 R 矩阵理论在美国的 R 矩阵分析程序 EDA 和中国的 RAC 中都得到了实际应用.

2.2 RAC 程序

RAC 程序使用“RAC-CENTRILIS”系统分析方法^[20], 同时拟合一个核系统的所有实验数据, 可以得到一个核系统全套的内部自洽的评价结果.

RAC 程序的 R 矩阵计算公式相较于标准 R 矩阵模型进行了改进, R 矩阵计算公式如下所示:

$$R_{cc'} = \sum_{\lambda\mu}^{N_1} \gamma_{\lambda c} \times \gamma_{\mu c'} A_{\lambda\mu} + \sum_{\lambda}^{N_2} \frac{\gamma_{\lambda c'} \times \gamma_{\lambda c}}{E_{\lambda} - E} + R_{cc'}^{\infty}, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} [A^{-1}]_{\lambda\mu} &= \left[E_{\lambda}^{\text{res}} - E + \sum_c (S_c(E) - B_c) \gamma_{\lambda c} \gamma_{\mu c} \right. \\ &\quad \left. - \frac{i}{2} \Gamma_{\lambda\mu}^e \right] \delta_{\lambda\mu}, \end{aligned} \quad (9)$$

其中 c 和 c' 表示不同的反应道; λ 和 μ 表示不同的能级; γ 表示约化宽度振幅; $A_{\lambda\mu}$ 表示能级矩阵; E 表示质心系能量; $R_{cc'}^{\infty}$ 表示常数型远能级本底; E_{λ}^{res} 表示共振能; $S_c(E)$ 表示位移函数, 定义为出射波函数导数与本身之比的实部; B_c 表示边界条件, 在实际计算中, 边界条件取 -1 , 即每个反应道轨道角动量的负值作为边界条件; $\Gamma_{\lambda\mu}^e$ 表示约化道总宽度.

RAC 以实验数据为标准对所有 R 矩阵参数进行调整, 调参过程中, 所有 R 矩阵参数都需要通过反复拟合进行校验, 通过计算整体参数的敏感性矩阵, 判断各个参数对于最终评价结果的影响. 去掉敏感性不强的参数或能级, 减少不必要的参数可以

加快系统的迭代速度. 对于各类反应截面, 采用文献 [27] 中给出的公式进行计算.

图 1 给出了 RAC 程序的计算流程图, RAC 程序包含三个主要输出文件, 分别是实验数据文件、参数文件和控制文件. 开展一个核系统的评价工作, 首先要整理出这个核系统考虑能量范围内各个反应道完备的实验数据集, 对原始实验数据进行误差处理和 Lett's 准则、PPP 规范的调整后 [20], 作为参数文件调参的参考数据; 参数文件包含反应道、各个入射粒子核靶核的基本信息, 道半径、能级参数等计算所需的参数信息, 通过控制文件控制程序自动进行调参; 控制文件具有调整调参的次数、步长、控制输入输出文件等功能, 通过控制符控制整个程序的运行. RAC 程序使用过广义最小二乘法进行调参, 以总体的 χ^2 作为标定, 目的是使最终整体的 χ^2 趋于最小.

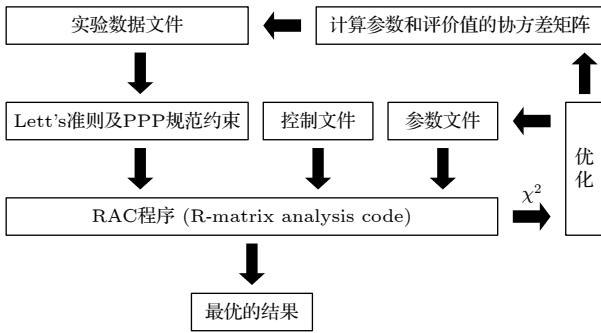


图 1 RAC 程序的主要输入文件及工作流程示意图
Fig. 1. Main input files and workflow diagram of the RAC program.

3 数据分析过程

3.1 反应道设置

针对 ${}^6\text{He}$ 系统的 R 矩阵分析, 所采用的反应道、道半径、阈值和能量范围如表 1 所列. 其中, 道半径初值由经典公式 [27] 计算给出:

$$a_c = r_0(A_1^{1/3} + A_2^{1/3}), \quad (10)$$

其中 r_0 与 A_1 和 A_2 无关, 其数值介于 1.4—1.5 fm 之间, A_1 和 A_2 分别为入射粒子和靶核的质量数.

经典 R 矩阵理论中道半径一般设置为定值, 在本工作的 R 矩阵分析中, 道半径不再局限于经典理论的约束, 道半径也作为 R 矩阵参数参与调参. 在 ${}^6\text{He}$ 系统中, 以 $t+T$ 道为零点, 其他反应道根据相对能量确定其阈值 ($t+T$ 为初态, 其余为末态).

表 1 反应道的道半径、阈值以及设置的能量范围
Table 1. Radius, threshold and energy range of reaction channels.

Channel	Radius a_c/fm	Threshold /MeV	Energy range /MeV
$t+T$	4.301	0	10^{-2} —20
$2n+{}^4\text{He}$	4.186	11.346	—
$n+{}^5\text{He}$	3.990	10.600	—
$d+{}^4\text{H}$	4.593	-7.852	—

3.2 实验数据使用

本工作使用的实验数据均来自于 EXFOR 实验数据库 [28,29], 具体情况如表 2 所列.

表 2 实验数据的使用情况
Table 2. Experimental data used in the RAC program.

Reaction channel	Cross section type	Energy range/MeV	Data point	Average χ^2
$T(t, 2n){}^4\text{He}$	Integral	3.125×10^{-2} —1.900	41	1.580
$T(t, n){}^5\text{He}$	Integral	5.980—19.140	5	0.022
$T(t, d){}^4\text{H}$	Integral	16.410—19.140	2	0.012
$T(t, 2n){}^4\text{He}$	Differential	0.040—2.22	81	1.654
$T(t, n){}^5\text{He}$	Differential	5.980—19.140	33	0.121
$T(t, d){}^4\text{H}$	Differential	16.410—19.140	2	0.042
$T(t, t)T$	Differential	1.582—2.013	18	3.509
Total			182	

R 矩阵分析是唯一拟合的过程, 判断其评价结果是否可靠, 主要是看整体评价与参考的实验数据集的符合程度如何, 一般使用 χ^2 来计算, χ^2 越小, 符合程度越高.

4 结果分析

4.1 积分截面的评价结果

RAC-2025 给出了 10^{-2} —20 MeV 能量范围内 $T(t, 2n){}^4\text{He}$ 反应积分截面的评价结果, 并与实验值、TENDL-2023 和 ENDF/B-VIII.1 的结果都进行了比较, 比较情况如图 2 所示.

在 10^{-2} — 10^{-1} MeV 的能量范围内, RAC-2025 的结果与实验值和评价数据符合良好. 在 10^{-1} —20 MeV 的能量范围内, RAC-2025 的结果与 ENDF/B-VIII.1 的结果基本一致, TENDL-2023 的评价结果与两家评价数据和实验数据相比出现明显差异. 在峰值附近, TENDL-2023 的结果相较于实验数据明显偏高, 峰位相较于 RAC-2025 和 ENDF/B-

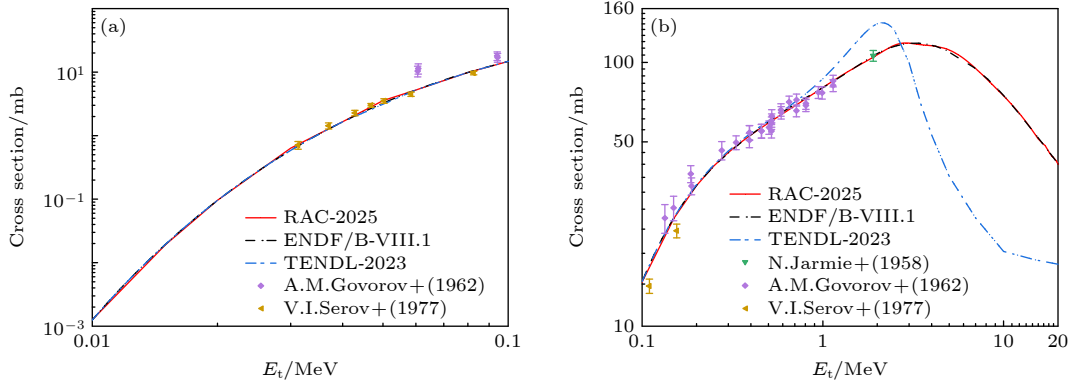


图 2 $T(t, 2n)^4\text{He}$ 反应积分截面 (a) 0.01—0.1 MeV; (b) 0.1—20 MeV
 Fig. 2. Integral cross section of $T(t, 2n)^4\text{He}$: (a) 0.01—0.1 MeV; (b) 0.1—20 MeV.

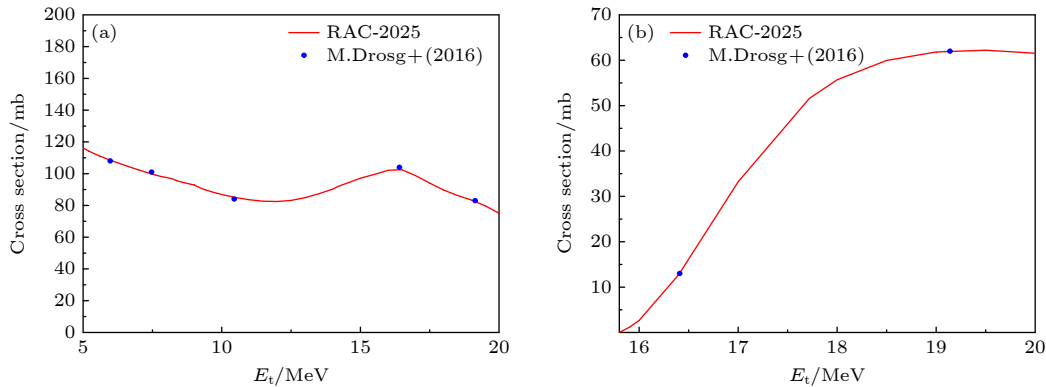


图 3 $T(t, n)^5\text{He}$ 反应和 $T(t, d)^4\text{H}$ 反应的积分截面 (a) $T(t, n)^5\text{He}$ 反应; (b) $T(t, d)^4\text{H}$ 反应
 Fig. 3. Integral cross section of $T(t, n)^5\text{He}$ and $T(t, d)^4\text{H}$: (a) $T(t, n)^5\text{He}$; (b) $T(t, d)^4\text{H}$.

VIII.1 的结果偏低约 0.8 MeV. 根据 RAC-2025 给出的结果, $T(t, 2n)^4\text{He}$ 反应在 2.9 MeV 附近达到峰值, 出现了明显的共振结构. 参考 ^6He 系统的能级分布^[14] 及 RAC 程序生成的能级文件, 该共振主要来自 2^+ 能级的贡献. 由于 RAC-2025 的评价只考虑了 $t+T$ 的初态, R 矩阵的系统学分析只能局限于积分截面和微分截面的相互约束. 根据 TT 反应的实验数据现状, $T(t, 2n)^4\text{He}$ 反应有效实验数据对应氦入射的最大入射能量为 2.22 MeV, 入射能量高于该能量时, $T(t, 2n)^4\text{He}$ 反应截面值的评价结果主要由系统调参后得到的 ^6He 系统的整体能级分布决定.

图 3 给出了 $T(t, n)^5\text{He}$ 反应和 $T(t, d)^4\text{H}$ 反应积分截面的评价结果. 对于这两个反应道, 实验数据库中仅有 Drosg 等^[30] 一家实验数据. 评价数据库 ENDF/B-VIII.1, TENDL-2023 和天体物理常用数据库 NACRE II^[31](Nuclear Astrophysics Compilation of REactions) 均未给出相应结果. 因此, 这两条反应道的评价主要依赖于 RAC-2025 基

于 ^6He 系统能级分布的整体分析.

图 3(a) 展示了 $T(t, n)^5\text{He}$ 反应 RAC-2025 的评价结果与实验数据的符合情况. 整体来看, RAC-2025 的评价结果与现有实验数据符合良好. 根据 RAC-2025 给出的评价结果与能级文件, $T(t, n)^5\text{He}$ 反应在 16.5 MeV 处出现明显共振结构, 该共振主要来自 2^- 能级的贡献.

图 3(b) 给出了 15.8—20 MeV 能量范围内 $T(t, d)^4\text{H}$ 反应 RAC-2025 的评价结果, 与 Drosg 等^[30] 的实验数据符合良好. 该反应存在阈值, 其阈值为 7.85 MeV. 根据 RAC-2025 的系统评价结果, 该反应在开道后的截面极小, 直至氦核入射能量达到 15.8 MeV 之后该反应的截面才出现明显增强, $0^+, 1^+, 1^-, 2^+, 2^-$ 五类能级均在 15.8 MeV 以后出现了峰值结构, 其中 2^+ 能级的贡献最大. 需要指出的是, 在阈值至 15.8 MeV 这一能区内, 目前尚缺乏实验数据或其他理论工作的结果作为参照, 因此该能区内 RAC-2025 的评价结果的可靠性有待未来实验测量或其他理论研究的进一步验证.

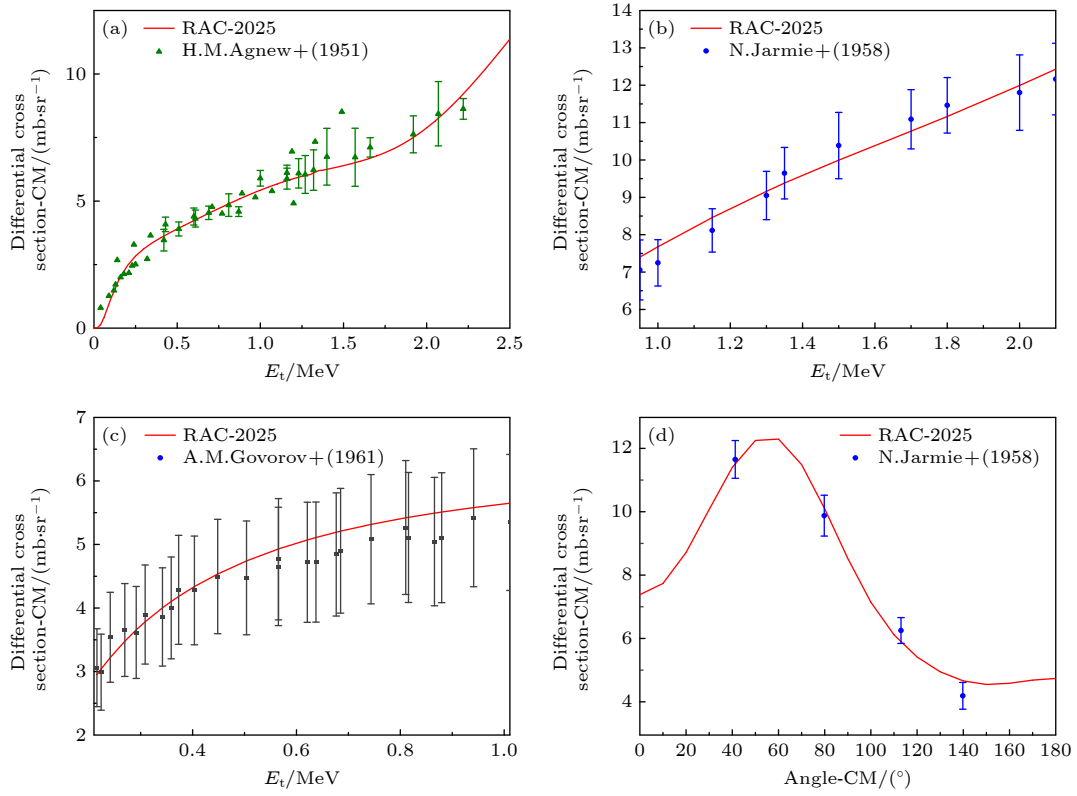


图 4 $\text{T}(t, 2n){}^4\text{He}$ 反应 ${}^4\text{He}$ 出射的微分截面(部分), 能量分布 (a) 0° , (b) 30° , (c) 90° ; 角分布 (d) 1.9 MeV

Fig. 4. Differential cross section of ${}^4\text{He}$ from the $\text{T}(t, 2n){}^4\text{He}$ reaction (partial), energy distribution: (a) 0° , (b) 30° , (c) 90° ; and angular distribution (d) 1.9 MeV .

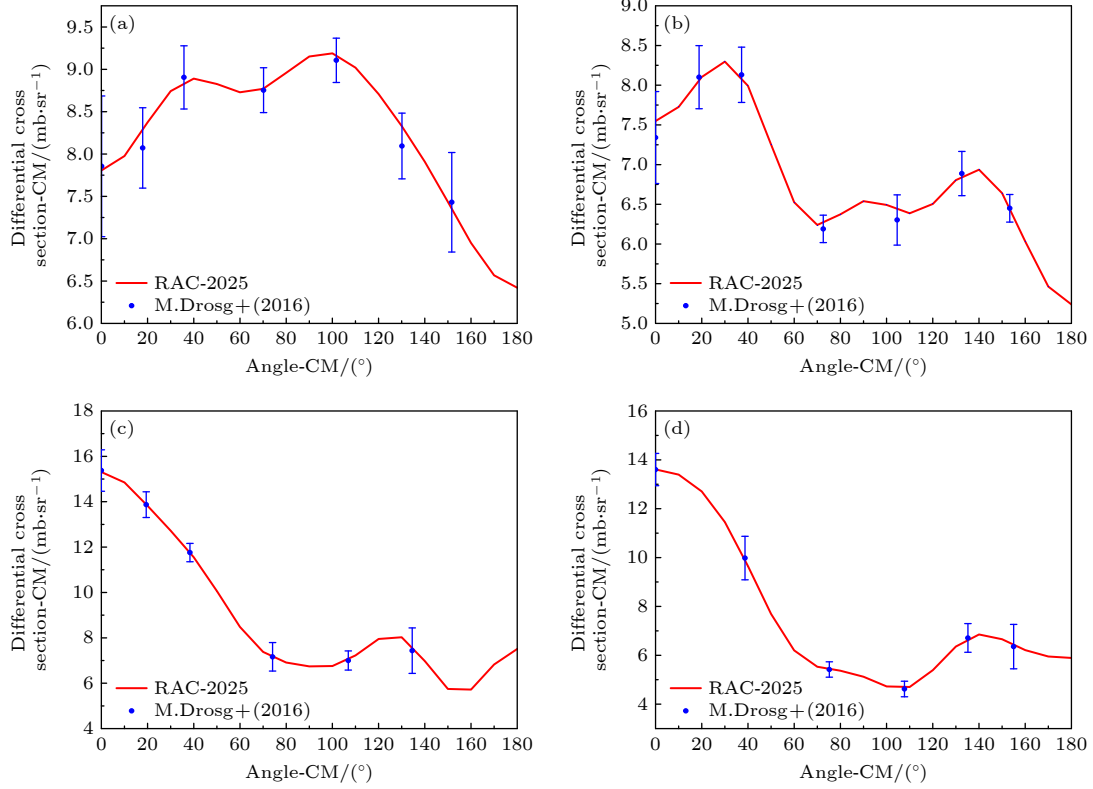


图 5 $\text{T}(t, n){}^3\text{He}$ 反应微分截面(部分), 入射能分别为 (a) 5.98 MeV ; (b) 10.45 MeV ; (c) 16.41 MeV ; (d) 19.14 MeV .

Fig. 5. Differential cross section of $\text{T}(t, n){}^3\text{He}$ (partial) at incident energies: (a) 5.98 MeV ; (b) 10.45 MeV ; (c) 16.41 MeV ; (d) 19.14 MeV .

4.2 微分截面的评价结果

对于微分截面, 相较于积分截面, 其计算结果对特定的能级结构更加敏感. 图 4、图 5 和图 6 分别展示了 $T(t, 2n)^4\text{He}$, $T(t, n)^5\text{He}$ 和 $T(t, d)^4\text{H}$ 反应部分微分截面的评价结果.

需要指出的是, R 矩阵方法主要适用于复合核体系中的两体反应, 对于 $T(t, 2n)^4\text{He}$ 这类末态为多体的核反应, 在评价过程中通常将多体末态近似为两体考虑. 针对 $T(t, 2n)^4\text{He}$ 反应, 本工作将末态的两个中子视为一个整体. 由于本工作将两个中子视为一个整体并且两个中子无法区分, 所以该反应微分截面的评价结果以 ^4He 出射的结果为参照.

图 4(a)—(c) 分别给出了实验室系下 ^4He 出射 0° , 30° 和 90° 的能量分布, 图 4(d) 给出了氚核入射 1.9 MeV 处角分布的评价结果, 整体来看, RAC-2025 的评价结果与实验数据符合良好. 以 1.9 MeV 处截面的评价为例, RAC-2025 的评价结果与 N. Jarmie 的实验数据 [32] 在积分截面 (图 2) 和微分截

面 (图 4(d)) 上均表现出良好的一致性, 积分截面与微分截面的相互约束提高了整体评价结果的可靠性.

对于 $T(t, n)^5\text{He}$ 和 $T(t, d)^4\text{H}$ 反应, 在本工作考虑的能区内只有 M. Drogg 一家的实验数据 [30], 其结果如图 5 和图 6 所示, RAC-2025 的结果与该实验值符合良好.

弹性散射微分截面在确定 (t, t) 反应道的宽度方面具有重要作用, 其拟合精度直接影响 R 矩阵拟合过程中能级的分布, 从而共同决定 $T(t, 2n)^4\text{He}$, $T(t, n)^5\text{He}$ 和 $T(t, d)^4\text{H}$ 反应截面的计算结果. 图 7 展示了 $T(t, t)T$ 弹性散射在不同入射能量下部分微分截面的评价结果. ENDF/B-VIII.1 给出的是固定能点的角分布数据. 在实验数据覆盖的能量范围内, 选取 1.6 MeV 处的 ENDF/B-VIII.1 结果, 与 RAC 的结果和实验数据进行比较, 如图 7(a) 所示. RAC 结果在小角和大角区域 (由库仑散射主导) 与 ENDF/B-VIII.1 基本一致, 在约 90° 附近, ENDF/B-VIII.1 的截面明显低于 RAC-2025 和实验数据.

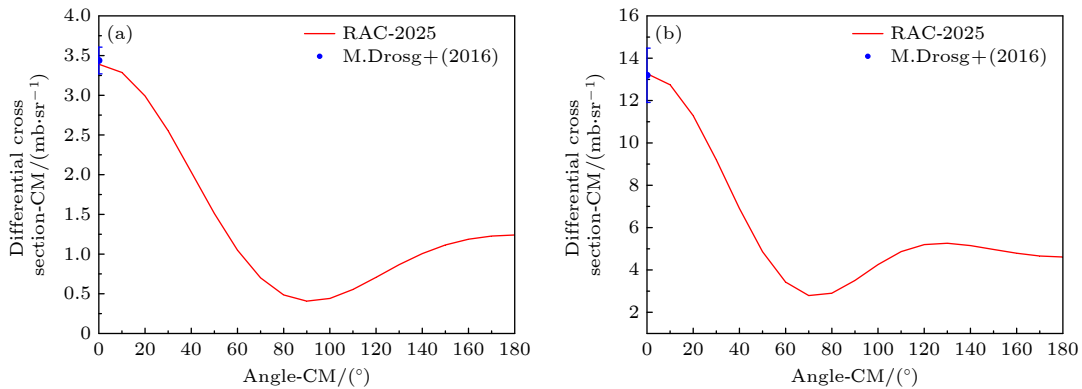


图 6 $T(t, d)^4\text{H}$ 反应微分截面 (部分), 入射能分别为 (a) 16.41 MeV; (b) 19.14 MeV

Fig. 6. Differential cross section of $T(t, d)^4\text{H}$ (partial) at incident energies: (a) 16.41 MeV; (b) 19.14 MeV.

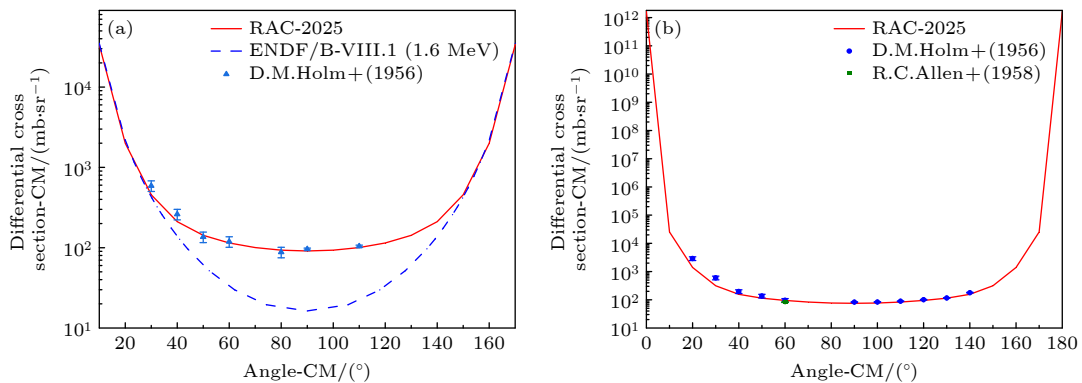


图 7 $T(t, t)T$ 反应微分截面 (部分), 入射能分别为 (a) 1.582 MeV; (b) 1.8 MeV

Fig. 7. Differential cross section of $T(t, t)T$ (partial) at incident energies: (a) 1.582 MeV; (b) 1.8 MeV.

5 结 论

本工作基于广义约化 R 矩阵理论, 利用 RAC 程序, 使用一套独立的 R 矩阵参数对 ${}^6\text{He}$ 系统进行了综合评价, 同时分析了 ${}^6\text{He}$ 系统所有可以利用的实验数据. 通过积分微分截面实验数据的相互约束, 提高了整体实验数据集的完备性, 进一步提高了评价的可信度. 通过设置合适的反应道, 在迭代过程中不断调整 R 矩阵能级, 并通过实验数据拟合修改相应的 R 矩阵参数, 最终得到了 ${}^6\text{He}$ 系统主要反应道的反应截面评价结果.

RAC-2025 的评价结果与实验数据及 ENDF/B-VIII.1 的评价结果总体符合良好. 对于 ${}^6\text{He}$ 系统中最关注的 $T(t, 2n){}^4\text{He}$ 反应, RAC-2025 的结果在低能部分与现有实验值及评价数据基本符合, 在 2.9 MeV 的峰值附近, RAC-2025 的评价结果与 ENDF/B-VIII.1 基本符合, 相较于 TENDL-2023 更符合实验数据.

完成对 ${}^6\text{He}$ 系统的评价, 结合此前对 ${}^4\text{He}$, ${}^5\text{He}$ 和 ${}^5\text{Li}$ 系统的研究, 进一步完善了对整个聚变反应系统的评价, 从而有助于我们提高对整体聚变反应数据的认识. 针对 TT 反应的进一步评价, 还需要从整个 $A=6$ 的复合核系统出发, 对其镜像反应 ${}^3\text{He}$ (${}^3\text{He}, *$) 形成的 ${}^6\text{Be}$ 系统展开研究. 镜像反应在修正库仑势和同位旋差异后通常表现出相似的核行为, ${}^6\text{He}$ 系统和 ${}^6\text{Be}$ 系统的能级结构可以相互补充和验证, 从而在一定程度上弥补单个核素评价过程中因数据缺失带来的不足.

数据可用性声明

支撑本研究数据的数据集可在科学数据银行 <https://www.doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00202> 访问获取.

参考文献

- [1] Umar A S, Simenel C, Oberacker V E 2014 *Phys. Rev. C* **89** 034611
- [2] Sun Y W, Qiu Z Y, Wan B N 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 175202 (in Chinese) [孙有文, 仇志勇, 万宝年 2024 *物理学报* **73** 175202]
- [3] Gu J F, Ge F J, Dai Z S, Zou S Y 2020 *Chin. J. Comput. Phys.* **37** 631 (in Chinese) [谷建法, 葛峰峻, 戴振生, 邹士阳 2020 *计算物理* **37** 631]
- [4] Chadwick M B, Paris M W, Hale G M, Lestone J P,

- Alhumaidi S, Wilhelmy J B, Gibson N A 2024 *Fusion Sci. Technol.* **80** 971
- [5] Magee R M, Ogawa K, Tajima T, Allfrey I, Goat H, Mccarroll P, Ohdachi S, Isobe M, Kamio S, Klumper V, Nuga H, Shoji M, Ziaei S, Binderbauer M W, Osakabe M 2023 *Nat. Commun.* **14** 955
- [6] Breunlich W, Kammel P, Cohen J S, Leon M 1989 *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **39** 311356
- [7] Chadwick M B, Obložinský P, Herman M, Greene N M, McKnight R D, Smith D L, Young P G, MacFarlane R E, Hale G M, Frankle S C, Kahler A C, Kawano T, Little R C, Madland D G, Moller P, Mosteller R D, Page P R, Talou P, Trellue H, White M C, Wilson W B, Arcilla R, Dunford C L, Mughabghab S F, Pritychenko B, Rochman D, Sonzogni A A, Lubitz C R, Trumbull T H, Weinman J P, Brown D A, Cullen D E, Heinrichs D P, McNabb D P, Derrien H, Dunn M E, Larson N M, Leal L C, Carlson A D, Block R C, Briggs J B, Cheng E T, Huria H C, Zerkle M L, Kozier K S, Courcelle A, Pronyaev V, van der Marck S C 2006 *Nucl. Data Sheets* **107** 29313060
- [8] Casey D T, Frenje J A, Gatu J M, Li C, Manuel M J-E, Petrasso R D, Seguin F H, Sinenian N, Zylstra A B, Glebov V Y, Radha P B, Meyerhofer D D, Sangster T C, McNabb D P, Amendt P A, Boyd R N, Hatchett S P, Quagliioni S, Rygg J R, Thompson I J, Bacher A D, Herrmann H W, Kim Y H 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 025003
- [9] Robert A M, William A F 1989 *Ann. Phys.* **192** 4558
- [10] Typel S, Blüge G, Langanke K, Fowler W A 1991 *Z. Physik A* **339** 249253
- [11] White R M, Resler D A, Warshaw S I 1992 *Nuclear Data for Science and Technology. Research Reports in Physics* Springer, Berlin, Heidelberg, May 13–17, 1992 p834839
- [12] Bosch H S, Hale G M 1992 *Nucl. Fusion* **32** 611
- [13] Tilley D R, Weller H R, Hale G M 1992 *Nucl. Phys. A* **541** 1104
- [14] Tilley D R, Cheves C M, Godwin J L, Hale G M, Hofmann H M, Kelley J H, Sheu C G, Weller H R 2002 *Nucl. Phys. A* **708** 3163
- [15] Hupin G, Quagliioni S, Navrátil P 2019 *Nat. Commun.* **10** 351
- [16] Wigner E P, Eisenbud L 1947 *Phys. Rev.* **72** 2941
- [17] Hale G M, Paris M W 2015 *Nucl. Data Sheets* **123** 165170
- [18] Carlson A D, Pronyaev V G, Smith D L, Larson N M, Chen Z P, Hale G M, Hamsch F J, Gai E V, Oh S, Badikov S A, Kawano T, Hofmann H M, Vonach H, Tagesen S 2009 *Nucl. Data Sheets* **110** 32153324
- [19] Odell D, Brune C R, Phillips D R, deBoer R J, Paneru S N 2022 *Front. Phys.* **10** 476
- [20] Chen Z P, Sun Y Y 2019 *INDC Reports* INDC(NDS)-0791
- [21] Leeb H, Dimitriou P, Thompson I 2019 *INDC Reports* INDC(NDS)-0787
- [22] Carlson A D, Pronyaev V G, Smith D L, Capote R, Schnabel G 2020 *INDC Reports* INDC(NDS)-0820
- [23] Liu J, Cui Z Q, Hu Y W, Bai H F, Chen Z P, Xia C, Fan T S, Chen J X, Zhang G H, Ruan X C, Huang H X, Ren J, Chen H T 2023 *Phys. Lett. B* **842** 137985
- [24] Zhou L B, Ye T, Wang J, Sun W L 2022 *Chin. J. Comput. Phys.* **39** 631 (in Chinese) [周历波, 叶涛, 王佳, 孙伟力 2022 *计算物理* **39** 631]
- [25] Han X 2025 *M. S. Thesis* (Beijing: Graduate School, China Academy of Engineering Physics) (in Chinese) [韩旭 2025 硕士学位论文 (北京: 中国工程物理研究院研究生院)]
- [26] Hauser W, Feshbach H 1952 *Phys. Rev.* **87** 366373
- [27] Lane A M, Thomas R G 1958 *Rev. Mod. Phys.* **30** 257353

- [28] Otuka N, Dupont E, Semkova V, Pritychenko B, Blokhin A I, Aikawa M, Babykina S, Bossant M, Chen G, Dunaeva S, Forrest R A, Fukahori T, Furutachi N, Ganesan S, Ge Z, Gritzay O O, Herman M, Hlavač S, Katō K, Lalremruata B, Lee T O, Makinaga A, Mastumoto K, Mikhaylyukova M, Pikulina G, Pronyaev V G, Saxena A, Schwerer O, Simakov S P, Soppera N, Suzuki R, Takács S, Tao X, Taova, Tárkányi F, Varlamov V V, Wang J, Yang S C, Zerkin V, Zhuang Y. 2014 *Nucl. Data Sheets* **120** 272276
- [29] Zerkin V V, Pritychenko B 2018 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect A* **888** 31
- [30] Drogg M, Steurer M M, Jericha E, Drake D M 2016 *Nucl. Sci. Eng.* **184** 114124
- [31] Xu Y, Takahashi K, Goriely S, Arnould M, Ohta M, Utsunomiya H 2013 *Nucl. Phys. A* **918** 61169
- [32] Jarmie N, Allen R C 1958 *Phys. Rev.* **111** 11211128

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

Evaluation of T+T reaction cross sections based on *R*-matrix theory*

HAN Xu¹⁾ YE Tao^{2)†} CHEN Zhenpeng³⁾ YING Yangjun²⁾
GUO Hairui²⁾ ZU Tiejun¹⁾

1) (School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

2) (Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

3) (Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 18 September 2025; revised manuscript received 11 October 2025)

Abstract

Based on the generalized reduced *R*-matrix theory, this work performs a comprehensive analysis of all available experimental data for the ⁶He system by using the *R*-matrix analysis code (RAC). A complete set of evaluated nuclear data is obtained for major reaction channels induced by triton beams in an energy range of 10⁻²—20 MeV. The evaluated integral cross sections include T(t, 2n)⁴He, T(t, n)⁵He, and T(t, d)⁴H reactions, and the differential cross sections include T(t, 2n)⁴He, T(t, n)⁵He, T(t, d)⁴H, and T(t, t)T. The evaluation results show that they are in good agreement with experimental data and the evaluated data of ENDF/B-VIII.1. In particular, for the T(t, 2n)⁴He reaction, the evaluated cross sections are consistent with the existing experimental results over the full energy range, and a resonance dominated by the 2⁺ level is observed near 2.9 MeV. At 1.9 MeV, where experimental measurements of both integral cross sections and angular distributions are available, the evaluation accurately reproduces both observables. The combined constraint of integral and differential data significantly improves the stability of *R*-matrix parameters and the reliability of the evaluation. Based on the global analysis of the ⁶He system, this work also provides supplementary cross section data for the T(t, n)⁵He and T(t, d)⁴H reactions. The results contribute to the nuclear data foundation for fusion-related reactions and lay the groundwork for future joint evaluation with the mirror ⁶Be system. The datasets presented in this paper are openly available at <https://www.doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00202>.

Keywords: *R*-matrix theory, fusion reaction cross sections, ⁶He system, T(t, 2n)⁴He reaction

DOI: 10.7498/aps.75.20251280

CSTR: 32037.14.aps.75.20251280

* Project supported by the Presidential Foundation of the China Academy of Engineering Physics (Grant No. YZJJZQ2023022) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11705009).

† Corresponding author. E-mail: ye_tao@iapcm.ac.cn