

低能氘氚聚变反应截面实验测量及数据评价综述*

孙君杰, 邓春风, 韩子杰, 鹿心鑫†

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 中子科学与技术全国重点实验室, 绵阳 621900)

摘要: 本文对 $E_d < 300$ keV 能区内开展过的氘氚聚变反应截面测量实验及相关的¹数据评价工作进行了综述。按照厚固体靶、薄固体靶和气体靶三条技术路线, 分类剖析了历史实验及获得的实验数据。分析发现, 厚固体靶实验的技术缺陷明显, 数据质量较差。薄固体靶和有窗气体靶难以用于 20~30 keV 以下能区的实验。有窗气体靶实验的数据需要进行修正以改善数据质量。1960 年以前, 由于量热器技术尚不成熟, 无窗气体靶实验的数据质量大多不佳。到目前为止, 20 keV 以下能区仅有五组实验数据, 一组数据来自重水厚冰靶实验, 两组数据来自超薄固体靶实验, 两组数据来自无窗气体靶实验。这五组数据中, 无窗气体靶实验数据质量最高, 重水厚冰靶和超薄固体靶数据存在系统性偏差。本文也汇总了关于氘氚聚变反应截面的数据评价类工作。1990 年以后, 欧美的聚变反应数据评价成果先后被收录至 ENDF (Evaluated Nuclear Data File)、JEFF (Joint Evaluated Fission and Fusion File) 等大型评价核数据库中, 实现了数据的系统化管理与共享。文中还分析和比较了多种氘氚聚变反应截面参数化公式。在 6~350 keV 能区内, Gaganov 公式精度最高, 但在 1~1000 keV 能区内, 基于 R 矩阵方法的 Bosch-Hale 公式最大偏离 3.7%, 总体表现最优。本文数据集可在科学数据银行 <https://www.doi.org/10.57760/sciencedb.41598> 中访问获取 (审稿阶段请通过私有访问链接查看 <https://www.scidb.cn/s/rUveEn>)。

关键词: 氘氚聚变; 反应截面; 核数据评价; 参数化公式

1、引言

可控核聚变被视为人类能源的终极解决方案^[1], 它将从根本上改变全球的能源结构, 从而带来巨大的科技、经济和地缘政治影响^[2]。可控核聚变可选择的轻核聚变反应过程主要包括 D+D、D+T 和 D+³He 等^[1], 此外 p+¹¹B 反应也受到众多关注^[3]。虽然 D+³He 和 p+¹¹B 聚变反应因属于无中子聚变而受到青睐。但目前可控核聚变研究的主流方向则是反应截面大、点火温度低和释放能量大的 D-T 聚变反应^[4]。

热核反应堆的合理运行能量区间预计在 $kT=1\sim30$ keV 之间^[5]。D-T 聚变反应截面是计算 D-T 可控核聚变反应速率的基础性数据^[6], 故低能 D-T 聚变反应截面实验数据, 对于可控核聚变研究具有极为重要的价值。自 1938 年 A. J. Ruhlig 发

*中子科学与技术全国重点实验室资助的课题(批准号: NST202401016)。

† 通讯作者邮箱: lx5187@qq.com

第一作者邮箱: sunjunjiegeomdyn@163.com

现 D-T 聚变反应^[7-8]及 E. Bretscher 发现 D-T 聚变反应复合核 ${}^5\text{He}$ 中的 $3/2^+$ 共振态^[9-10]以来, 美国、前苏联、英国、中国等国的研究者先后使用厚冰靶、厚铝/钛靶、薄铝/钛靶、有窗气体靶和无窗气体靶等技术路线开展过 D-T 聚变反应截面测量实验, 获得了近二十组实验数据。这些实验数据有一部分至今仍未被核反应实验数据库 (Experimental Nuclear Reaction Data Library, EXFOR) 收录。受限于语言障碍和文献获取的难度, 国内研究者对于前苏联的相关研究工作较为生疏。在中国工程物理研究院相关项目的支持下, 本工作历时两年, 先后开展了低能 D-T 聚变反应截面实验类历史文献的搜集、整理及分析工作。通过对该领域发展脉络的梳理, 对实验技术的剖析, 以及对历史实验数据的汇编和评议, 形成了综述性的文章。该文章对于国内研究者了解该领域的发展历程及研究成果, 尤其是前苏联开展的相关工作, 具有较高的学术价值。

从美国洛斯阿拉莫斯国家实验室 (Los Alamos National Laboratory, LANL) 的报告 LA-2014^[11]开始, 欧美科研单位已经多次汇编、评价过这些历史实验数据。近些年, 国内开始对轻核聚变核反应开展数据评价工作。周历波等^[12]就 ${}^4\text{He}$ 系统 (包括 D-D 聚变), 韩旭等对 T-T 聚变截面^[13]和 ${}^5\text{He}$ 系统 (包括 D-T 聚变)^[14]以广义约化 R 矩阵理论开展了数据评价工作。韩旭等开展 D-T 聚变反应截面数据评价时, 仅使用了约 10 组低能区历史实验数据。故 D-T 聚变反应截面实验数据的汇编与实验技术评议, 是基于理论模型开展数据评价之前必不可少的环节。

除了通过实验方法测量 D-T 聚变反应的激发曲线外, 学界也在理论上不断探索 D-T 聚变的反应机制和激发曲线的函数形式。当质心系能量 $E_{cm} \leq 30 \sim 50 \text{ keV}$ 时, 反应截面 σ 与 E_{cm} 之间的关系可使用 Gamow 公式表示^[15]:

$$\sigma(E_{cm}) = \frac{A}{E_{cm}} \exp\left(-\frac{B_G}{\sqrt{E_{cm}}}\right) \quad (1)$$

或用更精确的 Mott 公式表示^[15]:

$$\sigma(E_{cm}) = \frac{S(E_{cm})}{E_{cm}} \frac{1}{\exp(-\frac{B_G}{\sqrt{E_{cm}}}) - 1} \quad (2)$$

式中, A 为常数, B_G 为 Gamow 系数, $S(E_{cm})$ 为天体物理函数。在极低能量下, $S(E_{cm}) \approx A$ ^[15]。H. S. Bosch^[16]比较了 $E_{cm}=0\sim 500$ keV 能区内, Mott 公式和 Gamow 公式对于 D-D、D-T 和 D-³He 反应截面的计算差别。学界花费了数十年不断寻找 $S(E_{cm})$ 的最佳函数形式。需补充说明的是, 对于 D-T 聚变反应, 氘核能量 E_d 、氚核能量 E_t 和质心系总能量 E_{cm} 之间满足以下关系: $E_t=1.5E_d$, $E_{cm}=0.6E_d$ 。

2024 年, M. B. Chadwick^[10]整理介绍了美国早期(1934~1952)使用的 Bretscher 参数化公式。该公式将 Gamow 公式与 Breit-Wigner 共振理论公式相乘, 以同时考虑 D-T 聚变反应中的库仑位垒量子隧穿效应和共振效应。故, 该参数化公式将 Breit-Wigner 共振公式作为 S 函数。1957 年, 前苏联的 V. A. Davidenko^[17]也给出了相似的公式。但 V. A. Davidenko 公式中存在一个归一化系数, 即该公式仅能确定激发函数 $\sigma(E)$ 的形状, 而不能确定反应截面 σ 的绝对数值。随后, 前苏联科学家又给出了 Artsimovich 公式(1961)^[18]和 Kozlov 公式(1962)^[19]。这两个公式也采用了与 Bretscher 公式相似的函数形式。1975 年, L. Stewart 等^[20]分析后指出, Artsimovich 公式对反应截面峰值 σ_{max} 的计算偏差严重, 且能量高于截面峰值 σ_{max} 处的能量时, 该公式计算出的截面数值偏大。2019 年, A. A. Belov^[15]也指出, $E_{cm} \geq 200$ keV 时, Kozlov 公式造成的偏离极大。

1972 年, B. H. Duane^[21]在 Breit-Wigner 共振公式中增加了一个参数, 提出了著名的五参数公式。1979 年, A. Peres^[22]提出了一种基于 Henri Padé 展开式的 $S(E_{cm})$ 函数。1992 年, H. S. Bosch 和 G. M. Hale^[23]将多反应道 R 矩阵方法计算出的截面数值参数化为 Bosch-Hale 九参数公式, 其 $S(E_{cm})$ 函数与 A. Peres 的一致。

但他们使用的是 Gamow 公式，而不是 Mott 公式。2000 年以后，清华大学的李兴中等^[24-26]基于选择性共振隧穿模型提出了三参数公式。2016 年，T. Koohrokhi 等^[27]提出了一种四参数公式。2025 年，V. V. Gaganov^[28]针对 6~350 keV 范围内的 D-T 和 D-³He 聚变截面评价数据，在 B. H. Duane 公式^[21]中添加了一个参数，提出了一种六参数公式。2012 年，Petr Navrátil 等^[29]首次使用第一性原理多体理论对 D-T 和 D-³He 聚变的 $S(E_{cm})$ 函数进行了计算。

本文通过对低能区 D-T 聚变反应截面实验类和数据评价类历史文献的搜集与分析，理清了该领域的发展脉络，剖析了实验技术，汇编和评价了历史实验数据。该工作可为 D-T 聚变反应截面数据评价奠定基础，也为后续实验技术路线的选择提供参考。

2、低能区氘氚聚变反应截面实验和数据汇编评价工作

从 1948 年开始，美国、前苏联、英国、中国等国先后开展了众多 D-T 聚变反应截面测量实验。为方便后续论述，现将低能区实验的主要信息汇总在表 1 中。

表 1 低能区 D-T 聚变反应截面测量实验

Table 1. Experiments of D-T fusion reaction cross section in low energy region					
作者	实验年份	国别	束流种类	束流能区/keV	靶的信息
E. Bretscher ^[30]	1949	美国	T	15~125	D ₂ O 厚冰靶
T. W. Bonner ^[31]	1950	美国	D	10~132	ZrT 靶, 12μg/cm ²
V. A. Davidenko ^[32]	1951	前苏联	D	40~225	⁹⁵ ZrT 靶, 0.02~0.05mm 厚靶, 10nm 和 12nm 薄靶
D. L. Allan ^[33-34]	1951	英国	H/D/T	100~200	D ₂ O 厚冰靶、水蒸气靶
J. P. Conner ^[35]	1952	美国	D	10~1732	ZrT 靶, 10, 40 和 200μg/cm ²
H. V. Argo ^[36]	1952	美国	T	80~1200	D ₂ 有窗气体靶
W. R. Arnold ^[37-38]	1952	美国	D	22~120	T ₂ 有窗气体靶

R. G. Jarvis ^[39]	1953	英国	D	20~45	T ₂ 无窗气体靶
E. M. Balabanov ^[40-41]	1951~1955	前苏联	T/D	E _d =40~730	D ₂ 无窗气体靶、TiT 靶
E. M. Balabanov ^[42]	1951~?	前苏联	T	50~200	D ₂ O 厚冰靶
S. J. Bame ^[43]	1957	美国	D	250~7000	T ₂ 有窗气体靶
中国科学院近代物理研究所一室一大组 ^[44]	1965~1970	中国	T	13.8~114.3	D ₂ 无窗气体靶
A. P. Kobzev ^[45]	1966	前苏联	T	115~1650	D ₂ 有窗气体靶
N. Jarmie ^[46-47]	1979~1984	美国	T	12.5~117	D ₂ 无窗气体靶
R. E. Brown ^[48]	1987	美国	D	80~116	T ₂ 无窗气体靶
本课题组	2024	中国	D	72~241	TiT 靶, 50.2nm

需特别说明的是，W. R. Arnold^[38]数据中 E_d<22 keV 能区的截面数据是根据 Gamow 公式外推出来的，并非真实的实验数据。前苏联开展过的实验，除表 1 列出的以外，L. N. Katsaurov 在文献[41]中提到，哈尔科夫物理技术学院采用有窗气体靶（窗为 5.1μm 厚的铝箔）测得 D-T 聚变反应截面峰值为 4.91±0.31 b；E. M. Balabanov 在文献[42]中提及，1951 年苏联科学院列别捷夫物理研究所开展过重水冰靶实验。本课题组使用文献[49]中的实验装置和数据处理方法开展了 E_d=72~241 keV（靶中心处能量）能区内的 D-T 聚变反应实验，获得了八个角度上的微分截面数据和积分截面实验数据。

1956 年，LA-2014 报告^[11]首次对 D-T 聚变反应截面数据进行编评。此后，丹麦里瑟国家实验室（Research Establishment Risø, RES）、LANL、太平洋西北国家实验室（Pacific Northwest National Laboratory, PNNL）、劳伦斯辐射实验室（Lawrence Radiation Laboratory, LRL）、劳伦斯利弗莫尔国家实验室（Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL）、德国马克斯·普朗克等离子体物理研究所（Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, MPIP）、欧洲中央核测量

局（Central Bureau for Nuclear Measurements, CBNM）等科研单位都先后汇编和评价过 D-T 聚变反应截面实验数据。1990 年前后，由于聚变反应堆应用需求的推动，聚变核参数评价研究进入到了数据库时代。现将历史上开展过的数据编评工作汇总在表 2 中。

表 2 关于 D-T 聚变反应截面的主要评价类工作

Table 2. Primary evaluation works on D-T fusion reaction cross section

作者	年份	国别	科研单位	报告编号、出版信息
N. Jarmie ^[11]	1956	美国	LANL	报告编号：LA-2014
C. F. Wandel ^[50]	1959	丹麦	RES	<u>Nucl. Instr. and Meth., 4 (1959): 249-260</u>
S. L. Greene ^[51]	1967	美国	LRL	报告编号：UCRL-70522
W.C. Wolkenhauer ^[21,52]	1971~1972	美国	PNNL	报告编号：BNWL-1604,1685
H. Liskien ^[53]	1973	欧洲	CBNM	Nucl. Data Tables, 11 (1973): 569-619
L. Stewart ^[20]	1974	美国	LANL	报告编号：LA-5828-MS
G. H. Miley ^[54]	1974	美国	伊利诺斯大学	报告编号：COO-2218-17
R. J. Howerton ^[55]	1979	美国	LLNL	报告编号：UCRL-50400, Vol. 21
G. H. Miley ^[56]	1980	美国	伊利诺斯大学	报告编号：COO-2218-195
N. Jarmie ^[57]	1981	美国	LANL	Nucl. Sci. and Eng., 78 (1981): 404-412
H. S. Bosch ^[16]	1990	德国	MPIP	报告编号：IPP I/252
韩旭 ^[14]	2026	中国	北京应用物理与计算数学研究所	<u>Nucl. Sci. and Tech., 37 (2026): 59</u>

美国 ENDF（Evaluated Nuclear Data File）数据库自 ENDF/B-VI（1989）开始系统性的纳入聚变核参数^[58]。1991 年，国际原子能机构（International Atomic Energy Agency, IAEA）为了聚变应用，从 ENDF/B-VI 评价数据库中抽取了聚变相关的数据而创建了 FENDL/C 数据库^[59]。2009 年，又从 ENDF/B-VI.8 中抽取

相关数据创建了 FENDL-2.1 数据库^[60]。1980s 年，欧洲开始发布 EFF (European Fusion File) 数据库^[61]。此后聚变数据库 EFF 与裂变数据库 JEF (Joint Evaluated File) 合并为 JEFF (Joint Evaluated Fission and Fusion File)^[62]。

除了以上数据汇编与评价工作，在核天体领域，1967 年 W. A. Fowler 等人^[63]开始开展带电粒子热核反应率的数据评价工作。NACRE (Nuclear Astrophysics Compilation of REactions) 数据库的建立是核天体物理学反应数据评价工作进入新阶段的标志^[64]。目前，NACRE 数据库的版本已更新至 NACRE II。

3、D-T 聚变反应各向异性研究

部分历史实验仅给出了某角度上的微分截面数据，有些实验给出的积分截面数据是根据特定角度微分截面数据直接推算出来的。故，讨论 D-T 聚变反应在质心系中的各向异性问题，具有非常重要的作用。

1951 年，D. L. Allan 等^[34]测量了 $E_t=125$ 、175 和 200 keV 三个能点下 D-T 聚变反应各角度反应产物产额相对于 90° 产额的比值，发现在这三个能量下 D-T 聚变反应是各向同性的。即当 $E_d \leq 133$ keV 时，D-T 聚变反应在质心系中是各向同性的。1965~1970 年，中国科学院近代物理研究所^[65]得到了 $E_t=45$ 、67.5、105 和 150 keV 四个能点下聚变产物的角分布系数为 0.997 ± 0.006 。1995 年，J. Jordanova^[66]使用最新的聚变反应截面数据计算各向异性修正系数时指出，D-T 聚变在 $E_d \leq 200$ keV 时仍满足各向同性。H. Liskien 和 A. Paulsen^[53]认为， $E_d < 300$ keV 时，D-T 聚变反应满足各向同性。1952 年，H. V. Argo 等^[36]的实验指出， $E_t=380$ 和 570 keV (对应 $E_d \leq 380$ keV) 能点上，D-T 聚变在质心系中是各向同性的。S. L. Greene^[51]认为， $E_d < 400$ keV 时，质心系中 D-T 聚变反应满足各向同性。J. P. Conner^[35]认为， $E_d < 500$ keV 时 D-T 反应满足各向同性。S. J. Bame 等^[43]开展了

$E_d=0.25\sim 7.0$ MeV 能区内的 D-T 聚变反应实验，以公式 $d\sigma(\varphi)/d\Omega = \sum_{n=0} \alpha_n P_n$ 拟合微分截面与角度的依赖关系。其中， $d\sigma/d\Omega$ 为微分截面， φ 为质心系角度， P_n 为勒让德多项式， α_n 为拟合系数。当 $E_d < 2$ MeV 时， $d\sigma(\varphi)/d\Omega$ 基本为单调下降的。可以用函数 $R(\varphi)=[d\sigma(\varphi)/d\Omega - d\sigma(90^\circ)/d\Omega]/d\sigma(90^\circ)/d\Omega$ 表征反应的各向异性。当 $E_d=500$ keV 时， $|R(\varphi)| \leq 6\%$ ； $E_d=750$ keV 时， $|R(\varphi)| \leq 11.8\%$ 。故在 500~750keV 能区内，D-T 聚变反应各向异性明显增强。本课题组的实验结果表明， $E_d=241$ keV 时， $|R(\varphi)| \leq 3.33\% \pm 3.34\%$ 。即在本实验的误差范围之内， $E_d < 241$ keV 时，D-T 聚变反应的反应产物在质心系中是各向同性的。

当 D-T 聚变反应在质心系中是各向同性时，总截面满足如下公式：

$$\sigma(E) = 4\pi \cdot \frac{d\sigma}{d\Omega}(E, 90^\circ_{cm}) \quad (3)$$

其中， $d\sigma/d\Omega$ 为能量 E 上的微分截面。

图 1 为本课题组测量的积分截面数值与质心系 90° 微分截面数值之比。该比值极为精确的分布在 4π 值上。

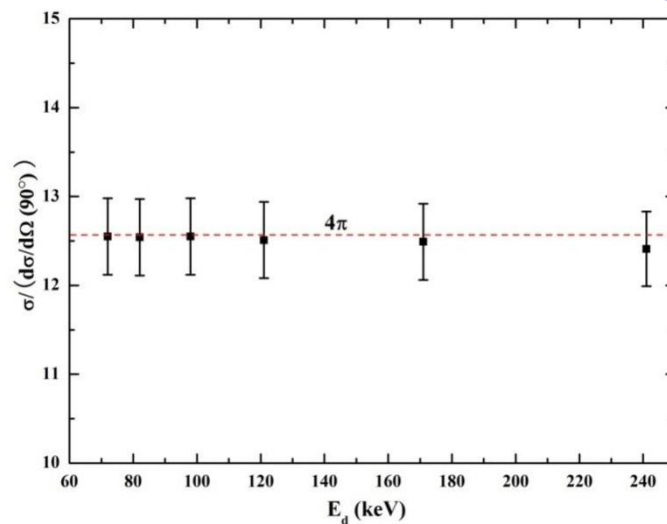


图 1 积分截面与质心系 90° 微分截面的比值

Fig. 1. The ratio of the integral cross-section to the 90° differential cross-section of the centre-of-mass frame

根据以上论述，虽然各家对于 D-T 聚变反应满足各向同性时的能量上限有不同的结论，但 $E_d=300\text{ keV}$ 时各向异性的影响不大。本文主要讨论 $E_d<300\text{ keV}$ 的低能区历史数据。后文论述历史实验数据时，还将进一步分析各向异性如何随束流能量变化的问题。部分历史实验仅提供了实验室系微分截面数据或质心系微分截面数据。本文在处理这些数据时，将实验室系微分截面转换为质心系微分截面，然后再乘以 4π 从而获得总截面数据。在实验室系微分截面转换为质心系微分截面时，已经考虑了因坐标系转换产生的截面转换系数^[67]。

4、各技术路线优缺点及实验数据比较

学界先后采用厚冰靶、厚铍/钛靶、薄铍/钛靶、有窗气体靶和无窗气体靶等技术路线开展过 D-T 聚变反应截面测量实验。本小节分别讨论这些技术路线的优缺点。

4.1 厚靶实验

1948 年，E. Bretscher 等^[30]使用氘束流轰击重水厚冰靶测量了 $E_i=15\sim125\text{ keV}$ 能区内的 D-T 聚变截面。此类实验的截面计算公式为：

$$\sigma(E) = \frac{1}{A} \cdot \frac{dN}{dE} \cdot \frac{dE}{dx} \quad (4)$$

其中， A 为束流粒子数与靶核数的乘积， $N(E)$ 为反应产额数， dE/dx 为靶的阻止本领。除此之外，前苏联的 E. M. Balabanov 等^[42]也使用重水厚冰靶开展过实验。重水冰靶实验的主要误差源包括 dN/dE 微分中的误差、靶对反应产物的自吸收效应、靶表面碳化及靶阻止本领 dE/dx 的误差^[41]。即便在当下，阻止本领 dE/dx 的精度依然不高^[10]。

厚铍/钛靶面临的问题比重水冰靶更复杂。厚铍/钛靶除了受 dE/dx 数值精度的影响，还受氘深度分布的影响。在氘化靶中，氘密度的深度分布函数是未知的。

图 2(a)为厚靶历史实验数据与 ENDF/B-VIII.0 评价数据的比较。为了进一步分析该类实验的历史数据，将其与 ENDF/B-VIII.0 评价数据之间的比值绘制在图 2(b)中。其中，V. A. Davidenko^[32]的厚靶实验使用了 0.02~0.05 mm 的铅靶。

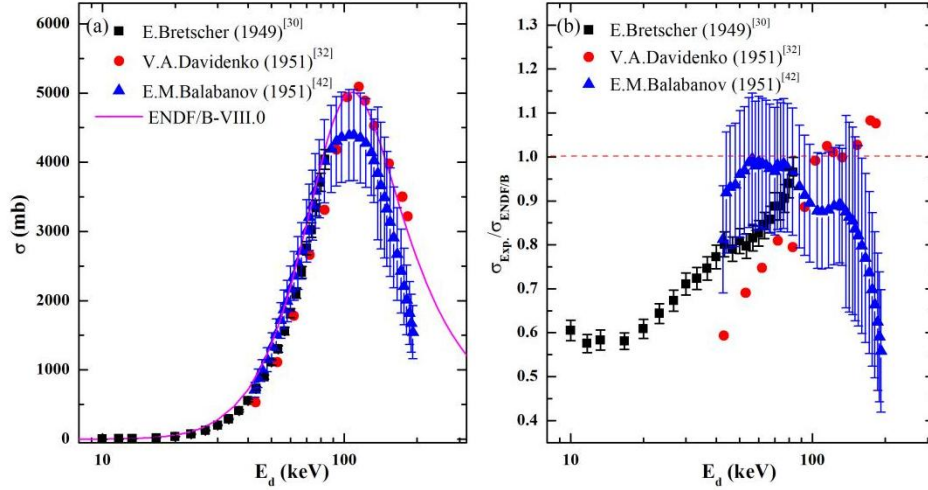


图 2 厚靶实验数据 (a) 与 ENDF/B-VIII.0 评价数据的比较；(b) 与 ENDF/B-VIII.0 评价数据的比值

Fig. 2. Thick target experiment data: (a) comparison with the ENDF/B-VIII.0 evaluation data; (b) ratio to the ENDF/B-VIII.0 evaluation data.

由于系统性误差（可能出自靶的阻止本领 dE/dx ），E. M. Balabanov 的峰值数据被低估了 10%^[41-42]，且随能量增加，修正比例随之提高， $E_d=200$ keV 处，修正量达+20%^[41]。从图 2 可知，在 $E_d < 90$ keV 能区，对于 E. Bretscher 和 V. A. Davidenko 的实验数据，束流能量越小， $\sigma_{Exp}/\sigma_{ENDF/B}$ 越小。这应当也是靶的阻止本领 dE/dx 数值不准确导致的。

4.2 薄铅/钛靶实验

薄铅/钛靶可以显著减小靶阻止本领 dE/dx 的误差对截面数据的影响，但薄靶中的氩核子数密度难以被准确测量^[41]。在 $E_d < 30$ keV 时，薄固体靶存在明显的束流背散射效应^[35]。此外，薄固体靶实验中还需关注束流的电荷中性化问题。V. A. Davidenko^[32]和 E. M. Balabanov^[40]的薄固体靶实验均只测量了激发曲线的形状，

并根据峰值进行归一化处理。V. A. Davidenko^[32]给出了两套薄靶实验数据，EXFOR 仅收录了其新薄靶的数据。H. Liskien 和 A. Paulsen^[53]汇编数据中包括 E. M. Balabanov 的质心系 $d\sigma/d\Omega(0^\circ)$ 数据。但从 E. M. Balabanov^[40]的实验装置和文章论述可知，其并未测量 0° 角附近的微分截面。此外，H. Liskien 和 A. Paulsen 对 A. P. Kobzev^[45]数据的汇编也存在类似问题。即他们以实验数据为基础进行了一定的理论推算。

T. W. Bonner^[31]使用 ZrT 靶测量了 10~132 keV 能区内的 D-T 聚变截面。J. P. Conner^[35]使用不同厚度的 ZrT 靶开展过实验，并使用有窗氙气体靶作为参考靶，测量了 ZrT 靶中的氙核子数。但相比于 V. A. Davidenko^[32]，其确定靶膜厚度的方法较为粗糙。

薄固体靶实验数据与 ENDF/B-VIII.0 评价数据的比较，及实验数据与评价数据的比值，绘制在图 3 中。需注意，与文献[32]对比可知，EXFOR 收录的 V. A. Davidenko 新薄靶数据存在明显错误。图 3 中 V. A. Davidenko 的数据是从文献[32]的图中提取获得的。J. P. Conner 的低能区截面数据是两块铍底衬靶与一块铝底衬靶实验数据的均值，三块靶的铀厚度均为 $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。中能区截面数据所用靶的铀厚度为 $40 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。

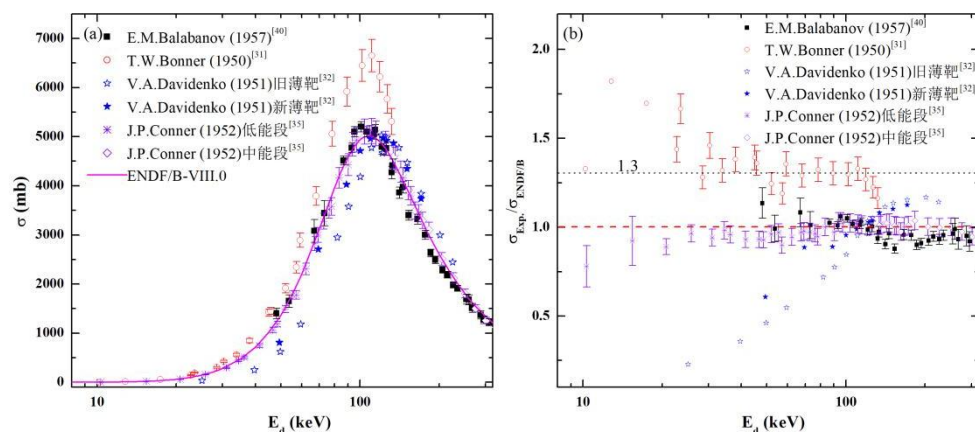


图 3 薄固体靶实验数据 (a) 与 ENDF/B-VIII.0 评价数据的比较；(b) 薄固体靶实验数据与

ENDF/B-VIII.0 评价数据的比值

Fig. 3. Thin solid target experiment data: (a) comparison with the ENDF/B-VIII.0 evaluation data; (b) ratio to the ENDF/B-VIII.0 evaluation data.

V. A. Davidenko^[32]的实验数据与评价数据严重偏离，这表明其激发曲线的形状出现了异常，无法通过调节氙靶核数的方法进行修正。T. W. Bonner^[31]的数据与评价数据的偏离也较严重，但其实验数据与评价数据之比大致在 1.3 处。由此可知，T. W. Bonner 数据的偏离主要是氙靶核数确定不准确导致的。可通过将实验数据除以 1.3 的方式进行修正。S. L. Greene^[51]指出，J. P. Conner 未提供详细的数据误差信息。本文暂时采用 S. L. Greene 对 J. P. Conner 数据误差的调整方案。

J. P. Conner 在实验中使用了三种不同底衬的靶，发现在极低能区存在明显的束流背散射效应。比如，在 $E_d=15$ keV 时，钨底衬靶测量的截面比铍底衬靶测量的截面高 40%^[35]。为了深入分析 J. P. Conner 的实验数据，从文献[35]的数据图中提取了三种底衬靶的微分截面实验数据，并据此计算出了积分截面数据。将 J. P. Conner 与 ENDF/B-VIII.0 评价数据的比较，绘制在图 4 中。此外，经调整后的 T. W. Bonner 数据也绘制在图 4 中。

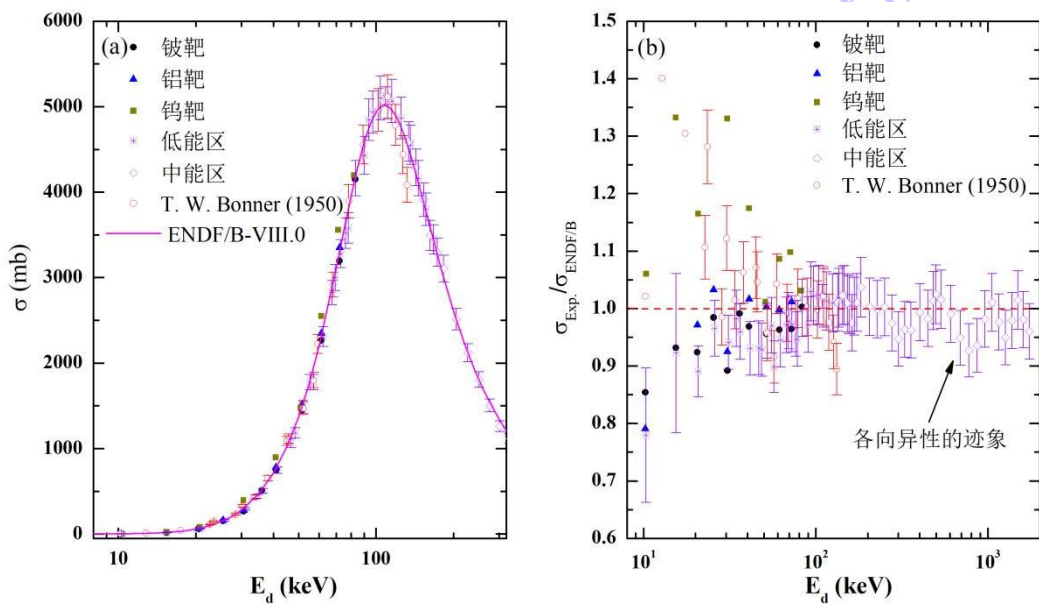


图 4 J. P. Conner 三种不同底衬靶的实验数据及修正后的 T. W. Bonner 数据 (a) 与

ENDF/B-VIII.0 评价数据的比较；（b）与 ENDF/B-VIII.0 评价数据的比值

Fig. 4. Experimental data from J. P. Conner's targets with three different backings, along with corrected T. W. Bonner's data: (a) comparison with ENDF/B-VIII.0 evaluation data; (b) ratio to the ENDF/B-VIII.0 evaluation data.

从图 4 可知，由于束流背散射的影响，铍底衬靶所测截面数据最小，钨底衬靶所测截面数据最大，即 $\sigma_{\text{Be-bk}} < \sigma_{\text{Al-bk}} < \sigma_{\text{W-bk}}$ 。 $E_d \in [20, 72]$ keV 时， $\sigma_{\text{Al-bk}}/\sigma_{\text{Be-bk}} \approx 1.045$ ； $E_d > 50$ keV 时， $\sigma_{\text{W-bk}}/\sigma_{\text{Be-bk}} < 1.2$ 。 $E_d < 80$ keV 时，J. P. Conner 的截面平均数据（铍底衬靶与铝底衬靶数据的均值）系统性低于 ENDF/B-VIII.0 评价数据。这难以使用束流背散射效应解释。造成该现象的原因可能有两个：J. P. Conner 使用的带电粒子能损计算公式低估了束流的能量损失，或者 J. P. Conner 低估了靶的厚度。从调整后的 T. W. Bonner 数据也可看出， $E_d < 28$ keV 时，其数据比 ENDF/B-VIII.0 评价数据高 30%~40%。这可能是束流背散射造成的。

此外，J. P. Conner^[35]认为，当 $E_d > 500$ keV 时，实验数据与 Breit-Wigner 公式发生偏离，表明 D-T 聚变反应出现了明显的各向异性现象。但从图 4(b)中 J. P. Conner 数据与 ENDF/B-VIII.0 评价数据的比值可知，直到 1.7 MeV，在各向同性假设下获得的积分截面数据与评价数据的偏离都不大。但 $E_d > 500$ keV 时，J. P. Conner 积分截面数值系统性的低于 ENDF/B-VIII.0 评价数据。这可能是聚变反应存在各向异性的间接证据。这表明 $\sigma_{\text{Exp}}/\sigma_{\text{ENDF/B}}$ 并非是度量各向异性的灵敏指标。从前文对 S. J. Bame 研究结果的论述可知，2.0 MeV 以下， $d\sigma/d\Omega$ 是单调下降的，故在各向同性假设下通过质心系 90° 微分截面获得的积分截面数值与积分截面真实数值偏差不大。

4.3 气体靶实验

气体靶相比于固体靶存在几个明显的优势，如气体靶接近于理想的薄靶，对束流造成的能损和散射最小，可通过改变气压调节靶的厚度，又可以通过理想气

体方程准确的测定出靶核数密度等。几乎在开展固体靶实验的同时，学界也开始了气体靶实验。气体靶分为有窗气体靶和无窗气体靶（也被分别称为静态靶和流动靶）。有窗气体靶常用于中高能散射、聚变类实验，但在低能聚变实验中也有少量应用。在低能实验中，由于束流能量较低，故将整个有窗气体靶室作为法拉第筒，以测量束流强度。窗膜造成的束流能量歧离和角度歧离，需要较为复杂的修正。无窗气体靶使用差分抽气系统维持加速器与靶室之间的气压差，由于束流与靶室内气体的电荷交换效应，导致束流出现较大比例的电荷中性化现象，传统的流强电测法随之失效，需使用量热器测量流强。

H. V. Argo^[36]、W. R. Arnold^[37-38]、S. J. Bame^[43]和前苏联 A. P. Kobzev^[45]的实验均采用有窗气体靶室。由于 H. V. Argo 和 S. J. Bame 主要关注高能区聚变反应实验，故 H. V. Argo 采用了 5.56 μm 的铝膜，S. J. Bame 采用了 5.08 μm 的铝膜或 1.27 μm 的镍膜作为靶室与加速器真空系统之间的窗膜。低能区实验需要更薄或更低密度的窗膜。A. P. Kobzev 使用了 0.57 μm 和 1.14 μm 的云母片，W. R. Arnold 使用了 30~50 nm 的 SiO 膜。

H. V. Argo 的铝窗膜造成了 11.5 keV 的能量歧离，即便是 W. R. Arnold 的超薄 SiO 膜也造成 3.36 keV 的能量损失和 0.5~0.75 keV 的能量歧离。窗膜造成的能量歧离对截面测量的影响，可以用公式表示为：

$$\sigma'(E_0) = \int_0^{\infty} f(E, E_0, S) dE = \int_0^{\infty} \sigma(E) \cdot g(E, E_0, S) dE \quad (5)$$

其中， $\sigma'(E_0)$ 为有能量歧离效应时的积分截面值， $\sigma(E)$ 为无能量歧离效应时的积分截面， $g(E, E_0, S)$ 是均值为 E_0 ，标准差为 S 时标准正态函数， f 为加权函数。以 $S=1.27 \text{ MeV}$ （对应半高宽 FWHM=3 keV，Full Width at Half Maximum）的能量歧离为例。有窗气体靶的能量歧离效应对截面测量的影响，如图 5 所示。

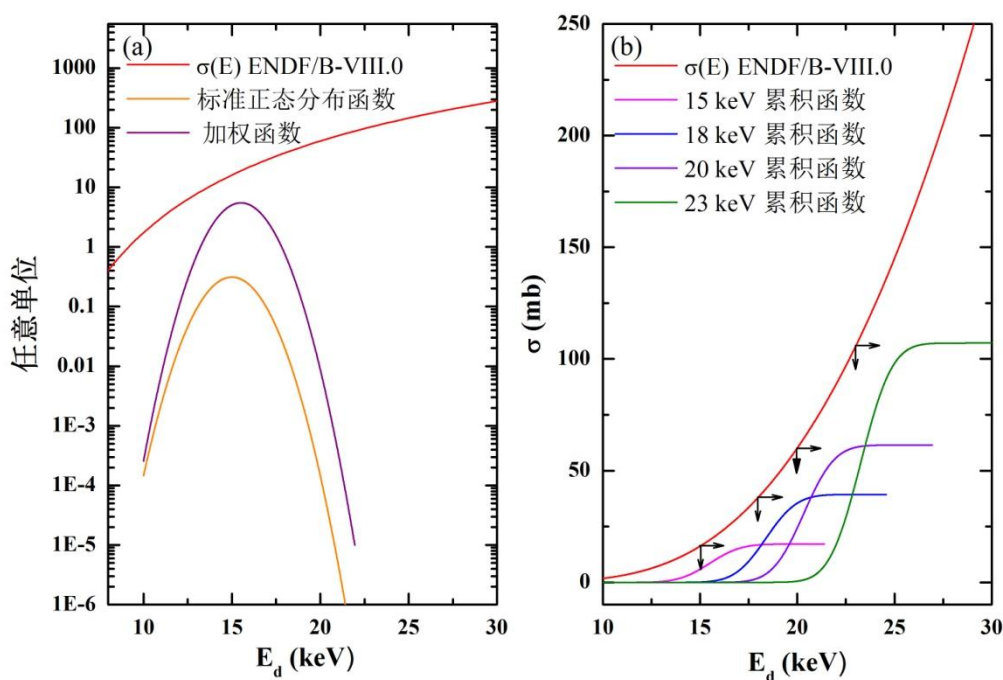


图 5 有窗气体靶的能量歧离效应对截面测量的影响 (a) $E_0=15$ keV 时的 $\sigma(E)$ 及加权函数;

(b) 四个束流能量对应的加权函数的累积函数

Fig. 5. Influence of energy straggling effect on cross-section measurement with foil-contained gas targets: (a) $\sigma(E)$ and the weighting function at $E_0=15$ keV; (b) cumulative function of the weighting function corresponding to four different beam energies.

由于能量歧离的影响, 存在能量歧离的截面数据与无能量歧离的截面数据之间满足关系式: $\sigma'(E_0)=\sigma(E_0+\Delta E)$ 。对于图 5 中的四个束流能量, ΔE 依次为 0.18、0.13、0.11 和 0.09 keV。即束流能量 E_0 越高, ΔE 越小。故可以对有窗气体靶能量歧离造成的影响进行修正。但在极低能区, 窗膜造成的束流角度歧离影响更大 [37-38]。

1953 年, 牛津大学的 R. G. Jarvis 等^[39]使用 T_2 无窗气体靶开展了 D-T 聚变反应截面测量。1951~1953 年, 前苏联的 E. M. Balabanov 等^[40]使用 D_2 无窗气体靶开展了实验。在实验中, R. G. Jarvis 使用了量热器测量束流强度, 而 E. M. Balabanov 认为量热器技术尚不成熟, 故使用重水厚冰靶作为参考进行束流强度测量。1965~1970 年, 中国近代物理研究所^[44]使用了不同量程的两款量热器, 分

别开展了 D-D (15~150 keV) 和 D-T ($E_d=13.8\sim114.3$ keV) 聚变反应截面测量工作。1979~1990 年, LLNL 的 N. Jarmie^[46-47]和 R. E. Brown^[48]使用低温无窗气体靶及 Ch. Thomann 等^[68]刚研制成功的补偿型量热器开展了 D-D、D-T 和 T-T 聚变反应截面测量实验。N. Jarmie 和 R. E. Brown 的实验中, $E_d=8.3\sim78.1$ keV 能区使用氘束流轰击 D₂ 无窗气体靶, 而 80~116 keV 能区则使用氘束流轰击 T₂ 无窗气体靶。N. Jarmie 和 R. E. Brown 的数据是 ENDF 数据库进行 D-T 聚变截面评价时采用的核心数据^[10]。此后, 补偿型量热器成为意大利格兰萨索地下实验室 LUNA (Laboratory Underground for Nuclear Astrophysics) 开展核天体物理无窗气体靶实验的标准设备。近期, 中国锦屏实验室也开始研制此类设备^[69]。

除了常规的 D₂ 和 T₂ 无窗气体靶, D. L. Allan 等^[33-34]还使用过 D₂O 水蒸气靶。鉴于当时量热器的技术尚不成熟, 实验使用了重水厚冰靶的 D(d,p)T 截面作为参考截面。其束流使用了 H₂ 气中掺入 30%D₂ 和 0.2%T₂ 的方式, 成分复杂。不考虑束流分子成分带来的测量误差, 仅参考截面引入的实验误差便高于 15%, 还有其他实验误差 8%, 故该数据的实验误差极大, 数据质量较差。

图 6 为气体靶实验数据与 ENDF/B-VIII.0 评价数据的比较结果。为了进一步分析这些气体靶实验数据与 ENDF 评价数据的偏离, 图 6(b)给出了实验数据与评价数据的比值。

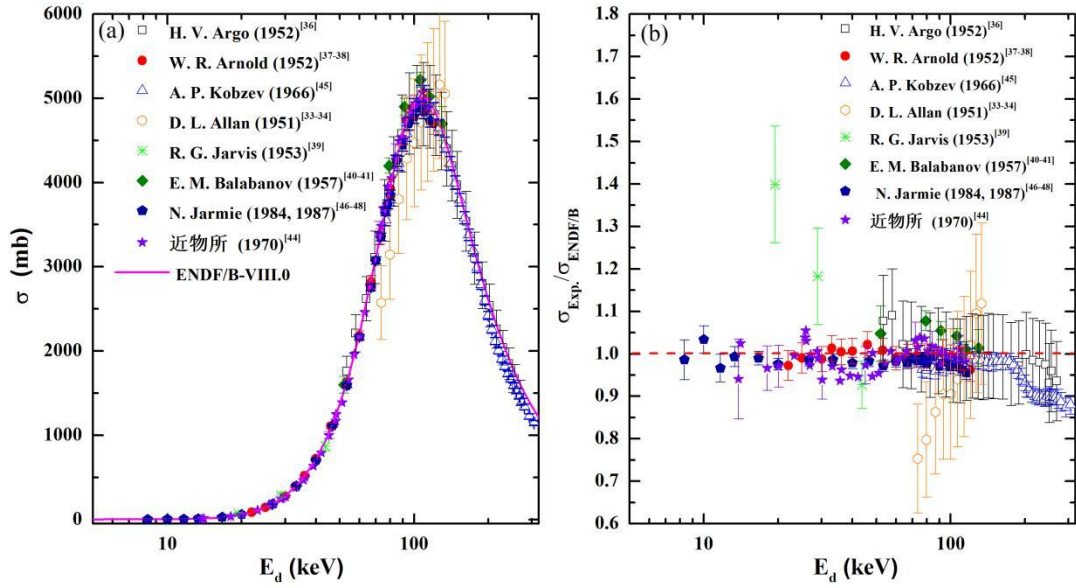


图 6 气体靶实验数据 (a) 与 ENDF/B-VIII.0 评价数据的比值; (b) 与 ENDF/B-VIII.0 评价数据的比值

Fig. 6. Gas target experiment data: (a) comparison with the ENDF/B-VIII.0 evaluation data; (b) ratio to the ENDF/B-VIII.0 evaluation data.

在图 6 中, 将 N. Jarmie^[46-47]和 R. E. Brown^[48]的数据进行了合并。中国近代物理研究所的数据使用了 EXFOR 收录的数据。R. E. Brown 的数据在峰值 ($E_d=107$ keV) 处比 ENDF/B-VIII.0 评价数据低约 5%。A. P. Kobzev^[45]指出, 在 $E_d>200$ keV 时, 其实验数据低于其他历史实验数据。从图 6(b)中也可观察到该现象。D. L. Allan 的数据, 截面峰值位置约在 127 keV, 与准确位置相差近 20 keV。

H. Liskien 等^[53]在汇编 A. P. Kobzev 的数据时, 根据实验室系 90° 微分截面实验数据推导出了质心系 0° 微分截面数据。通过比较质心系 0° 角微分截面数据与质心系其他角度微分截面数据的差异, 可度量 D-T 聚变反应的各向异性。图 7 为质心系微分截面 $d\sigma/d\Omega(0^\circ)$ 与 $d\sigma/d\Omega(\varphi)$ 的比较, 其中 φ 为实验系 90° 对应的质心系角度。质心系微分截面 $d\sigma/d\Omega(\varphi)$ 是根据 A. P. Kobzev 实验室系 90° 微分截面实验数据推算的。图 7(b)为 $d\sigma/d\Omega(0^\circ)$ 与 $d\sigma/d\Omega(\varphi)$ 的比值, 可直接度量反应的各向异性。

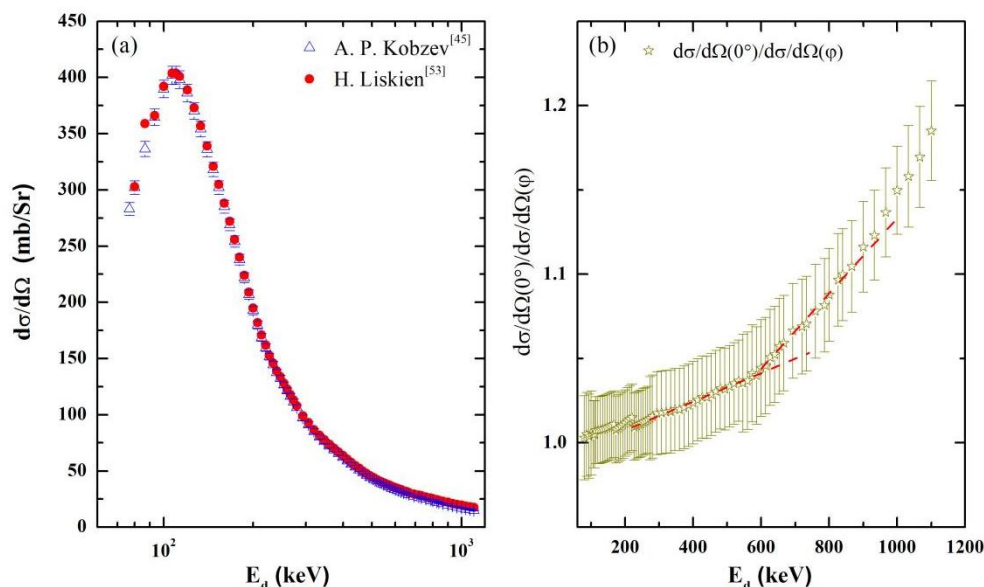


图 7 质心系微分截面 (a) 角度 φ 数据与 0° 数据的比较; (b) 0° 数据与角度 φ 数据的比值

Fig. 7. Differential cross-section of the centre-of-mass frame: (a) comparison of the angle φ data with the 0° data; (b) ratio of the 0° data to the angle φ data.

从图 7(a)可知, 质心系 $d\sigma/d\Omega(0^\circ)$ 系统性的高于 $d\sigma/d\Omega(\varphi)$ 。这正是 D-T 聚变反应各向异性的体现。从图 7(b)可知, $E_d \approx 600$ keV 时 $d\sigma/d\Omega(0^\circ)$ 与 $d\sigma/d\Omega(\varphi)$ 比值的斜率出现明显变化, 表明 $E_d > 600$ keV 以后随着束流能量增加, 聚变反应的各项异性明显增强。这与 S. J. Bame 的研究结论一致, 也印证了 J. P. Conner 数据中透露出的迹象。A. P. Kobzev 实验数据的系统性误差不影响此处所做的分析。

综上, 本节按照实验技术路线对美国、前苏联、英国和中国开展过的低能 D-T 聚变反应截面测量实验进行了汇总和分析。经过近八十年的实验研究, 总计获得 19 套实验数据 (包括本课题组测量到的 1 套实验数据)。其中, 厚固体靶实验数据 3 套, 薄固体靶实验数据 7 套, 气体靶实验数据 9 套。本文所有数据集 (暂不包括本课题组使用超薄靶测量的微分截面和积分截面实验数据) 均以 txt 格式在科学数据银行 (<https://www.doi.org/10.57760/sciencedb.41598>) 中给出。厚靶实验的数据难以修正, 建议数据评价时不采用此类数据, 后续实验也不再采用

该技术。对于薄固体靶实验，V. A. Davidenko 的两套数据整体偏离严重，难以修正。T. W. Bonner 的数据，可通过除以 1.3 的方式进行整体修正。对于气体靶实验，H. V. Argo 主要瞄准中高能区的实验，故窗膜较厚，低能区实验数据精度不高。R. G. Jarvis 的实验，仅有三个数据点，且与后续实验数据偏离较大。可能原因是当时量热器技术尚不成熟。D. L. Allan 的数据，误差过大，且截面峰值位置不准。建议数据评价时不采用 H. V. Argo、R. G. Jarvis 和 D. L. Allan 的实验数据。1960 年以前开展的四次无窗气体靶实验，仅前苏联 E. M. Balabanov 实验的数据质量较好。

总之，19 套实验数据中有 11 套数据质量较好，分别是 5 套薄固体靶数据和 6 套气体靶数据（包括 2 套有窗气体靶实验数据和 4 套无窗气体靶实验数据）。经前文分析可知，薄固体靶实验难以精确获得 $E_d < 30$ keV 能区的实验数据，有窗气体靶难以获得 $E_d < 20$ keV 能区的实验数据。目前， $E_d < 10$ keV 的截面主要靠理论外推获得。

5、各参数化公式的对比分析

对于 D-D 聚变，其复合核 ^4He 中没有共振态，故其 $S(E)$ 函数形式简单，可用多项式表示^[70]。但对于 D-T 和 D- ^3He 聚变反应，其 $S(E)$ 函数的形式更为复杂。本节使用 Bretscher 公式^[10]、Artsimovich 公式^[18]和 Kozlov 公式^[19]这三套早期的参数化公式，以及 Duane 公式^[21]、Bosch-Hale 公式^[23]、李兴中公式^[26]和 Gaganov 公式^[28]计算 D-T 聚变反应的激发曲线。Koohrokhi 公式^[27]的函数形式不明确，故本节不使用该公式。

图 8 为各参数化公式计算出的激发曲线与 ENDF/B-VIII.0 的评价数据的比较结果。为了进一步量化该结果，图 8(b)给出了各参数化公式与 ENDF/B-VIII.0 评

价数据的比值。由于 Bretscher 公式和 Artsimovich 公式与评价数据的偏离过大，故图 8(b)中不再包含这两个参数化公式。

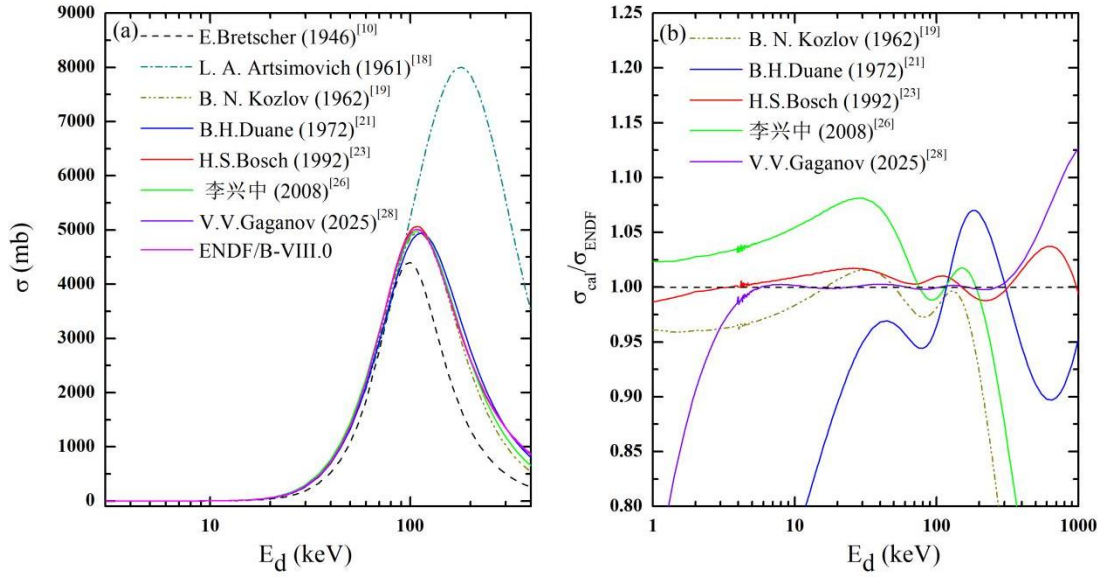


图 8 各参数化公式 (a) 与 ENDF/B-VIII.0 评价数据的比较; (b)与 ENDF/B-VIII.0 评价数据的比值

Fig. 8. Various parameterized formulas: (a)Comparison with the ENDF/B-VIII.0 evaluation data; (b)ratio to the ENDF/B-VIII.0 evaluation data.

T. Koohrokhi^[27]指出，当能量低于 Duane 公式的参数拟合能区时，该公式表现不佳。从图 8(b)中可以观察到该现象。Gaganov 的公式也存在类似现象。在 6~350 keV 能区，Gaganov 公式与 ENDF/B-VIII.0 评价数据的偏差小于 0.5%^[28]。这是所有参数化公式中表现最好的，但在更低和更高能区，Gaganov 公式的拟合偏差快速放大。在 1~1000 keV 能区内，Bosch-Hale 公式最大偏离 3.7%，表现优异。

4 结论和展望

本文通过对 $E_d < 300$ keV 能区内氘氘聚变反应截面实验类历史文献的搜集、整理和分析，理清了该领域的发展脉络。据统计，近八十年来，美国、前苏联、英国、中国一共测量到了 19 套实验数据。其中，厚固体靶实验获得 3 套实验数

据,薄固体靶实验获得 7 套实验数据,气体靶实验获得 9 套实验数据(有窗气体靶实验 3 套,无窗气体靶实验 6 套)。通过对厚固体靶、薄固体靶和气体靶三条实验技术路线优缺点的剖析,发现厚固体靶技术路线缺陷明显,实验数据质量较差。绝大多数薄固体靶和气体靶的实验数据质量较好,但薄固体靶和有窗气体靶难以用于 $E_d < 20 \sim 30$ keV 能区的实验。通过对氘氘聚变反应截面的数据评价类工作的汇总发现,1990 年前后,欧美的聚变反应数据评价成果先后被收录至 ENDF 和 JEFF 等大型评价核数据库,欧美的聚变反应数据评价工作进入数据库时代。本文还对学界提出的多种聚变反应截面参数化公式进行了分析和比较。

本课题组使用 50.2 nm 厚的钛靶开展了 $E_d = 72 \sim 241$ keV 能区范围内的氘氘聚变反应截面测量实验。鉴于无窗气体靶是开展 $E_d < 30$ keV 能区氘氘聚变反应截面测量的最佳技术路线,本课题组已经开始进行量热器和无窗气体靶技术的研究,后续将基于该技术开展氘氘和氘氚等聚变反应截面测量。

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.41598> 访问获取。

参考文献

- [1] Li J G 2025 Mod. Phys. **37** 50 (in Chinese) [李建刚 2025 现代物理知识 **37** 50]
- [2] Zhang Y R, Yu N P 2025 Forum of World Economics & Politics **5** 1 (in Chinese) [张翌然, 余南平 2025 世界经济与政治论坛 **5** 1]
- [3] Zhang S Z, Xu H, Xu X, Wei W Q, Ren J R, Chen B Z, Ma B B, Hu Z M, Li F F, Liu L R, Yang M Z, Lai Z Y, Yue H W, Xiong J, Xu Z F, Chen Y H, Wang Z, Zhou Z X, Shi L L, Chen R, Deng Z G, Qi W, Zhou W M, Zhao G C, Liu B, Luo D, Homann D H H, Zhao Y T 2023 Laser and Particle Beams, **2023** 9697329
- [4] Zhao L J, Xiao C J, Long X G, Chen Z L, Hou J W, Gong Y, Ran G M, Wang H Y, Peng S M 2019 Journal of Nuclear and Radiochemistry **41** 40 (in Chinese) [赵林杰, 肖成建, 龙兴贵, 陈志林, 侯京伟, 龚宇, 冉光明, 王和义, 彭述明 2019 核化学与放射化学 **41** 40]
- [5] de Souza R S, Reece Boston S, Coc A, Iliadis C 2019 Phys. Rev. C **99** 014619
- [6] Shen G, Zhong B, Wu Y, Wang J Guo 2023 Acta Phys. Sin. **72** 015201 (in Chinese) [沈刚, 袁斌, 吴勇, 王建国 2023 物理学报 **72** 015201]

- [7]Tornow W, Finch S W, Wilhelmy J B, Chadwick M B, Hale G M, Lestone J P, Paris M W 2025 *Phys. Rev. C* **111** 064618
- [8]Lestone J P, Finch S, Friesen F, Mancil E, Tornow W, Wilhelmy J B, Chadwick M B 2024 *Fusion Science and Technology* **80** 89
- [9]Paris M W, Chadwick M B 2024 *Fusion Science and Technology* **80** 110
- [10]Chadwick M B, Paris M W, Hale G M, Lestone J P, Alhumaidi S, Wilhelmy J B, Gibson N A 2024 *Fusion Science and technology* **0** 1
- [11]Jarmie N, Seagrave J D 1956 *Charged particle cross sections* Los Alamos Scientific Laboratory of the university of California LA-2014
- [12]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]
- [13]Han X, Ye T, Chen Z P, Ying Y J, Guo H R, Zu T J 2026 *Acta Phys. Sin.* **75** 020111 (in Chinese) [韩旭, 叶涛, 陈振鹏, 应阳君, 郭海瑞, 祖铁军 2026 物理学报 **75** 020111]
- [14]Han X, Ye T, Chen Z P, Guo H R, Sun W L, Sun Z H, Fan H Y 2026 *Nucl. Sci. and Tech.* **37** 59
- [15]Belov A A, Kalitkin N N, Kozlitin I A 2019 *Fusion Engineering and Design* **141** 51
- [16]Bosch H S 1990 *Review of Data and Formulas for fusion cross-sections* Max-Planck-Institut für Plasmaphysik IPP I/252
- [17]Davidenko V A, Pogrebov I S, Saukov A I 1957 *Soviet J. Atomic Energy* **2** 474
- [18]Artsimovich L A 1961 *Controlled Thermonuclear Reactions* [in Russian], Fizmatgiz, Moscow pp 60
- [19]Kozlov B N 1962 *Soviet J. Atomic Energy* **12** 247
- [20]Stewart L, Hale G M 1975 *The $T(d,n)^4\text{He}$ and $T(t,2n)$ cross sections at low energies* Los Alamos scientific laboratory of the university of California LA-5828-MS
- [21]Duane B H 1971 *Fusion cross section theory*. Annual Report on CTR Technology (1971), ed. Wolkenhauer W C Battelle Pacific Northwest Laboratory, Richland BNWL-1604
- [22]Peres A 1979 *J. Appl. Phys.* **50** 5569
- [23]Bosch H S, Hale G M 1992 *Nucl. Fusion* **32** 611
- [24]Li X Z, Tian J, Mei M Y, Li C X 2000 *Phys. Rev. C* **61** 024610
- [25]Li X Z, Liu B, Chen S, Wei Q M, Hora H 2004 *Laser Part. Beams* **22** 469
- [26]Li X Z, Wei Q M, Liu B 2008 *Nucl. Fusion* **48** 125003
- [27]Koohrokhi T, Izadpanah A M, Hosseini S K 2016 *J. Fusion Energ.* **35** 816
- [28]Gaganov V V 2025 *Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. B* **567** 165819
- [29]Navrátil P, Quaglioni S 2012 *Phys. Rev. L.* **108** 042503
- [30]Bretscher E, Fiebich A P 1949 *Phys. Rev.* **75** 1154
- [31]Bonner T W 1950 *Nuclear Science Abstracts* **4** 988
- [32]Davidenko V A, Pogrebov I S, Saukov A I 1957 *Atomnaya Energiya* **2** 386
- [33]Allan D L, Poole M J 1951 *Proc. Roy. Soc. A* **204** 488
- [34]Allan D L, Poole M J 1951 *Proc. Roy. Soc. A* **204** 500
- [35]Conner J P, Bonner T W, Smith J R 1952 *Phys. Rev.* **88** 468
- [36]Argo H V, Taschek R F, Agnew H M, Hemmendinger A, Leland W T 1952 *Phys. Rev.* **87** 612
- [37]Arnold W R, Phillips J A, Sawyer G A, Stovall E J, Tuck J L 1952 *Absolute cross section for the reaction $T(d,n)^4\text{He}$ from 10 to 120 keV* Los Alamos Scientific Laboratory of the university of

California LA-1479

- [38]Arnold W R, Phillips J A, Sawyer G A, Stovall E J, Tuck J L 1954 *Phys. Rev.* **93** 483
- [39]Jarvis R G, Roaf D 1953 *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **218** 432
- [40]Balabanov E M, Barit I Ia, Katsaurov L N, Frank I M, Shtranikh I V 1957 *Atomnaya Energiya Suppl.* **5** 57
- [41]Katsaurov L N 1962 *Akad. Nauk, USSR, Trudy, Fizicheskii Inst.*, **14** 224
- [42]Balabanov E M, Barit I Ia, Katsaurov L N, Frank I M, Shtranikh I V 1957 *Atomnaya Energiya, Suppl.* **5** 48
- [43]Bame S J, Perry J E 1957 *Phys. Rev.* **107** 1616
- [44]1st Research Group, 1st Research Division (Institute of Modern Physics, Academia Sinica) 1985 *High Energy Phys.Nucl. Phys.* **9** 723 (in Chinese) [中国科学院近代物理研究所一室一大组 1985 高能物理与核物理 **9** 723]
- [45]Kobzev A P, Salatskii V I, Telezhnikov S A 1966 *Yad. Fiz.* **3** 1060
- [46]Jarmie N, Brown R E, Hardekopf R A 1984 *Phys. Rev. C* **29** 2031
- [47]Jarmie N, Brown R E 1985 *Bucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. B* **10/11** 405
- [48]Brown R E, Jarmie N, Hale G M 1987 *Phys. Rev. C* **35** 1999
- [49] Sun J J, Zheng P, Xiao J, Yang J C, Mou Y F, Deng C F, Han Z J, Lu X X, Jiang L, Zhu T H, Lou B C 2026 *Acta Physica Sinica* **75** 090103 (in Chinese) [孙君杰,郑普,肖军,杨杰成,牟云峰,邓春风,韩子杰,鹿心鑫,蒋励,朱通华,娄本超 2026 物理学报 **75** 090103]
- [50]Wandel C F, Hesselberg Jensen T, Kofoed-Hansen O 1959 *Nucl. Instr. and Meth.* **4** 249
- [51]Greene S L 1967 *Maxwell averaged cross sections for some thermonuclear reactions on light isotopes* Lawrence radiation laboratory of the university of California UCRL-70522
- [52]Wolkenhauer W C, 1972 *Fusion cross section theory* Annual Report on CTR Technology (1972) Battelle Pacific Northwest Laboratory, Richland BNWL-1685
- [53]Liskien H, Paulsen A 1973 *Nuclear Data Tables* **11** 569
- [54]Miley G H, Towner H, Ivich N 1974 *Fusion cross sections and reactivities* University of Illinois COO-2218-17
- [55]Howerton R J 1979 *Integrated system of production of neutronics and photonics calculational constants. Volume 21, Part A. Maxwell-averaged reaction rates $\langle\sigma v\rangle$ for selected reactions between ions with atomic mass ≤ 11* Lawrence Livermore Laboratory UCRL-50400 Vol. 21
- [56]Miley G H 1980 *Charged-particle cross section data for fusion plasma applications* University of Illinois COO-2218-195
- [57]Jarmie N 1981 *Nuclear Science and Engineering* **78** 404
- [58]Dunford C L, Larson D C, Young P G 1989 *Fusion Technology* **15** 429
- [59]White R M, Resler D A 1995 *FENDL/C-1.0: Charged-Particle Reaction Data Library for Fusion Applications Version 1.0 of November 1991* International Atomic Energy Agency IAEA-NDS-166
- [60]Sawan M E 2009 *Fusion science and technology* **56** 766
- [61]Kellett M A, Forrest R A, Batistoni P 2004 *Nucl. Fusion* **44** 555
- [62]Henriksson H, Batistoni P, Fischer U, Forrest R, Kodeli I, Nordborg C 2007 *Fusion Engineering and Design* **82** 2430
- [63]Fowler W A, Caughlan G R, Zimmerman B A 1967 *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **5** 525
- [64]Xu Y, Takahashi K, Goriely S, Arnould M, Ohta M, Utsunomiya H 2013 *Nucl. Phys. A* **918**

- [65]Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences 1989 *Measurement of Light Nuclear Reaction Cross-sections* (Beijing: Science Press) pp52 (in Chinese) [中国科学院近代物理研究所 1989 轻核反应截面测量 (北京: 科学出版社) 第 52 页]
- [66]Jordanova J 1995 *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **200** 127
- [67]Fowler J L, Brolley J E 1956 *Rev. of Mod. Phys.* **28** 103
- [68]Thomann Ch, Benn J E 1976 *Nucl. Instr. and Meth.* **138** 293
- [69] Jiang Y C, Lian G, Fang X, Li Y J, Cao F Q, Nan W, Zeng C, Chen Y P, Liu W P 2024 *Atomic Energy Science and Technology* 58 Supl. 1 (in chinese) [蒋宇辰,连钢,方晓,李云居,曹富强,南巍,曾晟,谌阳平,柳卫平 2024 原子能科学技术, **58 Supl. 1**]
- [70] Pisanti O, Mangano G, Miele G, Mazzella P 2021 *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **4** 1

录用稿件，非最终出版稿

Low Energy Deuteron-Triton Fusion Cross Sections: A Review of Experiments and Data Evaluations*

SUN Junjie Deng Chunfeng Han Zijie LU Xinxin[†]

(National Key Laboratory of Neutron Science, Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: This paper presents a comprehensive review of both experimental measurements and nuclear data evaluations for the deuteron-tritium (D-T) fusion reaction cross sections at incident deuteron energies below 300 keV. The historical experiments are classified according to three target technologies: thick solid targets, thin solid targets, and gas targets. Our critical analysis reveals that early experiments using thick solid targets suffered from substantial technical flaws, resulting in data of poor reliability. For energies below 20~30 keV, experiments based on thin solid targets or foil-contained gas targets encounter severe operational difficulties, and data from the latter require significant correction to improve their quality. Furthermore, owing to the immature calorimetric techniques before 1960, most data from windowless gas-target experiments are of relatively low quality. In the sub-20 keV region, only five experimental datasets have been reported to date: one using a heavy-ice target, two using ultra-thin solid targets, and two using windowless gas targets. Among these, the windowless gas-target datasets exhibit the highest quality, whereas the others display systematic discrepancies. The evaluation activities on D-T fusion cross sections are also systematically compiled. After 1990, evaluated fusion reaction data of the United States and Europe have been successively integrated into the major evaluated nuclear data libraries, namely ENDF (Evaluated Nuclear Data File) and JEFF (Joint Evaluated Fission and Fusion File), thereby facilitating standardized data archiving and international sharing. Finally, several commonly used parametric formulas for the D-T fusion cross section are

* Project supported by the National Key Laboratory of Neutron Science and Technology (Grant No. NST202401016).

[†] Corresponding author. E-mail: lx5187@qq.com

The first author. E-mail: sunjunjiegeomdyn@163.com

compared. In the energy range of 6~350 keV, the Gaganov formula provides the best accuracy; however, in the wider range of 1~1000 keV range, the Bosch-Hale formula, derived from the R-matrix theory, exhibits a maximum deviation of 3.7% and offers the most balanced overall performance. The datasets presented in this paper, including a brief introduction to the experimental setup, the differential cross-section data and the integral cross-section data, are openly available at

<https://www.doi.org/10.57760/sciencedb.41598> (Please use the private access link

<https://www.scidb.cn/s/rUveEn> to access the dataset during the peer review process).

Key Words: Deuteron-Triton Fusion Reaction; Reaction Cross Sections; Nuclear Data Evaluation; Parametrisation formula.

录用稿件，非最终出版稿