ICCF25学术笔记及近期冷聚变动态

张武寿 于 2023年10月16日星期一

目录

| 0. 会议总体情况 | 2 |
|--|----|
| 1. 近期形势与一般问题 | 3 |
| 1.1. 国际冷聚变政治形势 | 3 |
| 1.2. 改组国际凝聚态核科学学会 | 3 |
| 1.3. 文献动态 | 3 |
| 1.4. 冷聚变目前的任务和应用展望 | 4 |
| 2. Pd-H(D)系统 | 5 |
| 2.1. Pd-H ₂ O(D ₂ O)系统 | 5 |
| 2.2. Pd-H ₂ (D ₂)系统 | 7 |
| 2.3. 金属氢化物材料学研究 | 8 |
| 3. Ni-H 系统 | 9 |
| 3.1. Ni-H2O 系统 | 9 |
| 3.2. Ni-H2系统 | 10 |
| 4. Ni 合金-H(D)系统 | 13 |
| 4.1. Cu-Ni-Zr 和 Pd-Ni-Zr 粉末系统 | 13 |
| 4.2. Cu/Ni 和 Pd/Ni 膜系统 | 15 |
| 4.3. 康铜(Cu ₅₅ Ni ₄₄ Mn ₁)丝 | 25 |
| 4.4. Ni 基合金-H2 系统 | 29 |
| 5. 直接产生电能的装置 | 37 |
| 5.1. LEC | 37 |
| 5.2. 催化聚变装置 | 41 |
| 6. 核嬗变,核产物 | 45 |
| 6.1. 奇异核径迹 | 45 |
| 6.2. 地质核异常 | 54 |
| 7. 東靶反应 | 55 |
| 7.1. 什切青大学及其合作者的工作 | 55 |
| 7.2. 其他小组的工作 | 63 |
| 8. 激光作用 | 67 |
| 9. 超声空化作用 | 72 |
| 10. 仪器方法 | 79 |
| 10.1. 热测量 | 79 |
| 10.2. 核产物测量 | 80 |
| 11. 各种理论模型 | 83 |
| 11.1. 经典理论的应用或扩展 | 83 |
| 11.2. 重电子和小氢原子 | 84 |
| 11.3. 各种耦合和增强效应 | 86 |
| 11.4. 更激进的理论 | 88 |
| 12. 技术进展总结 | 89 |
| 13. 结论 | 89 |

0. 会议总体情况

2023年8月27-31日,第25届国际凝聚态核科学会议(ICCF25,https://www.iccf25.com)在波兰 什切青(Szczecin)举行,什切青是波兰西北部边境的港口城市,靠近德国边境(见下图0.1,二战前 该地属德国,二战后改属波兰)。本次会议由什切青大学(USZ)举办,会议主席是Konrad Czerski (康拉德·切尔斯基)。会议27日报到,其他4日全天会议。游览及其他小会都在正式会议后举行。 31日晚间会议安排参观什切青大学物理研究所的低能束靶反应装置eLBRUS。



图0.1: ICCF25会址什切青在欧洲的位置。

会议分现场和远程两种模式,美欧学者以现场参会为主,共154人;中、日、美、乌、印等国41 学者远程参会。因俄乌战争,会议禁止俄罗斯学者参加,Alexander Parkhomov等人只能以无国籍的 个人身份出现在论文作者中。国内有5人参会,兰州大学王铁山赴波参会并主持了一场会议,远程参 会的有李兴中(清华大学)、张航(西安秋然实验室)、周康(浙江大学)和笔者本人。会议上王 铁山、李兴中和周康口头报告了最新进展。

会议共安排53场口头报告(其中14场是远程视频),还有29张墙报(附带5分钟视频介绍)。

包括田中群(厦门大学)在内的冷聚变国际顾问委员会决定下次会议(ICCF26)于2025年4-6 月间在日本岩手县盛冈市(Morioka)举行,由岩手大学(Iwate University)成田晋也(Shinya Narita) 主持。

现在分主题介绍本次会议的技术内容,分类是粗略的,且带有任意性。文中介绍到具体内容时用【A#】的形式表示其在摘要集中的页码,如【A27】表示摘要集第27页。摘要全文可在网址: https://iccf25.com/conf-data/iccf-25/files/ICCF25-book-of-abstracts_final.pdf下载,本笔记是结合摘要、报告视频(如【S.2.3】表示第2场第3个报告)、墙报(如【P5】表示第5篇墙报 或相关视频,如只有摘要页码,表示作者未提供进一步信息)和相关文献综合而成的。会议视频 已全部上网,但目前只有参会者可浏览。笔者无法把所截图表中内容全部在正文中表述,请读者多 从图表中获取有用信息。所有内容以原作者表述为准,特此说明。

1. 近期形势与一般问题

1.1. 国际冷聚变政治形势

欧、美、日已先后在政府层面支持冷聚变研究,这是三十多年来的第一次,其中意义不言自明。 欧盟的地平线2020研究与创新计划支持的洁净氢金属能(Clean HME, http://www.cleanhme.eu/) 支持了15家单位的LENR研究,4年的计划于今年8月份到期,已决定继续支持一期。会议最后一天, 欧盟委员会的Maurizio Maggiore介绍了欧盟对冷聚变研究和其他国际项目的支持情况【S.1.5.1】。

美国ARPA-E已支持8家(分别是University of Michigan 2家共约200万, Texas Tech University (TTU)115万, LBNL 150万, MIT 200万, Stanford University 150万, Energetics Technology Center 150万, Amphionic LLC约30万)共1,000万美元的计划,目的是验证LENR的科学性,这次会议上有两个相关小组(TTU和MIT)报道了初步结果。此外,美国人类世研究所(Anthropocene Institute)也接受验证LENR实验的项目申请(https://solidstatefusion.org/grants/),额度为2.5到10万美元。人类世研究所已资助了布里渊能源公司(BEC)、Forsley的环球能源公司(GEC)、MIT的Metzler组和意大利的Celani组等多家单位的冷聚变研究。

日本丰田实(Minoru Toyoda)建立的TEET(热电能技术)基金在2023–2026年间资助笠木治郎太(Jirohta Kasagi)领导的,由东北大学、九州大学、早稻田大学、岩手大学和神户大学的冷聚变研究共150万美元。

1.2. 改组国际凝聚态核科学学会

会前不久,国际凝聚态核科学学会(ISCMNS)的秘书William Colins因病于意大利去世,为表 彰其贡献,在他临终前特授予Preparata奖。28日下午进行了ISCMNS组织机构的改组,新会长是近年 活跃的美国科罗拉多山学院(Colorado Mountain College)的N. Lynn Bowen,副会长包括张航等 6人,英国的Alan Smith是秘书兼CEO(即实际负责人)。这几年ISCMNS一直免会费,新政策是每 年会费50美元(学生减半),永久会员200美元,荣誉会员(英国Brian Josephson,新西兰Michael McKubre,美国Edmund Storms和David Nagel,意大利Francesco Celani,法国Jean-Paul Biberian,日 本高桥亮人)免费。这些年ISCMNS的主要工作是筹办欧洲举行的"国际含氢金属异常效应研讨会" (International Workshop on Anomalies in Hydrogen Loaded Metals, IWAHLM)和《国际凝聚态核科 学杂志》(Journal of Condensed Matter Nuclear Science, JCMNS,主编是Jean-Paul Biberian)。从ICCF16 开始,会议文集都发表在JCMNS上。该刊平时接收冷聚变领域文章的投稿,目前已出版了36卷。

1.3. 文献动态

根据 2021 年 Freire Luciano Ondir 的统计【J. Electroanal. Chem. 903, 11587; DOI: 10.1016/ijelechem.2021.115871】,世界上共有375个小组3460人参与了冷聚变研究。

Jonah Messinger 等 人 报 道 美 国 的 人 类 世 研 究 所 开 发 了 数 据 库 : https://solidstatefusion.org/research/, 它不仅收集了冷聚变论文, 还按反应系统、材料和核产物等冷聚 变特有主题进行了分类, 以便入门者检索, 目前该数据库仍在建设过程中【A58】。

美国Conscious Energies的Diadon Acs讨论了机器学习在深入探索LENR中的应用【A89, S.8.4】。

开发具有大语言模型(LLMS)的自主研究助理(ARA),下图是利用机器学习收集到的4740篇冷 聚变文献的年份分布(参: <u>https://lenrdashboard.com/</u>),在网页上点击具体年份可显示当年的所有文 献。除了实验外,还有60多个理论模型。作者还展示了利用Dall-E自动绘制的实验装置图。



图1.3.1: 1920年以来每年的冷聚变文献数量。

美国的Jed Rothwell 开发了一个基于ChatGPT的问答界面: <u>https://lenr-</u> <u>canr.org/wordpress/?page_id=2988</u>,对lenr-canr.org上收藏的所有文献内容进行抓取。作者可针对具体 文献进行提问,能使用汉语。

美国LENE文档计划已经采访多个冷聚变学者并整理回忆录,笔者已见到《Melvin H. Miles博士的冷聚变研究自传》并允诺将其翻译成中文。

1.4. 冷聚变目前的任务和应用展望

美国的Robert Christian做了"使CMNS成为主流"的报告。为实现目标,通常认为如下两者必居其 一: (1)高度可重复的实验; (2)商业上可行的产品【A108, S.13.3】。欧盟委员会研究与创新总 局(DG RTD - European Commission)的Maurizio Maggiore的报告题目是"LENR研究: 独角兽近在眼 前?"【S.15.1】。作者对欧盟内的研究进行了总结,也说LENR目前仍处于盲人摸象的境地,期望出 现最简单的实验并可在主流期刊上发表。虽然作者申明只是个人观点,但还是代表一定官方态度的。 ISCMNS新任主席Bowen在28日晚间会议上也讨论了如何让科学界接受冷聚变。美国ARPA-E和人类 世研究所的资助目的都是实现科学性,可以说实现科学性已成为冷聚变界的共识。

美国犹他大学的Stephen Bannister报告了"在革命的边缘"【A111, S.14.2】。上一次能源革命是 工业革命,燃料从材薪转向煤炭,大约在1600年前后煤炭价格只有材薪的一半左右,而这次能源价 格将降低20-600倍。这是多年以后犹他大学的学者再次参加冷聚变会议。

美国LENRGY公司的Thomas Grimshaw描述了冷聚变在保持地球宜居中的作用【A110, S.14.1】。 他主要讨论冷聚变作为能源可缓解化石燃料导致的气候变化(global climate change, GCC),冷聚 变还可以降低采煤采油带来的污染问题,以及用核嬗变方法处理核废物等等。

法国凝聚态核科学学会(Société Française de la Science Nucléaire dans la Matière Condensée, https://www.sfsnmc.org/)的Jacques Ruer以"下世纪人类的能源——LENR的角色"为题介绍冷聚变能源 【A112, S.14.3】,结论是如果LENR只消耗H和D,那么就是无限的,如果还消耗稀有金属(见下



图1.4.1和1.4.2),那结论就不同。其结论也说明LENR将来是分布式,小型化的。

2. Pd-H(D)系统

2.1. Pd-H₂O(D₂O)系统

美国 University of LaVerne 的 Melvin H. Miles 报告了 ⁴He 测量与电流的关系(Miles 远程参会, 由 Peter Hagelstein 代讲),在开放电解的条件下,电解逸出的氘氧混合气中的 ⁴He 浓度与超功率和 电流关系为 ⁴He (ppb) = 55.91 P_{ex}/I ,作者的多数实验符合这一规律。只有用 Pd-B 阴极时 ⁴He 浓度比 该公式偏低,说明 B 阻挠了 ⁴He 逸出【A28, S.1.3】。

美国 New Energy Times 的 Steven B. Krivit 与 Melvin H. Miles 合作发表了"异常热报告的确认" 【A84】。这是一个"考古"工作,1989 年在冷聚变发现不到 5 周后召开了美国物理学会议,加州理工 的 Nathan Lewis 报告说弗莱希曼和庞斯在 J. Electroanal. Chem.杂志上给出的超热结论错了,不仅没 有超热,反而应该是热吸收,这在当时及以后产生了严重的消极影响。Krivit 最近在图书馆找到了 Lewis 演讲所用的原始文件,经 Miles 计算证明, Lewis 的计算是完全错误的,说明弗莱希曼和庞斯

确实在实验中观测到异常热(详参: <u>http://electrochem.xmu.edu.cn/EN/10.13208/j.electrochem.2306231</u>)。

芬兰 Turku 大学的 Kimmo Pyyhtiä 和 Pekka Peljo 验证 Pd/D 共沉积电极产生了带电粒子【A63, P10】。电解池如下图 2.1.1 所示,初始阴极是 Ag 丝,电解液是各种电活性物质(PdCl₂、CuCl₂或 PtCl₂)和支撑电解质(LiCl 或 KCl)的组合,然后电沉积 Pd 成树状结构,CR39 放置在阴极附近,电解几天后,观测蚀刻点。结果如下表 2.1.1 所示,使用 PdCl₂+H₂O、PdCl₂+D₂O、CuCl₂+H₂O和CuCl₂ + D₂O 电解液都曾测到蚀刻点,用²⁴¹Am的蚀刻点直径约 1 µm,而电解液中的大小为 1–1.5 µm,实验重复性不高。还用 ICP MS 测过 Pd 同位素分布,与天然值相比,无显著偏差。结果还需深入研究。



图 2.1.1: Pyyhtiä 和 Peljo 所用电解池。絮状物是 Pd/D 共沉积电极, 螺旋丝是 Pt 对电极, 左侧是轻 水池, 右侧是重水池【A63, P10】。

| 表 2.1.1: | Pyyhtiä 和 | Peljo 所用 | Pd/E |)共沉积体系的 | CR39 | 测量结果 | (A63, | P10 . |
|----------|-----------|----------|------|---------|------|------|-------|-------|
|----------|-----------|----------|------|---------|------|------|-------|-------|

Table 1: Different experiments and their electrolyte compositions and if pits similar to Fig. 4 are seen. Abbreviations: OPF – Original protective film, KPF – Kapton 6 μm Polyimide film, 3DC – 3D-printed cell

| Sample number | Electrolyte [30 mM] | Supp. elec. [300 mM] | Solvent [50 mL] | Notes | Additives | # of cells | Pits |
|---------------|------------------------|-------------------------|---|--------------------|------------------------|------------|------------|
| PdE-001/2 | PdCl ₂ | LICI | H20/D20 | | | 3/3 | No/Yes |
| PdE-003/4 | CuCl ₂ | LICI | H ₂ O/D ₂ O | | | 3/3 | No/No |
| PdE-005/6 | PdCl ₂ | KCI | H20/D20 | | Ĩ | 3/3 | No/Yes |
| PdE-007/8 | PdCl ₂ | LICI | D20 | DSA CE | -/0.1 mM PtCl2 | 3/3 | Yes/Yes |
| PdE-009/10* | PtCl ₂ | LICI/LICI* | H20/D20 | | -/10 mM D2504 | 1/2 | No/No |
| PdE-015 | PdCl ₂ | LICI | D20 | OPF, thermometer | | 3 | Yes |
| PdE-016 | PdCl ₂ | LICI | (50% H ₂ O / 50% D ₂ O) | | | 1 | Yes |
| PdE-017/18 | PdCl ₂ | LICI | H ₂ O/D ₂ O | KPF | | 3/3 | No/No |
| PdE-019 | PdCl ₂ | LICI | D20 | Stirring | | 3 | See Fig. 4 |
| PdE-020/22 | PdCl ₂ | LICI | D20 | KPF w/ 3DC | | 3/3 | No/No |
| PdE-021 | PdCl ₂ | LICI | D_0† | H-cell, DSA CE | | 1 | No |
| PdE-023 | PdCl ₂ | LICI | D201 | H-cell | | 1 | See Fig. 6 |
| PdE-024 | PdCl ₂ | LICI | D20 | Ag wire RE w/ 3DC‡ | | 3 | Yes |
| PdE-025/26 | PdNO ₃ | LINO, | H20/D20 | w/ 3DC | | 3/3 | No/No |
| PdE-027/28 | PdCl ₂ | LICI | H_0/D_0 | CE under WE w/ 3DC | | 3/3 | Yes/Yes |
| PdE-029/30 | CuCl ₂ | LICI | H ₂ O/D ₂ O | CE under WE w/ 3DC | | 3/3 | No/Some |
| PdE-031/32 | CuCl ₂ | LICI | H ₂ O/D ₂ O | CE under WE w/ 3DC | 1 mM PtCl ₂ | 3/3 | Yes/Yes |

*In PdE-010 LiCl concentration was 1 M

130 mL with PdCl₂ on WE side of membrane and 30 mL without PdCl₂ on CE side

\$Two cells used old cell design and instead of Ag/AgCI RE used only a chlorinated Ag wire as RE

2.2. Pd-H₂(D₂)系统

美国 Edmund Storms 未参会,但他在会前发布了一篇文章(<u>https://www.lenr-canr.org/acrobat/StormsEanewunders.pdf</u>)介绍其最新进展。在 0.5 atm D₂气氛下对 W型 Pd 片通电,发现电流升高时超热增加,可见电流有助于超热出现,测量中己扣除电流加热 Pd 的贡献。即使电流反向也有一样的效应。这个 Pd 截面约 1 mm × 3 mm,重 2.5 g,笔者求得长度约 7 cm,20℃下电阻为 2.2 mΩ,按 0.0035 的电阻温度系数,升温到 200℃时电阻也不过 3.7 mΩ,即使考虑吸氘后电阻加倍也不过 7 mΩ,3A 情况下的热功率也仅为 0.15 W,在氘气中无法有效升温,可见超热不是电加热所致。在电解条件下,增加电流总引起温度升高,使这两个参数无法独立,这是第一次在 Pd-D 系统中实现电流独立变化。至于这种影响的原因只是电致氘扩散还是有更深入的机理,需要深入研究。



图 2.2.1: Storms 所用的 W 形 Pd 片(左)和氘气中不同温度、不同电流下的超热(右)。

Theresa Benyo 回顾了美国宇航局格伦研究中心(NASAGRC)这些年的主要工作,并推测了反应途径【A102, S.12.1】。他们的工作分三大部分,以前都报道过,值得注意的有两点:

(1) Fralick 等在 1989 至 2018 年观测到 5 次 Pd₇₅Ag₂₅ 合金管脱氘过程中的异常温升,用氢气则无效应。用 ICP AES 检测到 Pd-Ag 合金管上产生显著的 Cu (实验前、后分别为 20、120 ppm), Fe (实验前、后分别为 20、40 ppm)和 Zn (实验前无,实验后 285 ppm),还有 Cr (实验前无,实验后 2 ppm)和 Mn (实验前无,实验后 0.5 ppm)。TOF SIMS 也证实该结果。

(2)用 2.9 MeV 电子辐照金属氘化物 (TiD₂和 ErD₃),电子先韧致辐射生成高能γ,γ再分解 D 为质子和中子,而中子碰撞冷氘生成高能氘,高能氘再与氘化物中的冷氘发生 DD 反应生成 2.5 MeV 中子,该工作的异常在于需要很高的屏蔽能才能解释实验结果。另外还测到 3-8 MeV 的中子,作者 认为是光分解中子碰撞基体金属发生剥离反应产生的。笔者注意到高桥亮人早期曾在 Pd 电解重水 系统中也观测到高于 2.45 MeV 的高能中子。

(3)在 PdCl₂/LiCl 的重水电解液中电沉积形成的 Pd 阴极上测到弱中子信号。

作者推测上述 Pd-Ag 合金表面的异常元素是在晶格中直接发生了 Pd 的光致裂变反应,如 Pd \rightarrow Fe + Ca 或 Pd \rightarrow Ti + Cr,或先发生 Pd + D 和 Ag + D 聚变,然后再裂变成 Fe + Ti、Mn + Cr、Fe + Cr 等元素。

印度辨喜瑜伽大学(S-VYASA,在班加罗尔南部 43 km 的 Jigani)能源研究中心的 Prahlada Ramarao 报道了水野型冷聚变超热【A97,S.10.4】。他们使用的反应釜如下图 2.2.2 所示,采用中心 加热的方法,用外表面测温获得输出热功率。活性材料是镍网蹭钯颗粒,用氢气或氘气。最近 9 年 已进行了 500 轮实验,其中有 100 轮是正结果。一例实验中产生 30-40%的超热。该小组用多反应 釜进行对比实验,即 3 个活性反应池和 1 个参考池(见下图 2.2.3),所有活性反应池都比参考池显 示出更高的热输出,尽管输入功率都是 100 W,见表 2.2.1。在班加罗尔的印度科学研究所用四极杆 质谱仪测了三次气体,在 Pd-H 活性反应池中都观测到 ³He,但在参考池中未测到。



图 2.2.2: S-VYASA 反应釜采用中心加热,外表面测温获得输出热功率【A97, S.10.4】。



图 2.2.3: S-VYASA 所用实验装置,图中 4 个反应釜同时工作【A97, S.10.4】。

表 2.2.1: 都输入 100 W 情况下 4 个反应釜的不同表面温度,参考池温度最低【A97, S.10.4】。

| Pin (100W Continuous) | Reference unit | Active 1 Generator | Active 2 Generator | Active 3 Generator |
|-----------------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Fuel composition | UNi+H2 | Ni+Pd+H2 | Ni+Pd+H2 | Ni+Pd+H2 |
| Surface Temp (°C) | 266.3 | 300.2 | 284.3 | 303.9 |

2.3. 金属氢化物材料学研究

法国国际氢材料研究所(i2-HMR)的 Nicolas Armanet 综述了压力最高到 GPa, 温度最高到 2000

K 条件下的 PdH(D)_{x>1.0} 的充氢(氘)问题【A70】。充氢(氘)到 x > 1.0 很难,前些年 McKubre 等人一直坚持高 D/Pd 才是超热出现的关键,所以一直有人关注该问题。Armanet 这些年来一直研究 Pd-H 材料学问题,相关工作有参考意义。

美国乔治华盛顿大学的 E. Marano 和 D.J. Nagel 讨论了材料中氢的电迁移在冷聚变中的作用 【A62, P9】。作者注意到至少有 18 篇冷聚变论文涉及"电迁移"一词。电迁移有两种模型,一种是 认为质子在电场作用下直接沿电场方向移动,另一种认为质子在电子碰撞下获得动量,沿反电场方 向移动,一般用质子在材料中的有效电荷 Z*来描述。已知在 Ti、Zr、V、Nb、Ta、Fe、Ni 和 Pd 中, 质子在电场下向负极聚集(即 Z*>0),而在 Cu、Ag 和 Y 中,质子向正极聚集(即 Z*<0)。Rajan、 Botta、Celani、Mengoli、Tamaki、Yamaguchi 和 Staker 等多个小组设想电迁移有助于冷聚变发生, 但无过硬证据。Preparata 在 1996 年 ICCF6 上曾报道用细 Pd 丝(\$50 μm × 250 cm)实现了电迁移引 起至少 78 W 的超热,但无后续重复性结果。作者希望可以证实该现象。

3. Ni-H 系统

3.1. Ni-H₂O 系统

印度理工学院坎普尔分校(IIT Kanpur,看来 IIT 要改名为婆罗多理工了)的 Shyam Sunder Lakesar 继续报道该小组轻水电解核产物测量结果。在 ICCF23 和 ICC24 上,他们报道用 EDS 在碳酸钾溶液 中电解过的多种金属和合金阴极柱上测到显著的嬗变产物,本次对以前结果给与了修正。用 EDS、 WDS 和 ICP MS 分析了 100 多个样品的表面和体元素,结果表明只有 1-7%的组分变化,总对比结 果如下表 3.1.1 及图 3.1.1 和 3.1.2 所示【A103, S.12.3】。理论上,如果像他们在以前报道的,电解 半天就改变一半以上的元素组分,这个世界早就不稳定,超热也不是一般的大了。

表 3.1.1: IIT Kanpur 组 ICCF24 的 EDS 元素分析结果与本次不同方法测量结果的比较。原始样品的 EDS 分析表明组分为 Ni-97.78%、Fe-0.26%、Cu-1.90%和 Pt-0.06% 【A103, S.12.3】。

| Elements | ICCF-24 | Current EDS | WDS | ICPMS | |
|-------------|----------------|--------------------|----------|----------|--|
| Of interest | Results(10keV) | Results(20 keV) | Results | Results | |
| Cu | 2-10% | 1.4-2.7% | 2-3% | 0.8-1.4% | |
| Fe | 2-3% | 0.1-1.2% | 0.5-1% | 4-8% | |
| Au | 10-70% | 0.1-0.6% | 0.1-0.6% | 0.3-0.5% | |
| Pt | 10-20% | 0.1-0.5% | 0.1-0.5% | 0.3-0.5% | |
| Ni | Balance | Balance | Balance | Balance | |



图 3.1.1: IIT Kanpur 组用 EDS 和 WDS 分析时不同的偏转电压下电极不同位置的 Au 测量结果, 红 线是反应前含量。可见 EDS 结果偏高, WDS 在柱体处偏低【A103, S.12.3】。



图 3.1.2: IIT Kanpur 组用 ICP MS 分析时不同偏转电压下电极不同位置的测量结果,红线是反应前 含量【A103, S.12.3】。

3.2. Ni-H₂系统

瑞士的 Heinz B. Winzeler 在 Ni-H2 系统中观测到超热【A57, P3】。他模拟的是意大利 Piantelli

的早期实验,反应池是竖直石英或陶瓷管(见图 3.2.1、2),厚度为 0.25、0.5 或 1 mm 的环形 Ni 片 放置在反应池上部。反应池底部的法兰与气路和真空系统相连,法兰中心内置空心管用于热电偶测 温。反应池外是感应加热螺线管,用 100 kHz 交流加热 Ni 片并激发 LENR。加热管同时还是流量量 热计的冷却流体管路。图 3.2.3 所示是 0.25 mm 厚 Ni 片的超热测量结果,共持续 15 天,可见在第 五天出现 COP > 100%,并持续 11 天,目测 COP 平均值为 125%。SEM EDX 测量表明产生了 5-8wt.% 的碳(见表 3.2.1)。实验重复性还是个问题。就笔者的经验,Winzeler 主要靠运气获得超热。另外, 感应加热的升温速率快,是一个值得注意的方法。



图 3.2.1: Winzeler 的 Ni-H₂反应池示意图【A57, P3】。



图 3.2.2: Winzeler 的 Ni-H2 反应池实物照【A57, P3】。



图 3.2.3: Winzeler 在 2021.2.12–28 期间 Ni-H₂ 系统产生的超热。绿线是气压,可见最多到 0.45 bar; 紫线是 COP,从第五天开始 COP > 1。反应池内温度最高到 340°C 【A57, P3】。

| Element (surface) | Starting mat.(w-%) | After reaction (w-%) |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|
| Ni | 98.5 | 9093 |
| C | 0 | <mark>6 8</mark> |
| Co | 23 | 3 |
| 0 | 23 | 1 |
| Fe | 23 | 0 |
| Cu | 0.40.7 | 0.4 |
| Mn | 0.10.3 | 0.2 |
| Ca | 0 | 0 |

表 3.2.1: Winzeler 用 EDX 测量的初始材料(99.2%Ni)和反应 1500 h 后的组分变化【A57, P3】。

4. Ni 合金-H(D)系统

各种镍合金-氢气系统是这些年的研究热点,以不同形态的 Ni-Cu 合金为主,本节分四部分介绍。

4.1. Cu-Ni-Zr 和 Pd-Ni-Zr 粉末系统

Cu-Ni-Zr(CNZ)和Pd-Ni-Zr(PNZ)合金粉末是日本学者独立发展并一直领先的材料,目前其他国家尚未重复。

高桥亮人(Akito Takahashi)向会议提交了摘要,但又因非技术原因而撤回。该摘要介绍了神户 大学纳米金属氢能(MHE)研究的最新进展。CNZ 必须在几天时间内达到 H/Ni >>1 且温度在 300℃ 以上时才有显著超热(约 200-300 W/kg)。当 H/Ni 超过 1.0 的转折点后,超功率开始急剧增加,几 天后,随着材料在高温下接近 H/Ni 全加载比(H/Ni>>1.0),超功率开始减小。通过控制 H/Ni = 1.0 + α(α < 2.0),可控制 MHE 热功率水平。



图 4.1.1: 神户大学 CNZ8_{ss-rr} 材料的超功率(浅蓝色点划线)与 H/Ni(黑线)的相关性,本次实验最 大超热 50 W【JCF23-8】。CNZ8_{ss-rr} 中下标 rr 表示二次煅烧,这是他们摸索出的材料预处理方法。

关于 CNZ 材料,国内防化院的赵辉等人(肖无云组)用球磨法制造了纳米 CNZ 合金,他们报 道了合金颗粒尺寸随球磨时间的变化,如下图 4.1.2 所示,可见在一天以后,时间越长,粒径越小 【A72,P20】。



图 4.1.2: 防化院的 CNZ 合金颗粒尺寸随球磨时间的变化【A72, P20】。

日本早稻田大学的工作是前几届会议已报道内容的延续【A39,S.4.2;A96,S.10.3】。他们在 ICCF24 报道了脉冲高压氢气对 Pd-Ni-Zr 粉末(PNZ10r,Technova 公司提供,应该是经过一次煅烧 预处理的样品)超热的激发。这次小林知嵩(Tomotaka Kobayashi)报告用非接触法(即红外)测量 温升(见下图 4.1.3),目的是证明非接触法的优点。用1g氧化铜粉末,施加 0.5 MPa 氢气压力,非 接触方法测到温升 280°C,而热电偶只测到 15°C(见下图 4.1.4)。用 Ni 粉和 Pd-Ni-Zr 粉也得到类 似结果。两者的区别在于非接触法直接测量表面温度,而接触法深入样品内部,反应先在表面发生, 所以温升较慢。从内容看,这个主要是测量方法的改进,氢气还原氧化铜放出的是化学热【A39, S.4.2】。



图 4.1.3: 早稻田大学实验装置示意图及实验步骤图【A39, S.4.2】。



图 4.1.4: 用 1 g 氧化铜粉, 施加 0.5 MPa 氢气压力, 非接触法测到温升 280°C(左), 而热电偶只测 到 15°C(右)【A39, S.4.2】。

同组的鸟羽裕太(Yuta Toba)报告优化气体射流喷嘴长度可以增加超热【A96, S.10.3】。利用 小型反应池,气体喷嘴长度为260 mm,进行3gPNZ10r纳米粉末吸收氢气实验。对比两种阀门的 开启速度,针阀开启速度最慢到约180 s,电磁阀开启速度可快到20 ms。阀门开启速度越快,越容 易产生100℃以上温升,即超热越大。这是因为快速开启阀门会产生氢气脉冲射流,射流前端压力 梯度越大,带来超热也更大。然而,与冲击波的压力梯度相比,电磁阀的压力梯度相对不大。因此 增加了喷嘴长度,通过将射流前端近似为激波来增加异常热产生。从可压缩流体力学的角度来看, 在下游较高温度和压力下声速较高的氢气可以赶上前方的氢气,从而带来激波,即平均自由程水平 内压力和温度的不连续跃变(见下图 4.1.5)。实验表明,在初始平均温度 258℃的条件下,将 0.5 MPa 的氢气注入 PNZ10r 中,同时把喷嘴长度(即前图 4.1.3 中蓝色箭头部分)从 325 mm 增长到 1325 mm (见下图 4.1.5 中 Fig. 2)。结果表明,在 325 mm 到 825 mm,随着喷嘴长度的增加,PNZ10r 的 温升也随之增加,当气体喷射喷嘴长度为 825 mm 时,观察到的最大温升为 62.9℃(图 4.1.5 中 Fig. 3)。然而,由于粘度和导热性的耗散,喷嘴长度超过 825 mm 后将导致温升降低。



图 4.1.5: 早稻田小组 PNZ-氢气实验中不同喷嘴长度对温升的影响。

美国 JET 公司的 M.R. Swartz 继续其 NANOR®型 ZrO₂NiPdD 器件,在下图 4.1.6 所示一例中, 在横坐标时长为 5000-7000 (对应 2 h)时输入不到 10 μW,输出达到 0.1 W, COP~30,000。Swartz 的研究很有特色,主要问题是配方独特,别人无法复制【A32】。他的另一篇摘要题目是"利用 CF/LANR 纳米材料系统的反斯托克斯峰编码量子比特"【A56】。



图 4.1.6: Swartz 自制 ZrO₂NiPdD 器件的超热结果【A32】。

4.2. Cu/Ni 和 Pd/Ni 膜系统

日本东北大学和洁净星球公司(https://www.cleanplanet.co.jp)合作项目组的笠木治郎太(Jirohta Kasagi)【A27, S.1.2】, 伊藤岳彦(Takehiko Itoh)【A33, S.2.2】和岩村康弘(Yasuhiro Iwamura)【A42, S.5.1】分别报道了氢气解吸过程中 Ni-Cu 多层膜中的异常超热。

为了研究 Ni-Cu 多层膜中的异常热效应,他们开发了辐射量热法(原理见下图 4.2.1)。该量热使用三种类型的光谱计,一种是 TMHK-CLE1350(波长 3-5.5 µm)用于中红外,一种是 FTIR 光谱

仪 Hamamatsu C15511(波长 1.5–2.5 μm)用于近红外,一种是 Hamamatsu C10027(波长 0.3–0.9 μm) 用于可见光。具体方法如下:薄膜样品由沉积在 Ni 衬底上的多层 Ni-Cu 膜组成,样品吸收 H₂(D₂)气体后,将样品室抽真空,同时把样品加热到 1000 K 左右。样品在 H₂(D₂)气体解吸过程中产生超热。 保持加热器输入功率恒定,测量超功率。由于样品放置在真空中(小于 10⁻⁴ Pa),因此来自样品的 大部分热流是样品及其支架的热辐射。因此,辐射量热法最适合于测量真空中样品产生的热量。不 同条件下的热测量结果见下图 4.2.2–6,主要结论如下:(1)氢氘气体超热无显著区别;(2) Ni-Cu 多层膜比 Cu 单层膜超热明显大,Ni/Cu=5/1 的膜比 Ni/Cu=1/3 的膜超热大,但结果需要更深入研究; (3)超热几乎是常数,80 h 内不降低;(4)时间越长,超热的振荡性越大。





图 4.2.2: 比较 6{Ni(6 nm)Cu(17.8nm)}/Ni 基底(左)和 Cu(140 nm)/Ni 基底(右)两种样品脱氢(红 圆点)时的光谱与真空下(黑×)的差别。可见 Ni-Cu 多层膜有明显超热,而 Cu 单层膜只有轻微超 热。





图 4.2.3: Ni/Cu 比与超热的关系。纯 Ni 基底无超热(左); Cu 单层在氢气和氘气中只有少量超热(中,右),当然无法排除 Cu-Ni 合金化; Ni-Cu 多层膜可产生显著超热, Ni₅Cu 比 NiCu₃ 超热更高。



图 4.2.4: Ni₁Cu₃ 多层膜得到的超热随时间的短期变化,纵坐标单位是 W。第一次用氢气(左),第 二次用氘气(中),第三次用氢气(右),可见超热随时间缓慢增加。



图 4.2.5: 超热的长期行为,左图是脱氘过程中的超热变化,右图是脱氢过程中的超热变化,可见在 80 h 内几乎稳定,当然总有短期脉冲,且氢氘无显著区别。



图 4.2.6: 在初始吸氢少于以前 1/10 情况下的超热。结果表明超功率会减小,但单位氢原子放出的热量增多,说明不是多质子过程。

伊藤岳彦 (Takehito Itoh) 报道了纳米多层膜脱氢过程中出现热猝发时的光辐射特征【A31,S.2.2】。 实验中使用的样品是 Cu/Ni/CaO 纳米多层膜,采用磁控溅射沉积法制作(见下图 4.2.7)。将两个纳 米多层膜固定在真空室内样品支架中陶瓷加热器两侧(见图 4.2.8(a))。氢气吸收到样品中(250 Pa, ~250°C,12–15h)后,加热样品并保持输入功率恒定,同时泵出氢气,从而引发超热。在此过程中, 经常观察到热猝发,即温度突然升高。图 4.2.8(b)显示了一例热猝发。该实验中共观测到 8 次热猝 发,A、B 表面的中红外辐射随加热器温度的升高同步增加。图 4.2.8(c)是第二次热猝发的放大图。 A 面辐射量急剧上升,随后加热器温度升高,最后 B 面辐射量增加。这说明 A 面发生了热猝发,而 且需要注意的是,在爆发前几秒,A 面辐射先下降,随后才迅速增加。活性层的中红外光谱负脉冲 下降时间约 8 s,温度上升时间约 150 s,详见图 4.2.9。热猝发功率脉冲在 0.1–0.6 W,详见图 4.2.10。



图 4.2.7: 日本东北大学使用的 Cu/Ni/CaO 多层膜。



图 4.2.8: 陶瓷加热片两侧都有活性层,当一侧的 A 面出现超热前会有短暂的中红外光谱辐射降低, 而紧贴中心陶瓷片的温度和对面的中红外谱强度单调升高。









0.58W

1287.9J

Burst7

图 4.2.10: 不同热猝发功率及积分热。

岩村康弘(Y.Iwamura)报告了两个进展,首先是短期功率降低和增加都可刺激多层膜产生热脉冲,其次是多种手段证明多层膜中产生了氧【A42,S.5.1】。在去年负脉冲激发的基础上,今年他们开展了正负脉冲激发超热的工作,平均输入功率为27.8W,然后变为26.8W(减少1W)维持3min,3h后再变为29.3W(增加1.5W)维持2min,这样可保证平均功率一直是27.8W。下图4.2.11可见正负热功率变化都能激发出热脉冲。



图 4.2.11: 短时间功率的增加和减少都可以激发出热脉冲。

对产生超热的 Ni/Cu 多层膜样品,用多种方法证明核过程产生了氧:(1) SEM EDX 发现明显的 含氧斑点,结果如下图 4.2.12 所示。图中对照组样品的氧含量只有 0.78%,而产生超热样品的 O 含 量高达 33.7%;(2)用 TOF SIMS 分析产超热的多层膜样品(见下图 4.2.13),可发现两个显著特点, 首先是 Ni/Cu 多层膜中 Ni 和 Cu 的周期分布在实验后相互扩散成合金态,其次是反应后氧含量比反 应前增加了几十倍,深度分布可达 200 nm;(3) SEM EDX 和 TOF SIMS 的表面分布相同(见下图 4.2.14),也说明两者结论是一致的;(4)把样品先在 700°C下空气中氧化,再在氢气中还原,检测 发现氧含量不超过 5%(见下图 4.2.15),说明氧污染的比例很小;(5)用 RGA 分析反应气体(见下 图 4.2.16),结果 6{Cu(3.8 nm)/Ni(20 nm)}大超热样品(图中黄线)和 6{Cu(3.5 nm)/Ni(20 nm)}小超 热样品(图中蓝线)气体质谱中质量数 32 与质量数 28 的比值明显不同,质量数 32 可认为是氧,而 质量数 28 可认为是 CO₂和 N₂,也说明超热与氧产生正相关。



图 4.2.12: Ni/Cu 多层膜中样品产超热后在 SEM 中观测到的氧斑点。



图 4.2.13: 产生大超热 Ni/Cu 多层膜样品的元素深度分布。



图 4.2.14: TOF SIMS 与 SEM EDX 的元素分布相同。



图 4.2.15: 样品先在空气中氧化再氢气中还原后的氧含量检测结果。



图 4.2.16: 不同超热样品气相质谱中质量数 32 与质量数 28 间的比值。

高桥亮人在 JCF23 上也证实, 氧并非来自于空气泄露。

东北大学小组的工作强烈地表明,目前 Ni/Cu-H 系统的核产物主要是 O,这是 Miley 多年前在 Ni-H 电解系统中发现大量嬗变核产物后确定的另一个主要核产物,对机理研究有重大指导意义。如 果能分析不同氢氘比例混合气条件下的超热与核产物并与氢气氛中的对比,则意义更大。

日本岩手大学的成田晋也(Shinya Narita)继续探索蒸镀有 Ni 膜的 Pd 箔解吸氢实验中的热测 量【A34, S.3.1】。其样品结构见下图 4.2.17, 主要特点是 Pd 表面要蚀刻 200 nm 的凸起, 作者说该 微观结构对超热产生很重要。先在 5 atm 的 H₂气氛中加载到 H/Pd=0.7-0.8, 把样品放入真空腔内, 抽真空到 10⁴ Pa, 在样品上通入 0.5 W 恒功率电流使氢脱除,连续检测样品温度(K 型热电偶直接 测温且红外温度计间接测温)和压力约 24 h。本次实验与以前相比的特点是恒电流激发改为恒功率 激发,更有利于超热测量。这次只说氢没提氘。9 轮实验都观测到明显热脉冲,空白实验的温度和 功率关系标定表明,最大超功率达到 0.2-0.3 W, 一例结果见下图 4.2.18。从热测量方法看还显粗略, 如果能与质谱测量相结合会更有说服力。



AFM: Projected shape with a width of ~2 μm and a height of ~200 nm TEM: Semispherical size of 50-200 nm

图 4.2.17: 岩手大学的样品特点。在 0.1 mm 厚 Pd 衬底上用 Ar 离子束蚀刻成 200 nm 高度的粗糙结构 (见图左的 AFM 和 TEM 图), 然后再离子溅射约 100 nm 后的 Ni 膜。



图 4.2.18: 岩手大学 Pd/Ni 脱氢过程中的温度脉冲,上图是前 24 h 的结果,下图是前 4 h 的结果。

美国的 Francis Tanzella 报道了布里渊能源公司(BEC)的工作进展【A30, S.2.1】。所用材料是陶瓷管衬底上形成 Cu/Al₂O₃/Ni 三明治结构薄膜(见下图 4.2.19),在~3 atm 氢气氛中施加纳秒电脉冲,这次特异之处是使用一种称为总体量热法(total calorimetry)的热测量方法(见下图 4.2.20), 其特点是把脉冲发生器也内置于量热计内,直接测量进入量热计的直流电,这样既给信号发生器提供恒温环境,还避免了脉冲信号测量的准确性问题。所用电脉冲约 200 V,上升时间约 3 ns,脉冲重 复率 0.1–5 MHz。反应器温度在 200–600℃。他们用 6 个不同的反应器,使用了 300 个不同 Ni 镀层,进行了 2000 次实验。可观测到明显大于输入功率的输出功率,如下图 4.2.21 所示。



图 4.2.20: BEC 公司所用总体量热法示意图,用流量法测量热功率,水流从1处流入,6处流出。



图 4.2.21: BEC 公司的超热结果。图中棕黄色是输出输入比(即 COP),电压脉冲为 90-215 V,脉 冲重复率为 279 kHz。

4.3. 康铜(Cu₅₅Ni₄₄Mn₁)丝

意大利的F. Celani继续其康铜丝-H₂(D₂)系统超热研究,其实验装置结构和实物分别如下图4.3.1 和4.3.2所示。在一例实验中,康铜丝直径为0.2 mm,长158 cm,重0.45 g,绕75圈,最高工作温度到 800°C,输入功率不超过170 W,通过在氢(氘)气中施加电流激发超热。本次进展主要如下:(1) ICCF23用脉冲电流激发超热,ICCF24用直流激发超热,这次直接用市电(230 V,50 Hz)通过高功 率二极管半波整流后得到的脉动直流也可激发出超热,且负脉动得到的超热比直流和正脉动的高, 使用直流时重复性50%,直流加交流时重复性达到80-85%,最大超热23 W(比超热51 W/g);(2) 一般康铜丝要浸泡在亚微米Cu-Ni-Fe粉(吸氢活性材料)和Ca-Sr-Ba(低功函数材料)以及一些特制 的抗烧结添加剂中做表面处理。**未表面处理的康铜丝也有超热,但幅度偏小,效应也不稳定**。如单 极负脉动下输入170 W,超热5.5 W;(3)在氢气氛中退火(即高温氢气氛保持24-96 h)有利于增 加超热。(4)在氢气氛下,升温(如500°C以上)有利于超热增加,作者认为电子发射和表面离子 化与超热有关联【A40, S.4.3】。Celani的装置复杂,从材料准备到反应过程控制,乃至热测量都有 其自身特点,他的表达也总是自创很多词汇,不容易理解,这些都限制了该类系统的发展。



图4.3.1: Celani的反应器结构示意图, 棕色线圈是康铜丝, 容器是壁厚3.2 mm的硼硅酸耐热玻璃管。



图4.3.2: Celani的实验装置图,反应器在不锈钢柱状滤网内。

加拿大湖首大学的Dimiter Alexandrov继续其康铜丝-氘气系统的研究【A33, S.2.4】。实验装置如下图4.3.3所示,把康铜丝绕在氧化铝棒上,用光谱法测量辐射温度并推算热功率。可明显看到300°C时氮气与氘气反应类似,而升温到400°C以后氘气产生明显超热(见下图4.3.4、5)。在670°C附近COP可达3左右(见下图4.3.6)。超热多时³He产量也大(见下图4.3.7)。作者宣称用氘气做燃料,工作温度650–1200°C时,COP=3.9–16,持续时间可达24月。本实验还有待细化,量热和质谱测量都比较粗糙,特别是质谱用的是最简单的残气分析(RGA),质量分辨率很低,他把质量数为3的气体作为³He还需要进一步的证据,质量数为4的气体中有没有⁴He也需要确证,如果把气体成分搞清楚,对康铜-氘气系统的机理及其应用有重大意义。



图 4.3.3: Alexandrov 所用的实验系统。



图 4.3.4: 左图是康铜-氮气系统,右图是康铜-氘气系统。用光谱法测量温度,反应池初始温度都是 300°C(康铜丝为 405°C)时充入氮其或氢气都降温(气体导热的结果)。但当反应池初始温度为 400°C (康铜丝为 524°C)时,充入氮气后温度只降低,而充入氘气后先升温到 420°C (康铜丝为 548°C) 然后才降温。说明康铜-氘气系统产生了异常热效应。



图 4.3.5: 左图是充入氘气前的图像; 右图是充入氘气后的, 放热把反应釜照亮了。



图 4.3.6: 输入 70 W 左右时的温度及 COP 等参数。





图 4.3.7: 用 RGA 分析的 ³He/(⁴He+D₂)比值与超热的关系。

4.4. Ni 基合金-H2系统

法国 Vegatec 公司的 J.-P. Biberian 等人报道了基于水滑石纳米粒子的超热【A26, S.1.1】。Biberian 原来在马赛第一大学工作,从去年的 ICCF24 开始单位署名为 Vegatec 公司,这是一家制造各种规格 管道的公司,应该是他退休后去的,可明显看出实验装置也鸟枪换炮了。在 ICCF24 上已报道了 Ni-Cu 纳米粉的初步结果,这次结果更详细。

纳米材料是从水滑石(结构见下图 4.4.1)开始制作生产的,水滑石是阴离子型层状双金属氢氧化物(Layered Double Hydroxide, LDH),有天然水滑石矿。此处所用的样品在经过高温降解和氢气还原后实际上是合金与氧化物纳米的掺杂材料,详见本小节后半部分 Ruer 的报告。



图 4.4.1: 水滑石结构【A65, P12】。

反应池是直径 20 mm,长 90 mm 的石英管,见下图 4.4.2(上),石英管外用铁铬铝电阻丝(Kanthal wire)环绕加热并覆盖水泥以保温(见下图 4.4.3(左)),外套 3 个不锈钢屏以减少热辐射(见下图 4.4.4(左))。该设计可使反应池达到 1000°C。



图 4.4.2: Biberian 等人所用两种型号的石英试管,上图中的长细管是外加热的,下图中的短粗管是内加热的【A26, S.1.1】。



图 4.4.3: Biberian 等人所用反应池外套保温水泥套(左)及放置反应池的不锈钢法兰(右)【A26, S.1.1】。

上述反应池放在一个直径 63 mm,高 150 mm 的不锈钢真空腔(见上图 4.4.3 (右))内,顶部是 CF67 法兰。真空腔放在法兰形塞贝克量热计(见图 4.4.4)内,该量热计是双层铝柱筒,内外筒之 间串联 50 对 K 型热电偶用于量热,量热计放在恒温水浴中(见下图 4.4.5)。不锈钢真空腔正好能放 入法兰形量热计中,顶部用塑料球覆盖以隔热。三轮实验结果见图 4.4.6-9,分别使用了 11-12g的 Ni/Fe、Ni/Cu 和 Ni/Bi 水滑石样品,最高温度不超过 900°C,这三者的比超热分别为 160、60 和 280 W/kg。一般而言,超热随升温而增加,升温过程(吸氢)中的超热一般大于降温(脱氢)时的。



图 4.4.4: Biberian 等人所用塞贝克量热计及反应釜结构示意图(左)和拆分视图(右)【A26, S.1.1】。 (作者说这是卡尔维(Calvet)量热计,该说法不准确,卡尔维量热计特指双子池设计的塞贝克量热 计)



图 4.4.5: 准备放入恒温水浴的量热计【A26, S.1.1】。

Experiment CR-108

Hydrotalcite with Ni:Fe with ratio 7/1 (10.6g)



图 4.4.6: 10.6 g 的 Ni:Fe = 7:1 的水滑石样品在氢气中超热随温度的变化。红实线是真空空白实验, 蓝线是充氢过程中的超热, 绿线是其后脱氢过程中的超热, 黑线是再次充氢, 间断红线是脱氢时的超热。



图 4.4.7: 12 g 的 Ni:Cu = 7:1 的水滑石样品超热随温度的变化。红线是真空空白实验, 蓝线是充氢 过程中的超热,其他依次是充氢和脱氢过程中的超热。

CR-118



Hydrotalcite with Ni:Bi with ratio 7/1 (11g)

图 4.4.8: 11g 的 Ni:Bi=7:1 水滑石样品超热随温度的变化。红线是真空空白实验,其他依次是充氢 和脱氢过程中的超热。



图 4.4.9: CR-118 实验所用 Ni_Bi =7:1 水滑石粉末 SEM 图,颗粒直径为 23-50 nm。



图 4.4.10: CR-118 实验所用样品放大后用 SEM 分析其单晶颗粒 (左, 左下角刻度是 5 μm),发现主 要是 Ni,还有 Al 和 C (右图)。另外的单晶颗粒是 Bi。



图 4.4.11: 氢气中的标定实验 CR-119, 只使用 ZrO2 和氢气,多数情况在±0.5 W 内无超热。

另一类量热实验使用上图 4.4.2(下)所示的短粗大试管,可放入 130 g 粉末,使用商用陶瓷加 热器件可稳定加热到 1000℃。目前只有少量正结果,最大超热在约 900℃ 时达到 2 W。

Biberian 结果总结如下:(1) Ni-Fe、Ni-Cu 和 Ni-Bi 合金纳米水滑石样品在氢气氛中皆产生超热;(2) 最大超热出现在 Ni-Bi 粉末中,超功率密度为 280 W/kg;(3) 只用升温的办法即可激发超热;(4) 抽真空脱氢的过程更有利于超热激发。

法国 Sart von Rohr 公司(该公司专业生产管道阀门)的 Jacques Ruer 与 J.-P. Biberian 等 6 个单位的学者合作,研究了高温下氢气氛中合金水滑石粉末的电阻率【A65, P12】。本工作可视作 Biberian 结果的补充,他们从水滑石制作过程开始(见下图 4.4.12),然后在高温流动氢气氛中还原。他们测量前把粉末放入反应舟中,底部整体是铜片做电极,顶部也是铜片,在氢气氛下升温还原并在铜片间施加 100 V 电压测量粉末电阻(测量装置见图 4.4.13,电路见图 4.4.14)。



图 4.4.12: 水滑石制作过程。



图 4.4.13: 测量水滑石基材料在高温氢气还原过程中电阻率的方法。



图 4.4.14: 测量水滑石基材料在高温氢气还原过程中电阻率方法的电路图。

氢气还原过程中的温度变化如下图 4.2.15 所示,得到的电阻率如图 4.2.16 所示。





• The resistivity starts to drop above a given temperature that depends on the type of powder

图 4.2.16: 在升温(绿色)和降温(蓝色)过程中的电阻变化。

氢气处理前样品为浅绿色,处理后为黑色,详见下图 4.4.17。氢气还原生成了 Ni-Cu/Al₂O₃纳米 粉末,见下图 4.4.18。可见 Biberian 前面用的材料其实类似于日本小组所用的 Cu-Ni/ZrO₂ 粉末。



图 4.4.17:反应舟中氢气还原前后的粉末材料。
Heating in a flux of hydrogen 300°C-700°C: **Reduction of the oxides** NiO_{5.25}CuO_{0.75}Al₂O₃ Ni5.25Cu0.75Al2O3 (70% Ni/Cu on Al2O3) Black Powder Magnetic (Ni^oCu^o) Brown powder Nanosized NiCu particles supported on an amorphous matrix of alumina cf: He et al, 2012; doi.org/10.1002/anie.201201737 Hydrotalcite is a simple method 3500 3000 500 for the production of NiCu 2500 2000 1500 400 * : NiO, CuO * : Ni/Cu metal nanocrystal nanoalloys 300 200 1000 100 500 0 100 0 20 40 60 80 100 60

图 4.4.18:从水滑石开始生产的 NiCu/Al₂O₃ 纳米材料。

主要结论如下:(1)粉末电阻率很高,每升温100K可降低一个量级;(2)MgO基水滑石在高温仍有高电阻率;(3)电阻率是在松散条件下测量的,压实的结果会不同。

5. 直接产生电能的装置

5.1. LEC

去年笔者介绍 ICCF24 时曾说过 LEC 研究应该增加热测量内容,以鉴别电功率在总超热中的份额,确定电信号是初级效应还是次级效应,本次会议前 E. Storms 就报道了相关结果。Storms 用 Szpak 所述的方法电化学沉积 Pd,然后放入 D₂气体中,用 Pt 片作为集电极收集电子,如下图 5.1.1 所示。 该装置密封在石英管内,外部用电阻丝加热。电流用外部串联的 0.1 MΩ电阻测量。下图 5.1.2 所示 是不同温度下的超热与电子电流,可见电功率明显小于热功率,说明电信号是次级效应。理论上只 有当聚变发生在近表面时电子才可以脱离样品,而热量则无论在哪里产生都可被测得。此外,化学 反应产生的离子和发射电子在氘气中也可产生电流,但这些都是 350℃以上才发生的情况。在 350℃ 以下,可认为都是核反应的结果。



图 5.1.1. Storms 的 LEC 照片。



图 5.1.2. D₂气体中加热共沉积 Pd 时,超功率和 LEC 电流随温度的变化。电子发射极相对于集电极 保持在 0 V,箭头表示测量顺序。先测量超功率后测量电流。温度是在反应器内测量的,但探头不 在样品处。

在两电极间施加电势(见下图 5.1.3),在-100 至 0 V 间电流不变,说明气体电离不是电流主要 来源,因为离子电流会随电压减少而下降(说明气压不高,电子几乎无碰撞经过气体)。当电压相对 于发射极为正时,施加电势等于或大于电子能量时,电子将返回发射极,所以电流随电压增加而减 少。该结果表明大多数电子能量低于 100 eV,因为电子到达材料表面也需要能量,所以收集到的电 子能量不一定是电子本身的能量。这进一步表明电子不可能来自传统化学反应。根据超功率得到的 聚变率为 3.9 × 10¹⁰/秒,而逃逸电子数为 6.2 × 10¹¹/秒,如果这些电子由聚变过程产生,与聚变事件 的数量相比,发射电子要多得多。



图 5.1.3. 298°C 下发射极与集电极之间电压变化时电子电流和超热,电势值是相对于发射极测量的。



图 5.1.4: 另一个有趣的现象,上图中施加电压把电子抑制到 Pd 样品上的行为,当电压到 100 V 时 辐射值会在 200 min 内逐渐回复到 30 V 左右,似乎抑制的电子反而促进了冷聚变过程。

美国 Inovl 公司的 Frank Gordon 和 Harper Whitehouse 报告了 LEC 研究的两大进展【A107, S.13.2】: 一是用液体、凝胶或固态电解质取代气体电解质,增强导电性,减少离子对产生所需能量; 二是把 Pd-H 颗粒混合到电解质中,增强自发电离,从而增加电解质中存在的离子数量。结果如下 图 5.1.5 所示,在负载阻抗为 100 Ω,温度约为 20°C 时峰值功率为 0.478 mW (> 100 µW/cm²),比 ICCF 24 报道的功率增加了 2-3 个量级。本次进展更多偏向机理研究,提高功率输出还需要:(1) 改进活性物质制作配方;(2)增加气体压力;(3)提高工作温度,LEC 已在远低于 0°C 和远高于 100°C 的温度范围内进行了测试;(4)增加活性物质表面积,如把现在的活性电极表面积增加到 1 m²,预计输出还会增加 4 个量级。此外,他们还得出如下结论:(1)LEC 是扩散驱动装置,是电流 源而非电压源(ICCF24 上他们和意大利的 Di Stefano 也得出类似结论);(2)传导方程为优化电极 分离、气体压力等提供了参考,详细建模或数值求解将极大地有助于优化 LEC 功率输出;(3)减少 离子复合的 LEC 设计可以显著提高功率输出。当然,离子产生机理仍不明确,需要深入研究。



图 5.1.5: Inovl 公司最新 LEC 测试结果。

西安秋然实验室的张航重复了 LEC 实验结果【A64, P11】,他所用的 LEC 实物和电路如下图 5.1.6 所示,利用类似于 Di Stefano 的方法,内外管是钛管,间隙 0.5-1 mm,内管外壁电镀铁、镍、铜和钛四种材料。管内是氢气、氘气或空气。主要结论如下:(1)多种情况下都在长达一天的时间 内观测到电压,铜和铁系统中充入空气时观测到最大电压 0.25 V (见下图 5.1.7);(2)未活化的表面无电压;(3)在电镀铜-氢气和电镀钛-氢气情况下观测到电压极性的翻转;(4)实验容易重复;(5)盖革计数器未测到辐射。



图 5.1.6: 张航所用的 LEC 实物(下)和电路图(上)。



图 5.1.7: 钛管电镀铁在空气中的电压(蓝线)和温度(黄线)随时间的变化,总时长约 2.5 h。

5.2. 催化聚变装置

匈牙利的 George Egely 【A99, S.11.2】和 Sebastian Domoszlai 【A100, S.11.3】分别介绍了催化 聚变及所用的热测量方法,此处一并介绍。

他们的催化聚变(catalytic fusion, https://www.catalyticfusion.com/)前几年叫尘埃聚变(dust fusion)。1913年,发现电子的 J.J. Thomson 就在真空管中发现生成了He 和 Ne 【Nature 90 (2259) 645】,而 J.N. Collie 也于1914年报道在放电系统中观测到生成He 和 Ne 【Proc. R. Soc. Lond. A 91, 30】。二战后断断续续至少有15个英语专利涉及过尘埃聚变。Egely 重复出了其中的结果,其特点是通过脉冲放电过程产生了更多的电力并伴随有核产物,其反应物可以是碳粉等尘埃,也可以是氢气或水蒸气。作者认为形成了Kenneth Radford Shoulder 所说的 EVO (Exotic Vacuum Objects,奇异真空体)或其他人所述的凝聚等离体子体团 (condensed plasmoids)等高密度电荷团簇,团簇屏蔽库 伦排斥力,导致质子与电子生成热中子,热中子进一步发生核反应。

Egely 所用的放电装置如下图 5.2.1 所示,核心是一个火花放电管,抽真空后充入 0.3-0.6 bar 的 气体,电极是铝柱,边缘和表面经粗糙化处理,电极间距(毫米级别)可调节,图 5.2.1 (中)的两 铝柱间隙的蓝色光点就是氢气放电产生的。最早 T.H. Moray 用 S、Pb、Cu 和 Al 合金,经复杂的熔 化,退火,冷却,再加热等过程制作成电极。因为条件限制,Egely 只用 Al 作电极。作者曾试验过 钢、铜、钛和黄铜等材料,发现成分的微小变化和表面处理都会引起性能的变化。



图 5.2.1:(上) Egely 所用的放电装置;(中)放电管,(下)电路图。

催化聚变的电路主要由三个部分组成:输入部分包括三节 AA 电池、一个驰张振荡器和电容器 形成脉冲电路,中间是氢氘气体放电管,最后是输出部分(如电阻等负载)。现象可简单描述如下, 当脉冲电压超过放电管的击穿电压后开始放电,放电低于某个电压时重新开始充电-放电过程(见图 5.2.2 (下))。峰值电流 kA 级,脉冲时间短于 1 μs,峰值电压 1–2 kV。因为条件限制,他们研发了 一种间接方法进行热测量,原理如下图 5.2.2 所示,电阻 R_{in}和 R_{load} (R_{in} >> R_{load},也见图 5.2.1)分 别位于一个可以监测温度的充油玻璃管中,先用脉冲电流在不同放电条件下测量功率与温度关系, 实际工作时可通过 R_{load} 温度获得放电输出热功率,因为放电时气体放电管本身产热,所以即使 COP ~1 也意味着产生了超额电能【A100, S.11.3】。

Setup





图 5.2.2:火花放电热测量原理图。上图中两个虚线框内电阻的温度,用于标定热功率。下图是实际 放电过程中的电压脉冲波形,时间尺度在 ns 量级。

作者用电解水产生的氢气作为放电管中的气体(见下图 5.2.3),也曾使用干(纯)氢气,干(纯) 氘气,湿氢气,湿氘气,湿空气作为放电气体,发现纯 H₂(D₂)并非最好,COP = 2.5–3,有时更高。 以前曾用水下活化放电来实现该效应,即用水作为介质也是可以的。



图 5.2.3: 火花放电介质。

剑桥大学用拉曼谱测量阴极上生成了碳化硼 (见下图 5.2.4 所示黑色斑点),可能通过图 5.2.5 所示多步聚变过程生成碳和硼:

UNWANTED SIDE EFFECT: TRANSMUTATION

Carbon deposit appeared on the surface of the cathode if the discharge current exceeded a threshold value





图 5.2.4: 电流超过阈值时在电极边缘形成的碳沉积物,这是光学显微照片。

TRANSMUTATION OF HYDROGEN INTO BORON AND CARBON

The Raman spectroscopy test results of Cambridge University on a cathode: boron carbide.

Traces of carbon were shown at ICCF-24.

The most likely fusion steps are as follows (note the abundance of neutrons!):

| $p + e \rightarrow n$ | $p+n \rightarrow d_2^1$ | $d_2^1 + n \rightarrow t_3^1$ | $d_2^1 + p \rightarrow He_3^2$ | |
|----------------------------------|--|-------------------------------|------------------------------------|--|
| $t_3^1 + p \rightarrow He_4^2$ | $He_{4}^{2} +$ | $He_3^2 \rightarrow Be_7^4$ | $Be_7^4 + d_2^1 \rightarrow B_9^5$ | |
| $B_9^5 + n \rightarrow B_{10}^5$ | $B_{10}^5 +$ | $n \rightarrow B_{11}^5$ | | |
| $B_{10}^5 + d_2^1 \to C_{12}^6$ | $_{2} \qquad B_{11}^{5} +$ | $p \rightarrow C_{12}^6$ | etc. | |
| | | | | |
| Test Results of Catalyti | ic Fusion - Dr. George Egely • egely@egely | | | |

图 5.2.5: 设想从质子开始生成 B 和 C 的核过程。

Egely 曾从事球形闪电工作多年,2013 年开始在 Infinite Energy 杂志上发表十几篇文章介绍尘埃 聚变,其中既有以前的历史,也有他的实验进展。在2016 年 ICCF20 上,他介绍的是 U₂SO₄ 粉末与 碳粒子混合,在微波下加热后γ辐射降低,β放射性增强的工作。现在看来他的工作也属于 LENR, 值得继续关注。作者展望峰值功率密度可达 MW/mm²,持续 ns 到µs,功率是 1±0.5 kW,功率密度 10 kW/kg,估计的反应器和电路造价是 100 USD/kW。

6. 核嬗变, 核产物

6.1. 奇异核径迹

早在 1990 年,日本的松本高明就注意到冷聚变会在固体表面产生奇特的核径迹,这些径迹表现 出周期结构,但多年来这类结果缺乏进一步的研究,在本次会议上,有三个学者讨论了相关问题。

乌克兰独立学者 Alexey Ivanchuk 报道了"火花塞 LENR 的检测"【A52, S.7.3】。他说 LENR 反应池产生未知的辐射产物,在距离最多 30 cm 远处还可在玻璃、塑料和其他固体表面产生径迹。作者用空白 DVD 作为探测器,在第一个实验中,DVD 放在 30 个废旧汽车火花塞(见下图 6.1.1)5 cm 远处,保持一周。结果在 DVD 表面发现了微小的链条状径迹(见下图 6.1.2),而对照 DVD 上无径迹。有意用铁丝、沙粒和室内灰尘刮擦,发现只有把 DVD 表面放置一周后,两片 DVD 相互摩擦,表面积存的室内灰尘可以产生类似的周期性径迹(见下图 6.1.3)。作者估计 DVD 上的径迹是 LENR 产生的未知力推动气溶胶粒子产生的,力大小为 0.01 N 量级(即 1 g 的力)。





图 6.1.1: Ivanchuk 所用的废旧火花塞(左)和 DVD(右)。



图 6.1.2: Ivanchuk 在火花塞附近 DVD 上观测到的径迹。



图 6.1.3: DVD 在室内静置一周后,两片 DVD 相互摩擦,表面积存的灰尘可以产生类似径迹。

为了重新测试第一个实验,在 DVD 上薰一薄层烟灰(见下图 6.1.4)。把这些带烟灰的 DVD 在 200 个废旧火花塞下放置了一个星期,发现了大量的分支径迹(见下图 6.1.5)。第一类是清除烟灰后 残留在 DVD 上的细线。第二种代表粘在一起的树状分支烟灰结构。第三类宽而长,可达几毫米,径迹松散。径迹面积约占光盘表面的 30%。



图 6.1.4: 在 DVD 片上薰制一薄层烟灰。



图 6.1.5: 在使用过的火花塞附近的 DVD 光盘上出现的三种奇怪辐射径迹。

在第二个实验中,将无烟灰的干净 DVD 装在塑料光盘盒内分别放置在汽车发动机上方、发电机上方、电池上方、车内、车身下的谐振器附近和排气管后(见下图 6.1.6)。发动机空转 3 个小时,然后追踪灰尘颗粒径迹。在这次实验中,放置在发动机上方和排气管附近的 DVD 上出现了径迹,而其他 DVD 无径迹(见下图 6.1.7)。是一种未知力把灰尘颗粒压在圆盘上并移动,在 DVD 上留下 细长的灰尘颗粒线。



图 6.1.6: 汽车不同位置的径迹测量。



图 6.1.6: 汽车发动机和排气管处 DVD 上的径迹。

在 ICCF25 会后的 google CMNS 论坛上, Alan Smith 说这是真正的餐桌科学(true kitchen table science),虽然技术谈不上完美,但至少是原创和巧妙的。Jed Rothwell 说 CD 盘类似于 CR-39。E. Storms 认为这些奇特径迹就是 Shoulders 提出的 EVO。

这不是该类实验的第一次报道,2000年时俄罗斯的 L.I. Urutskoev 等人就报道了 Ti 片电爆炸过 程中生成的奇异径迹【英文版见: L.I. Urutskoev, V.I. Liksonov 2000, Ann. Fond. Louis de Broglie, 27, 701】。哈萨克斯坦 Satbayev 大学的 Vladislav Zhigalov 与俄罗斯的 Alexander Parkhomov 总结生成径 迹的形式主要有真空放电、水中放电、辉光放电、电弧放电、Ni-H 反应器、电解、白炽灯、激光和 旋转物体等几种(见下图 6.1.7)。特点是只出现在材料表面;一些是周期性的,但每个有独特的结 构;相同的结构成群出现(每群面积约 1 cm²);离反应釜小于 20 cm;形成径迹的时间跨度很大, 短的以秒计,长的以周计【A105, S.12.4】。



图 6.1.7: LENR 实验中生成的各种奇异径迹【A105, S.12.4】。

他们用 300 W (320 V)的卤素灯 (原理见下图 6.1.8)放在石英管中 (见下图 6.1.9),用循环水 流冷却,把 7 张光盘放在不同位置,其中只有离得最近 (7 cm)的 3 号光盘产生了共 380 mm 长的径迹,其次是灯上方的 1 号光盘产生了共 50 mm 长的径迹 (距离 12 cm),其他 5 张光盘产生的很少 (见下图 6.1.10)。



图 6.1.8: 卤素灯原理图。卤素灯是在灯泡内注入碘或溴等卤素气体,在高温下,升华的钨丝与卤素 生成化合物,冷却后钨会重新凝固在钨丝上,形成平衡的循环,避免钨丝过早断裂,因此卤素灯比 普通白炽灯更长寿。

Source: incandescent lamp



图 6.1.9: Zhigalov 与 Parkhomov 实验装置示意图(中)及照片(右上)及结果(左上)【A105, S.12.4】。

Statistics is gained: 46 disks in 9 exposition



图 6.1.10: Zhigalov 与 Parkhomov 共 46 个 DVD 的 9 次曝光实验中,绝大多数径迹出现在小于 20 cm 距离内。大于 20 cm 后的径迹长度少了两个量级。

Examples of tracks



Total length 15315 mm tracks in this disk

图 6.1.11: Zhigalov 与 Parkhomov 实验中一片 DVD 上的径迹, 一般径迹长 10 mm 量级。



图 6.1.12: 径迹的光学照片和 SEM。每个径迹有独特的模式,在一条径迹内,周期是相同的。



图 6.1.13: Zhigalov 与 Parkhomov 实验中 DVD 径迹的 AFM,可见深度约 1 微米。





Where is the start and where is the end? Is the period the same on all the track length (5 mm)?





图 6.1.15: Zhigalov 与 Parkhomov 实验中 DVD 上径迹周期开始长,后面短,周期从 199 μm 变为 189 μm。在另一例中,周期为 50-65 μm。总而言之,周期在 20-200 μm 之间变化。直径为 7-70 μm。

Smooth tracks (>90% on DVDs)



图 6.1.16: Zhigalov 与 Parkhomov 实验中 DVD 上>90%的径迹是光滑的。

Smooth tracks (AFM)

Smooth furrows, often going in parallel:



图 6.1.17: Zhigalov 与 Parkhomov 实验中 DVD 上径迹呈犁沟状,深度和高度在 0.2–0.3 μm 之间。 估计粒子直径为 6.5–8 μm,每个粒子上的力为 0.5 mN,而 8 微米直径的铁粒子重量只有 20 pN。估 计形成每条径迹的粒子能量约为 2.5 μJ。转换成热,对应于升温 1500 K。

作者估计周期性径迹是几十微米直径的粒子在表面翻滚形成的,而光滑径迹是几个微米直径的 粒子沿表面平移,加热聚碳酸酯到熔点(约 300°C)以上形成的。他们的工作已经发表,详参: V.A. Zhigalov. Strange radiation and LENR: what's the relation? RENSIT, 2021, 13(3):329-348. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.329; Zhigalov V.A et al. Investigation of strange radiation tracks near incandescent lamps and electrolytic cell. RENSIT 2023 15(1) 95-105e DOI: 10.17725/rensit.2023.095. http://en.rensit.ru/vypuski/article/482/15(1)95-105e.pdf。

英国马丁弗莱希曼纪念项目(MFMP)的 Robert William Greenyer 这次报告用分形环形矩(Fractal Toroidal Moment, FTM)理论来解释 LENR 实验【A109, S.13.4】。此处的环形距如下图 6.1.18 所示, 圆周电流形成图 6.1.18 (左)所示的磁矩,环形磁矩就是磁矩也成环形(见图 6.1.18 (右)),环形距 是相对于偶极矩和四极距而言的。看起来环形距就是个微观的托卡马克。Greenyer 认为 FTM 是一种特殊的磁流体结构,是环形或球形等结构,FTM 不仅导致冷聚变,也是球形闪电和 EVO 的起因, 日本松本高明(Takaaki Matsumoto,见下图 6.1.19)最早于 1993 年观测到的径迹也是 FTM 所致。 FTM 是美国等离子体物理学家 Winston H. Bostick 于 1950 年代提出的等离子体团(Plasmoids)概念的发展,等离子体团就是一种环形磁流体结构。



Magnetic moment

Toroidal moment

图 6.1.18: 磁矩(左)与环形矩(右)示意图。



图 6.1.19: 松本高明(图中)已于今年春天去世,这是 Greenyer(左二)与松本一家的合影,两人手持的图片就是松本高明当时观测到的径迹。松本提出了纳豆模型,但影响最大的就是这种奇异径迹。

6.2. 地质核异常

地质环境中的冷聚变也一直受到关注,近年来中国、日本和哈萨克斯坦的相关学者都有研究。 这次浙江大学的周康报道了一个有趣现象,即地热资源丰富的地区几乎没有强震,而地球内部已有 的生热机制尚无法完全解释实际的热释放,他也注意到地质活跃地区地下³He/⁴He 的丰度比异常, 估计这些都与地球内部形成核活性环境中发生 LENR 有关【A29, S.1.4】。

哈萨克斯坦里海理工大学 Gennady Tarassenko 等人继续其地质冷聚变的研究【A59,A67】。奇怪的是从 ICCF20 开始每次会议都有摘要,但一直不见墙报和论文展示更详细的内容。这次内容大体是把地震看作电磁能的释放,地球内部发生着高电压(kV量级)冷聚变反应,通过测量地球强磁场可预测地震。

7. 束靶反应

7.1. 什切青大学及其合作者的工作

本届会议主办方什切青大学(USZ)研究束靶反应多年,所以相关内容较多。

今年 2 月 15 日, USZ 宣布建成了 eLBRUS 超高真空加速器 (http://www.cleanhme.eu/?p=609)。 M. Kaczmarski 介绍了该系统,用电子回旋共振 (ECR)离子源提供电流高达 1mA 和长期能量稳定 性约 10 eV 的轻离子束。一种特殊的减速透镜可使能量低于 1 keV 的束流增大。最大加速电压设定 为 26 kV。靶温度可在液氮到 1000℃的范围内调节。此外,俄歇光谱系统允许在原子清洁度水平上 监测表面污染。UHV 系统与高电流 ECR 加速器相结合,并且能量分辨率仅为几个电子伏特,允许 可靠地测量低能聚变截面。不仅可测量低能 D-D 反应,还有希望确定分支比和角分布,可能有助于 解决冷聚变之谜【A68】。

USZ 的 Mathieu Valat 等人提议建立一个更接近温热能量(thermal energies)的束靶反应系统, 束能量低至 1 keV, 束流达 1 A, 不仅装备有 NaI+TI、S-PIPS、HPGE 和 BC408 等探测器,还装配 有近红外可观测热点,有 XRD、PAS、SANS 等在线材料表征设备,还有 RGA 分析气体产物【A66 (会议摘要集有误,把其他人的摘要放这里了,Krivit 版本摘要集有相关内容),P14】。

波兰科学院核物理研究所的 W. Parol 等人发展了用飞行时间法测量束能量分布的方法,可实现在 70-220 MeV 范围内束能量精度优于 0.2%,以保证结果准确性【A61, P8】。

USZ 的 R. Dubey 报道了温热能量下固态 DD 聚变实验中电子观测的基准化分析【A45, S.5.4】。 根据 K. Czerski 的理论,低能时 DD → ⁴He 反应道存在 DD 阈值共振因此截面大幅增强,这种共振 最可能的衰变通道是通过电子-正电子对(e⁻-e⁺)产生而出现能量高达 22.84 MeV 的电子连续谱(见图 7.1.1)。实验中利用 6–20 keV 的 D 束轰击 ZrD₂靶,然后用 5–125 µm 厚 Al 膜作为挡片,和 1–3 mm 厚的硅面垒探测器(SSB)测量能谱(见下图 7.1.2),同时利用 Geant4¹程序计算能谱,两者比较(见 下图 7.1.3)。下图 7.1.4 所示是不同氘束能量下 e/p 比值,曲线是理论值,散点是实验值,图例中的 1、2、3 mm 是探测器厚度,而 20、40 和 10 eV 指 DD 阈值共振宽度(根据组内其他人报告,单位 eV 应该是 meV)。用 NaI 探测到的中子引起的光子能谱也与 Geant4 拟合相符(见下图 7.1.5)



• Presence of a 0+ threshold resonance at 23.85 MeV *



• Decay through Internal Pair Production * K. Czerski, et al., EPL 113, 22001 (2016)

图 7.1.1: DD 聚变 0⁺阈值共振示意图,即 ⁴He 的 0⁺态(右图间断红线)正好在 23.85 MeV 高度,与 反应释放能量相同,发生共振【A45, S.5.4】。

¹ Geant4(GEometry ANd Tracking,几何和跟踪)是由 CERN(欧洲核子中心)开发的蒙特卡罗应用软件包,用于 模拟粒子在物质中的输运过程。



Thick ZrD 2 target that was tilted at 45° to the beam, resulting in the beam spot size of 7x12 mm. D2 beam : 6-20 keV, different thickness of detectors (1-3 mm) and Al absorber (5-125 um)

图 7.1.2: USZ 实验装置图【A45, S.5.4】。



(b) Geant4 MC



图 7.1.3:实验(左)与 Geant4 模拟(右)对比图 【A45, S.5.4】。



图 7.1.4: 不同氘束能量条件下 e/p 比值【A45, S.5.4】。



图 7.1.5: 用 Nal 探测到的中子引起的光子能谱(左)及与 Geant4 拟合的比较(右) 【A45, S.5.4】。

USZ 的 Gokul Das Haridas 详细介绍了温热能条件下 DD 反应的 Monte Carlo Geant4 模拟【A53, S.7.4】。该软件模拟不同厚度 SSB 测量β的过程如下图所示,可见符合很好。模拟表明,对于分支比研究而言,探测器最佳厚度为1 mm 和2 mm。



图 7.1.6: Geant4 拟合不同厚度 SSB 探测器测量 204TI 和 60Co 的β射线的响应【A53, S.7.4】。

波兰什切青海事大学的 Agata Kowalska 等人用 PAS(正电子湮灭谱)研究发现氘束注入 Zr 金属样品产生了非常高的空位密度,空位均匀分布在氘核射程之内,正电子湮灭寿命表明是单空位缺陷。取 3°、5°和 10°三种 XRD 掠射角,发现氧辐照作用下空位向更深层运动,该结果也由 PAS 测量的空位深度分布所证实。空位扩散会降低 ²H(*d*,*p*)³H 反应的增强因子【A81】。在 ICCF24 上, Agata Kowalska 就介绍过 PAS,这次有了具体结果,当时她应该是 USZ 的学生。

USZ 的 K. Czerski 试图解释温热能量下质子引起的核反应【A46, S.6.1】,虽然考虑了各种屏蔽和共振效应,但 d + p 反应的截面仍比 dd 反应小 4-6 个量级,而 p + p 反应截面比 dd 反应的小 16 个量级,目前还无法解释实验上氢氘两系统超热接近的实验结果。

土耳其 Eskişehir 大学的 A. I. Kilic 等人研究了低能下 DD 反应分支比和反应截面的材料依赖性 【A47, S.6.2】。Kilic 是理论家,曾是 Czerski 的研究生。先前对 Al、Zr 和 Ta 金属靶中氘核聚变反 应的测量表明,分支比和角分布的能量依赖性与气体靶中类似。然而,对于 Sr 和 Li 靶,当氘核能 量低于 20 keV 时,观测到中子通道明显受抑制且角各向异性增加(见下图 7.1.7 和 7.1.8)。这种不 寻常的效应可归因于 DD 反应中的共振,而在之前使用的模型中未考虑这一点。为解决该问题,应 用了一种基于 T 矩阵元的替代模型,该模型曾用于解释宽的 4He 共振。该方法可包含共振之间的干 扰效应。发现理论结果与大多数材料的实验数据和多通道 R 矩阵理论非常吻合。然而,为解释 Sr 和 Li 获得的实验数据,需要存在一个新的 0⁺阈值共振,该共振具有单粒子氘-氘核结构和窄的宽度。 结果发现该 0⁺共振的贡献对反应截面有显著影响,还会降低观测到的大屏蔽能。这些发现突出了共 振贡献的重要性,以及靶材料在理解涉及氘核的核反应中分支比和角分布的能量依赖性方面的作用。



图 7.1.7: 上图是 DD 反应中(d,n)反应(红线)与(d,p)反应(蓝线)在不同靶材料中的角各向异性。 下图是 DD 反应中(d,n)反应截面与(d,p)反应截面在不同靶材料中的比值【A47, S.6.2】。



图 7.1.8: Sr 和 Ta 两种靶材料中 DD 两种反应的参数。上左图是(d,n)反应微分截面随角度的勒让德 分布中第二项(a)和第三项(b)的比值;上中图是(d,n)反应截面与(d,p)反应截面比值;上右图是 (d,p)反应微分截面随角度的勒让德分布中第二项(a)和第三项(b)的比值。下表是(d,n)和 (d,p)反 应截面中的参数【A47, S.6.2】。

Kilic 还预言用金属框架结构提高 LENR 的方法【A82, P30】。1996 年 J. Pendry 提出有效电子 质量与磁场相关以解释金属框架结构的介电响应。此处有效电子质量与固体电子论中的不一样,作 者预言这类结构(见下图 7.1.9)有助于提高 LENR(见下图 7.1.10)。



图 7.1.9: Kilic 设想的金属框架结构【A47, S.6.2】。



图 7.1.10: Kilic 预计铝丝网上的屏蔽能可达 7.4 keV 【A47, S.6.2】。

N. Targosz-Ślęczka 报告了 USZ 和斯洛文尼亚约瑟夫斯特藩研究所(Josef Stefan Institute, JSI) 两小组合作的束靶实验结果【A91, S.9.2】,实验特点是同时用直接运动学(direct kinematics)和反向运动学(inverse kinematics)研究束靶反应(见下图 7.1.11),前者是正常的束靶反应,如²H(d,p)³H; 后者是重核轰击轻核的束靶反应,如²H(¹⁹F, p)²⁰F。结果在 Zr 靶中,USZ 发现²H(d,p)³H 反应屏蔽能为 100–500 eV,而 JSI 小组发现 ²H(¹⁹F, p)²⁰F 反应屏蔽能为 7 keV。用自洽介电函数理论研究核反应过程,该理论考虑极化屏蔽(polarization screening)和内聚屏蔽(cohesion screening)的静电局域场修正(static local field correction),结果这两者的屏蔽能分别最多只能到 111 和 734 eV。这只是未考虑晶格缺陷情况下的结果,即只是屏蔽能的下限。实验上的屏蔽能会受到缺陷的增强。

Experimental methods @ JSI



图 7.1.11: 直接运动学 (direct kinematics) 和反向运动学 (inverse kinematics) 束靶反应的区别 【A91, S.9.2】。

斯洛文尼亚 JSI 的 A. Cvetinović 报道了 Pd 中的电子屏蔽【A94, S.10.1】。特别注意到屏蔽能与 入射粒子 Z 数量的关系不是与 Z 呈线性正比,而是比 Z²还高些(见下表 7.1.1)。

| Target | Stoichio-metry | | $U_e(\text{keV})$ | |
|------------------------------|--------------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| | | ⁷ Li | ¹¹ B | ¹⁹ F |
| $\overline{U}_{\mathrm{ad}}$ | | 0.24 | 0.68 | 2.19 |
| TiH | 1.03 ± 0.04 | 3.9 ± 0.4 | 6.7 ± 1.8 | 62 ± 6 |
| Pd | 0.21 ± 0.03 | 3.6 ± 0.7 | 8.0 ± 1.9 | 63 ± 6 |
| W | $(4.2 \pm 0.2)10^{-2}$ | 5.9 ± 0.9 | | 74 ± 15 |
| Graphite | $(5.9 \pm 0.3) 10^{-2}$ | 10.3 ± 0.4 | 32 ± 4 | 115 ± 8 |

表 7.1.1: 不同材料中不同反应的屏蔽能【A94, S.10.1】。

为了研究电子屏蔽的影响,特别选了两种 Pd 材料,一种是退火形成软钯,可在常温常压下吸 H(D)达到 70%的 H(D)/Pd;另一种是冷轧形成的硬钯,达到 47%的 H(D)/Pd,用称重法和核反应分 析 (NRA)测量 H(D)/Pd。D 的深度分布用 0.629–4.297 MeV 的 ³He 通过测量 ²H(³He,p)⁴He 反应的 质子获得,各种金属中的 D 分布如下图 7.1.12 所示。软钯与硬钯中 ²H (¹⁹F,p)²⁰F 反应的屏蔽能分别 为 3 和 18 keV,即硬钯中比软钯的高 6 倍 (见下图 7.1.13 和表 7.1.2)。对这两种金属氢化物的 NMR 测量也表明,软钯的奈特位移峰是单峰,而硬钯是双峰 (见下图 7.1.14),说明后者的 H 不仅仅在传 统的 Pd 八面体位上,也分布于缺陷和位错等处 (见图 7.1.15),这应该是硬钯屏蔽能高的原因。



图 7.1.12: JSI 用核反应分析 (NRA) 获得不同材料中的 D 分布 【A94, S.10.1】。



图 7.1.13: 软硬两种钯材中 ²H (¹⁹F, p)²⁰F 反应不同的屏蔽能, 软 Pd 靶中屏蔽能为 3 keV, 而硬 Pd 靶 中屏蔽能为 18 keV 【A94, S.10.1】。

| 表 7.1.2: | 硬钯中4 | 1种不同逆向运动学反应的屏蔽能比较【A94, | S.10.1]. |
|----------|------|------------------------|-----------|
|----------|------|------------------------|-----------|

| Reaction | U _{ad} [keV] | U _e [keV] |
|-------------------|-----------------------|----------------------|
| ⁶ Li+d | 0.24 | 4.7±1.3 |
| ⁷ Li+p | 0.24 | 2.9±0.2 |
| ¹⁹ F+p | 2.19 | 18.7±1.5 |
| ¹⁹ F+d | 2.19 | 18.2±3.3 |

Target analysis:

Nuclear Magnetic Resonance and Knight shift

O The Knight shift originates from the interaction of conducting electrons in metals with nuclear spins and is proportional to the density of electronic states at the Fermi level at the nucleus site



图 7.1.14: 两种氢化物的 NMR, 左图中黑线是硬钯结果, 红线是软钯结果。右上表是理论与实验值 比较, 软钯实验值与理论值定性一直, 硬钯则完全不同【A94, S.10.1】。



图 7.1.15: 左图的软钯中 H 在八面体位,右图的硬钯中 H 还分布在晶界,位错和空位等处【A94, S.10.1】。

7.2. 其他小组的工作

兰州大学的王铁山综述了金属环境下亚库仑势垒条件下的轻核聚变【A90, S.9.1】。在金属氘化物中进行的低能 DD 聚变会遇到氘含量无法准确确定的问题,所以他们近年来主要进行 p+⁷Li、d+⁶Li 和 d+⁹Be 的束靶反应研究,其中 Li 和 Be 作为金属靶可避免靶材料的浓度问题。结果发现金属环境中的屏蔽能普遍高于理论预测,如液态 Li 中的屏蔽能随温度降低而升高,最大达 600 eV,在 Be 中为 545 ± 98 eV。近年来金属环境中 dd 聚变屏蔽能异常结果已有很多,此处轻核反应屏蔽能丰富了 类似实验结果。

美国的 S. Forbes (Hagelstein 小组)介绍了 MIT 束靶实验进展【A93, S.9.4】。用 DC-25 离子源 先在 Ti 靶中注入 D 形成 TiD_x; 然后用 Ar 束激发 (见下图 7.2.1 和 7.2.2),在用 1.59 mm 厚 Ti 靶实 验中,Ar 激发时用 SSB 观测到 30-36 MeV 的带电粒子和中子信号 (见下图 7.2.3)。

DC-25 ion source (Oxford Applied Research)



| Model | DC25 | DC25s | DC150 |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------|
| Standard in-vacuum length | 100mm | 100mm | 230mm |
| Beam diameter | 25mm | 25mm | 150mm |
| Mounting flange * | NW63CF | NW63CF | NW200CF |
| lon beam energy | 100eV-1keV | 10eV-200eV | 100eV-1keV |
| Beam current | 40mA (max)** | 5mA (max) | 300mA (max) |
| Operating gas flow | 3-10 sccm | 3-10 sccm | 15-20 sccm |
| Power supplies | Included (single unit) | Included (single unit) | Included |
| Grid material | Inconel, Mo*** | Inconel, Mo*** | Inconel, Mo*** |

* For externally mounted source. Internally mounted sources are also available ** Gas dependent

*** Parallel, concave, convex grid-set options

图 7.2.1: MIT 的 Forbes 等人所用的离子源【A93, S.9.4】。

Vacuum chamber set up



图 7.2.2: MIT 的 Forbes 等人的束靶实验装置【A93, S.9.4】。

Low-level energetic ion emission



950 eV D and 950 eV Ar

Neutrons correlated with charged particles



图 7.2.3: 上图是 MIT 的 Forbes 等人用 950 eV 离子束注氘入 1.59 mm 厚 Ti 片, 然后 950 eV Ar 粒子 激发出 30–36 MeV 粒子实验结果, 下图是测到带电粒子时中子计数也相应密集【A93, S.9.4】。

因为厚靶中只有部分高能带电粒子可以逸出,所以他们制造了 5 μm 厚的薄 Ti 靶,再用 2 mm 厚的 SSB 紧贴在薄 Ti 靶上以测量到更多带电粒子,结果在 Ar 激发时测到 3-6 MeV 的带电粒子(见下图 7.2.4)。在另一组实验中, Ar 激发时产生约 47 MeV 的带电粒子,但在 Ar 停止后的 40 h内产 生了 1-11 MeV 的带电粒子(见下图 7.2.5)。作者估计这些带电粒子是发生单个或两个 DD 聚变形成 ⁴He 后能量通过 Ti 裂变产生 p 或α而放出的,见下图 7.2.6。该实验的问题是 SSB 只标定到 5 MeV,对于 30 MeV 以上未标定,所以高能部分还有待确认。

MeV counts correlated with Ar beam



图 7.2.4: MIT 的 Forbes 等人用 5 μm Ti 膜在 Ar 粒子激发 TiD_x 时观测到 3-6 MeV 之间的带电粒子 【A93, S.9.4】。

Energetic ion emission with "thin" Ti foil



图 7.2.5: MIT 的 Forbes 等人的 Ar 粒子激发 TiD_x 实验, Ar 离子激发停止后 40 h 内测到的带电粒子 【A93, S.9.4】。



图 7.2.6: MIT 的 Forbes 等人设想的高能带电粒子产生途径【A93, S.9.4】。

美国的 L. Forsley (NASA GRC 与环球能源公司等合作)讨论了低能束靶反应过程中等离子体 引起的电子屏蔽【A43, S.5.2】,他的中心思想是因为一定能量的离子在固体中的慢化距离分布在布 拉格峰(Bragg Peak)附近很窄的范围内(这正是离子束能高精度杀死癌细泡的原理,见下图 7.2.7)。 离子在慢化过程中的线性能量传递(linear energy transfer, LET)产生了等离子体屏蔽,而能量在慢 化过程中损失不大,只有在布拉格峰处损失严重,所以屏蔽在此处达到极大值,屏蔽可促进核反应 几率。作者说 PdD 阴极电解重水与 2.9 MeV 电子在 TiD 中韧致辐射都产生了类似的中子能谱(见下 图 7.2.8),说明两者有类似机理。GRC 这些年一直研究高能电子辐照金属氘化物通过多步过程产生 DD 聚变中子。但该理论中的高屏蔽能是传统理论无法解释的,>4 MeV 高能中子能谱的解释也显牵 强。



图 7.2.7: DD 聚变产生的质子在 PdD 中慢化产生的布拉格峰【A43, S.5.2】。



图 7.2.8: Pd 电解产生的中子能谱(左)和 2.9 MeV 电子韧致辐射在 TiD 中产生的中子能谱,两者 相似【A43, S.5.2】。

8. 激光作用

美国陆军工程兵团寒区研究与工程实验室(CRREL)的 Benjamin Barrowes 介绍了激光辐照 Pd 丝样品的结果【A92, S.9.3】。与去年用的 Pd 锭相比,今年用的是直径 0.25 mm,长 2.5 cm 的 Pd 丝, 用不锈钢鳄鱼夹固定,引线是 Ni 丝,见下图 8.1。先在 5 mtorr 真空中加 3 A 电流(2–3 W)加热 Pd 丝到 600℃,持续 60 min,烧掉氧化层。然后充入 3 bar 氘气或氢气,进行 20 min 周期的循环:(1) 无电流,无激光 10 min;(2)加电流(7A/10 W,在氘气中会发光)5 min;(3)加电流并激光照射 5 min。加热会使 Pd 丝脱氘,一般 5 min 内即可脱除,放出的氘引起气压增加。在一个周期内气压 变化 0.1 bar,据此变化估计 D/Pd = 0.85,一次循环好几天。D/Pd 随循环次数而增加。



图 8.1: CRREL 所用 Pd 丝, 中图有激光照射, 按照 ICCF24 报道, 应该是 640 nm, 5 mW 脉冲激光。 右下图是电流通过 Pd 时的情景【A92, S.9.3】。 在加热过程中引入空气后会在 1/4 秒时间内发光并有爆响声,炸出的碎片如下图 8.2 所示,用 SEM 分析发现是 F和 C,分别占 58%和 42%。从组分看似乎是特氟龙,但反应釜内并无该材料(四 氟分子式是 CF₂, C和 F分别占 24%和 76%)。还报道产生了 Be,但未见具体信息。如果在未加电 流期间引入空气,未看到能量释放,但观测到中子猝发,如下图 8.3 所示。



图 8.2: Pd 在氘气中加电流过程中引入空气后发生爆炸产生的碎片【A92, S.9.3】。



图 8.3: Pd 丝引入空气后产生的中子猝发信号【A92, S.9.3】。

美国 Florian Metzler (中文名傅睿恩)介绍 MIT (作者中无 P.L. Hagelstein)、剑桥大学和苏黎世 理工联合小组的实验计划,目的是测量激光照射金属氢化物产生裂变并发射中子,装置示意于图 8.4。 他们的工作受到 ARPA-E 的资助,小组平均年龄只有 32 岁。目前还处于准备阶段【A38, S.4.1】。



图 8.4: MIT、剑桥和苏黎世理工联合小组的激光照射金属氢化物靶的核产物测量实验计划【A38, S.4.1】。

在另一篇英国剑桥大学 Jonah Messinger 作为第一作者的摘要中,该小组介绍了表征非平衡条件 下金属氢化物中发生量子相干聚变-裂变反应的方法,这些反应包括对称和非对称裂变,测量产物集 中于初始材料的同位素分布变化,核辐射以及用 NAA 和 MS 测量核产物,看起来也是准备工作, 无具体内容【A71】。

冰岛大学的 S. Olafsson 报道钽箔中吸收激光加速氢里德伯物质的飞行时间表征【A44, S.5.3】。 当吸收氢里德堡物质的钽箔受到 1064 nm, 100 mJ, 5 ns, 10¹²–10¹⁶ W/cm² 的激光激发时,观测到 0.1–0.5 c 快粒子的产生,快粒子具有正电荷。该类实验的问题也是信号微弱,需要确认。

意大利 FutureOn 公司的 U. Abundo 等人(G. Parchi 组) 用 ³He 正比计数管测量 DD 束靶反应 产生的中子, 靶材料有金属(W、Ti 和 Ir)和氧化物(Fe₂O₃和 Al₂O₃基材料)两种, 前者的中子计 数更高。特别是当用于乙苯脱氢的钾助催氧化铁催化剂(potassium-promoted iron oxide catalyzer)作 靶材料时中子产率比钛靶的高 1.5 倍。根据他们的实验结果,可以验证催化剂表面的氘浓度很高, 比金属氢化物中的都高。用 ⁶Li 掺杂的氧化铁靶可以产生更多的中子(见下图 8.5),金属靶也有类 似效果。作者原来的目的是验证 Holmlid 的超密度氢模型【A83】。



图 8.5: Abundo 等人在不同加速电压下于 6Li 掺杂氧化铁靶中测量到的累积中子【A83】。

冰岛大学的 S-Z. Gundersen 和 S. Olafsson 发现当氢进入钾助催氧化铁催化剂时,催化剂会产生 类似于 X 射线的辐射,可用好几种探测器测到。辐射是各向同性的,可穿透 3 mm 厚钢板和几米厚 的空气。图 8.6 所示是覆盖铝膜的光电倍增器在吸氢前后测到的信号,吸氢前是 170 cps,吸氢后是 1423 cps,累积时间 500 s 【A79】。



图 8.5: 冰岛大学用覆盖铝膜的光电倍增器在吸氢前后测到的类 X 射线信号 【A79】。

罗马尼亚国家物理与核工程研发所(IFIN-HH)的 Anissa Bey 介绍了在极端光学基础设施-核物 理(ELI-NP)上进行核异构体研究的激光电子驱动轫致辐射伽马源的调试【A98, S.11.1】。以高功率激 光(1 PW、20 PW 和 100 TW 三个光源)通过康普顿散射的电子产生高亮度高强度γ光(最大 19.5

MeV), γ再与核材料发生光核反应——如(γ,n)反应——从而研究天体核物理过程,图 8.6 和 8.7 分别 是原理和装置示意图,目前处于调试阶段。该装置是 10 多年前由欧盟委员会批准的预算约 8.5 亿欧 元的三个 ELI 项目之一,其中粒子与 X 射线源 (ELI-Beamlines) 装置和阿秒光脉冲源 (ELI-ALPS) 装置分别建于捷克和匈牙利。



图 8.6: ELI-NP 原理图【A98, S.11.1】。



图 8.7: ELI-NP 装置示意图【A98, S.11.1】。

9. 超声空化作用

台湾大学的黄秉钧(现在主要供职于江陵关系企业)小组(共包括6个单位)继续报道前几届 会议上介绍过的蒸汽压缩空化(VCS)产生超热与核产物的结果【A95, S.10.2】。前几年他们观测到 采用双管换热器,用蒸汽发生器为热源,用脉冲水流产生极端空化,当COP>1.05时在破裂铜管上 测到 3-4 倍的C含量升高,10倍的O含量升高,1.4-4.4倍的Fe含量升高(见下图 9.1 和 9.2)。



图 9.1: 黄秉钧组近年来超声空化装置示意图【A95, S.10.2】。

Test of DHX

J. Condensed Matter Nucl. Sci. 36 (2022) 247–265



图 9.2: 黄秉钧组近年在 VCS 中观测到的超热及元素异常【A95, S.10.2】。
最近的进展包括采用更坚固的结构以避免材料损伤,用多种共振器以增强效应(见图9.3),特 别是采用质谱测量非凝结气体(见图 9.4)。结果在 14 个采样中,当出现超热时都测到类似的气体质 谱, 谱峰都在 m/z < 50 范围(见图 9.5)。效应最显著的是测到 m/z 44 的二氧化碳, 表 9.1 中 K44 > 1.5 意味着产生了 CO_2 , 而相应的 COP > 1.0, 至少说明 C (因为水中有 O_2) 是与超热对应的一种核 产物。为进一步验证 CO2 产生, 在测量质谱前令气体经过 Ca(OH)2 吸收层, 结果 m/z 44 信号显著降 低, 说明确实是 CO₂(见表 9.2)。另一个核产物是 Ne-22, 图 9.6 中浅蓝色柱是 K22, K22 > 1.5 意 味着产生了显著的²²Ne,而没有产生超热的四个样品(红色箭头对应的柱状图)的 K22 值都很小。 因为 CO₂²⁺也是 m/z 22, 所以也用 Ca(OH)₂ 吸收层来比较。表 9.3 中 K22a > 0.2 意味着产生了 ²²Ne, 对于 CO2样品气,该值只有 0.006,可见产生显著超热的都产生了 ²²Ne。另一个核产物是 ¹⁷O, ¹⁷O 表现在 m/z 19(即 H2¹⁷O⁺),图 9.7 中两个柱状图 R198(蓝色)和 LL198(浅蓝色)都表示¹⁷O 的产 生,可见只有产生超热的样品中有显著¹⁷O。¹⁷O的第二个证据是 m/z 33 (¹⁶O¹⁷O),图 9.8 中参数 K33 也表示产生超热的样品中有显著¹⁷O。¹⁷O的第三个证据是 m/z 45 (C¹⁶O¹⁷O), 图 9.9 中 10 个产 生超热的气样中有9个K45>1.5,而无超热的很小。作者推测¹⁷O是H-¹⁶O聚变的结果,而¹²C和 ²²Ne 是两个 ¹⁷O 聚变的产物 (见图 9.10)。

2. Recent development (2021-2023)



· New reactors using strong and simple structure for easy scale-up (US patents pending)

图 9.3: 黄秉钧组近三年的改进包括采用更坚固的结构及多种共振器 【A95, S.10.2】。

COP Test facilities





9



- No significant m/z signals at m/z 50 higher.
- All gas samples have similar mass spectrum except the signal intensity.
- Serious signal interference from gas contamination is not seen.





表 9.1: 黄秉钧组 14 个气体质谱结果中 m/z 44(即 CO₂)的比较【A95, S.10.2】。

3.2 Presence of CO2

• Proof from m/z signal ratio K44

- > m/z 44 signal is produced from CO2 since no significant m/z signals at m/z 50 higher.
- ▶ 4 gas samples are from reactors without LENR (COPx <1.05): Tube9, 12, 17, 27.
- > K44 is defined using internal standard (m/z 40), which provides more accurate results.
- > the large signal ratio K44 (71.0 or >7) strongly suggests the significant presence of CO2.

 $I44(gas) = m/z 44(gas) \div m/z 40(gas)$ $I44(air) = m/z 44(air) \div m/z 40(air)$ Isotope ratio: K44 = I44(gas)/I44(air)

| Gas sample ID | Tube6 | Tube7 | Tube8 | Tube9 (steam) | Tube10 | Fube12 failure product | Tube13 | Tube14 | Tube 16 | Tube 17 baseline test | ube 18 | Tube 23 | Tube 24 | Tube 27 failure product |
|---|--------------|--------------|--------------|------------------|--------------|------------------------------|----------|----------|----------|-----------------------------|----------|----------|----------|-------------------------------|
| Gas source (Reactor) | VCS (5RT) | VCS (SRT) | VCS (5RT) | only boiler | VCS (5RT) | JT1-n35 | DHX-2B | JT4-BV | DHX-2B | VCS- NTU(c) | JT3∙CV | nDHX-2B | VCS-NTU | JT5-A5 |
| m/z 44(gas) peak signal | 4.46E-07 | 3.605E-06 | 1.89E-05 | 1.68E-08 | 7.50E-08 | 2.00E-08 | 1.50E-07 | 7.15E-07 | 1.97E-07 | 1.19E-07 | 1.90E-07 | 3.34E-07 | 1.09E-05 | 1.90E-07 |
| m/z 44(air) peak signal | 2.77E-07 | 2.857E-07 | 2.70E-07 | 1.79E-08 | 4.00E-08 | 5.10E-08 | 6.00E-08 | 5.50E-08 | 1.10E-07 | 8.01E-08 | 1.10E-07 | 1.39E-07 | 1.39E-07 | 1.39E-07 |
| LENR (with COPx > 1.05) | Y | Y | Y | n | Y | n | Y | Y | Y | n | Y | Y | Y | n |
| LENR index: Measured COPx | 1.53 | 1.61 | 1.61 | 1.0 | 1.51 | 1.02 | 1.17 | 1.10 | 1.20 | 1.02 | 1.05 | 1.20 | 1.57 | 1.03 |
| m/z 40(gas) peak signal | 2.60E-06 | 3.30E-06 | 2.41E-06 | 1.24E-07 | 3.49E-07 | 1.76E-07 | 5.89E-07 | 4.96E-07 | 8.73E-07 | 6.08E-07 | 2.85E-07 | 1.34E-06 | 1.39E-06 | 1.29E-06 |
| m/z 40(air) peak signal | 2.64E-06 | 2.57E-06 | 2.57E-06 | 1.36E-07 | 4.41E-07 | 4.40E-07 | 5.21E-07 | 4.89E-07 | 9.54E-07 | 1.34E-07 | L.37E-07 | 1.26E-06 | 1.26E-06 | 1.26E-06 |
| 144(gas) = m/z 44(gas) ÷ m/z 40(gas) | 0.17 | 1.09 | 0.78 | 0.14 | 0.22 | 0.11 | 0.25 | 1.44 | 0.23 | 0.19 | 0.67 | 0.25 | 7.85 | 0.15 |
| 144(air) = m/z 44(air) ÷ m/z 40(air) | 0.10 | 0.11 | 0.10 | 0.13 | 0.09 | 0.12 | 0.12 | 0.11 | 0.12 | 0.13 | 0.12 | 0.11 | 0.11 | 0.11 |
| Internal standard ratio: K44 = I44(gas)/I44(air) | 1.63 | 9.84 | 7.47 | 1.03 | 2.37 | 0.98 | 2.21 | 12.8 | 1.96 | 1.46 | 5.56 | 2.26 | 71.0 | 1.33 |
| K44 > 1.5 (presence of CO2) | Y | Y | Y | n | Y | n | Υ | Y | Y | n | Y | Y | Y | n |

表 9.2: 黄秉钧组在测量质谱前令气体经过 Ca(OH)2 吸收层,结果 m/z 44 信号显著降低,说明确实 是 CO2 【A95, S.10.2】。

Proof from m/z 44 signal reduction by CO2 absorption of gas samples

- To identify CO2, the gas sample flows through an absorber, calcium hydroxide Ca(OH)₂, to absorb CO2 before entering MS.
- Measuring the m/z 44 signal reduction of the gas sample with and without CO2 absorption, we can identify the presence of CO2, through the ratio Ab44 = m/z 44(Y)÷m/z 44(n)

| Gas sample | Reactor | COPx | CO2 absorption | m/z 44 | Ab44 = m/z 44(Y) ÷ m/z 44(n) | Reduction of m/z 44 (1 – Ab44) | |
|------------|-----------|----------|-------------------|----------|---------------------------------|-----------------------------------|--|
| D | Reference | | n | 4.62E-04 | 0.010 / + 1) | Y (92%) | |
| Pure CO2 | gas | NO LENK | Y | 8.93E-06 | 0.019 (< 1) | | |
| Atmosphere | Reference | | n | 1.87E-06 | 1 1 4 | n | |
| air | gas | NO LEINK | Y | 2.14E-06 | 1.14 | | |
| MS blank | Reference | | n | 8.09E-06 | 0.09 (~ 1.0) | | |
| | gas | NO LEINK | Y | 7.96E-06 | 0.98 (≈ 1.0) | n | |
| Tube16 | | 1 20 | n | 1.99E-07 | 0.27/+1) | Y (63%) | |
| | DHX-2B | 1.20 | Y | 7.47E-08 | 0.37 (< 1) | | |
| Tube 20 | VCS-NTU | 1.54 | n | 4.42E-06 | 0.74/+1) | V (260/) | |
| Tubess | | | Y | 3.28E-06 | 0.74 (< 1) | 1 (50%) | |
| Tube/0 | VCS NTU | 1 21 | n | 6.70E-06 | 0 52 / 21) | V (100/) | |
| Tube40 | VC3-INTO | 1.21 | Y | 3.51E-06 | 0.52 (< 1) | 1 (40%) | |
| Tube42 | PDUY 200 | 1 22 | n | 1.68E-05 | 0.20/~1) | V (000/) | |
| | IIDHA-266 | 1.22 | Y | 3.40E-06 | 0.20 (< 1) | 1 (00%) | |
| Tube// | DUV 200 | 1 16 | n | 9.98E-06 | 0.46/~1) | Y (54%) | |
| Tube44 | IIDHX-266 | 1.10 | Y | 4.62E-06 | 0.40 (< 1) | | |
| Tubell | DUV 200 | 1 15 | n | 5.52E-06 | 0 59 (< 1) | Y (42%) | |
| Tube46 | IDHX-288 | 1.15 | Y | 3.20E-06 | 0.56 (< 1) | | |

Ab44 < 1 reveals the reduction of m/z 44 signal by CO2 absorption.</p>

Presence of Ne22 – three evidences

(1) Proof from isotope ratio K22 using internal standard m/z 40

- 1) m/z 22 signal is generated from Ne22 gas and CO2++ made by CO2 ionization in MS, while CO2 is the product of LENR.
- 2) the isotope ratio K22 > 1.5 (far beyond CO2++ interference) in all LENR gases suggests that m/z 22 signal contains those generated from Ne22.



图 9.6: 黄秉钧组的 ²²Ne 测量结果,图中浅蓝色柱是 K22,K22>1.5 意味着产生了显著的 ²²Ne,而 没有产生超热的四个样品(红色箭头对应的柱状图)的 K22 值都很小【A95,S.10.2】。

表 9.3: 黄秉钧组用气体经过 Ca(OH)₂ 吸收层来比较是否 CO₂²⁺干扰了 ²²Ne 测量,产生显著超热的 都产生了 ²²Ne 且不受 Ca(OH)₂ 吸收层影响【A95, S.10.2】。

(3) Proof of Ne22 presence from isotope-ratio K24a using CO2 absorber

- CO2 in gas sample is absorbed first by calcium hydroxide Ca(OH)₂ before entering MS to eliminate m/z 22 signal interference.
- Pure CO2 is tested as the reference.
- m/z signal ratios (K24a) are compared to the reference K24a(CO2) (=0.96)
- K24a(gas) > K24a(CO2) (=0.96), in all LENR gases, indicates the presence of Ne22
- the isotope ratio using internal standard K22a >> 0.06 confirms the presence of Ne22.

| | | | | | | | | | Internal standard method (ISM) based on m/z 40 | | | |
|---------------|-----------|-------------|-------------------|----------|----------|----------|--------------------------|--------------------------------------|---|----------------------|-------------------------|------|
| Gas sample | Reactor | СОРх | CO2 adsorption | m/z 22 | m/z 40 | m/z 44 | R24 = m/z 22 ÷ m/z 44 | <mark>K24a</mark> = R24(Y)/R24(n) | 122 = ratio 22/40 | 144 = ratio 44/40 | K22a = I22(Y)/I22(n) | |
| Pure CO2 | Reference | | n | 4.44E-06 | 4.20E-07 | 4.62E-04 | 9.61E-03 | 0.96 | 10.6 | 1100.0 | 0.0060 | |
| | gas | | Y | 8.26E-08 | 1.31E-06 | 8.93E-06 | 9.25E-03 | | 0.0631 | 6.817 | | |
| Tube 16 | DHX-2B | 1.20 | n | 2.33E-09 | 8.73E-07 | 1.99E-07 | 1.17E-02 | 1.07 | 0.0027 | 0.228 | 0.55 | |
| | | | Y | 9.33E-10 | 6.37E-07 | 7.47E-08 | 1.25E-02 | | 0.0015 | 0.117 | - | |
| Tube 39 | VCS-NTU | S-NTU 1.54 | n | 2.94E-08 | 1.63E-05 | 4.42E-06 | 6.65E-03 | (1.49) | 0.0018 | 0.271 | (1.86) | |
| | | | Y | 4.93E-08 | 9.35E-06 | 4.97E-06 | 9.92E-03 | \bigcirc | 0.0053 | 0.532 | \bigcirc | |
| Tube 42 | nDHX-2BB | HX-2BB 1.22 | n | 1.55E-07 | 9.78E-06 | 1.68E-05 | 9.21E-03 | 1.03 | 0.0158 | 1.717 | 0.21 | |
| | | | Y | 3.23E-08 | 9.92E-06 | 3.40E-06 | 9.49E-03 | | 0.0033 | 0.343 | | |
| Tube 44 | nDHX-2BB | DHY 288 | 1 16 | n | 7.75E-08 | 1.19E-05 | 9.98E-06 | 7.77E-03 | 1.14 | 0.0065 | 0.839 | 0.48 |
| | | 1.10 | Y | 4.10E-08 | 1.30E-05 | 4.62E-06 | 8.87E-03 | | 0.0032 | 0.355 | | |
| Tube 46 | nDHX-2BB | HX-2BB 1.15 | n | 4.87E-08 | 1.02E-05 | 5.52E-06 | 8.82E-03 | 1.10 | 0.0048 | 0.541 | 0.65 | |
| | | | Y | 3.10E-08 | 9.93E-06 | 3.20E-06 | 9.69E-03 | | 0.0031 | 0.322 | | |
| | | | | | | | K24a > | 0.96 | | | | |
| | | | | | | | shows Ne22 | 2 presence | K22a > 0.2 shows Nezz presence | | | |

Tracing of isotope H2O-17(heavy water) from isotope ratio m/z 19 to 18

Since steam (Tube9) contains HDO, R198(steam)=1.10 is the maximum contribution of HDO to m/z 19
LL198 >>1 appearing in 9 out of 10 LENR gases strongly suggests significant contribution to m/z 19 from H2O-17, other than HDO. [presence of H2O-17]



图 9.7: 黄秉钧组 ¹⁷O 测量结果,柱状图 R198 (蓝色)和 LL198 (浅蓝色)都表示 ¹⁷O 的产生,可 见只有产生超热的样品中有显著 ¹⁷O 【A95, S.10.2】。

Tracing of isotope O2 [O16-O17] from K33

K33>1.1 appearing in all LENR gases strongly suggests presence of O16-O17



图 9.8: 黄秉钧组产生 ¹⁷O-17 的第二个证据 m/z 33 (¹⁶O¹⁷O),图中参数 K33 表示产生超热的样品中 有显著 ¹⁷O【A95, S.10.2】。

Tracing of isotope CO2 [C12-O16-O17] from K45

K45 >> 1.5 appearing in 9 out 10 LENR gases (except Tube7) suggests the presence of isotope CO2 (C12-O16-O17)



图 9.9: 黄秉钧组产生 ¹⁷O 的第三个证据 m/z 45 (C¹⁶O¹⁷O),图中 10 个产生超热气样中有 9 个 K45 > 1.5,而无超热的很小【A95, S.10.2】。

Q1: Are Ne22 and CO2 produced through nuclear or chemical reactions ?

Possible production mechanism of Ne22 and CO2:

Q2: Will the rest of O17 and C12 produce other compounds ?





乌克兰基辅国立大学的 V.I. Vysotskii 等人利用水射流产生空化效应,因此而产生 80 MHz 的弱 无阻尼热波 (weak undamped thermal wave)冲击 20 cm 远处的 TiD_{1.5}柱靶 (直径 7 mm,厚 10 mm) 两次 (见下图 9.13),分别持续 40 和 20 分钟。用 CR39 测到粒子径迹。6 个月后,用放射自显影法 得到这两个靶的影像,如下图 9.12 所示。这是明显的氚产生信号,且冲击 40 分的信号明显强于 20 分的,前者辐照 65 h 的β放射性强度是 163 Bq,后者是 46 Bq,对应的氚原子产生数目分别约为 1.6 × 10¹⁰ 和 4.6 × 10⁹。说明产生了 DD 热聚变反应【A36, S.3.3】。



图 9.11: Vysotskii 等人所用的反应装置【A36, S.3.3】。



图 9.12: Vysotskii 等人观测到的氚放射自显影图像,左右两图分别是 6 个月前处理 40 和 20 分钟的 TiD_{1.5} 柱【A36, S.3.3】。

10. 仪器方法

10.1. 热测量

美国 TTU 的 Andrew Gillespie 等人开发了两种量热计【A51, S.7.2】。第一种是液氮蒸发量热计, 这是一种相变量热计, 通过测量发生相变物质的质量变化结合相变能确定体系中产生或吸收的热量, 是严格意义上的等温量热计, 灵敏度约 25 mW, 可检测 1–50 J 的热脉冲(见下图 10.1.1); 另一种是固态开放系统微分量热计, 如下图 10.1.2 所示, 其实就是具有单面热敏器件(仪器常数约 9 W/V)的卡尔维量热计, 即通过双子池设计消除环境温度干扰。采用帕尔贴器件加热/制冷的方式控温, 控温精度到 0.01℃, 灵敏度 0.5 mW, 10 W 时重复性好于 0.5%, 可用于电化学和气相 LENR。最后一种是真空量热计, 灵敏度<1 mW, 10 W 时重复性好于 0.1%, 20 W 时重复性好于 2%。在 250℃下试验过样品。



图 10.1.1: TTU 的液氮蒸发量热计结构示意图【A. Gillespie et al, Rev. Sci. Instr. 91 (2020) 085103】。



图 10.1.2: TTU 研发的微分量热计【S. Lacouture et al, Rev. Sci. Instr. 91 (2020) 095102】。

TTU是 ARPA-E 支持的八单位之一,负责材料分析和核产物测量,为其他单位提供支持。积极 支持冷聚变研究的原密苏里大学副校长 Robert V. Duncan 在 2016 年后加盟 TTU,这应该是 TTU 能 在此轮 ARPA-E 项目中胜出的一个原因。

美国科罗拉多山学院的 N. L. Bowen 提请注意在气体绝热压缩过程中会出现热脉冲,这种脉冲可能只是正常的热力学过程,不要当作超热【A55, P1】。

10.2. 核产物测量

美国 TTU 的 Andrew Gillespie 介绍了他们的高分辨傅立叶变换离子回旋共振质谱(HR FT-ICR MS)【A51, S.7.2】。在质量数为 3 时分辨率达到 0.0001 Da,容易分辨 T、³He、H₃和 DH(见下图 10.2.1),He 可检测到 pM,T 到 fM。可通过检测 ²⁰Ne 和 ⁴⁰Ar 确定密闭池中的大气入侵【A51,S.7.2】。



图 10.2.1: FT-ICR MS 在气体 He 处的几个质谱峰【A51, S.7.2】。

他们发展的氚抽取和检测系统可测量最低到 10 fM 的氚产生,测量 NASA GRC 的 3 个 TiD_x 晶 格束缚聚变 (LCF) 样品,结果发现有~ 5 × 10¹² 个氚原子,该数值仅支持 D(n,γ)T 的 T 产额,尚不 支持 LCF 要求的 D(d,p)T 的 T 产额。在 NASA GRC 实验中用 2.9 MeV 电子束照射金属氘化物,电 子韧致辐射产生 2.5 ~ 2.9 MeV γ射线,能量大于 2.226 MeV 的光子可分解氘核为质子和中子 (中子 平均能量为 0.145 MeV,最大 0.4 MeV),热中子碰撞氘核并把一半能量转移给氘核形成热氘 (平均 能量为 64 keV),热氘与晶格间隙的冷氘碰撞发生 D(*d*,*n*)³He 反应生成 2.45 MeV 中子,核异常主要 表现在屏蔽能很高 (如 ErD₃ 中为 347 eV),GRC 命名为 LCF。在该过程中,因为热中子与氦很容易 发生 ³He(n,p)T 反应生成 T,所以用 HR FT-ICR MS 质谱未测到 ³He,这是与理论符合的结果。但 T 产生不支持 GRC 的结论。他们说该结果只是初步结论,需要进一步证实。NASA GRC 在 2020 年的 Phys. Rev. C 上发表结果时笔者就奇怪为什么没有氚测量结果,看来当时就未测到氚。笔者猜测, NASA GRC 理论组对金属氘化物中发生的核过程解释存在问题【V. Pines et al, 2020 Phys. Rev. C. 101 (2020) 044609】,因为不仅氚测量对不上,其中子能谱也存在高能部分无法合理解释的问题。





美国 TTU 的 A. Sobel 和 NASA 的 L. Forsley 讨论了银河宇宙射线(Galactic Cosmic Rays, GCR) 引起的次级中子, 95%的 GCR 是> 0.5 GeV/核的质子和 alpha 粒子(见下图 10.2.3)。该文关注的是

中子的生理效应,一般用剂量当量Q因子来衡量吸收辐射剂量(见下图 10.2.4),其范围从X射线、 伽马射线和 β 的Q=1到热中子的Q=5和快中子和 α 粒子的Q=10不等,同时介绍了各种测量中子方法(见下图 10.2.5)【A69, P17】。



Galactic Cosmic Rays (GCR)¹

图 10.2.4: 各种射线的剂量当量因子 Q 【A69, P17】。

Q=2

Q= 20

Q= 2.5 - 10

Neutron W_R revising

protons, pions

1. https://en.wikipedia.org/wiki/Relative_biological_effectiveness .../n@sख़v@n@ov/docs/ML1233/ML12338A682.pdf

Thermal to fast neutrons

faster neutrons, alpha particles

| | | Neutron Detection Methods |
|------|--------|---|
| 1. | Co | unting |
| | 1. | Efficiency is a few percent at best. |
| | 2. | BF ₃ and ³ He Detectors: Need moderation, most sensitive to thermal n |
| | 3. | Witness materials: activated and measured by gamma or beta |
| | | 1. Thresholds and resonances |
| | | 2. Thermal or resonance captures, < keV to > MeV |
| 2. | Sp | ectroscopy |
| | 1. | Multiple Moderated Detectors, (³ He Remballs) unfolded spectra Components of NUSTL's new neutron spectrometer |
| | 2. | Single moderated detectors using multiple MSND ⁶ Li detectors |
| | 3. | Liquid and solid scintillators (temporal information 200 nsec) PMT and |
| | | 1. 10% efficiency < 10 MeV KE, 5% efficiency > 10 MeV KE Scintillator |
| | 4. | Pulse Shape Discrimination |
| | | 1. Differentiate between gammas and neutrons |
| | 5. | Neutron Spectra Unfolding |
| | | 1. Moderated Remballs or scintillator light output, and specific geometries, |
| | | approximate (n,p), (n,C) neutron recoil in keVee (equivalent electron units) convert to MeV KE |
| | | 2. neutron capture cross-sections |
| | | Energy discrimination is necessary to know the Q Factor |
| 1 P. | Goldha | 9 gen, "Use of Cosmic-Ray Neutron Data in Nuclear Threat Detection and Other Applications", Neutron Monitor Community Workshop— Honolulu, Hawaii (October, 2015). |
| | | 图 10.2.5, 已知各种测量中子的方法【A69, P17】。 |
| | | |

11. 各种理论模型

类似于 ICCF24 笔记,本次理论介绍仍是大概分类,录以备考,前面介绍过的理论将不再提及。

11.1. 经典理论的应用或扩展

Florian Metzler 等人最近的一篇工作【arXiv2208.07245】总结了各种可以提高固体中聚变率的机理,可参考。

美国科罗拉多山学院的 N. L. Bowen 基于传统氘氘反应来解释钯-重水电解系统的超热与核产物。她的模型完全以弗莱希曼和庞斯实验装置为出发点,认为 Pd 中 NAE 发生的初级反应就是传统的 (d,n)和(d,p)反应,然后生成的带电粒子再发生次级反应,而中子与 LiOD 中的 ⁶Li 和硼硅酸耐热玻璃 中的 ¹⁰B 反应生成 ⁴He,与水浴中的 H 发生反应放出 2.22 MeV 伽马射线。结果是 1 W 的初级反应 可引发 3.39 W 的次级反应,平均每个 ⁴He 对应 23.05 MeV 的超热。她还认为 Pd 的核心反应区特征 与超导有相似性。基于该理论,她提出了 LENR 反应堆设计方案【A50, S.7.1】。实话说,如果这个 理论在 1989 年提出来,估计会吸引不少注意,在 LENR 反应种类很多的今天,不要说其具体过程 是否可信,就是实验现象本身也早超出了该理论预言的范围。

美国华盛顿大学的 David J. Nagel 注意到 LENR 嬗变数据与氘核聚变屏蔽数据的惊人相关性 【A35, S.3.2】,如下图 11.1.1 所示,即美国 G.H. Miley 的 Ni-H₂O 电解和日本水野忠彦的 Pd-D₂O 电 解都产生了幻数核时才有的峰值分布(见下图 11.1.1 (左)),而日本笠木治郎太(J. Kasagi)在束靶 实验中得到的 D-D 反应屏蔽能也随靶原子变化有类似的幻数核分布峰,此外 Widom-Larsen 的光学 势模型也给出类似的幻数核分布(见下图 11.1.1 (右))。作者估计这其中应该存在统一的物理机理。



图 11.1.1: Nagel 总结的 LENR 中 4 种情况下的幻数核分布【A35, S.3.2】。

从 ICCF21 开始,美国科罗拉多山学院的 N. L. Bowen 在传统核模型中考虑夸克之间的电磁作 用,本次会议报道的是第四部分内容,即轻核力中的电磁行为【A77,P25】。以前的核力模型主要 考虑质子之间的库仑斥力,而夸克间电荷和磁偶极矩相互作用才是核力的真正起因。所有的核都同 时含有正电荷和负电荷以及正负磁偶极矩。以前的核力模型忽略了这一事实。她将标准电磁学原理 与原子核内部结构联系起来。轻核的大部分核行为可以通过检查电磁力和能量来解释。这些获得的 见解可以扩展到中等核的行为模式。这个模型回答了 100 多个关于轻核行为的问题,而这些问题是 其他核力模型无法令人满意回答的。使用该模型,可以实现对 LENR 的更好理解。可以理解大量的 问题和无法解释的实验结果。例如:(1)反应释放的能量与键断裂之间的关系。(2)更好地理解为 什么某些同位素具有如此大的热中子截面。(3)为什么双中子和双质子不稳定。(4)核聚变发生时, 核结构内部到底发生了什么。(5) 当裂变发生时,核结构内部实际发生了什么。(6) 为什么氘核键 能如此之低且没有激发态。

11.2. 重电子和小氢原子

美国 New Energy Times 的 Steve Krivit 介绍了 Widom-Larsen 理论【A106, S.13.1】。他是该理论 的粉丝,曾在其他场合鼓吹了很长时间,这次有机会专门介绍。该理论主要包括如下四点:(1)重 电子的产生:LENR 反应池中的电磁辐射在金属氢化物或氘化物表面产生表面等离激元(SPP)电子 群,电子群通过质量重整过程将其部分能量贡献给单个 SPP 电子,这种集体效应使 SPP 电子的质量 增加了至少 0.78 MeV,成为 SPP 重电子;(2)超低动量中子的产生:一个 SPP 重电子和一个质子 聚变成中子,产生一个具有超低动量中子和一个中微子;(3)俘获超低动量中子:原子核俘获超低 动量中子并产生新的稳定同位素或不稳定的同位素;(4)新元素的产生:如果新元素不稳定就会发

生 α 衰变产生 ⁴He 和低 Z 原子,或者发生 β 衰变,发射一个电子并产生一个高 Z 原子。该理论的亮 点是较早地注意到表面等离激元在 LENR 中的重要性,但其重电子和超低动量中子缺乏理论基础, 即使真有,那么实验上肯定能测到重电子催化核反应或中子俘获反应放出的核辐射,而实验上并未 测到。此外,该理论创立者之一 Lewis Larsen 已于 2019 年去世。



图 11.2.1: Widom-Larsen 理论原理,其中蓝球是金属原子,黄球是氢原子,蓝点是电子,红点是重电子【A106,S.13.1】。

加拿大湖首大学的 Dimiter Alexandrov 也用重电子理论解释康铜-氘气中的超热【A33, S.2.4】。

匈牙利独立学者 Jozsef Garai 【A74, P22; A78, P26】认为电子在自由空间是点电荷,在原子中是面电荷(见下图 11.2.2)。在 5-10 层金属原子尺寸的空位中,两原子相遇时电子的球形面会压缩成椭球面,从而降低了库仑势垒,实现了核聚变。他在 ICCF23 上曾报告过宇宙射线中的µ介子催化聚变。



图 11.2.2: Garai 电子模型的特征【A74, P22; A78, P26】。

印度辨喜瑜伽大学(SVYASA)能源研究中心的 Narayan Behera 认为量子真空极化效应可显著

提高氘核隧穿形成氦核的几率【A48, S.6.3】。他的理论有两个特点:(1)相对论量子力学中氘原子 中存在深电子轨道;(2)量子真空极化可产生粒子和反粒子对,真空中产生的虚粒子可以与氘核相 互作用,导致其有效质量和电荷的改变,使库仑势垒更易穿透。作者用费曼图计算真空激化,用 WKB 近似计算隧穿概率,结果显示显著增强了氘核聚变成氦核的几率。

美国加州的 Arayik Danghyan (https://exhlab.com) 考虑相对论条件下电子有不同于主流氢原子 模型的电子分布函数,如存在-479.79 keV 的束缚态,比-13.6 eV 深了 3.5 万倍,氢原子比经典尺寸 小 500 倍,氢进入金属后部分氢原子可进入深轨道,辐射出该束缚能的γ射线,再进一步发生各种核 反应【A73, P21】。该理论类似于我们在 ICCF9 尝试过的,以及这些年 Meulenberg 和 Paillet 一直坚 持的电子深轨道模型。

11.3. 各种耦合和增强效应

印度理工坎普尔分校(IIT Kanpur)的 Harishyam Kumar 报道用二阶微扰理论处理 LENR,这是 ICCF23 上双光子发射理论的继续。他们认为在自由空间中无法实现的双光子发射可以在固体介质 中实现【A37, S.3.4】。笔者读过他们发表的文章,仅仅考虑金属氢化物介质是不足以实现双光子乃 至多光子发射的。

MIT 的 Peter Hagelstein 继续研究其耦合理论【A86, S.8.1】,其哈密顿量包括声学支声子、光学 支声子、等离激元、核能、D₂/⁴He 转变和 D₂*/⁴He 转变(见下图 11.3.1)。这次的特殊之处在于考虑 了核分子态,如 Pd 分裂成两个子核后的各种形态(见下图 11.3.2、3),理论上反应能通过这种激发 态从高能级向低能级跃迁,跃迁宽度与释放出的声子,等离激元的能量一致才能进行下去,如果能 级太宽,反应就终止了。

Fusion and compact state model



图 11.3.1: Hagelstein 描述 Pd 中 D 冷聚变过程的哈密顿量【A86, S.8.1】。

Nuclear molecules

- · Proposed that nuclear molecules might be important for coherent dynamics last year
- Since then, many codes developed to study fission, fusion and static cluster models
- · Conclusion is that reasonably stable nuclear molecules possible...
- ...as clusters that are essentially touching



z (fm)

Diaz-Torres, A. and Wiescher, M., Characterizing the astrophysical S factor for ¹²C+¹²C fusion with wavepacket dynamics. *Physical Review C*, **97** (2018) 055802.

图 11.3.2: Hagelstein 描述 Pd 各种形变后形成的核分子【A86, S.8.1】。



图 11.3.3: Hagelstein 描述的各种 Pd 核分子态密度【A86, S.8.1】。

清华大学的李兴中讨论了金属氢化物核嬗变中原子量立方根与核共振能级间的关系【A87, S.8.2】。根据核液滴模型,原子核质量数的立方根正比于原子核尺寸,那么在发生共振核反应时原子 核尺寸也要满足方势阱中的共振要求,如下图 11.3.4 所示。据此可以解释发生共振时某些原子核同 位素会比其他更少的实验现象,如下图 11.3.5 所示。 EQUATION: Smooth Connection @ Nuclear Surface for Resonance



 $\sqrt[3]{A_N} = 1.13 \text{ N} - 0.46, 2-\text{Step},$





0.E+00

图 11.3.4: 李兴中的核内共振过程的机理【A87, S.8.2】。

Resonance



图 11.3.5: 李兴中指出 7Li、28Si、74Ge 和 151Eu 耗尽峰与模型一致【A87, S.8.2】。

乌克兰基辅国立大学的 V.I. Vysotskii 等人继续其相干相关态(correlated-coherent states, CCS) 模型【A60, P7】。类似于 ICCF23 的研究,这次仍研究 $p + {}^7Li \rightarrow 2\alpha$ 反应。结论是 500 eV 的定向单 色质子可实现最大的反应率,预言可用阴极丝沉积单层石墨烯在电晕放电下实现反应。

11.4. 更激进的理论

比利时独立学者 Philippe Hatt 报道希格斯玻色子质量与中子、质子、电子质量关系的强核相互 作用解释以及基于该理论解释任意核结合能的理论【A49, S.6.4; A75, P23】。他的核理论类似于冷 聚变早期的 Monti 【R.A. Monti 1996, Low-Energy Nuclear Reactions: Experimental Evidence for the Alpha Extended Model of the Atom, J. New Energy, 1 (3): 131-144】, 把核分解成α粒子, 质子和中子, 把核内作用分解成这些粒子的相互作用。

美国加州独立学者 D.S. Szumski 【A88, S.8.3, P28】几乎重复了 ICCF24 上报告过的内容,墙 报与口头报告一致。

荷兰的Kaal等四人组继续发展其结构化原子模型(Structured Atom Model, SAM 【A103, S.12.2】。 其核心内容是中子非独立粒子而是质子和电子结合体,原子核靠电子为中介结合质子而成,本次报 告认为超热主要起源于核嬗变,原子核可极化。更详细内容可参<u>http://structuredatom.org</u>。

Aleksandr Nikitin 提出了低能冷聚变链式反应模型【A76】,但无具体技术内容。

12. 技术进展总结

至少有两个小组报道或认可的结论如下:

- (1) Pd长片-D2和康铜丝-H2系统中的超热都正比于样品中的电流【Storms, Celani】
- (2) Pd 或其他基体金属会裂变【高桥亮人, NASA GRC, Metzler, Hagelstein】
- (3) 氢参与的反应可能是 $p + e + p \rightarrow d + v_e$ 【Storms, Kasagi】
- (4) 脱氢(氘)比吸氢(氘)过程更容易出现超热【Biberian,高桥亮人,日本东北大学,成田 晋也,NASA GRC】
- (5) 含H系统中C、O含量增高【东北大学,高桥亮人JCF23,黄秉钧,Winzeler,CRREL】
- (6) Ti-D系统中容易测出氚【BARC, Vysotskii】,但NASA在电子辐照样品中未测到氚。
- (7) Pd-H₂中产生³He【S-VYASA】,康铜-氘气中也产生³H【湖首大学】。
- (8) ²²Ne 也是需要注意的核产物【黄秉钧,一战前多个早期研究】。
- (9) 金属中空位缺陷似乎增强了库仑势垒的屏蔽强度【USZ, Miley】
- (10) 存在应力的 Pd 更容易发生 LENR 【JSI 小组的硬钯中屏蔽能增强,以前 Lipson 的受张力 Pd-D 产生中子】。

13. 结论

总而言之,本次会议的主要进展如下:(1)Pd-D系统的超热正比与其中的电流;(2)Ni/Cu/CaO 多层膜在出现超热前的温度降低可以作为一种前驱现象,值得重视;(3)各种反应和各种材料的束 靶反应深入研究表明材料的晶相特征对核反应截面有明显影响;(4)LEC和Egely催化聚变装置预 示着将来核能有可能直接转化为电能,可跳过目前核能和未来托卡马克发电必须的"烧开水"环节; (5)碳粉放电、火花塞和卤素灯等非含氢系统也会发生LENR且产生奇特的粒子径迹,这些结果 不仅超出传统核物理,也超出目前的多数冷聚变实验结果,还需要独立证实和深入研究。