

文章编号: 1001-3555(2021)04-0390-05

第23届国际凝聚态核科学会议(ICCF-23)介绍

张武寿

(中国科学院化学研究所, 北京 100190)

摘要: ICCF 是凝聚态核科学研究领域最重要的系列性国际会议, ICCF-23 于 2021 年 6 月 9~11 日在厦门大学召开, 会议主席是田中群院士。共有 33 个国家和地区的 433 名代表参会, 收录摘要 86 篇。本次会议的主要进展是多个小组在 Pd(Ni)-D₂O(H₂O) 电解体系和 Pd(Ni)-D₂(H₂) 体系中观测到超热, 突破了传统上只有 Pd-D 和 Ni-H 体系才能产生超热的成见; 多个小组在合金-D₂(H₂) 体系中观测到稳定的十瓦级超热; 两个小组证实氧化层在超热产生中起重要作用, 纳米或介观尺寸样品明显好于体样品。多个小组观测到含氢体系在电解、气相和放电条件下的核嬗变并呈现出某种规律性。

关键词: 凝聚态核科学; 低能核反应; 化学辅助核反应; 超热; 核嬗变

中图分类号: O643.36

文献标志码: A

DOI: 10.16084/j.issn1001-3555.2021.04.009

1 会议简介

ICCF 是低能核反应(LENR, 也称为凝聚态核科学或化学辅助核反应)领域最重要的系列性国际会议, 第 23 届国际凝聚态核科学会议(ICCF-23)已于 2021 年 6 月 9~11 日召开^[1]。本次会议由厦门大学固体表面物理化学国家重点实验室和嘉庚创新实验室承办, 田中群院士组织。因疫情持续影响, ICCF-23 以线上会议方式进行。共有 33 个国家的 433 名代表参加了本次会议, 这是历届 ICCF 中参会人数最多的一次, 其中国内与会代表 193 人, 美国代表 111 人, 其它分别为日本 20 人, 印度 16 人, 意大利 14 人, 俄罗斯 11 人, 加拿大和法国各 9 人, 瑞士 7 人, 英国 6 人, 其余 23 个国家和地区分别有 1~3 人。会议共收录摘要 86 篇, 安排了 46 个口头报告和 40 篓墙报。报告视频可在会议网站上观看, 摘要集可从网上下载, 作者所述内容大多来自视频和摘要集^[1], 不再一一标注其来源。感兴趣的读者可浏览会议网址^[1]。

下届会议 ICCF-24 将于 2022 年夏天在美国硅谷举办, 会议网址是 <https://www.iccf24.org>。

2 Pd-D(H) 系统

2.1 Pd-D₂O(H₂O) 系统

美国 E. Storms 把钯微粒压成硬币大小的圆饼,

孔隙率约 50%, 先在 900~1000 °C 真空中加热数小时, 然后在 > 400 °C 的空气中氧化数小时后自然冷却, 在 D₂O 电解和 D₂ 中都用塞贝克(Seebeck)量热计测得超热。量热在 24 W 内的标准偏差小于 8 mW。结果表明, 如果样品未在空气中氧化则不会产生超热。钯粉压饼在 D₂O 电解条件下最大超热达 0.3 W(比超热约 200 W/kg-Pd), 在 D₂ 中达 0.25 W(比超热约 170 W/kg-Pd)。钯粉压饼与以前钯体材超热随温度变化的行为类似, 都在 28~31 °C 出现活化能转变。镍粉在 D₂ 中也产超热, 最高达 0.5 W(比超热约 500 W/kg-Ni), 超热也随温度增加而增加, 在 72 °C 出现活化能转变。Storms 得出结论, 即只有在低温区产生超热才需要高的 D/Pd, 高温区 D/Pd 到 0.01 就够了。此外, 高温区固体 Pd 超热受限于 D 在 Pd 中的扩散, 所以活化能与 D 扩散活化能相同, 而钯粉压饼中扩散不成问题, 所以活化能显示的是其他速率控制步骤的。该结果具有多重意义, 首先说明纳米和介观材料有利于超热产生, 这是日本 Y.Arata 和意大利 A.Rossi 的粉末材料在 H₂(D₂) 中产生超热以来第一次用纳米或介观材料电解产生明确超热的实验, 其次证明了氧化物在超热产生过程中起关键作用, 还说明 Pd-H 和 Ni-D 皆可产生超热而不必限定于 Pd-D 和 Ni-H 体系。

美国密苏里大学的 G.K.Hubler 小组使用开放

收稿日期: 2021-06-27; 修回日期: 2021-07-28。

基金项目: 国家自然科学基金项目(#21153003, 20973185)(Project supported by NSFC (#21153003, 20973185)).

作者简介: 张武寿(1968-), 男, 博士, 副研究员, E-mail: wszhang@iccas.ac.cn, Phone:+86-10-62554276 (ZHANG Wu-Shou (1968-), male, Associate Professor, E-mail: wszhang@iccas.ac.cn, Phone:+86-10-62554276).

电解池并用水流法量热，热本底噪声约 5 mW。阴极是细长 Pd 片，溶液中添加直径 9 nm 的 Pd 粒子，产超热的电解液是 0.1 mol/L LiOD 轻水溶液，用 25 mA 电解，输入功 48 mW，电解到 160 h 时超热趋于稳定并维持不变。在 58 d 内，稳定超热达 90 mW（比超热约 94 W/kg-Pd），COP（Coefficient of Performance, 能效比，即输出功率与输入功率比值）约 2.9，总超热 453 kJ（比超热约 5×10^7 J/mol-Pd 或 500 eV/atom-Pd）。多数时间内 D/Pd = 0.65 ~ 0.7。产超热的 Pd 阴极上明显有颗粒状沉积，其他电解池中则没有。他们尝试过 LiOH+H₂O、LiOH+D₂O 和 LiOD+D₂O 电解液，一些产生过最多 60 mW（比超热约 62 W/kg-Pd），COP = 1.2 ~ 1.6，持续几个小时到几天的超热。使用 LiOH+H₂O 电解液无超热。在 LiOD+D₂O 电解液中尝试过 50 nm Pd 粒子，3 nm Au 粒子加磁场极化，50 nm Pd 镀 Fe 和 50 nm Pd 镀 Ni，皆无超热。该小组结果再次说明 Pd-H 系统并非超热的禁区，D/Pd 比也不需要所谓产生超热的高阈值要求。

H.Zhao 和 W.-S. Zhang (赵辉和张武寿) 用塞贝克量热计测得 M.H.Miles 提供的 Pd 合金阴极电解重水产生的超热，发现 Pd-B 确实比 Pd-Cu 重复性好。此外还发现用 Pt 阴极电解 D₂O 和 H₂O 时都观测到超热，Pt 电解 D₂O 最大超热是 79 ± 12 mW（比超热约 1.10 ± 0.17 kW/kg-Pt），重复性 12/19；Pt 电解 H₂O 最大超热是 156 ± 12 mW（比超热约 2.20 ± 0.17 kW/kg-Pt），重复性 3/3。该结果的最大意义是用量热计直接证明 Pt 阴极电解 D₂O (H₂O) 也可产超热，虽然以前有类似报道，但一直无重复性结果。

2.2 Pd-D₂(H₂) 系统

美国的 F.E.Gordon 报道了“晶格能量转换器”，其装置是镀钯膜与黄铜管构成对电极，管中充入氢气，可持续产生 0.1 ~ 1 V 的电压，温度越高，电压越大。该结果是法国 F.David “聚变二极管”的进一步发展，David 的装置在氘气氛下输出电压可达 0.4 V，氢气中略小，氩气中几乎没有。如果该装置能进一步证实超热产生并与核产物一一对应，那么这意味着将来的 LENR 可直接转化为电能，不再需要通过热机。

美国的 G.H.Miley 报道了 Pd-ZrO₂+H₂ 系统的超热。结果是样品量越大，超热越多，但与气压关系不明显。这再次说明 Pd-H 系统也可产超热且与 H/Pd 关系不大。

法国 J.-P. Biberian 在 1 cm² 的氧化硅基底上先后沉积 Cr 膜和 350 nm 厚 Pd 膜，在 0.2 MPa 的 H₂ 中用 650 nm 激光照射 3 month 后形成直径约 200 μm 的轮胎形黑斑。用 SEM-EDS 分析样品，结果黑斑中心处 3 个点都存在 N、O、Na、S、Mg、Fe 和 Ni，轮胎形圆圈上 3 个点也存在明确的 N、O、S 和 Ni，而 Fe 水平较低，黑斑外 3 个点则主要是 Pd。在氩气中处理的样品未见黑斑。

俄罗斯的 I. Savvatimova 用 Pd 和 Ni 片分别在 D₂ 和 H₂ 中辉光放电 40 h，用 ICP-MS 测量发现 Pd 片表面的重金属 Pt 和 Pb 减少。放电前没有的 W 放电后出现了，作者认为是 Pt 与 D 反应生成了 W。Ni 片在放电后表面 Fe、Zn 和 Cu 杂质减少，而 ⁵⁴Fe 同位素丰度增加了约 3 倍，⁶⁴Zn 同位素丰度增加了一倍，⁶³Cu 丰度也增加，且都是最轻同位素增加最多。

3 Ni-H 系统

印度的 A. Kumar 等使用纯 Ni、纯 Cu、Ni-Fe 合金和 Kanthal 合金作阴极，1 mol/L K₂CO₃ 水溶液作电解质。纯 Ni 在水中电解后用 EDS 和 WDX 都测到表面产生了 Cu、Mg 和 Fe。TOF-SIMS 测量表明这些元素分布在距表面 200 nm 深度内，铜同位素与天然值不同。纯 Cu、Ni-Fe 和 Kanthal 合金电解后的元素测量表明，合金电解时间比纯金属少一个量级，可见更容易发生核嬗变。

日本的 H.Yamada 用塑料管作电解池，电解液是 Li₂SO₄+H₂O，底部是 5 μm 厚镍膜阴极，镍膜下是闪烁体，在暗室中统计闪烁次数。结果发现闪烁频率随电流值而增加，160 mA 电解时闪烁频率为 0.9/h，对照实验中闪烁频率只有 0.1/h，即电解能显著提高闪烁频率，是电解中发生 LENR 产生 > 3 MeV 带电粒子引起的闪烁。

俄罗斯的 A.Klimov 用 Ni 阴极水中等离子体脉冲放电，EDS 和 ICP-MS 测量发现杂质元素 Fe、Cu、Si、Ca 等减少乃至消失。该实验与上述 Kumar 的结果正好相反，前者在电解体系中观测到 Cu 和 Mg 杂质含量的增加，当然二者化学条件不同。

意大利的 U.Mastromatteo 用 0.125 mm 厚镍带，两侧各电沉积 200 nm 厚钯膜。结果在室温下真空室中充入氢气后压力明显下降，根据体积与气压变化求得 H/Ni = 0.6，这是纯镍片不曾发生过的现象。此外在吸氢开始后还观测到比本底高 80% 的中子

信号，并维持了好几个小时。Ni-H 系统超热报道过不少，很多人只是猜测 Ni 大量吸氢，但无明确证据。如果该结论得以进一步证实，意义很大。

4 合金-H(D) 系统

日本已用相同样品多家独立重复的方法交叉验证了超热，A. Takahashi 综述了其结果。最好样品产生 200 W/kg 超热并持续数周，反复煅烧可显著提高 PNZ (Pd-Ni/ZrO₂) 和 CNZ (Cu-Ni/ZrO₂) 的超热，使用氢气或氘气，压力 0.1~1 MPa，室温到 500 °C 皆可产生超热。在 2018 年 ICCF-21 以后，有 16 个小组验证了超热，产生了比 Pd 吸 H 所放热量高 10 000 倍的超热，典型值是 2×10^8 J/mol-D，一般煅烧 3 次后超热趋于饱和。对于 CNZ 样品，温度越高，超热越大。用小样品在差示扫描量热计 (DSC) 上也测到超热。该结果的意义是再次证明氧化有助于超热产生。

日本东北大学的 Y. Iwamura 和 J. Kasagi 等人在 Ni 片上交替沉积 6 层 Cu (2 nm)/Ni (14 nm) 多层膜，先烘焙，然后在 250 °C 条件下充入 200~300 Pa 氢气并维持约 15 h，再迅速加热 (500~900 °C) 并抽真空，结果有氢气时观测到 21 keV/atom-H 或 2.0 GJ/mol-H 的超热。只用纯 Ni 片时无超热。他们采用辐射量热法，当样品温度从 669 增加到 719 °C 时，有氢样品辐射比无氢样品增加 6.2%，对应于 6.0 W 的超热。除了稳态超热外，还有脉冲超热，不同位置测温表明超热来自表面层，脉冲超热还伴随核辐射。温度越高，超热越大。初步证据表明，氘气也可产生等量超热。从科学角度而言，薄膜上的异常反应比大量粉末样品更容易定位并进行深入机理研究，所以值得重视。

早稻田大学 K. Naitoh 组报道了小体积反应釜中镍粉和 Pd-Ni-Zr 粉的温度变化。一例结果是 3 g 镍粉在 240 °C，0.5 MPa 压力下使用氢气比氮气的高 4 °C，而 Pd-Ni-Zr 粉的要高 12 °C，温度和压力升高都促进异常温升。虽然没有超热数据，但该结果从侧面证明 Pd-Ni-Zr 粉的有效性。

有两小组独立重复了 T. Mizuno 的超热结果。印度辨喜瑜伽大学 (S-VYASA University) 的 P. Ramarao 等人使用类似于 Mizuno 的镍网附钯作活性材料并通过气流量热法测量热功率。输入 50 到 300 W 时皆有超热，一例结果是输入 50 W 时 COP =

1.98。氢气与氘气结果相差无几。西安秋然实验室的 H. Zhang (张航) 采用塞贝克量热计并用水流式量热做辅助测量，结果表明在 10 Pa 氘气压力下，外径 3 mm，壁厚 0.5 mm，长 5 m 的不锈钢管镀约 1 μm 厚钯膜产生 1.5~2.5 W 的连续超热 (比超热约 1.6~2.6 kW/kg-Pd)。

5 束靶反应和核嬗变

束靶反应截面或屏蔽能异常升高是 LENR 的另一面。波兰 K.Czerski 的结果表明晶格缺陷和杂质导致屏蔽能增加，但靶表面杂质导致屏蔽能降低。兰州大学 T.-S.Wang (王铁山) 组用锂靶代替金属含氘靶，结果表明液态锂靶的核反应产率明显大于固态靶，如 ⁶Li+d 反应屏蔽能增加了 235 eV，而 ⁷Li+p 反应屏蔽能增加了 140 eV，液态锂靶上 ⁶Li (d, α) ⁴He 反应屏蔽能随温度增加而降低。这些结果皆说明化学环境对核过程有明显影响，正属于化学辅助核反应的研究范畴。

俄罗斯的 A. Kornilova 与乌克兰的 V. Vysotskii 在厌氧基上进行生物核嬗变实验，ICP-MS 证明 21 d 培养后 Sr 浓度明显降低而 Y 同位素浓度增加，是 ⁸⁸Sr + p = ⁸⁹Y 反应所致。此外，还发现 K 浓度降低而 Ca 浓度增加，是 ³⁹K + p = ⁴⁰Ca 反应。该结果与国内吕功煊等^[2]在化学条件下观测到的结果相同，说明比轻核聚变 (如 D-D) 更难的聚变反应也可以发生。

6 材料学和热测量

厦门 Z.-Q.Tian (田中群) 认为，可能的 LENR 往往发生在通过热、电、光、粒子脉冲引起的金属 (合金) 体相内部的非平衡态条件下 (部分晶格发生不可逆的显著畸变)，迄今尚无法可控地创建和表征这些凝聚态物质内的活性位点结构和动力学行为，这很可能是 LENR 重复性很低的主要原因，也是对凝聚态科学的一个挑战。纳米材料则不同于大块体材，可以很方便地采用化学方法将实验后的粒子全部溶解，再重新合成用于下一批重复或对比实验的新鲜纳米粒子。此外，各类形貌和组分 (如，Pd、Ni、Li) 的纳米结构可理性设计组合，并开展系统的基础研究。为此，他和 J.-F.Li (李剑锋) 团队通过电化学原子层沉积 (EC-ALD) 方法，在不同金单晶表面上覆盖 1、3、5 层钯原子层，并采用电化学、拉曼光谱和理论模拟对其吸氢性能进行了较系统研

究，发现Pd膜在吸H(D)后的 $\sim 180\text{ cm}^{-1}$ 的拉曼谱峰发生位移至 $\sim 190\text{ cm}^{-1}$ ，但不完全符合理论模拟得到的Pd、PdH和PdD声子能谱，其原因尚待进一步研究。国内外多人关注于Pd-H(D)声子谱与LENR的联系，如能从材料学获得突破，也是一条蹊径。D.-P.Zhan(詹东平)报道了氢原子在石墨烯表面的电吸附，发现通过Pt催化剂“溢流-表面扩散-化学吸附”的途径可使表面H/C达0.875，有助于理解材料吸氢过程。

日本J.Kasagi等通过测量3种不同波长的强度来确定辐射光谱，进而计算总辐射热功率，比意大利A.Rossi在Lugano实验中所用辐射量热法更加严谨可信，近年来LENR反应温度越来越高，该方法可用于高温反应热功率准确测量。近年来塞贝克量热法广泛用于LENR研究，W.-S.Zhang(张武寿)介绍了可把塞贝克量热计分辨率提高2个量级的卷积降噪技术，该技术有利于微弱热信号识别。另外，H.Zhang(张航)发现塞贝克量热计中的热电模块先并联再串联后信号稳定了很多。这些技术都从不同侧面推进了LENR中的量热研究和超热测量。

7 凝聚态核科学形势及相关问题

虽然LENR在学界仍有争议，但近期的一些消息还是鼓舞人心的。今年4月，Science杂志刊登了125个科学问题，其中冷聚变(LENR的俗称)是3个能源问题之一，这对LENR工作的开展也是一种促进，田中群院士在开幕式上也强调了这一点。

波兰的K.Czerski介绍了他负责协调的欧盟CleanHME(Clean Energy from Hydrogen-Metal systems)项目，该项目包括17个小组，目标是结合气相实验和加速器实验，寻找最佳材料，实验可检测到核产物，理论能解释核产物，建造最佳HME反应釜。这是迄今为止在政府层面最大规模支持LENR的计划。

相对而言，美国的支持以民间和企业为主，如前几年的Google和一直支持冷聚变的Industrial Heat公司。最近NASA在支持LENR，相关人员也参加了会议。

8 存在的问题和挑战

总而言之，虽然LENR研究体系越来越集中于纳米或介观合金-氢系统中，超热重复性和效应显

著性也越来越高，嬗变模式也越来越清晰，但凝聚态核科学整体上仍处于探索之中，需要在具体的体系上得到明确的超热-核产物关联证据且实现第三方独立可重复。就世界研发形势而言，日本处于第一方阵，合金-氢气系统超热研究远远领先于其他国家。美国处于第二方阵，以面广人多占优势。我国亟待加强人力和资金的支持，否则很可能与LENR这一巨大科学突破和能源应用失之交臂。

致谢：田中群院士和吕功煊研究员提出重要修改意见。

参考文献：

- [1] <http://ikkem.com/iccf-23.php>.
- [2] Lu Gong-xuan(吕功煊), Zhang Wen-yan(张文妍). Photocatalytic hydrogen evolution and induced transmutation of potassium to calcium via low-energy nuclear reaction (LENR) driven by visible light(可见光驱动的光催化产氢同时诱导低能核反应嬗变钾为钙)[J]. *J Mol Catal (China)*(分子催化), 2017, **31**(5): 401–410.

Summaries of 23rd International Conference on Condensed Matter Nuclear Science (ICCF-23)

ZHANG Wu-Shou

(*Institute of Chemistry, CAS, Beijing 100190, China*)

Abstract: The 23rd International Conference on Condensed Matter Nuclear Science (ICCF-23) was held from June 9 to 11, 2021 at Xiamen University. A total of 433 representatives from 33 countries and areas registered, 86 abstracts were accepted. The main progress of this conference is that several groups observed excess heats in the Pd(Ni)-D₂O(H₂O) electrolytic system and Pd(Ni)-D₂(H₂) system, which breaks the traditional prejudice that only the Pd-D and Ni-H systems can work. Several groups observed stable excess heat of 10 W/order in the alloy-D₂(H₂) system. Two groups confirmed that the oxide layer played an important role in the generation of excess heat. The nano-sized or meso-sized samples are significantly better than the bulk samples in production of excess heat. Several groups observed the nuclear transmutation of hydrogen-containing systems under the conditions of electrolysis, gas phase and discharge, and the transmutation modes have some regularities.

Key words: condensed matter nuclear science; chemically assisted nuclear reaction; low-energy nuclear reaction; excess heat; nuclear transmutation

《分子催化》简介

《分子催化》是由中国科学院兰州化学物理研究所主办、中国科学院主管、科学出版社出版的向国内外公开发行的学术性刊物。主要报道有关分子催化方面最新进展与研究成果。辟有学术论文、研究简报、研究快报及综合述评等栏目。内容侧重于配位催化、酶催化、光助催化、催化过程中的立体化学问题、催化反应机理与动力学、催化剂表面态的研究及量子化学在催化学科中的应用等。工业催化过程中的均相催化剂、固载化学的均相催化剂、固载化的酶催化剂等活化、失活和再生；用于新催化过程的催化剂的优选与表征等方面的内容，本刊亦有报道。读者对象主要是科研单位及工矿企业中从事催化工作的科技人员、研究生、高等院校化学系和化工系的师生。

《分子催化》已被美国化学文摘(CA)、俄罗斯化学文摘、中国科学引文数据库、中国化学文献数据库、中国学术期刊文摘、中国化工文摘等国内外文献数据库收录。《分子催化》现为《中文核心期刊要目总览》的中国核心期刊和中国科技核心期刊。曾荣获中科院和甘肃省科委“优秀期刊三等奖”和“优秀科技期刊”奖。

《分子催化》为双月刊，每逢双月末出版，大16开本，约16万字，每册定价30.00元。中国标准刊号：ISSN 1001-3555/CN62-1039/O6。

欢迎订阅，欢迎来稿。