

## 冷核聚变现象研究

李 银 安

(中国科学院物理研究所)

本文综述了关于冷聚变研究的现状、实验方法及其结果,介绍了探索中的冷聚变机制的几种理论解释,在最后一部分,对冷聚变研究进行了评论。

1989年3月23日,英国索斯安普敦大学(University of Southampton)的 M. Fleischman、美国犹他大学(University of Utah)的 S. Pones 和 M. Hawkins 以发布新闻的方式公布了他们的研究结果。他们声称在室温条件下,在装有重水和氧化铯锂盐的电解池内,在电极钡棒(阴极)和铂丝(阳极)间通以直流电流,经一段时间后便发出大量热量并伴有中子、 $\gamma$ 射线、氦、氘产生,热量释放速率比输入能量高四倍,并声称这是由于氘核聚变反应的结果。3月30日,美国杨·伯翰大学(Brigham Young University) S. Jones 等人公布了他们在类似的实验中独立地实现室温核聚变的消息,他们观察到的聚变速率比 Fleischman 的要小一万倍,但无热量产生。相对于传统的热核聚变而言,这种在室温条件下产生的核聚变,又称为冷核聚变。

对于 Fleischman 和 Jones 等人的结果,虽然人们有种种怀疑,但它们仍然受到了物理学家们的关注,特别是引起了电化学专家们的兴趣。不少国家进行了类似的实验,以验证他们的实验结果。到4月中旬,约有七、八个大学的实验小组声称,他们在不同程度上重复了 Fleischman 和 Jones 的实验结果,但大多数的国家实验室均未能重复。4月12日,美国化学学会在美国 Dallas 举行学术会议,听众达7000人,会上, Pones 作了报告,报告之后进行了一个多小时的质疑,似乎消除了许多人的怀疑。Jones 也作了报告,大家对他的实验结果似乎

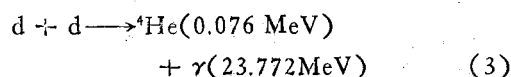
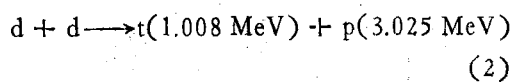
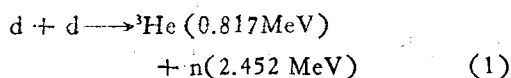
没有提出什么疑问。5月1日,美国物理学会在美国 Baltimore 举行会议,参加者有1500人,会上除了 Huggins 等少数几个报告外,大多数的实验报告都指出没有或只有少量中子产生。Lewis (Caltech) 对 Fleischman-Pones 实验中的过热、中子、 $\gamma$ 射线和  $^4\text{He}$  等的测量提出了批评。会议主席表示对 Jones 的实验结果比较相信。5月7日,在洛杉矶举行了美国电化学学会会议,有1600人出席。在关于冷聚变的专题会上,一共有九个关于冷聚变的报告,虽然其中大多数报告都表示了肯定的结果,但 Fleischman 和 Pones 在会上却承认了他们在实验中对中子、 $\gamma$ 射线的测量有错误,并承认  $^4\text{He}$  的发现也是不对的。因此,大家对他们的结果更加怀疑了,但是 Pones 仍坚持他们对热量的测量是正确的。5月23日由美国能源部和洛斯阿拉莫斯国家实验室在美国新墨西哥州 Santa Fe 联合举行了关于冷聚变现象专题国际会议,约有450人参加,他们来自美国、加拿大、联邦德国、意大利、中国、日本、法国等10多个国家和地区,提交的报告约125篇,其中有的报告支持和相信 Fleischman 和 Pones 的实验结果,观察到了大量热量产生又有中子等发射;有的报告则反对他们的结果而支持 Jones 的实验结果,即只有少量中子产生,基本上无过热释放;有的报告则认为不存在冷聚变现象。在这次国际会议上,除了报告了用电化学方法研究冷聚变现象的结果以外,还报告了用其它方法研究的结果。

## 一、冷核聚变现象研究的几种方法

### 1. 电解

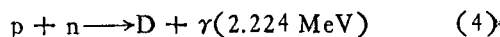
人们早已知道,有些金属例如钡和钛具有很强的贮氢能力.这些金属中晶格间距很大而原子尺寸很小,所以存在着电子密度较低的许多区域可以容纳氢原子.氢原子通过高压或通过电解池中电场的作用被吸入晶格,吸入钡晶格的氢原子数与钡原子数的比值可接近1,而对钛金属而言,该比值接近2.

Fleischman 等人<sup>[1]</sup>使用一个较小的电解池,池中装有纯度为99.5%的重水和氘化铀锂盐,阴极采用长度为10 cm的钡棒,阳极是铂丝,电极间通以直流电流,电流密度高达500 mA/cm<sup>2</sup>.他们用了不同直径(1—4 mm)的钡棒,还用了钡片和钡块做实验.他们发现,释放出的热量随着钡电极的体积和电流密度的增大而增加,每立方厘米钡产生超过输入能量(即过热)的速率大于10 W,且长达120 h,其中有一个实验产生的过热比竟大于1000%,所释放出的热量远大于假定钡中所吸收的全部氢原子与氧结合时所释放的热量.如此大量的释放热,除了归结为核聚变反应所致以外,很难想象出还能是由其它什么过程产生的.但是,核聚变究竟是否产生,要取决于能否观察到核聚变反应的产物.氘-氘聚变反应可通过以下方式进行:



(1)和(2)反应式的反应速率差不多,反应(3)只在晶格中才能产生,其反应速率比反应式(1)和(2)的要低好几个数量级.核反应产物有氦(<sup>3</sup>He和<sup>4</sup>He)、中子(n)、氚(t)、质子(p)和 $\gamma$ 射线.

犹他大学的研究组声称测到了氘、中子和2.22 MeV的 $\gamma$ 射线,并认为这种 $\gamma$ 射线是由反应物中子(2.452 MeV)被电解池中的质子俘获后产生的:



2.224 MeV  $\gamma$ 射线谱意味着中子的产生速率约为10<sup>4</sup>/cm<sup>3</sup>·s,相当于平均每对原子每秒产生10<sup>-20</sup>个聚变反应.但是,在洛杉矶会议上Fleischman和Pones宣布他们的测量结果有问题.事实上,如果认为热量是由核聚变产生的,则按所测得的热通量算出的中子产生速率应为10<sup>13</sup>/cm<sup>3</sup>·s,每对原子每秒应产生10<sup>-10</sup>个聚变,显然这与实验结果相矛盾.美国麻省理工学院P. D. Petrasso等人测到的 $\gamma$ 射线的能量是2.5 MeV而不是2.22 MeV<sup>[2]</sup>.

Jones及其合作者用的电解池较小,电解液是加了多种盐的重水,阴极是约为3g重的经过熔融的钛块,其表面积与体积之比较大.他们测到了能量为2.5 MeV的中子,中子信号比本底信号高五倍,平均每对原子每秒产生10<sup>-24</sup>个聚变,并未观察到热效应<sup>[3]</sup>.

研究冷聚变现象的其它电解法,多与上述类似,但有些实验未能观察到过热现象及核聚变反应产物.

### 2. 高压

Jones认为,吸入钡晶格中的氘产生聚变反应时,该系统必须处于非平衡状态.据此,意大利富拉斯卡蒂实验室的研究者使氘气和能吸收氘的金属钛直接接触,并通过改变温度和压强使氘吸入钛中或从钛中解吸出来,由此建立系统的非平衡条件.他们将钛做成剃齿状,并放入不锈钢瓶中,先使钛除气,然后通入氘气,逐渐增大气压直到50bar(1bar = 0.9869 atm),再将钢瓶放入装有液氮的容器中使系统的温度降到77 K,钢瓶中气压维持不变.随着液氮的蒸发,液面随时间的增加逐渐下降,钢瓶露出液面部分逐渐增多,因而系统的温度在随时间和空间变化.在这样的系统中,观察到了中子发射,发射时间长达60 h,中子发射呈无规形式,

中子计数比本底高 35 倍。在另一实验中,在不同的压强和温度条件下,使氘与钛直接接触近一天时间,然后将氘气抽走,并将液氮容器取走,使钢瓶及其内部的钛逐渐升到室温,大约经过 3 h 之后,观察到中子发射,发射时间约 80 min,中子脉冲是爆发式的,中子计数比本底竟高达 500 倍。这两个实验结果是与 Jones 关于中子发射的必要条件是该系统必须处于非平衡状态的看法相符合的。

H. O. Menlove 等人<sup>[4]</sup>和 R. Ryan 等人<sup>[5]</sup>(美国洛斯阿拉莫斯国家实验室)和 S. W. Barwick 等人<sup>[6]</sup>(加州大学伯克利分校)都在不同程度上重复了以上实验,但 F. M. Mueller 等人(洛斯阿拉莫斯国家实验室<sup>[7]</sup>)、J. C. Blencoe 等人(橡树岭国家实验室<sup>[8]</sup>)和 J. E. Schirber 等人(桑地亚国家实验室)<sup>[9]</sup>未能重复以上实验结果。

### 3. 粒子注入

如果吸入钯中的氘原子数与钯原子数之比  $D/Pd > 1$ , 则氘原子之间的距离可以减小,就能较易产生聚变反应。但是,用通常的电化学方法或气相充氘法很难达到这么高的比值。例如,用高能粒子(如氘)直接注入钯,这比值可达到 1.3 左右。

Alber G. Gu 等人(密西西比州大学)用 1keV 的氘等离子体束轰击钯靶,观察到了比本底高八倍左右的中子。氘束在这样低的能量条件下,按通常的“束-靶”聚变概念考虑,相应的反应截面仅为  $0.143 \times 10^{-41} \text{ cm}^2$ , 故这中子似乎不太可能直接由通常的“束-靶”聚变产生。S. M. Myer 等人(美国桑地亚国家实验室)<sup>[10]</sup>利用 30 keV 的氘束注入处于 40 K 温度的钯中,但未得到明显的中子计数。P. A. Seeger 等人(美国洛斯阿拉莫斯国家实验室)<sup>[11]</sup>用电子注入贮氘的钯中,使这些金属中的电子浓度在短时间内达到非平衡状态,但未得到有效结果。F. Besenbacher 等人(丹麦 Aarhus 大学)<sup>[12]</sup>利用钯或钛做电极,使其在氘气中产生直流辉光放电,希望在放电时氘注入钯或钛中,但最终未观察到高于本底的中子计数。

## 二、冷核聚变机制探讨

如果冷核聚变确实存在,那么这是由什么机制产生的呢?众所周知,在聚变发生之前,两个核是被它们的库仑位垒排斥分离的。如果这两个核的电荷分别为  $Z_1e$  和  $Z_2e$ , 则库仑位垒的量值为  $(Z_1e) \times (Z_2e)/r$ , 式中  $r$  为核的尺度,如果  $Z_1 = Z_2 = 1$ , 则其量值为 600keV。在通常的热核聚变研究中,需采取各种办法来提高核的能量(即温度),使其能克服核间的库仑位垒而发生聚变。此外,原子核也可以通过量子力学的隧道效应穿过位垒而发生聚变。当然,这种聚变几率是很小的,例如在氘分子中,两核间距为  $0.74 \text{ \AA}$ , 按 Clinton Dew 等人的计算,这几率为  $10^{-70}$ /分子·s。S. Koonin 等人对此作了更为精确的计算,这几率为  $10^{-64}$ /分子·s, 远低于 Fleischman 和 Jones 所观察到的反应几率。设想,如果氘核外的电子被一个质量为电子质量 207 倍而电荷仍为电子电荷的粒子(即负  $\mu$  子)所替代,由于其绕核旋转的轨道半径变小,则两氘核的间距可缩小 207 倍,此时穿透位垒的隧道几率将会增加 80 个数量级。因此,理论家们在寻找屏蔽库仑位垒的机制,以期解释冷核聚变反应速率。

M. N. Guinan<sup>[13]</sup> 等人提出氘化金属中氘核聚变是由宇宙射线中的负  $\mu$  子催化效应引起的。负  $\mu$  子催化理论认为,宇宙射线或实验室中产生的高能负  $\mu$  子能将绕氘核和氘核外围旋转的电子撞击出来而替代电子,形成一个较小的原子,这个“ $\mu$  原子”于是捕获另一氘核, $\mu$  子便绕着捕获的两个原子核旋转,其轨道半径变得很小,形成尺度很小的原子,两核间距大为缩小,因而导致穿透库仑位垒的隧道几率增高而发生核聚变反应。这反应产生一个较大的核,此核几乎立即粉碎并释放能量和原来的那个  $\mu$  子。这  $\mu$  子又重复以上过程,于是产生一连串的聚变反应,直到这  $\mu$  子衰退为止。负  $\mu$  子对核聚变起到了催化作用。在高气压 D-T 气体中,负  $\mu$  子催化的聚变链长度可达 170 (即每个  $\mu$  子引起 170 次聚变反应)<sup>[14]</sup>。在普通的气体

和固体中,负 $\mu$ 子不能引起很多次聚变。例如,在纯氘气中就没有观察到这种催化聚变链,因为形成 $\mu\text{D}_2^+$ 离子的时间( $10^{-6}\text{s}$ )远大于负 $\mu$ 子的寿命( $2.2\mu\text{s}$ )。但是,在金属氢化物如 $\text{TiD}_2$ 或 $\text{PdD}$ 中, $\mu\text{D}_2^+$ 的形成速率要比在普通的液体或气体中的快得多,因而每个负 $\mu$ 子能催化很多次聚变反应。为了能解释 Jones 等人的聚变速率,要求每个负 $\mu$ 子能催化700次聚变。但是, $\mu$ 子会粘在聚变反应物 $^3\text{He}$ 上形成 $\mu^3\text{He}$ ,这时 $\mu$ 子再也不能脱离出来而使催化聚变链中断<sup>[15]</sup>。为了检验 M. W. Guian 等人的推测,日本东京大学 K. Nagamine 等人<sup>[16]</sup>利用加速器 UT-MSL/KEK 产生的负 $\mu$ 子注入氘化钯 Pd(D) 上,却未见聚变速率有明显增加,因而 M. W. Guian 等人的推测未能被实验证实。

那么,金属氢化物中的聚变反应可否由其它重粒子的催化效应引起?要解释 Jones 等人所观察到的聚变速率,需要由一个五倍于电子质量的粒子去替代氘核外围的电子,为了解释 Fleischman 等人观察到的聚变速率,这种粒子的质量要10倍于电子质量,然而在实验中至今未发现这种粒子。

S. E. Koonian 提出,固体中聚变核环境的涨落能提高聚变速率。这是因为这种涨落会改变库仑势,而聚变速率对库仑势的变化是极其灵敏的。例如,库仑势均方根涨落的百分比为0.1(约3eV),聚变速率可提高大约八个数量级,当库仑势均方根涨落百分比为0.5时,聚变速率可提高30个数量级。前面讲到的意大利高压实验结果似乎与这一看法相符。

阎新中、蔡诗东等人(中国科学院物理研究所)考察了 Pd(或 Ti) 晶格空隙区域中的氘原子所形成的氘等离子体性质,认为如果在室温( $T = 300\text{K}$ )条件下氘核密度 $n > 10^{23}\text{cm}^{-3}$ ,则库仑耦合强度 $\Gamma = e^2/akT > 400$ ,式中 $a = [3/(4\pi n)]^{1/3}$ , $k$ 为玻耳兹曼常数,因而这种等离子体具有强耦合特性,由于集体的离子屏蔽和电子极化效应,穿透库仑位垒的隧道几率显著提高。计算表明,d-d 反应速率对氘核密

度是灵敏的,而对温度则不很重要,在 Pd(或 Ti) 中的氘核密度达到 $10^{25}\text{cm}^{-3}$ 时,才可产生可测到的中子数目。

H. Furth(美国普林斯顿等离子体实验室)<sup>[17]</sup>和 F. J. Mayer 等人<sup>[18]</sup>分别独立地提出,电化学实验中的中子是由晶格裂缝加速的氘核撞击到晶格中氘核所引起的聚变反应产生的。在载有大量氘的金属内部,应力很大,晶格容易产生裂缝,当内部应力积聚到足够大时,裂缝便通过金属传播,在裂缝两边的晶格表面上存在的电荷是不平衡的。随着裂缝的增长,带电表面分开而电荷保持不变,于是裂缝两侧间的电压 $V$ 增加,因为 $V = 10^9 \eta d$ ,式中 $\eta$ 是每平方晶格常数的未被平衡的电荷, $d$ 为裂缝宽度。当 $\eta = 0.1$ , $d = 10^{-5}\text{cm}$ 时, $V = 10^3\text{V}$ ;当 $d = 10^{-4}\text{cm}$ 时, $V = 10^4\text{V}$ 。如果杂散的氘核落入这裂缝间隙中时,氘核便被加速而获得足够的能量,则当它们撞击到晶格中氘核上时,便发生核聚变反应,被称为微热核聚变,其聚变速率可大到电化学实验中所观察到的聚变速率。在载有大量氢和氘的钯中,出现大块裂缝<sup>[19]</sup>以及晶体破碎时产生中子<sup>[20]</sup>的现象,在实验中很早就观察到了。

如果 Fleischman 等人的实验确实产生了过热,则还必须进一步解释在他们的实验中为什么中子和氘的产生速率要比与所释放的热量相对应的聚变速率慢 $10^9$ 倍。

关于 Fleischman 等人在实验中所观察到的过热现象,F. J. Mayer 等人<sup>[18]</sup>认为这是由晶格裂缝中静电场的静电能量转换成热量引起的。计算表明,这静电能 $E = 10^3 \eta^2 d/2$ 。如果每秒钟在几十平方厘米的面积上释放这种能量,则电功率就能达几瓦,呈现过热现象。Ali F. AbuTaba<sup>[21]</sup>认为在钯中的裂缝传播期间,钯中会释放显著的应变能,断裂功是过热现象的热源。理论家们对冷核聚变机制还提出了一些其它的模型。

### 三、进一步研究的若干问题<sup>[22]</sup>

1. 聚变产额与一些参量的关系。这些参

量是：氢与金属(钷或钷)离子之比,压强(由电场或气压或机械压强引起的),温度,氢化物相变,表面条件(例如电极表面处理,钷上镀钷)等。

2. 理解聚变是由于晶格中氘的约束引起的(压力聚变),还是由于氢化物中的裂缝传播的被强电场加速的氘核与晶格中氘核的碰撞引起的(微热核聚变)。

3. 比较 d-d, p-d 及 d-t 聚变速率,以便精确描述新现象。

笔者认为,目前还不能对冷聚变的存在与否作出决定性的判断,还需在实验和理论方面作进一步细致的研究,特别是目前实验的重复性极差,使人很难获得可信结果。现在可以肯定的一点是,即使冷核聚变存在,但它没有希望成为有用的能源,因为聚变反应速率太低,且其燃料是价格昂贵的钷而不是廉价的氘,钷的储量很少,地球上大约有 95% 的钷为南非和苏联所拥有。但是,这种慢反应速率的冷核聚变或许可用来解释地球或其他行星上,甚至星体中较冷区域内出现的热量和  $^3\text{He}$  的现象。如能提高反应速率,这种冷核聚变或许可用来作为单能中子源。从基础科学研究角度来看,通过凝聚物质中冷核聚变现象的研究,可以建立金属-氢系统在极端条件下的测试方法,并加深对这一系统的物理性质的理解。

- [1] M. Fleischman et al., *J. Electroanalytical Chemistry*, 261 (1989), 301.  
 [2] P. D. Petrasso et al., *Nature*, 339 (1989), 183.  
 [3] S. E. Jones et al., *Nature*, 338 (1989), 737.  
 [4] H. O. Menlove et al., LA-UR-89-1570.  
 [5] R. Ryan et al., Abstracts Selected for Poster Sessions, part: Neutron and Gamma-Ray Spectroscopy, Work-

- shop on Cold Fusion Phenomena, Santa Fe, NM, USA, May 23—25, 1989, 10.  
 [6] S. W. Barwick, et al., Abstracts of Presentations, Session E, Workshop on Cold Fusion Phenomena, Santa Fe, NM, USA, May 23—25, 1989, 6.  
 [7] F. M. Mueller et al., Abstracts of Presentations, Session B, Workshop on Cold Fusion Phenomena, Santa Fe, NM, USA, May 23—25 1989, 3.  
 [8] J. C. Blencoe et al., Abstracts of Presentations, Session B, Workshop on Cold Fusion Phenomena, Santa Fe, NM, USA, May 23—25 1989, 4.  
 [9] J. E. Schirber, et al., Abstracts selected for Poster Sessions, Part: Neutron and Gamma-Ray Spectroscopy, Workshop on Cold Fusion Phenomena, Santa Fe, NM, USA, May 23—25 1989, 21.  
 [10] S. M. Myers et al., Abstracts of Presentations, Session E, Workshop on Cold Fusion Phenomena, Santa Fe, NM, USA, May 23—25 1989, 3.  
 [11] P. A. Seeger et al., Abstracts Selected for Poster Sessions, Part: Neutron and Gamma-Ray Spectroscopy, Workshop on Cold Fusion Phenomena, Santa Fe, NM, USA, May 23—25 1989, 19.  
 [12] F. Besenbacher et al., Abstracts selected for Poster Sessions, Part: Neutron and Gamma-Ray Spectroscopy, Workshop on Cold Fusion Phenomena, Santa Fe, NM, USA, May 23—25 1989, 3.  
 [13] M. W. Guinan et al., UCRL Report, (1989), 10081.  
 [14] S. E. Jones, *Nature*, 321 (1986), 127.  
 [15] C. Y. Hu et al., *Phys. Rev.*, A36 (1987), 5420.  
 [16] K. Nagamine et al., Abstracts for Presentations, Session D, Workshop on Cold Fusion Phenomena, Santa Fe, NM, USA, May 23—25 1989, 6.  
 [17] H. Furth, APC Meeting, May, 1, 1989.  
 [18] F. J. Mayer et al., Abstracts for Presentations, Session E, Workshop on Cold Fusion Phenomena, Santa Fe, NM, USA, May 23—25 1989, 5.  
 [19] H. C. Jamieson et al., *J. Less Common Metals*, 50 (1976), 89.  
 [20] V. A. Klyuer et al., *Sov. Tech. Phys.*, 12 (1986), 551.  
 [21] Ali F. Abutaha, Abstracts selected for Poster Sessions, Part: Applicable Electrochemistry, Workshop on Cold Fusion Phenomena, Santa Fe, NM, USA, May 23—25, 1989, 1.  
 [22] S. E. Jones, Abstracts of Presentations, Session C, Workshop on Cold Fusion Phenomena, Santa Fe, NM, USA, May 23—25 1989, 2.

## 1990 年第 3 期《物理》内容预告

近年来 X 射线及中子衍射学进展(王煜明);高温超导电流也许不会永远持续(阎守胜编译);质量和速度的关系(郭奕玲);婴儿宇宙,黑洞的后裔(Stephen W. Hawking);古代铜鼓矿料来源的铅同位素考证(万辅彬等);掺杂无序和混晶半导体的晶格振动行为(陆卫等);相图及其应用专题系列(IV):稀土合金相图与发展稀土磁性材料(吴昌衡);相图及其应用专题系列(V):低价稀土卤化物相图与高效发光材料的研制和

开发(王世华);一种新型的记忆元件和定时装置(孟令崑);加速器质谱技术在核物理的应用(李业祥);光纤法布里-珀罗(FFP)传感器(邹运庐等);夫兰克-赫芝实验技术的改进(傅云翎);等离子体气相沉积有机硅绝缘钝化膜(周坤彝等);发光动力学(张新夷);费曼和量子场论(丁亦兵编译);费曼对凝聚态物理的贡献(张先蔚编译)。