

放射性同位素电池及其应用

梁代骅 沈关涛

(中国科学院上海原子核研究所)

一、引言

就目前所知,干电池、蓄电池和燃料电池的使用寿命只有几小时至几十天,因而仅能限于短期应用.对于长期任务,必须配备重量可观的电池或经常定期更换.这对于一般场合是容易办到的,但对人们难于经常到达的严重缺氧的高山、严寒的极区、远海孤岛及数千米深的海下,那就很难办到了,对于长期的空间航行更无此可能性.太阳能电池的使用寿命较长,但仅适用于阳光充足的地区,在海下和远外空间等没有阳光或阳光极弱的地方,就无能为力了.月球上的漫长黑夜(一个“月夜”相当于十四个地球昼夜)及强烈的太阳风、宇宙辐射和宇宙微尘的作用,将影响太阳能电池的性能和使用寿命.为了适应各种特殊场合对能源的要求,促使人们研制一种尽可能不受外界环境影响的长寿命电池.放射性同位素电池就是在这种情况下应运而生,这是近十多年来出现的一种新型的长寿命电池.

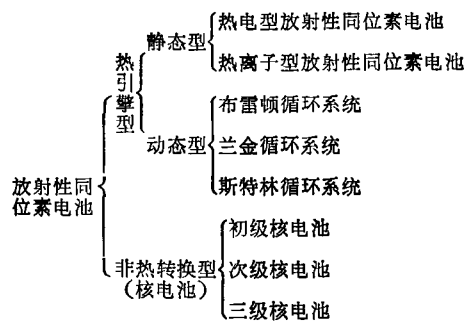
此外,放射性同位素电池也是大规模利用原子能工业“废物”(裂变产物),化害为利、变废为宝的重要途径,也是原子能综合利用的一个重要方面.

二、放射性同位素电池的种类与特点

放射性同位素电池的种类很多,按工作原理可分为热引擎型和非热转换型两类(见表

1).这两类电池的区别在于,前者需要一个换能装置(即所谓“引擎”)把热能转换成电能,后者则是将放射性同位素衰变时出射的高速带电粒子的动能直接转换成电能,或使射线经过某种次级效应而转变成电能.一般仅把非热转换型放射性同位素电池称为核电池.

表1 放射性同位素电池的分类



与其他电池相比,放射性同位素电池具有许多优点:(1)寿命长.这主要取决于所用放射性同位素半衰期的长短和半导体换能元件的长期工作稳定性,目前,该种电池的使用寿命可达5—10年.(2)对环境适应性强.能承受较强的辐射照射,不怕微粒轰击;能承受火箭发射和返回大气层时的冲击、加速、振动及各种可能发生事故时的热冲击、机械冲击;能承受较高的海水静压力,海水腐蚀;不依赖阳光等.(3)工作可靠.(4)不需维护.(5)结构紧凑、体积小、重量轻.这对于空间和医学应用特别合适.例如,第一台正式应用于空间的放射性同位素电池,形状接近球体,直径约12.5cm,高约13.7cm,重约2kg,但它所提供的电力却等于一台重300kg左右的镍-镉电池所提供的电力.又

例如，正式应用于埋植式心脏起搏器的放射性同位素电池，重量仅40g，长约5cm，直径约2.3cm。核电池就更小了，有的只有纽扣般大小。由于具有上述这些特点，因而放射性同位素电池具有特殊的用途。

三、放射性同位素电池的基本结构

不同种类，不同用途的放射性同位素电池的结构是各不相同的，现以热电型放射性同位素电池为例，简单介绍一下它的基本结构。图1为该种电池的结构示意图。它共包括六个部

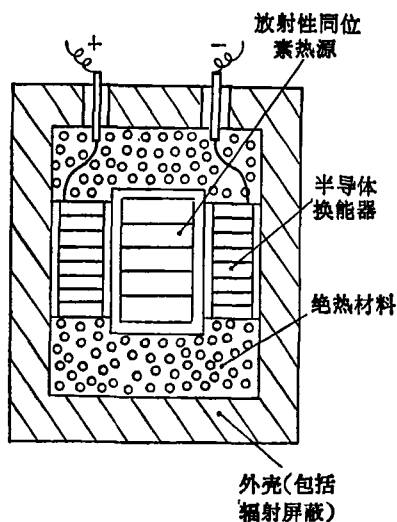


图1 热电型放射性同位素电池结构示意图

分：放射性同位素热源、半导体换能器、绝热材料、外壳-散热器、辐射屏蔽与安全防护、电压变换和功率调节。

热源是放射性同位素电池的主要部件之一。它是决定电池的性能、结构特点和成本的关键。它由放射性同位素燃料和燃料盒两部分组成。放射性同位素燃料是电池的能量来源。为获得高性能的电池，要求作燃料用的放射性同位素有一定的功率密度(比功率 $>0.1\text{W/g}$)、半衰期长、毒性小、有害杂质少、有良好的物理、化学性能和加工性能、与燃料盒适应性好等。因此，虽然已知的放射性同位素有1500多种，但可用作电池燃料的只有 ^{90}Sr 、 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{147}Pm 、

^{210}Po 、 ^{238}Pu 、 ^{242}Cm 、 ^{244}Cm 等十来种，其中用得最多的是 ^{90}Sr 和 ^{238}Pu 。燃料盒的主要任务是可靠地密封燃料，确保安全。一个中等功率水平(几十瓦)的电池所包含的同位素有几十万居里，决不允许放射性物质向周围环境扩散，这就要求燃料盒在电池的安装、试验、使用、运输以及各种事故环境中完整无损。尤其在空间应用，燃料盒必须能经受得住重返大气层时极为强烈的热冲击和机械冲击，能够克服空气动力加热等作用而完整地返回地面。

半导体换能器是另一个主要部件，它的主要作用是将放射性同位素热源发出的热能转变为电能，对换能器的主要要求是转换效率高和长期工作的稳定性。目前常用的换能材料有三种：碲化铅、碲化铋和硅-锗合金，它们分别为中温、低温、高温材料。每种材料均有各自的最佳工作温度范围。为了提高换能效率，常常几种材料联合使用(串联或级联)。此外，在制造换能器的过程中，还要解决许多工艺问题，例如与电极的焊接问题，如何降低热阻等。

绝热材料的主要作用是减少漏热，保证热源中的大部分热量从换能元件中通过。目前，使用较多的一种绝热材料是微孔绝热材料，它主要由二氧化硅、玻璃纤维和少量遮光剂组成，其热导率低于空气的热导率，绝热性能良好。外壳-散热器有双重作用，一是保护电池本身，二是散热。中等功率以上的电池，除水下应用外，大多采用带散热翅的外壳。电池的安全防护有两个方面，一是防止放射性物质散布和污染，二是设计适当厚度的屏蔽层，使射线的强度减弱到允许的安全标准，从而保证电池附近的仪器及工作人员能够安全正常地工作。电池的核安全问题已能很好地解决，自正式应用以来，还未出现过安全事故。电池的输出大都是低电压大电流，而用电设备要求的电压往往较高，有的还要求多路供电，因而需要进行电压变换，使与所用设备相匹配。功率调节装置有两个功能，一是保护电池本身，二起“功率调坪”作用，使电池在整个运行过程中，保持平稳的工作状态，不受热源衰变的影响。此外，电池还有一些其它零部

件。

四、热电型放射性同位素电池的工作原理

不同种类的放射性同位素电池的工作原理是不同的,对于热电型放射性同位素电池,它的热电流程图如图 2 所示。放射性同位素热源发

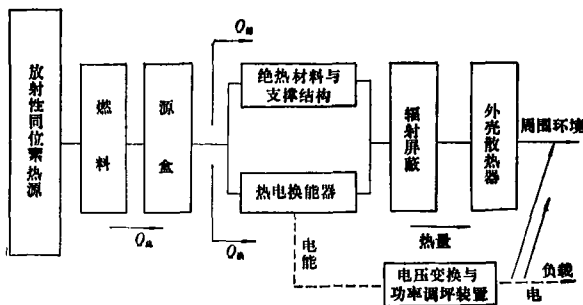


图 2 热电型放射性同位素电池的热电流程图

出的热量 ($Q_{总}$),大部分通过换能器 ($Q_{换}$),还有小部分不可避免地通过绝热材料和支撑结构漏掉了 ($Q_{漏}$),通过换能器的热量 $Q_{换}$ 只有一小部分被转换成电能,提供负载使用,其余热量与 $Q_{漏}$ 一起,最终通过外壳-散热器向周围环境排出。

热电型放射性同位素电池是以温差电现象(如塞贝克效应、珀尔帖效应和汤姆孙效应等)的理论为基础,根据温差发电的原理制成的。热源中的放射性同位素不断衰变放射出射线 (α, β, γ),这些射线通过物质时与物质发生相互作用,最终被阻止和吸收,射线的动能就转变为热能,使与其相互作用的物质(如源盒)的温度升高。通过绝热材料的作用,在换能器的两端建立起几百度的温差,并由半导体换能器把这种热能转变为电能。半导体换能器的工作原理示意图见图 3。换能器的基本单元由一个 n 型和一个 p 型元件组成,称为温差电偶。一个电池的换能器由多对温差电偶组成。

热电型电池半导体换能器能量转换的基本原理如下: n 型半导体是掺入施主杂质的半导体,施主杂质易释放电子,可使半导体内产生很

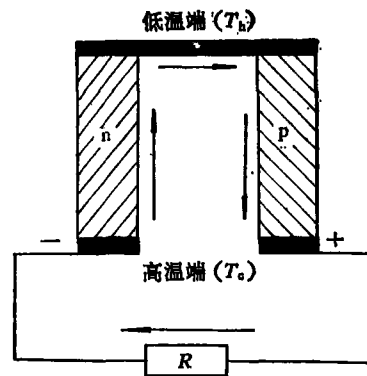


图 3 半导体换能器工作原理示意图

多自由电子。当这种半导体一端加热时,自由电子从热端扩散到冷端,使冷端积累电子而带负电,相应的热端带正电。p 型半导体是掺入受主杂质的半导体,当它被加热时,使半导体中的电子摆脱原子的束缚而变为自由状态,这些电子很容易被受主杂质俘获,而使半导体呈“空穴”型。因此,当它的一端被加热时,“空穴”由热端扩散到冷端,使冷端带正电而热端带负电。这样,n-p 型温差电偶两端的电压,就等于这两种半导体元件所产生的电位差之和。为使电池获得比较高的电压,可将若干对热电偶串联起来。将电偶与外负载接通,便可对负载供电。

五、放射性同位素电池的性能

放射性同位素电池的总性能参数包括:效率、输出电功率、输出电压、工作寿命、重量、体积、成本和可靠性等等。人们是根据这些参数来评价一个电池的。

电池的总效率定义为

$$\eta_{总} = \frac{\text{电池输出的电功率 } (P)}{\text{放射性同位素热源的热功率 } (Q_{总})}$$

$$= \eta_{热电} \cdot \eta_{结构} \cdot \eta_{变调}$$

式中 $\eta_{热电}$, $\eta_{结构}$, $\eta_{变调}$ 分别代表换能器的热电转换效率、电池的结构效率和电压变换与功率调节装置的效率。效率的精确表达式和严格计算比较麻烦,实际计算可以简化。在满足几何条件和电阻最佳化的理想条件下,表达式为

$$\eta_{\text{热电}}(\text{最大}) = \eta_{\text{卡诺}} \cdot \eta_{\text{材料}}(\text{最大})$$

$$= \frac{T_h - T_c}{T_h} \cdot \frac{\sqrt{1 + \frac{Z}{2}(T_h - T_c)} - 1}{\sqrt{1 + \frac{Z}{2}(T_h - T_c) + \frac{T_c}{T_h}}}$$

$$\eta_{\text{结构}} = (Q_{\text{总}} - Q_{\text{漏}})/Q_{\text{总}}$$

$$\eta_{\text{变换}} = P/P_0$$

这里, $\eta_{\text{卡诺}}$, $\eta_{\text{材料}}$ 分别称为卡诺效率和半导体换能材料的换能效率, T_h , T_c 分别为换能器的高、低温端的温度 (K), Z 为换能材料的灵敏值, P_0 为换能器输出的电功率, P 为电池输出的电功率. 在进行近似计算时, Z 的表达式为

$$Z = [(\alpha_n + \alpha_p)/(\sqrt{\rho_n K_n} + \sqrt{\rho_p K_p})]^2$$

式中 α_n , α_p 分别为 n 型和 p 型元件的塞贝克系数 ($\mu\text{V}/\text{K}$), ρ_n , ρ_p 为相应元件的电阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$); K_n , K_p 为相应元件的热导率 ($\text{W}/\text{cm} \cdot \text{K}$). 上式各值分别取使用温度范围 (即 $T_h - T_c$) 的相应积分平均值.

电池的输出功率和输出电压, 主要按用户的要求进行设计. 在理想条件下, 电池的最大输出功率和负载电压为

$$P_{\text{最大}} = [n(\alpha_n + \alpha_p)(T_h - T_c)]^2/4R_{\text{外}}$$

$$V = \frac{Mn}{(M+1)} (\alpha_n + \alpha_p)(T_h - T_c)$$

上两式中 n 为换能元件的对数 (即热电偶的个数), $R_{\text{外}}$ 为电池的负载电阻 (Ω), M 由下式求得:

$$M = R_{\text{外}}/R_{\text{内}} = \sqrt{1 + Z(T_h + T_c)}/2$$

其中 $R_{\text{内}}$ 为电池的内阻 (Ω), 相应最大输出功率的最佳电流为

$$I_0 = n(\alpha_n + \alpha_p)(T_h - T_c)/R_{\text{内}}(1 + M)$$

上述计算都是对换能元件采用单段材料而言, 若采用分段结构, 表达式将更为复杂些.

如果电池用于空间, 则电池外壳靠辐射散热, 外壳表面积与表面温度之间的关系为

$$P_{\text{净}}/A_2 = [\eta_{\text{壳}}/(1 - \eta_{\text{壳}})][\epsilon\sigma T_{\text{R}}^4 - q_{\text{r}}/A_2]$$

式中 $P_{\text{净}}$ 为电池的净功率输出 (W), A_2 为电池外壳的辐射表面积 (cm^2), ϵ 为辐射表面热辐射率, σ 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数, T_{R} 为辐射表面温度, q_{r} 为从外部能源吸收的辐射热 (W/cm^2).

在地面应用时, 电池外壳散热器 (传热不仅靠辐射, 而且还有对流, 其关系为

$$Q_{\text{散}} = Q_{\text{对流}} + Q_{\text{辐射}} = h_c A_c \Delta T + h_r A_r \Delta T$$

式中 h_c , h_r 分别为对流热传导系数和辐射热传导系数 ($\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{K}$), A_c , A_r 分别为外壳的自然对流传导面积和辐射热传导面积 (cm^2), $\Delta T = T_{\text{壳}} - T_{\text{环}}$ (K), $T_{\text{壳}}$ 为外壳表面温度, $T_{\text{环}}$ 为周围环境温度. 水下应用时, 要用相应的其他公式计算.

电池漏走的热量 ($Q_{\text{漏}}$), 燃料盒的温度及元件尺寸等, 要根据具体结构而定. 电池各个性能参数的相对重要性, 随电池的用途不同而有所变化, 在设计计算时要针对具体情况进行综合考虑.

六、放射性同位素电池的应用

放射性同位素电池的研制开始于五十年代中期, 到六十年代初, 就先后在海、陆、空间和医学等领域取得了实际应用. 目前正式应用的电池都为热电型放射性同位素电池. 其他各类电池的研制也取得了相当大的进展, 有的处于研制试验阶段, 有的已接近实用水平, 将在八十年代投入使用. 下面简略介绍一下热电型放射性同位素电池在海洋、地面、空间和生物医药四个方面的应用情况.

1. 空间应用

空间应用主要是三个领域: 某些具有特殊使命的地球卫星, 月面科学考察站, 外层空间飞行与探索.

空间能源是宇宙航行迫切需要解决的问题, 而且对能源的要求非常高, 除要求功率高、寿命长、体积小、重量轻外, 还要求可靠性好, 能适应火箭动力学环境和严峻的宇宙环境. 用于人造地球卫星的电源有化学电池、燃料电池、太阳能电池和放射性同位素电池等. 前两种只适用于短期工作. 在地球轨道上, 阳光充足, 太阳

能电池已发展成为人造地球卫星的主要电源。然而,某些具有特殊使命的卫星常借助于同位素电池供电。六十年代初期,美国先后发射五颗“子午仪”导航卫星,以解决“北极星”核潜艇的精确定位。1972年9月又发射了这类卫星的改进型,放射性同位素电池是作为主要能源使用的。其中1961年6月首次在空间应用的同位素电池运行了十多年,大大超过原来的设计寿命。1968年和1969年又有两颗军用气象卫星发射到空间,它们各携带了两台同位素电池作为太阳能电源的辅助电源。此外,美国国防部于1976年发射了两颗通讯卫星,每颗卫星由两台百瓦级同位素电池供电,共输出300W电能。

在月球表面上,漫长的月夜,十分悬殊的温差、经常受到陨石袭击和强烈的太阳辐射,没有空气和水,缺乏人类生存的必要条件。在这样恶劣环境中,用放射性同位素电池作为月面考察站的电源是比较理想的。1969—1972年期间,共有五台放射性同位素电池,分别由“阿波罗”12, 14, 15, 16, 17号的宇航员带上了月球,它们昼夜为月震仪、磁强仪、热流计、重力计、大气成分分析仪和太阳风测定仪等多种仪器提供动力。试验表明,电池工作情况良好,而且已大大超出原设计的一年使用寿命。

当宇宙飞船在太阳系向外层深空间飞行时,由于飞行时间长(以年计),且太阳光通量随之急剧下降,在这样的恶劣环境下,同位素电池能很好地满足这种特殊任务的要求。为了探索木星的奥秘,1972年和1973年先后发射了“先驱者”10号,11号木星探测器,每个探测器均配备了四台高性能的放射性同位素电池,合计能提供120W的电功率。此外还配备有12个1W的放射性同位素加热装置。1975年各携带两台同位素电池(各共70W)的“海盗”1号,2号火星探测器踏上了八亿多公里的旅程,于1976年成功地实现了火星软着陆,进行各种科学考察,并将各种资料和照片等发回地球。1977年美国航空和航天局又发射了“旅行者”1号和2号宇宙飞船,去执行木星和土星的飞行使命,其中“旅行者”2号,于1979年9月越过木星,

1981年8月接近土星,预计1986年抵达天王星,1990年9月越过冥王星轨道。飞船上载了三台百瓦级同位素电池,共发出438W电功率。

2. 海下应用

在水下,没有阳光,无法应用太阳能电池,其他各种电池,也因寿命短等缺点,不完全适用。而放射性同位素电池却是一种比较理想的水下电源。在海下应用需要解决耐压和耐海水腐蚀问题。目前,国际上已有几十台同位素电池投入海洋应用,估计今后将增加到几百台。同位素电池在海下的应用是多方面的,主要作为海下声纳、信标、水下监听器、海底电缆中继站、通讯增音器、深海应答器、海潮报警器、海底实验室以及各种海洋仪器的电源。美国海军于七十年代中期开始研究一种用于海底监察系统中使用的半瓦级的放射性同位素电池,设计寿命15年,1975年已搞出样机,研究试验工作仍在进行。

3. 地面和海面的应用

放射性同位素电池在地面和海面上主要用于其他能源难以发挥作用的场合,例如南极、北极、远海孤岛、高山、沙漠等条件恶劣、人迹不易到达的地方。地面和海面上应用的电池,人接触的机会相对多一些,因而需要很好的辐射屏蔽。许多国家都在进行这方面应用的电池的研制工作,并于六十年代初起,相继正式投入应用。它们主要用作自动无人气象站(包括南极、北极、高山、海洋浮漂气象站)、浮标和灯塔、地震观察站、飞机导航雷达信标、微波通讯中继站、核武器控制系统以及钟表等的电源。美国海军比较重视发展水下及地面用的放射性同位素电池,单美国目前至少有几十个各种型号的电池投入海面 and 地面应用,1976年相继把多台同位素电池用于海洋信标、南极气象站等方面。

4. 医学应用

微瓦级、毫瓦级的微型放射性同位素电池可供生物医学上使用,放射性同位素心脏起搏器就是一个突出例子。1970年4月法国巴黎布鲁塞医院首次将放射性同位素心脏起搏器植入人体获得成功。这种起搏器所用的同位素电

池,以 ^{238}Pu 为燃料,输出电功率为 $200\mu\text{W}$,寿命至少可达十年.它的体积很小,为一个直径 2.3cm 、高 5cm 圆柱体,其横截面相当于伍分硬币的大小,重 40g .美国于 1972 年 7 月也把同位素心脏起搏器植入人体.该起搏器所用的电池外形尺寸为 $\phi 1.7 \times 4.5(\text{cm})$.这种起搏器适用于房室传导阻滞和房颤伴有室率缓慢的心脏病患者,它的功能是当患者心率低于 62 次/分时,给予一定的电脉冲刺激,增强心脏的搏动能力,使患者的心率维持在 72 次/分.据最近一个资料的不完全统计,已有 126 个放射性同位素心脏起搏器植入人体,其中只有四例失败, 83 个现仍在安全地运转,失败率小于 0.15% .

1975 年美国已研制成功植入式的放射性同位素膈神经模拟器,并取得了专利.它是由放射性同位素电池 (^{238}Pu 为燃料)、电脉冲发生器和调制器等组成,是一种借助于同位素电池产生的电能来刺激一根或多根膈神经,以达到控制哺乳动物呼吸速率的装置.它的直径为 7cm ,厚 3.2cm ,重约 198g ,电能输出约 $1-5\text{mW}$.此外,放射性同位素电池在医学上还可作为括约肌刺激器、人工血压调节器、人工心脏、人工肺脏、人工肾脏等人造脏器的电源,并且人工心脏已开始牛、羊等动物身上做试验.

七、结 束 语

二十多年来的研究和应用表明,热电型放射性同位素电池是一种十分可靠的长寿命电

(上接第314页)

常会发现一些过去从未了解的、有趣的新性能”.

某些材料科学家对此仍持保留态度.哈佛大学应用物理学家 David Turnbull 认为,如果结果属实,钱的结果将是非常重要的.但是他担心这种铁银合金的均匀性究竟如何,他说:“也许是均匀的,但在没有进一步证实其在原子尺度上也是按 $50:50$ 均匀混合的话,我将难以信服”.然而钱坚持认为这种合金至少在百分之二的误差范围内是混合得均匀的.

钱的工作是第一次制备出那些根本不存在相应晶态合金的元素系统的金属玻璃.这种非晶态铁银合金

池,该类电池已比较成熟,并在海洋、陆地、空间和生物医学上获得广泛的应用,在那些其他电池难以发挥作用的领域更能显示出它的优越性.目前,该类型电池仍在继续发展,新的发展主要在两个方面:(1)采用先进的同位素分离和燃料生产工艺,(2)研制新的热电材料——硒材料,从而使电池的效率提高,成本降低、性能大为改善.预计到八十年代初中期,效率可从原来的 $5-6\%$ 提高到 $10-14\%$;燃料成本将从 1.7 百万美元降到 0.6 百万美元;电池的成本将从 2 万美元/ $\text{W}(\text{e})$ 降到 6 千美元/ $\text{W}(\text{e})$;电池的比功率可从 $1.5\text{W}(\text{e})/\text{lb}$ 提高到 $4\text{W}(\text{e})/\text{lb}$.

其他类型的放射性同位素电池也取得了可喜的进展.1977 年有一台兰金循环系统开始投入运行,以 Pu 为燃料,输出 $1300\text{W}(\text{e})$,效率为 20% ,重 450lb 左右.八十年代,布雷顿循环系统、斯特林系统都将投入运行,输出效率为千瓦级.预计反应堆空间能源将在 1986—1988 年投入运行,输出功率约 $3-5\text{kW}$.

中科院上海原子核所于 1971 年首次成功地安装了一台放射性同位素电池,以 ^{210}Po 为燃料,输出功率为 $1.4\text{W}(\text{e})$,效率达 4.2% .预料这种新型电源将随着原子能事业和科学技术的发展而不断完善,应用范围将不断扩大.

参 考 文 献

- [1] W. R. Corliss and D. G. Hazvey, Radioisotopic Power Generation, Prentice-Hall, Inc., (1964).
- [2] 梁代骅、斯厚智、杜光天、沈关涛,放射性同位素电池,原子能出版社,(1978).

是亚稳态,在 250°C 以上,合金中的铁和银开始彼此分离,并分别晶化.

既然铁和银彼此互不相容,那么在这种新的金属玻璃中是什么力能将这些原子结合在一起呢?钱认为铁原子间很强的内聚力就是其根源,而银原子只是简单地被捕陷于其间.他指出,铁银合金的成功将排斥了非晶固体中的微晶理论,因为这种理论认为金属玻璃的存在是与相应晶态的存在密切相关的.

(赵见高自 Science News
1983 年第 174 卷第 6 期)