



# 核動力工程

**Hedongli Gongcheng**



**4**

中国核学会编辑  
原子能出版社出版

**1980**  
第一卷

# 核动力工程

一卷 (1980) 总目录

- 未来世界是核能的世界…………… (1-1)
- 目前世界各国民用核动力发展形势和动向…………… (2-1)
- 解决今后能源的新途径——高温气冷堆的综合利用…………… (3-1)
- 美国三里岛核电站事故和我们的一些看法…………… (1-54)

## 堆物理

- 三维粗网格展开法中子扩散计算…………… (1-5)
- 一维离散座标 $S_n$ 程序ODSN…………… (2-31)
- 广义G-G近似与氢致慢化的严格计算…………… (3-12)
- 轻水反应堆沸腾噪声的模拟实验…………… (2-24)
- 零功率堆物理实验室中子通量在线测量系统…………… (4-13)
- FMJ-1型反应性测量模拟计算机…………… (1-48)

## 热工水力

- 压水堆一回路自然循环特性及其计算…………… (1-17)
- 不锈钢管路及其部件的阻力特性…………… (2-50)
- 核工程中采用热管的探讨…………… (3-50)

## 堆结构与力学

- 论高强度钢在核动力反应堆压力容器中的应用…………… (2-11)
- 美国西屋压水堆堆内结构的改进…………… (3-53)
- 用最小二乘法配置有限元…………… (1-31)

## 燃料与元件

- 锆-2和锆-4合金管中的氢化物取向与管结构关系的初步研究(上)…………… (1-27)
- 锆-2和锆-4合金管中的氢化物取向与管结构关系的初步研究(下)…………… (2-43)
- 用内胶凝法制备高密度 $UO_2$ 陶瓷微球的实验研究(上)…………… (2-59)
- 用内胶凝法制备高密度 $UO_2$ 陶瓷微球的实验研究(下)…………… (3-26)
- 用激光脉冲法测量几种反应堆材料的热扩散率、比热和热导率…………… (4-1)

- $UO_2$ 窄板燃料元件的结构设计研究…………… (4-43)

## 堆化学、腐蚀

- 锆合金在高温高压水中的腐蚀…………… (3-32)
- 锆-2合金管材焊接后在过热蒸汽中的不均匀腐蚀…………… (4-28)
- 压水堆冷却系统中的气体及其含量计算…………… (4-19)
- 铀和钼同位素丰度比的精密测定…………… (4-56)

## 控制与仪器

- 国产镍铬-镍铝热电偶耐中子辐照性能的试验研究…………… (1-42)
- 自给能中子探测器绝缘区空间电荷初步探讨…………… (3-43)
- 长管路抽气系统中浮子流量计指示流量的修正…………… (4-68)
- 磁阻离合器的试验研究…………… (4-50)

## 其它

- 一九七九年国际标准化组织技术委员会85工作会议…………… (1-59)
- 一九七九年欧洲核会议…………… (1-61)
- 西德标准化学会核技术标准委员会介绍…………… (2-62)
- 辐照技术研究…………… (4-61)
- 拆除放射性污染的玻璃纤维保温层的尝试…………… (4-71)

## 简讯

- 堆化学会议在浙江召开…………… (1-0)
- 反应堆热工流体术语和符号讨论会…………… (1-0)
- 中国核学会第一次全国代表大会在北京召开…………… (2-0)
- 电离辐射计量学术会议…………… (2-0)
- 二机部动力堆标准技术小组活动情况…………… (2-0)
- 美籍反应堆热工专家汤焱孙博士来华讲学…………… (3-0)
- 1980年反应堆物理学术讨论会在苏州召开…………… (3-0)

核动力工程 (季刊)

一九八〇年 第一卷第四期

编辑者 中国核学会  
《核动力工程》编辑部  
(成都291信箱31分箱)

出版者 原子能出版社  
(北京2108信箱)

发行者 新华书店北京发行所

印刷者 重庆印制一厂  
四川省期刊登记证号: 046

统一书号: 15175.291

定价: 0.60元

1980年11月出版

(限国内发行)

# 用激光脉冲法测量几种反应堆材料的热扩散率、比热和热导率

应诗浩 吉忠昌

介绍激光脉冲法测量材料的热扩散率、比热和热导率方法在本实验室中的使用情况,以及对金属(纯铁、电弧熔炼钨、铀和铍)、陶瓷(二氧化铀、氧化铍)和石墨等材料的测量结果。

## 一、引言

热脉冲法测量材料的热扩散率、比热和热导率首先是由帕克(Parker)等人<sup>[1]</sup>提出的。随后有许多人在理论和实验技术方面发展了这种方法。文献[2—5]讨论了此法在高温测量时的修正。许多作者<sup>[4—8]</sup>讨论了激光脉冲宽度对测量结果的影响。文献[9]对各种偏离边界条件引起的误差作了较深入的研究。还有人<sup>[10,11]</sup>研究了如何从两层复合材料一层的已知数据测出另一层的热扩散率。早期多数用示波器记录试样的温度变化,进入70年代以来,逐渐用电子计算机记录和处理数据,使测量更加迅速方便,并使热扩散率的测量精度从原来的 $\pm 5\%$ 左右提高到 $\pm (1-2)\%$ ,<sup>[9,12,13]</sup>。文献[13]曾对1973年以前热脉冲法的进展情况作了总结。

帕克等只是在原则上提出了在测量热扩散率的同时还能测量比热。随后,有许多人进行了同时测量比热的研究,但多数结果不理想。近来有人报道<sup>[14]</sup>,在80—1100K间,用激光脉冲法测比热的精度已接近精度较高的绝热卡计法,可达0.5—2%左右。

由于激光脉冲法所需要的试样小(重量约1克左右,直径6—10毫米,厚度0.5—3毫米的薄片),加工简单,测量迅速方便,测量的温度范围宽(-196—3000℃),对均匀的金属、半导体、陶瓷和其他非金属材料都能进行测量,而且测量的准确度也较高(1—10%),所以近十多年来,成为国内外用得较多的热导测量手段。有人估计<sup>[9]</sup>,75%以上的热扩散率数据是用此法测得的。

我们与上海激光站于1971年试制了国内第一台激光脉冲热导仪,测量温度范围为室温到2000℃。后来自己又建立了一台立式的测量室温到800℃的热扩散率和比热的测试设备。本文以对金属、陶瓷和石墨的测量结果作为例子,介绍激光脉冲法在本实验室中使用情况。

下面着重从物理概念上介绍测量原理。计算公式的推导见文献[1, 5]。

### 1. 测量原理

假设图1中某待测片状试样已处于某平衡温度 $T$ 。(见图2)。在 $t$ 时,用一脉冲激光

束照射试样正面,使正面极薄一层处产生瞬时温升,同时用热偶或红外元件探测试样背面的温度变化,可得到如图 2 所示的温度随时间变化的曲线。分析这温升的快慢和高度,即可得出材料的热扩散率和比热。

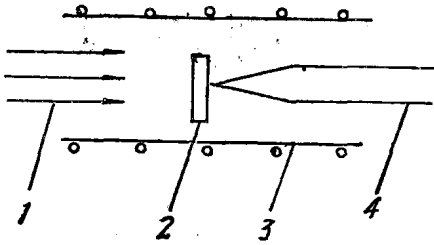


图 1 测量原理

1——激光束; 2——试样; 3——加热炉;  
4——热偶或红外元件。

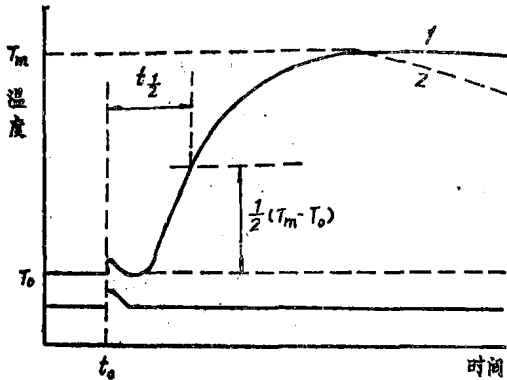


图 2 试样背面温度变化

1——无热量损失时; 2——有热量损失时。

试样厚度,使  $t_0 > 50\tau$ , 这样就不必考虑有限脉冲时间的影响<sup>[6]</sup>。对太薄的试样,我们按文献 [8,9] 的方法进行修正。

试样的比热为:

$$C_p = \frac{Q}{M(T_m - T_0)} \quad (\text{焦耳/克} \cdot \text{度}) \quad (2)$$

式中  $Q$  (焦耳) 为试样吸收的能量。通过图 3 中分光镜 (6) 分出一定比例的激光束,用能量计 (1) 测量这部份激光的能量。假如试样正面对激光的吸收系数在测量过程中不变,则标定后,就能测出试样吸收的能量。 $M$  (克) 为试样质量。 $T_0$  和  $T_m$  分别为试样测量开始时的温度和温升的最大值 (见图 2)。

试样的导热率 ( $K$ ) 可由下面熟知的公式算得:

$$K = \alpha C_p \rho \quad (\text{瓦/厘米} \cdot \text{度}) \quad (3)$$

式中  $\rho$  (克/厘米<sup>3</sup>) 为试样的密度,高温时也要作热膨胀修正。

假如测量过程中试样与周围没有热量交换,能量脉冲被试样前表面均匀吸收后引起的热流是一维的,并且热脉冲持续的时间 ( $\tau$ ) 比表征热脉冲传过试样的特征时间 ( $t_0 = \frac{L}{\pi^2 \alpha}$ ) 小得多,则试样的热扩散率 ( $\alpha$ ) 可用下面简单公式计算:

$$\alpha = A \frac{L^2}{t_{1/2}} \quad (\text{厘米}^2/\text{秒}) \quad (1)$$

式中  $L$  (厘米) 为试样厚度,高温时  $L$  应进行热膨胀修正。 $t_{1/2}$  (秒) 为试样背面温升半高度所需要的时间 (见图 2)。 $A$  为无量纲的系数,当满足理论计算时所假设的边界条件和初始条件时,  $A=0.139$ 。高温时,测量过程中试样必有热量损失,这时记录的试样背面温度变化曲线不出现平台 (图 2 中曲线 2)。通常,我们用考恩 (Cowan)<sup>[8]</sup> 提出的经海克门 (Heckman)<sup>[9]</sup> 等计算得到的方法,根据曲线下落的快慢,对  $A$  进行热损修正。

当  $L$  为某一最佳厚度时,热损和有限脉冲时间的影响均较小。我们一般选择适当的

## 2. 实 验 装 置 和 方 法

本装置主要由激光器,加热炉和温度变化信号的接收记录系统三部份组成。测比热时还

要加入激光能量测量系统。并且温升的测量精度也要提高。关于比热的测量方法和设备将另有介绍,不再详述。图3为1971年建立的卧式激光脉冲热导仪示意图。图4为其全貌。

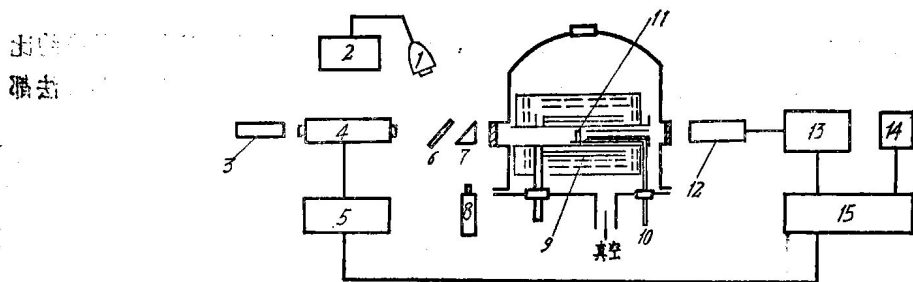


图3 激光脉冲热导仪示意图

1—能量计; 2—记录仪; 3—平行光管; 4—激光头; 5—激光电源; 6—分光镜; 7—直角棱镜; 8—光学高温计; 9—钨发热体; 10—热偶; 11试样; 12—红外头; 13—放大器; 14—时标; 15—记录仪。

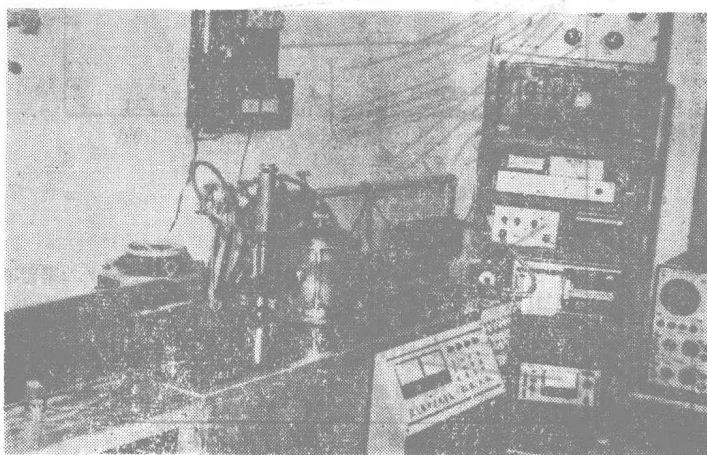


图4 激光脉冲热导仪

激光的工作物质为直径12毫米,长150或300毫米的钨玻璃棒,输出能量从阈值到30焦耳连续可调。脉冲宽度约为0.3—0.8毫秒。在激光头和炉子间加有透镜,以改善激光的均匀性。加热试样的钨管炉或钨丝炉置于钟罩内,可在 $2 \times 10^{-5}$ 托真空或保护气氛下进行测量。

用直径为0.06毫米的镍铬-镍硅热偶丝测量试样从室温到900℃的温升。对金属试样,热偶丝点焊在试样背面中心处,两偶丝分开约1毫米。对陶瓷材料试样,则用银浆把热偶丝粘在试样上。250—2000℃时,用硫化铅(PbS)红外元件测量温升。温升讯号经放大后用Sc-16光线示波器记录。记录纸上标有分格线、表征激光开始激发的零点讯号和晶体谐振器发出的每秒1000次的时标讯号。

试样的平衡温度用直径为0.3毫米的铂/(铂-10铑)或(钨-6铼)/(钨-25铼)热偶丝测量。高温时,同时也用光学高温计测温,以相互校验。经常用标准热偶校验工作热偶。估计在1300℃以下,测温误差小于0.5%;1300℃以上,测温误差在1%左右。

根据对工业纯铁、电弧熔炼钨(99.9%)和纯金(99.999%)等标准材料的测量结果,以及对测量误差的分析,估计本测试设备测量热扩散率的准确度在1500℃以下约为±5%,1500℃以上约为±7%。根据对氧化铝、纯铁和纯金的测量结果,初步估计从室温到700℃的比热测量均方根误差在±3%左右。

### 三、结 果 和 讨 论

图 5 为某些标准材料和反应堆材料的部份热扩散率测量结果。图中纯金的热扩散率约比氧化铀粉末的高 250 倍。这表明，只要试样是比较均匀的，在  $\alpha$  的很大范围内，激光脉冲法都能测得较准确的结果。

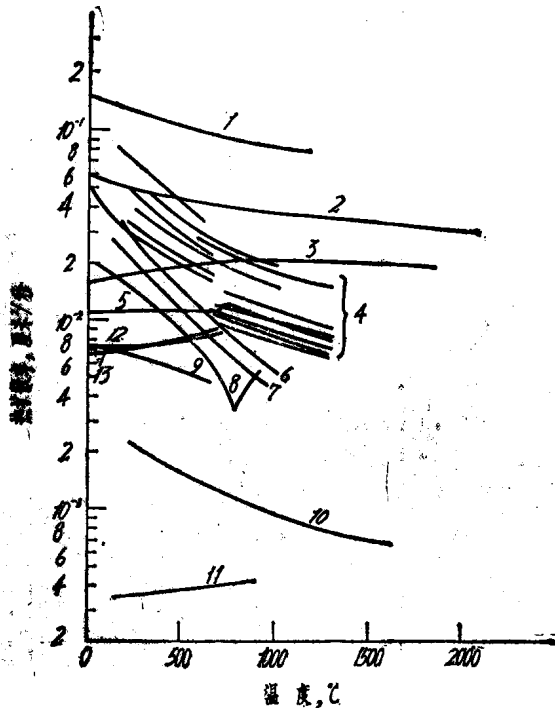


图 5 热扩散率与温度的关系

- |                    |                      |
|--------------------|----------------------|
| 1 — 纯金 (99.999%) ; | 2 — 电弧熔炼钨 (99.9%) ;  |
| 3 — Nb-10% Hf 合金;  | 4 — 几种石墨;            |
| 5 — 铀合金;           | 6 — BeO (99.5%) ;    |
| 7 — BeO (95%) ;    | 8 — 工业纯铁;            |
| 9 — AISI403 不锈钢;   | 10 — UO <sub>2</sub> |
| 11 — 氧化铀.          | 12 — Zr-2            |
| 13 — Zr-4          |                      |

下面摘要地分别叙述某些标准材料(纯铁、钨)和核反应堆材料: 金属(铀, 钍)陶瓷(二氧化铀、氧化铍)和部份石墨的测量结果和讨论。

#### 1. 工 业 纯 铁

普遍认为<sup>[16-17]</sup>, 纯铁(如阿姆柯铁)在 80—925K 间是很好的热导标准材料。鲍威尔(Powell)<sup>[16]</sup>等认为, 纯铁中杂质的当量含碳量在 0.04—0.07 之间时, 杂质对纯铁的热导率影响在仪器的测量误差(约 ± 2.4%) 之内。我们所用的工业纯铁的当量含碳量约为 0.06, 密度接近理论密度, 所以我们用这种纯铁测得的热扩散率与文献中阿姆柯铁(Armco Iron)的数据进行比较, 来检验我们测量系统的准确度。

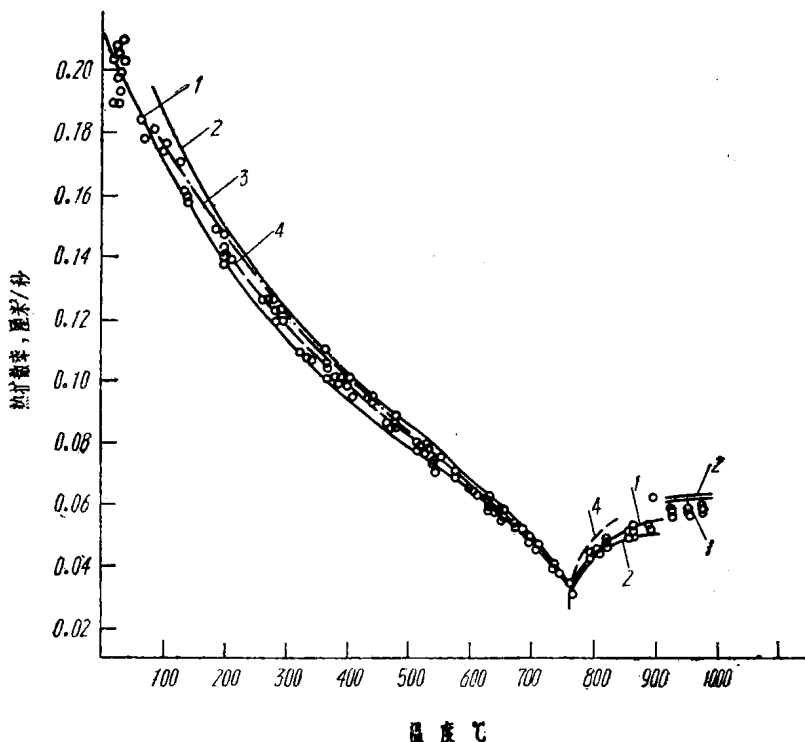


图6 纯铁热扩散率

O——本工作结果；1——文献[18]结果（三种方法的测量结果）；2——文献[19]结果（径向动态法）；3——文献[20]结果（由热导率计算得热扩散率）；4——文献[17]结果（激光脉冲法）。

四个纯铁试样的测量结果及与文献中数据的比较示于图6。其中两个试样曾用热偶和PbS元件分别作了两次升降温测量。另外两个是用PbS元件测量的。四个试样所测数据的平均相对偏差约为 $\pm 3\%$ 。在室温到800°C间，我们的结果与沈阳金属所和上海钢铁研究所用相同方法在由同一块纯铁料取得的试样上测得的结果一致。在25—760°C间我们的结果与文献中报导的数据<sup>[17-20]</sup>符合得较好。在居里点（760°C）以上，纯铁的热扩散率受成份和热处理的影响较大，一般不作标准<sup>[18]</sup>。

## 2. 电弧熔炼钨

一般认为<sup>[12, 21]</sup>，从低温到3000K，电弧熔炼钨是较好的热导标准材料。

我们所用试样的纯度为99.9%钨，经电弧熔炼，密度为19.26克/厘米<sup>3</sup>（约99.6%理论密度）。从室温到500°C，用热偶测量试样背面温升；300—2000°C用PbS元件测量温升。在温度相重部份，两种方法的结果是一致的。

图7为从室温到2000°C、厚度不同的两个试样的测量结果及其与文献中数据的比较。由图可见，在1700°C以下，我们的结果与文献中报导的数据<sup>[22-24]</sup>一致。在1700°C以上，我们的数据偏低，而与图中的曲线（2）和（5）相接近。

## 3. 金属铀

对加工工艺不同而化学成份接近（约含2000 ppm合金元素）的两种铀合金（密度约为18.7克/厘米<sup>3</sup>）试样进行了测量。在室温到600°C间，用热偶或PbS元件对八个试样进行了十

多次升降温热扩散率测量, 结果示于图 8。虽然用两种测温元件测得的结果的差别都在实验误差范围内, 但从统计角度看, 用PbS元件测得的热扩散率约比热偶测得的高 3%, 这可能

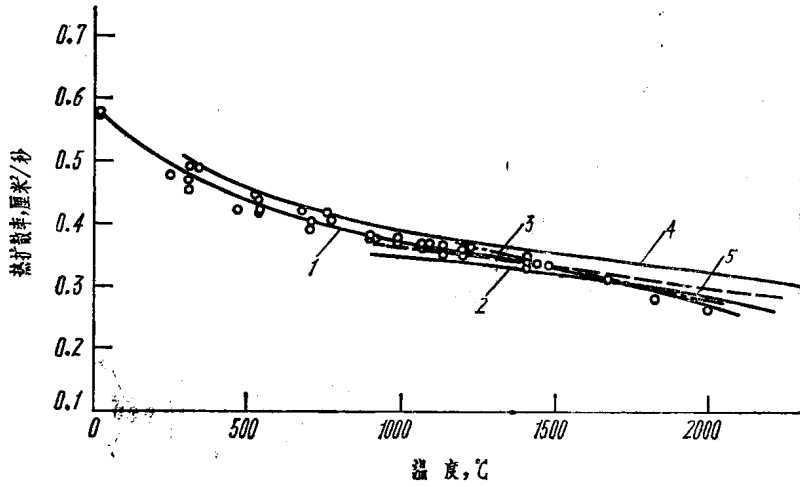


图 7 电弧熔炼钨的热扩散率

1(·)本工作结果; 2(+ )文献[22]中B. M. I的结果; 3——文献[23]的结果; 4——文献[24]中№26作者的结果; 5——文献[24]中№13作者的结果。

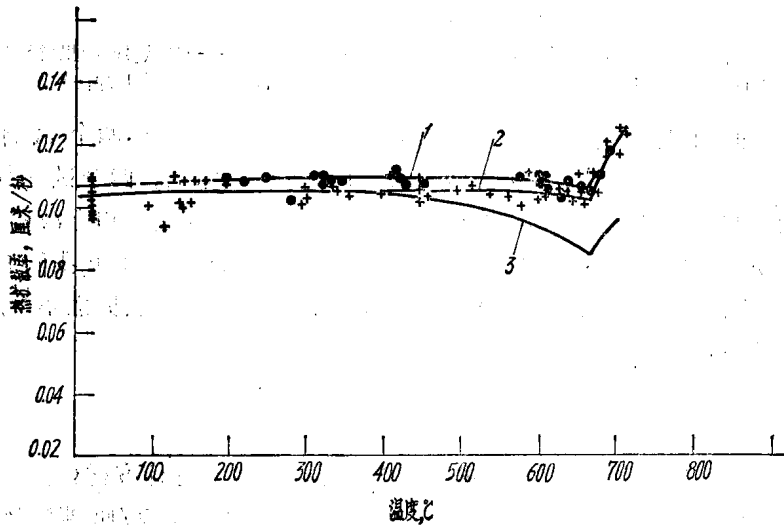


图 8 金属铌的热扩散率

1(·)——PbS元件测得结果; 2(+ )——热偶测得结果; 3——文献[29]用热偶测的结果。

是由于热偶的热惯性而使测得的结果偏低<sup>[25-27]</sup>。PbS元件为非接触式测温, 响应快 (小于200微秒), 所以我认为, 用PbS元件测得的结果更反映试样真实的导热性能。由图 8 可见, 所测得的两合金的热扩散率在室温到600°C间几乎不随温度变化, 约为 0.109厘米<sup>2</sup>/秒。这与文献<sup>[28]</sup>中报道的结果是一致的。在400°C以下, 我们用直径为0.06毫米的热偶丝测得的热扩散率与纳苏(Nasu)等<sup>[29]</sup>用直径为0.1毫米的热偶丝测量纯度为99.9%的金属铌所得的结果是一致的。在400°C以上, 纳苏等人的曲线逐渐下降, 与我们的结果有较大差别, 由所计算的热导率来看 (图10), 我们的热导率随温度变化的趋势与大多数作者较一致。而纳苏等



人的曲线, 高温时偏离大多数曲线的趋势。

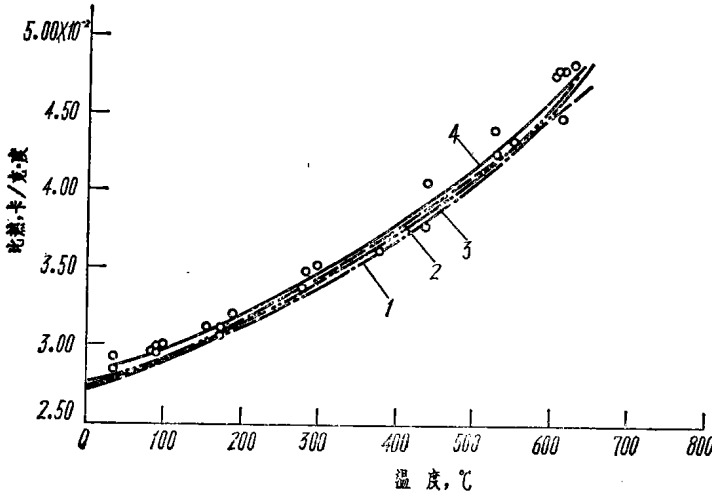


图9 铀的比热;

1——文献[30]结果; 2——文献[31]结果; 3—— $\alpha$ 铀比热, 沈阳金属所 (1964); 4——本工作结果。

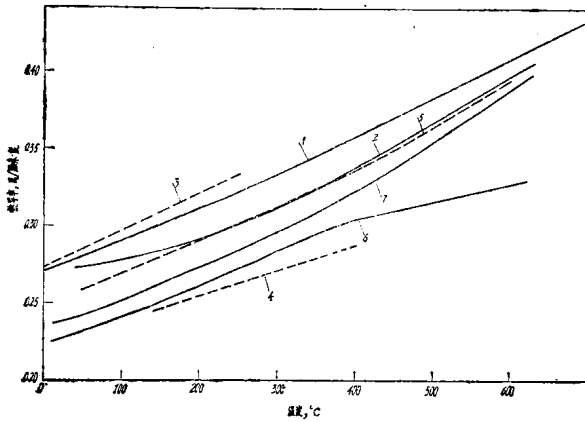


图10 金属铀的热导率

1——文献[32]推荐的充分退火高纯铀标准曲线; 2——文献[33]推荐的标准曲线; 3、4——文献[33]数据分散范围; 5—— $\alpha$ -U 热导率, 沈阳金属所 (1965); 6——文献[29]的热扩散率计算得到; 7——本工作结果。

用激光脉冲法测得的这两种铀合金的比热示于图9, 约比文献中金属铀的比热<sup>[30,31]</sup>高3%。我们曾用奈曼-考普定律 (Neuman-Kopp Law) 计算了这两种铀合金的比热, 结果比纯铀的约高2%左右。所以我们认为, 这两种铀合金的比热比纯铀的高3%, 是由于试样中加入1,000 ppm左右的铝等合金元素引起的。合金的含量虽然很低(约0.2w%), 但由于铀的比热很小(室温时为0.028卡/克·度), 而铝的比热很大(室温时为0.22卡/克·度左右), 所以1,000 ppm铝对铀的比热就会有明显的影响。

图10中曲线7为由测得的 $\alpha$ 、 $C_p$ 和 $\rho$ 计算得到的热导率。许多作者曾对铀及铀合金的热导率进行了测量<sup>[32]</sup>。1957年之前, 曾有人对美国的多晶 $\alpha$ -U的热导率作过总结<sup>[33]</sup>。图10中曲线3和4为当时数据的分散范围。曲线2为文献[33]推荐的金属铀热导率标准曲线。

#### 4. 金属铍

试样为900°C真空热压, 纯度为反应堆级的铍。密度为1.85

克/厘米<sup>3</sup>。对厚度为2毫米和3毫米的两个试样, 在两台设备上, 分别用热偶(直径0.03毫米)和PbS元件在室温到650°C之间进行多次升降温测量, 热扩散率测量的结果示于图11。有几次, 在测量前, 试样前表面涂以胶体石墨, 使探测到的温升信号增大, 但并不影响热扩散率的结果。

在立式设备上测得的从室温到480°C的比热数据示于图12。它与文献[34]中的数据一致。

根据公式(3)计算得到的热导率示于图13。在室温附近, 我们这种铍的热导率与文献[36]的数据比较接近, 但比文献[32]上推荐的充分退火的纯铍的热导率标准值低20%左右。随着温度升高, 我们这种铍的热导率与其他作者的结果逐渐接近。

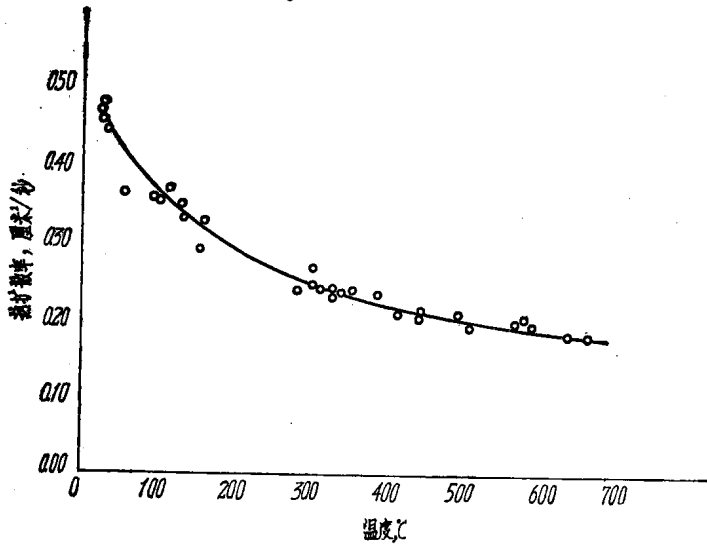


图11 铍的热扩散率

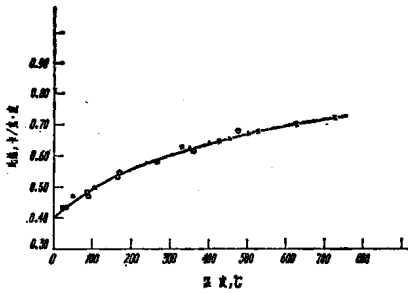


图12 铍的比热

- 本工作结果;
- ▼—文献[34]中曲线3 (99.8% Be);
- ×—文献[34]中曲线2 (99.8% Be粉);
- \*—文献[34]中曲线1 (99.5% 挤压铍)。

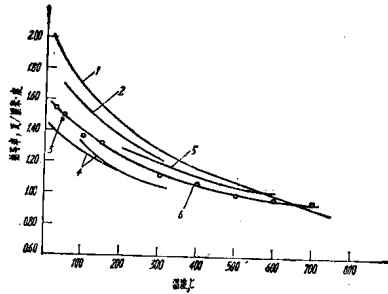


图13 铍的热导率

- 1—文献[32]结果 (充分退火纯铍); 2—文献[35]结果 (烧结铍); 3—文献[36]结果 (真空铸造铍); 4—文献[35]结果; 5—文献[36]结果 (真空铸造挤压); 6—本工作结果。

### 5. 二 氧 化 铀

UO<sub>2</sub> 是目前用得最多的核燃料,它的主要缺点是热导率特别低。所以,世界各国对UO<sub>2</sub>的热导率所进行的测量和研究比任何其他材料都多。高密度正化学式UO<sub>2</sub>从室温直到熔点的热扩散率、比热和热导率已研究得相当透彻,并得到了较一致的结果<sup>[37,38]</sup>。所以这种UO<sub>2</sub>实际上也可以作为检验物性测试设备的标准材料。

我们的试样纯度为反应堆级UO<sub>2</sub>,经1750°C烧结后,密度为10.45克/厘米<sup>3</sup>(95% T. D.),  $\frac{O}{U}$ 为2.003。图14为测得的热扩散率。利用文献<sup>[37]</sup>中推荐的比热数据以及我们测得的热扩散率和密度计算的热导率示于图15。图中所有数据都用洛布(Loeb)关系式修正到98% T. D.。由上述两图可见,我们这种UO<sub>2</sub>的热扩散率和热导率与温度的依赖关系跟文献中高密度正化学式UO<sub>2</sub>的相一致。

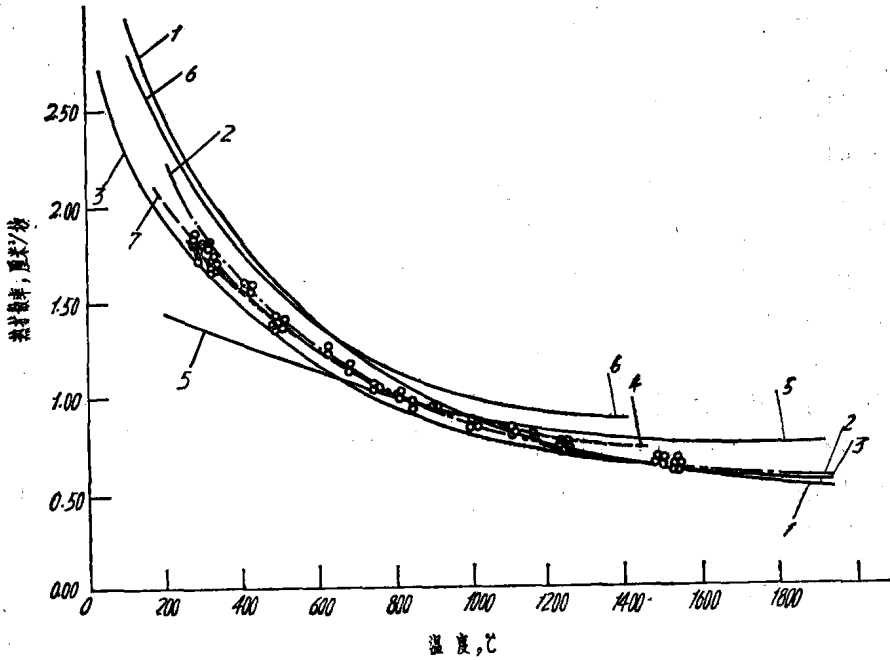


图14 二氧化铀的热扩散率

1——文献[39]结果, 2——文献[37]结果, 3——文献[37]结果, 4——文献[37]结果。(曲线1— $4O/U=2.002-2.00T$ ,  $\rho=98\%T.D.$ ); 5——文献[40]结果( $O/U=2.002$ ,  $\rho=95\%T.D.$ ); 6——文献[41]结果(正化学式,  $\rho=98\%T.D.$ ); 7——本工作结果( $O/U=2.003$ ,  $\rho=95\%T.D.$ )。

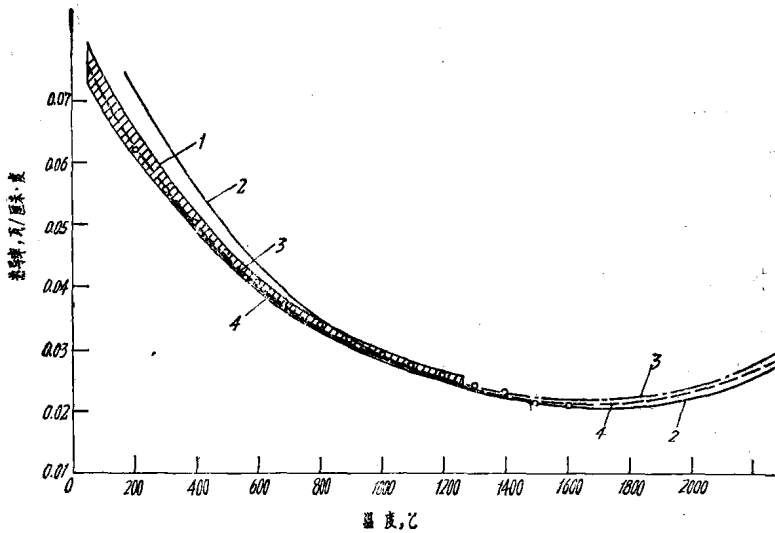


图15 二氧化铀热导率

1——文献[20]结果; 2——文献[39]结果; 3——文献[42]结果; 4——文献[37]结果; O——本工作结果。

图16为热阻( $\frac{1}{\alpha}$ 或 $\frac{1}{K}$ )与温度的关系。可见它们间有直线关系。即:

$$\frac{1}{\alpha} \left( \text{或} \frac{1}{K} \right) = A + BT \quad (4)$$

其中A和B为由实验决定的参数，T为温度。求得的UO<sub>2</sub>的A和B值列于表1，与文献中报导的A、B值较为接近。

晶体的热导理论认为，在金属氧化物晶体中，热量主要是通过声子（即晶格振动）传输的，热阻主要是由于声子与声子相互作用和声子与晶格缺陷相互作用引起的。声子与声子散射是由于晶格的非谐振动引起的，所以这部份热阻与温度成正比例，反映在公式(4)中为BT项。晶界和位错等扩展的缺陷只在低于德拜温度时才起重要作用。高于德拜温度时，即在我们进行测量的这段温度范围内，主要是声子与点缺陷相互作用引起的热阻；对于弱点缺陷，这部份热阻基本上不随温度变化（对弱点缺陷，引起的热阻与T<sup>1/2</sup>成正比），这反映在公式(4)中为A。所以，通过对热阻与温度关系的研究，有助于了解导热机制，也便于各作者结果的相互比较。

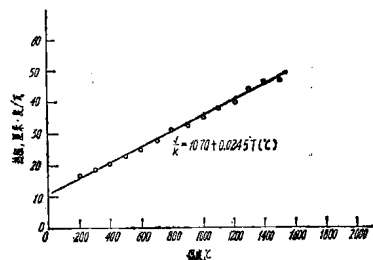


图16 二氧化铀的热阻

表1 A、B 值 比 较

	本 报 告	文 献 [42]	文 献 [43]	文 献 [39]
A	10.70	11.14	10.28	8.51
B	0.0245	0.0223	0.0228	0.0247

### 6. 氧 化 铍

UO<sub>2</sub>的热导率很低，而BeO的热导率却特别高。我们测量了纯度为99.5%，密度为2.85克/厘米<sup>3</sup>的纯BeO，以及95%BeO加3%的MgO和2%的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、密度为2.77克/厘米<sup>3</sup>的试样。两种试样均经1750℃烧结。测量时，试样两面涂以胶体石墨。热扩散率测量结果示于图17。显然，纯BeO的α比含95%BeO的高得多。弗里曼(Freeman)<sup>[43]</sup>曾用激光脉冲法测量了密度为2.81—2.93克/厘米<sup>3</sup>的BeO+0.5W%MgO材料辐照前后的α。其辐照前的α低于我们纯BeO的，但高于95%BeO的。埃尔斯特(Elstor)等<sup>[44]</sup>用Ångstrom法测量了密度为2.95—3.00克/厘米<sup>3</sup>的烧结BeO的α，与我们的纯BeO的结果较一致。由上述结果可见，成份对BeO的热扩散率有较大的影响。

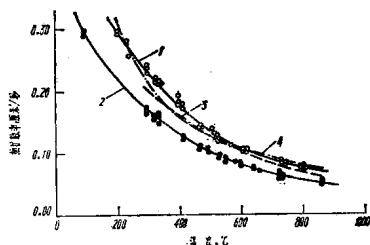


图17 BeO的热扩散率

- 1——本工作结果 (99.5%BeO)；
- 2——本工作结果 (95%BeO)；
- 3——文献[43] (BeO+0.5MgOW%)；
- 4——文献[44]。

### 7. 石 墨

图18中的1\*石墨为釜石焦石墨，密度为1.74克/厘米<sup>3</sup>。2\*为延迟焦石墨，密度也为1.74克/厘米<sup>3</sup>；3\*为进口石墨，密度为1.66克/厘米<sup>3</sup>；4\*为1.92克/厘米<sup>3</sup>的高密度石墨。由上述几种核石墨所测得的热扩散率结果可见：1\*与2\*石墨的生产工艺和密度都相同，但所用原料不同，其热扩散率和热扩散率的各向异性有较大差别。经过多次浸渍，焙烧和石墨化得到的4\*石墨，其密度最高，但其热扩散率却比1\*石墨低。另外，实验还表明，（石墨化程度较高的石墨，其导热性也较好，我们用X光方法测得，1\*石墨两个方向的织构因子值差别较大，3\*次之，2\*最小。与此相对应的是1\*石墨两个方向上的热扩散率相差最大，3\*次

之, 2#较小。

比热是对结构不敏感的量。一般认为<sup>[45,46]</sup>, 除室温或接近绝对零度外, 各种类型的天然或人造石墨的比热基本相同。各种石墨比热数据的差别往往小于仪器的测量误差。所以可用文献中报导的石墨比热数据, 由公式(3)算出石墨的热导率。

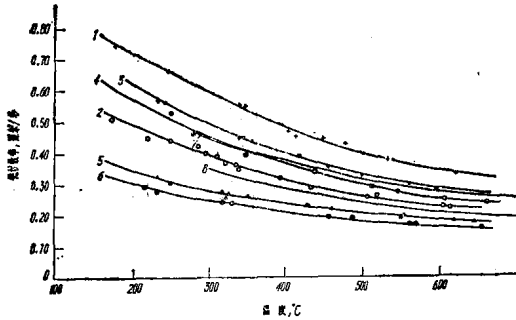


图18 四种石墨的热扩散率随温度的变化及其与取向的关系

1——1#石墨(平行压型方向); 2——1#石墨(垂直于压型方向); 3——2#石墨(平行于压型方向); 4——2#石墨(垂直于压型方向); 5——3#石墨(平行于压型方向); 6——3#石墨(垂直于压型方向); 7——4#石墨(平行于压型方向); 8——4#石墨(垂直于压型方向)。

由于石墨对激光的反射率低, 而且性能比较稳定, 所以用激光脉冲法测量石墨热扩散率的精度比测表面光亮的金属热扩散率的精度高。由于所需要的试样小, 而且热流是一维的, 所以只要能以不同取向截取试样, 就能测出热导的各向异性。所以激光脉冲法用于测量性质类似石墨的材料的热扩散率是特别合适的。

#### 四、结 语

通过几年来的测量, 我们感到, 激光脉冲法是研究核材料热学性能很有用的工具。

除了能提供一些性能数据外, 还可以用来研究性能与组织结构和缺陷的关系。例如研究密度、微裂缝、化学成份和织构对热导率的影响, 弥散体的热导规律等。

#### 参 考 文 献

- [1] W. J. Parker et al., *J. Appl. Phys.*, 32, 1679(1961).
- [2] W. J. Parker et al., *Advanced Energy Conversion*, 2, 87(1962).
- [3] R. D. Cowan, *J. Appl. Phys.* 34, 926(1963).
- [4] J. A. Cape et al., *J. Appl. Phys.* 34, 1909(1963).
- [5] D. A. Watt, *Brit. J. Appl. Phys.* 17, 231(1966).
- [6] R. E. Tayler et al., *Appl. Phys. Letter*, 5, 212(1964).
- [7] K. B. Larson et al., *J. Appl. Phys.* 38, 465(1967).
- [8] R. C. Heckman, *J. Appl. Phys.* 44, 1455(1973).
- [9] R. E. Tayler, PB-225591/7AS, (1973).
- [10] K. B. Lason et al., *J. Appl. Phys.* 39, 4408(1968).
- [11] K. E. Gilchrist, *J. Nucl. Mater.* 62, 257(1976).
- [12] M. L. Minges, *Intern. J. Heat and Mass Trans.*, 17, 1365(1974).
- [13] F. Righini et al., *High Temp. High Pressures*, 5, 461(1973).
- [14] Y. Takahashi et al., *J. Nucl. Sci. and Tech.*, 12, 133(1975).
- [15] R. W. Powell et al., *Prog. in Inter. Res. on Thermodynamic and Transport Prop.* (1962), P. 454.
- [16] C. F. Lucks, *Proc. 11th Thermal Conductivity Conf.* (1971) P. 101.
- [17] J. L. Bates, BNWL--989(1968).
- [18] H. R. Shanks et al., *J. Appl. Phys.* 38, 2885(1967).
- [19] G. D. Cody et al., *Trans. AIME*, 224, 25(1961).

- [20] T. G. Godfrey et al., ORNL-3556(1965).
- [21] J. G. Hust, *High Temp. High Pressures*, 8, 377(1976).
- [22] A. D. Little et al, AFML-Tr-69-2(1968).
- [23] E. Fitzner et al, *Advances in Thermal Conductivity*, University of Missouri-Rolla, p.42(1973).
- [24] M. J. Uheeler, *Brit. J. Appl. Phys.*, 16, 365(1965).
- [25] C. D. Henning et al., *J. Heat Trans Fer*, 89, 146(1967).
- [26] R. E. Tayler et al., *High Temp. High Pressures*, 6, 65(1974).
- [27] H. D. Maglic et al., *High Temp. High Pressures*, 6, 105(1974).
- [28] A. N. Holden, *Physical Metallurgy of Uranium*, Addison-wesley Publishing Company, inc, (1958)
- [29] S. Nasu et al., *Japan J. Appl. Phys.* 7, 682(1968).
- [30] D. C. Ginnings et al., *J. Res. Nat. Bur. Stand*, 39, 309(1947).
- [31] G. E. Moore et al., *J. Amer. Chem. Soc.*, 69, 2105(1947).
- [32] Y. S. Touloukian et al., *Thermophysical Prop. of Mater*, 1, (1970), IFI/Plenum.
- [33] K. F. Smith, ANL-5700, part A(1957).
- [34] Y. S. Touloukian et al., *Thermophysical Prop. of Mater*, 4(1970), IFI/Plenum.
- [35] P. W. Powell, *Phil. Mag.* 44, 645(1953).
- [36] F. M. Yans et al., *Elec. Mfg.* 64, 181(1959).
- [37] J. B. Conway et al., GEMP-715(1969).
- [38] *Thermal Conductivity of UO<sub>2</sub>*, IAEA Technical Report, Series (59), (1966) Vienna.
- [39] J. L. Bates, BNWL-1431 (1970).
- [40] C. Ferro et al., *J. Nucl. Mater*, 43, 273 (1972).
- [41] A. J. Welter et al., *Revue Internationale Des Hautes Températures Et Ges Refractaires*, 7, 271(1970).
- [42] J. P. Stora, CEN-R-2586, (1964).
- [43] R. J. Freeman, GEMP-452, 54A(1966).
- [44] J. Elstor et al., *Second U. N. Intern. Conf. Peaceful Uses of Atomic Energy* (15/p/1159), 1958.
- [45] G. B. Spence, WADD-Tr-61-72(1963).
- [46] C. L. Mantall, *Carbon and Graphite Handbook*, John Wiley and Sons, Inc. (1968).

(上接18页)

- [4] 戴贵亮, 射线物理测量方法专业会议资料汇编, p237(1975).
- [5] 曹师儒, DJS-7机反应堆通量测量在线处理(1976), 未发表.
- [6] 国营建安仪器厂, DBL-1型联动定标器技术说明书(1971), 未发表.
- [7] 北京有线电厂, DJS-7技术说明书(1967), 未发表.

# 零功率堆物理实验室 中子通量在线测量系统

赵翼瑜 周国桢 何乾明 曹师儒

在堆物理实验室中采用在线计算技术,是实现实验手段现代化的一个重要方面。本文叙述了零功率反应堆物理实验室中子通量在线测量系统的研制。该系统包括DBL-1型联动定标器;经过改装的DJS-7型小型计算机;自行设计制造的直接输入通道和在线系统的管理程序;中子通量测量程序等部份。

一年多来的运行表明:该中子通量在线测量系统实现了从测量到实验数据处理的自动化。不仅能快速给出多种实验结果,而且能对实验过程中出现的奇异现象及时加以纠正,从而大大提高了实验精度。

小型在线数字计算机国外早在六十年代已广泛应用于反应堆临界装置的控制及在线数据的获取和处理<sup>[1-4]</sup>。它的优越性在于实验过程中几乎立即可以给出所需的最终结果,实验中出现的异常结果可及时发现,加以修正。随着在线计算技术的发展,堆物理实验室所需的多种专门设备趋向被一台在线计算机代替,不同的实验以及不同的数据处理过程只需改变计算机的软件就可以达到。

为了探索零功率堆物理实验室中采用在线计算机的途径,我们以测量中子通量空间相对分布为开端,尝试使用在线计算机。经过几年工作,于1976年10月完成了中子通量在线测量系统的研制,实现了从测量到数据处理的全部自动化,大大提高了中子通量测量的效率。

## 一、中子通量在线测量系统

该系统由经过改装的国产 DJS-7 计算机, DBL-1 型联动定标器以及自行设计、制造的直接输入通道三个主要部份构成(见图 1),并配有专用的管理程序<sup>[5]</sup>。

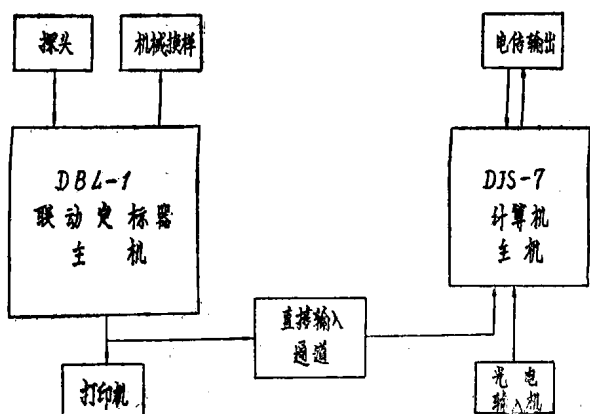


图 1 中子通量在线测量系统方框图

### 1. DBL-1型联动定标器<sup>[6]</sup>

定标器是国产的自动化程度较高的联动定标装置。整个装置包括探头、机械换样、主机、输出打印四大部分。主机由六台定标器、一台定时器(或比较器)、一台移位器组成。六台定标器可分别作为活性测量仪使用,也可通过定时器(或比较器)和移位器联动使用。联动有“联动

1”和“联动Ⅱ”之分。在“联动Ⅰ”时，打印机输出的是各台定标器的一次测量结果；在“联动Ⅱ”时，打印机输出各定标器测量的相加结果。定标器工作方式有“定时计数”、“定数计时”、“比较”、“校验”四种，还有自动减本底功能。方框图见图2。

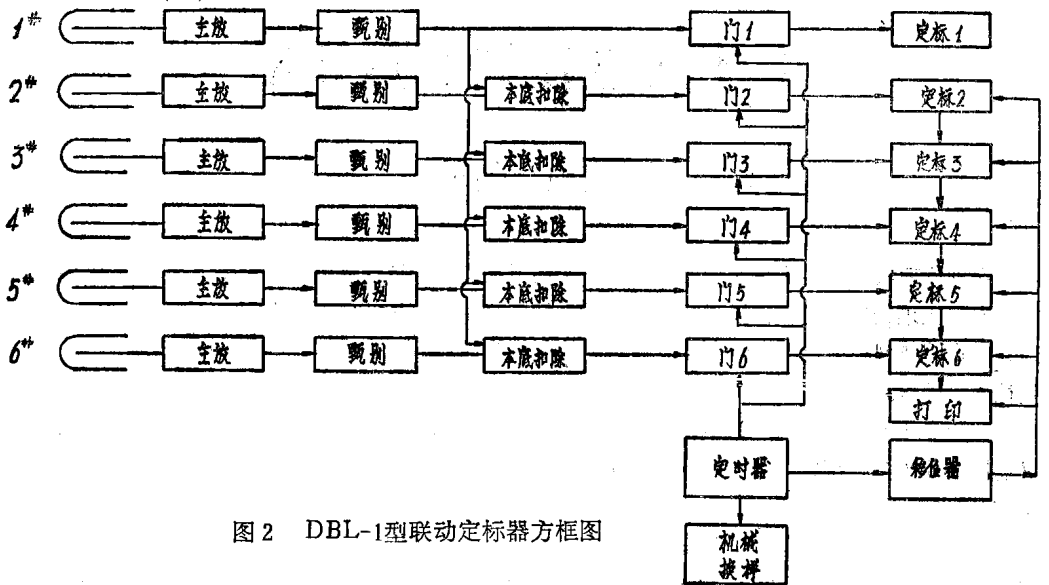


图2 DBL-1型联动定标器方框图

现在以定时测量为例，说明一下工作原理。首先在定时器面板上，选择好需要测量的时间以及停止换样时间。然后打开定时器启动开关，在定时器进行定时计数的同时，各台定标器均打开，除1#探头测量本底讯号外，其余探头均开始测量样品活性。从1#探头来的经放大甄别后的本底讯号，除送1#定标单元记录外，还分别送2#—6#定标器的本底扣除单元。这样，2#—6#定标单元输出的就是扣除本底后的计数。当计数时间结束，定标器计数门关闭，停止门打开，各定标器停止计数。同时，定时器还输出两个控制讯号，一个控制机械换样工作，另一个控制移位器，使移位器发出一系列控制讯号，按时间顺序依次把各台定标器计数送到第六台，并由第六台输给打印机。这样，打印机可连续打印出五台减本底计数。停止时间结束，计数又开始，周而复始，自动进行下去。

探头采用闪烁晶体。机械换样是这样来实现的：被测样品固定在靠重力下滑的小车上，小车底部有齿条，通常，电磁铁锁住齿条，小车停止在某一位置，当计数结束，停止时间开始时，定时器给出控制讯号使电磁铁吸合-释放一次，衔铁上下运动一次，小车靠重力下滑移动一定距离，实现换样目的。

## 2. DJS-7计算机<sup>[7]</sup>

这是一台国产的小型通用定点计算机。机器字长21位，定点运算平均速度2700次/秒。机器带有五通道系统组成的中断系统。内存容量为4096个字，字长22位，并行读写，读写周期为15—20微秒，和运算控制器串行连接。外存贮器是一台容量为2400个字的磁鼓，串行读写，字长22位，每个磁道128个字。输入采用5—8单元RJ-3型光电输入机，可以输入数和指令。算法语言源程序可用5单位或7单位文字输入，光电机速度是2.5米/秒。也可由打字机实现键盘输入。输出采用55型电传打字机，可印出26个大写英文字母，10个数字和一些符号，打印速度5个字符/秒。



控制台备有指示灯、钮子开关按键，可以显示数码寄存器、地址寄存器以及运算器内容，显示中断状态及操作码触发器的工作状态。

电源可直接用市电220伏/380伏，功率消耗小于1千瓦。

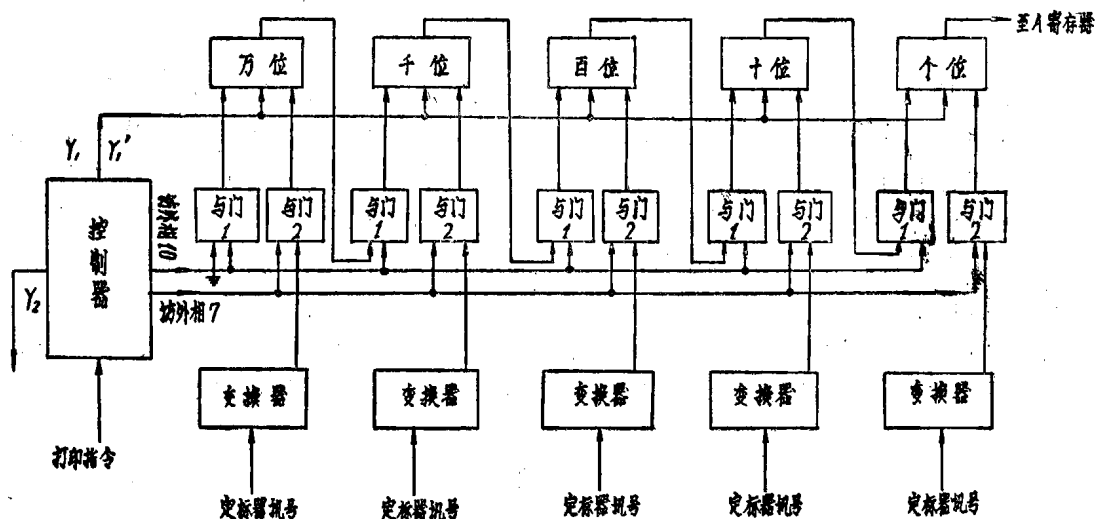
DJS-7机作为通用计算机，有32种基本操作指令可供数学工作者使用，机器也配有ALGOL语言，可以进行中小型题目计算。机器在执行每条指令时，是按照时间顺序分十个节拍（或称为相）完成的。在线测量正是利用这点，控制机器准确接收定标器计数讯号。例如，我们改装DJS-7计算机，使机器执行访外指令（我们用它作为接收定标器计数指令）时，自动停止在第7相，而第7相转到第8相必须由联动定标器讯号来控制。为了实现通量在线测量，我们不仅对DJS-7机作了以上改装，而且还为机器配上了专用的直接输入通道，使DBL-1型联动定标器输给打印机的计数讯号并联输到直接输入通道，然后，再输给DJS-7机进行各种必要的处理。

### 3. 直接输入通道

直接输入通道是中子通量在线测量的关键设备，通道应有以下几个功能：①变换联动定标器输出的10进制数成为计算机所能接受的2-10进制数；②配合计算机节拍工作，使2-10进制数实时并行输入通道的缓冲寄存器部分；③配合计算机节拍工作，把缓冲寄存器的数码串行输入DJS-7机的A寄存器。

为了上述目的，在兄弟单位协助下，我们设计和试制了直接输入通道。通道由16块插件板组成，其中10块插件板作为缓冲寄存器部分，3块为10进制数转换成2-10进制数部分，还有3块为控制板。除了以上晶体管插件外，还带有与DJS-7机相联的控制讯号插头，电源插头以及联动定标器来的5位10进制数码插头。

直接输入通道（方框图见图3）主要由三部分组成，简述如下：



(1) 变10进制数为2-10进制数部分 主要功能是使定标器来的10进制编码变换成计算机所需的2-10进制编码，同时还完成定标器和计算机之间电平的匹配。

(2) 由五位数（个，十，百，千，万）组成的缓冲寄存器 每位缓冲寄存器均由4个C-3触发器组成。它是由基本单元线路“与-非”和“与-或-非”组成的。该触发器逻辑上具