

堆内 UO₂ 芯块热导率的测定

郁金南 陈惠中 罗金汉 薛伟贤 梁启东

本文叙述堆内 UO₂ 芯块热导率的测定, 获得 205°~2563°C 范围内积分热导 $\int_{205^{\circ}\text{C}}^T k dT \sim T$ 的曲线, 以及 213~2500°C 范围内芯块热导率数据, 误差是 8%。热导率 k 满足关系式: $k = k_l + k_e = \frac{1}{A + BT} + CTe^{-\epsilon/AT}$, k_l 是晶格热导率, k_e 是电子热导率, $A = 7.01$ 厘米°K/瓦, $B = 0.0189$ 厘米/瓦, $C = 2.29 \times 10^{-8}$ 瓦/厘米, $\epsilon = 1.48$ 电子伏。

一、引言

堆内 UO₂ 芯块热导率是 UO₂ 元件设计中的重要参数, 它确定着元件的运行温度、温度分布、芯块的热应力以及由此引起的一些重要现象, 如芯块的沙漏状, 肿胀、裂变气体释放、芯块与包壳贴壁应力和相互作用等^[1], 所以, 芯块热导率的测定受人重视。

芯块热导率除与孔隙率、氧铀比有关外, 还与生产工艺、杂质、添加物和运行状态有关^[1]。目前, 高温热导率的测量值比较纷乱^[2-6], 尤其是堆内高温热导率的数据较少^[7], 因此, 有必要对国产 UO₂ 芯块在堆内直接测量辐照时的热导率, 提供设计数据, 以便于探讨高温热导机制。

在堆内均匀中子场中, 由于自屏蔽作用, 长圆柱形燃料元件棒径向通量分布接近于贝塞尔函数 $\phi(r) = \phi_0 I_0(\lambda r)$ 。对于元件棒表面冷却, 轴向热流可以忽略不计, 只考虑径向热流, 则燃料中两个不同径向位置 r_2 、 r_1 的温度 T_2 、 T_1 与热导率 k 的关系如下^[8]:

$$\int_{T_1}^{T_2} k dT = \frac{q}{4\pi} F, \quad (1)$$

$$F = \frac{I_0(\lambda r_1) - I_0(\lambda r_2)}{\frac{1}{2} \lambda a I_1(\lambda a)}, \quad (2)$$

$$\lambda^2 = 3 \Sigma_a \Sigma_t / \left(1 + 0.4 \frac{\Sigma_a}{\Sigma_t} \right)^2. \quad (3)$$

q 是元件单位长度上的发热率; F 是通量降抑因子; λ 是中子在芯块中扩散长度的倒数; a 是燃料芯块的半径; $I_0(\lambda r_1)$ 、 $I_0(\lambda r_2)$ 、 $I_1(\lambda a)$ 是零级、一级修正贝塞尔函数; Σ_a 、 Σ_t 是芯块的宏观吸收截面、宏观总截面。我们测量了 r_2 、 r_1 位置的温度 T_2 、 T_1 , 测量了元件内平均热中子通量和芯块内的中子温度、镅比, 由此得出 q 和 λ 值(在 q 中还考虑了快裂变和 γ 加热部分)。代入(1)式得出 $\int_T^{T_2} k dT$ 积分热导值, 由一系列的积分热导值, 归到

相同积分下限的积分热导值 $\int_{205^{\circ}\text{C}}^{T_2} k dT$, 作出 $\int_{205^{\circ}\text{C}}^{T_2} k dT$ 与 T_2 的曲线。对该曲线微分, 得出热导率与 T 的曲线。

实验装置使芯块部分有足够长度, 避免通量的端部效应和轴向热流对测量点的影响^[9]。装置在游泳池式反应堆 5# 孔道进行试验, 在堆功率 191~3680 千瓦逐级进行测量 T_2 、 T_1 。 T_2 、 T_1 是由钨铼热电偶测量, 在 205°C ~ 2500°C 范围内数据稳定可靠。

二、实验装置

实验装置如图 1 所示。元件包壳是 $\phi 27.5 \times 1$ 毫米的不锈钢管, 装有直径为 $\phi 24.92 \pm 0.05$ 毫米的 UO_2 芯块, 芯块的总长度为 300 毫米, 分上下两段, 上段为 200 毫米, 样品是带孔的, 可以通过六副钨铼热电偶, 下段样品不带孔。温度测量点设在下段第一块不带孔的样品上, 其余的芯块是防止中子通量的端部效应和轴向热流对测量点的影响。

UO_2 芯块采用高温烧结工艺制备, 烧结温度是 1650°C , 芯块直径 $\phi 24.92 \pm 0.05$ 毫米, 高度 5 毫米, 平均密度是 10.62 克/厘米³, ^{235}U 的加浓度是 3.04%, 氧铀比是 2.00; 平均晶粒度为 28μ , 气孔均匀, 无微裂纹。

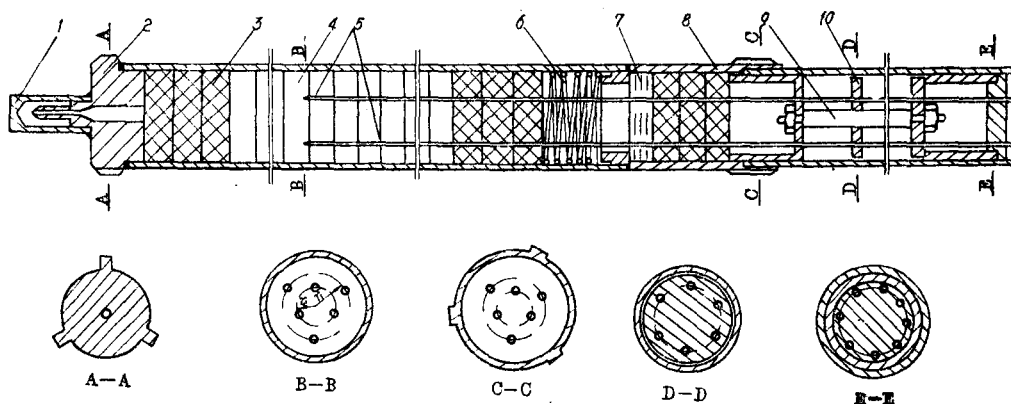


图 1 UO_2 堆内热导装置

1—密封帽; 2—下端塞; 3—绝热 MgO ; 4— UO_2 ; 5—钨铼热电偶; 6—钨丝弹簧; 7—热屏; 8—上端塞; 9—定位杆; 10—定位片。

带孔的芯块是用超声波加工机床, 分别在芯块上 r_1 (7.80 毫米) 和 r_2 (5.02 毫米) 圆周上钻三个互为 120° 角的 $\phi 1.5$ 毫米的小孔, 内外圈的小孔交错配置, 见图 1 的 B-B, G-G 剖面。

温度是采用 W-5 Re/W-20 Re 的钨铼热电偶测量, 它们直接插到芯块的 r_1 、 r_2 位置上, 热电偶丝的直径为 $\phi 0.2$ 毫米, 刻度误差是 $\pm 1\%$, 绝缘套管是 $\phi 1.2 \times 0.3$ 毫米的双孔 MgO 瓷管。

为避免 UO_2 芯块的轴向热流, 在 300 毫米长的芯块的上、下端都放有三块 MgO 绝热块。在上端装有钨丝弹簧, 使样品的端面互相贴紧, 整管样品具有整体性。在钨丝弹簧以上, 装有热屏, 绝热块, 定位件, 使引出钨铼热电偶丝的金属陶瓷封接件具有相当低的温度。金属陶瓷封接件上有八对钨铼热电偶引出线, 与陶瓷件是银焊料密封。

测量装置组装、焊接、检漏后，放入手套箱，进行抽空、充氦、堵焊，组成测量装置。在钨铼热电偶末端接上补偿导线，并且在钨铼热电偶的末端按上镍铬-镍铝热电偶，测量钨铼热电偶的末端温度。

实验装置放在游泳池式反应堆 5#孔道的动水迴路中进行试验，由迴路的进出口水温得到元件发热率，它与裂变率得出的发热率比较一致，由于裂变率的测量比较精确，所以采用裂变率得出的发热率数据。

三、测量结果

1. 发热率 q 的测量 发热率 q 由热中子裂变、快中子裂变和堆 γ 场加热三部分组成。热中子裂变功率是由样品中平均热中子通量、中子温度和超热中子份额所决定，热中子裂变的发热率 $q_{\text{热中子}}$ 为：

$$q_{\text{热中子}} = \epsilon_r V \bar{\phi} \hat{\sigma}_f^5 \frac{\rho}{M} N C^{235}, \quad (4)$$

ϵ_r 是每次裂变在样品内形成的热量 ($175 \pm 6 \text{ MeV}$)^[10]； V 是芯块单位长度的体积 (厘米²)； $\bar{\phi}$ 是样品内平均热中子通量 (中子/厘米²·秒)； ρ 是样品密度 (克/厘米³)； M 是 UO_2 分子量 (270)； N 是阿伏伽德罗常数； C^{235} 是 ^{235}U 的加浓度 (3.04%)； $\hat{\sigma}_f^5$ 是 ^{235}U 有效裂变截面，它与 2200 米/秒的热中子裂变截面 $\sigma_{f_0}^5$ 的关系为^[11]：

$$\hat{\sigma}_f^5 = \sigma_{f_0}^5 \times \left[g + r \sqrt{\frac{T_n}{T_0}} \left(s \sqrt{\frac{T_0}{T_n}} \right) \right], \quad (5)$$

$T_0 = 293^\circ\text{K}$ ， T_n 是样品内的中子温度，经测量为 565°K ； r 是超热中子份额； g 是分布为麦克斯韦谱时，截面的非 $\frac{1}{v}$ 规律的修正； s 是超热区域截面偏离 $\frac{1}{v}$ 规律的修正，它们都是 T_n 的函数，根据中子温度，查表^[11]可得 g, s 值，代入 (5) 得 $\hat{\sigma}_f^5 = 538$ 靶。

对于快中子裂变功率，在游泳池式反应堆内，贡献不大，可以采用下列简单公式求出相对于热中子裂变功率的份额 η ：

$$\eta = \frac{q_{\text{快中子}}}{q_{\text{热中子}}} = \frac{\bar{\phi}_{\text{快中子}} \hat{\sigma}_f^8 C^{238}}{\bar{\phi}_{\text{热中子}} \hat{\sigma}_f^5 C^{235}}, \quad (6)$$

$\hat{\sigma}_f^8$ 是快中子对 ^{238}U 的有效裂变截面； C^{238} 是 ^{238}U 的原子份额； $\bar{\phi}_{\text{快中子}}$ 是快中子通量。 $\bar{\phi}_{\text{快中子}}$ 、 $\bar{\phi}_{\text{热中子}}$ 随堆功率成比例上升； $\bar{\phi}_{\text{快中子}}$ 与 $\bar{\phi}_{\text{热中子}}$ 是互成比例的，将同一堆功率下的 $\bar{\phi}_{\text{快中子}}$ 、 $\bar{\phi}_{\text{热中子}}$ 值和 $\hat{\sigma}_f^8$ 、 $\hat{\sigma}_f^5$ 、 C^{238} 、 C^{235} 代入 (6)，得出 $\eta = 5\%$ 。

关于堆 γ 场对样品加热的贡献，采用钢样品在 5#孔道内相同位置所得 γ 加热的经验值，在 3500 千瓦时，每克钢样品 γ 加热功率是 2 瓦，这样每克物质、每千瓦堆功率的 γ 加热功率是 5.71×10^{-4} 瓦/克·千瓦(堆)。各种堆功率下， $q_{\text{热中子}}$ 、 $q_{\text{快中子}}$ 、 q_γ 的结果列于以下表 2 中。

2. 温度测量 测温时，堆功率按预先计算好的功率分级提升，每一级稳定一、二小时，测量样品内外圈 r_1 和 r_2 上各三副热电偶的温度值，算出 T_1 和 T_2 的平均温度，结果列于表 2 中。实验测量结束后，切下被测样品上面一块样品作金相磨片，观察 UO_2 晶粒生长情形。由图 2 看到， r_1 的热电偶插孔在晶粒生长区与柱状晶粒之间，所以测量点 T_1 在停堆前的温度值应为 $1700^\circ\text{C} < T_1 \leq 1950^\circ\text{C}$ ，实际热电偶的测量值是 1955°C ，表明热电

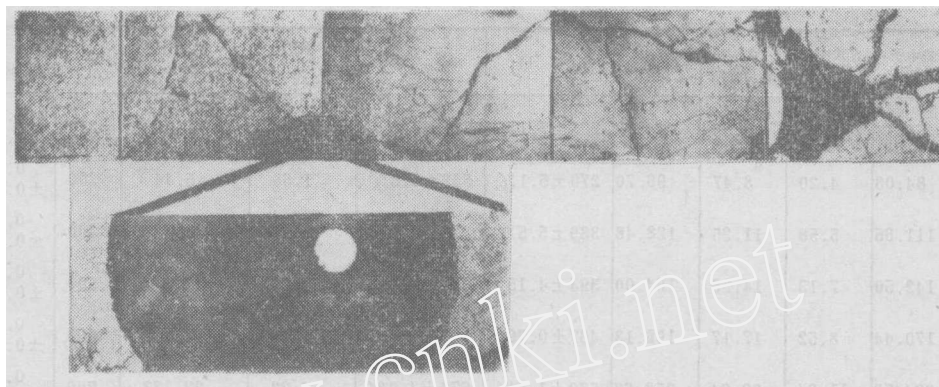


图 2 被测样品的上面一块样品的金相磨片

偶测量值是可靠的。

3. 通量降抑因子 $F(\lambda, r_1, r_2, a)$ 按(2) 式由 λ, r_1, r_2, a 所确定, λ 由(3) 式确定, 其中:

$$\Sigma_a = \frac{\rho N}{M} (\hat{\sigma}_a^5 C^{235} + \hat{\sigma}_a^8 C^{238} + \hat{\sigma}_a^{O_2} C^{O_2}), \quad (7)$$

$$\hat{\sigma}_a^5 = g \sqrt{\frac{\pi T_0}{4 T_n}} \sigma_{a0}^5, \quad (8)$$

$$\hat{\sigma}_a^8 = g \sqrt{\frac{\pi T_0}{4 T_n}} \sigma_{a0}^8, \quad (9)$$

$$\Sigma_s = \frac{\rho N}{M} (\sigma_s^5 C^{235} + \sigma_s^8 C^{238} + \sigma_s^{O_2} C^{O_2}). \quad (10)$$

σ_{a0} 是 2200 米/秒中子的吸收截面。由中子温度 $T_n = 565^\circ K$, 查表^[11]得表 1。由这些值得出 Σ_a, Σ_s , 由此代入(3) 式得出 λ , 由(2) 式和 r_1, r_2, a 的数值定出通量降抑因子 F 是 0.2050。

表 1 核截面及修正因子

	σ_{a0} , 靶	g	σ_s , 靶
^{235}U	683.04	0.9363	10
^{238}U	2.71	1.0065	8.3
O_2	0.0002		4.2

由 q, T_1, T_2 和 F 值代入方程(1), 得到各种功率下的积分热导值 $\int_{T_1}^{T_2} k dT$, 通过内插法运算, 得到固定下限温度的积分热导 $\int_{205^\circ C}^T k dT$ 对温度 T 的曲线, 每点切线的斜率是该温度的热导率, 详见表 2。

积分热导的误差主要来自发热率的误差, 由(4) 式, $\bar{\phi}$ 的误差来自样品内平均通量与监测点的相对测量误差(3%), 监测点的通量绝对测量误差(3%)和堆功率的测量误差(3%), 所以 $\bar{\phi}$ 的误差是 5.2%, ϵ_r 的误差 3.44%, V 的误差 0.4%, ρ 的误差 0.35%,

表 2 实验结果

堆功率, 千瓦	$q_{热中子},$ 瓦/厘米	$q_{快中子},$ 瓦/厘米	$q_{\gamma},$ 瓦/厘米	$q,$ 瓦/厘米	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$\int_{T_1}^{T_2} A dT,$ 瓦/厘米	$\int_{200}^{T_2} A dT,$ 瓦/厘米	$T,$ $^\circ\text{C}$	$k,$ 瓦/厘米 $\cdot^\circ\text{C}$
191	56.14	2.81	5.65	64.59	205±7.1%	221±8.8%	1.05	1.05	210	0.0656 ±0.0073
286	84.03	4.20	8.47	96.70	270±5.1%	302±5.3%	1.58	5.44	300	0.0530 ±0.0041
380	111.65	5.58	11.25	128.48	339±5.5%	379±6.24%	2.10	9.42	400	0.0488 ±0.0043
485	142.50	7.13	14.36	164.00	394±4.15%	452±4.99%	2.68	12.84	500	0.0451 ±0.0038
580	170.44	8.52	17.17	196.13	467±0.79%	538±2.97%	3.20	16.725	600	0.0420 ±0.032
765	224.78	11.24	22.64	258.66	570±1.5%	672±1.3%	4.22	22.333	700	0.0392 ±0.0031
955	280.61	14.03	28.27	322.91	670±0.6%	808±4.5%	5.27	27.523	800	0.0367 ±0.0029
1425	418.76	20.94	42.18	481.83	874±1.91%	1112±4.0%	7.86	37.753	900	0.0344 ±0.0027
1895	556.87	27.85	56.09	640.81	1058±0.6%	1407±2.24%	10.45	46.507	1000	0.0328 ±0.0025
2390	702.33	35.12	70.74	808.19	1230±3.3%	1759±1.7%	13.18	54.73	1100	0.0312 ±0.0023
2840	834.57	41.73	84.06	960.36	1436±1.88%	2208±1.73%	15.67	63.02	1200	0.030 ±0.002
2940	863.93	43.20	87.02	994.15	1511±1.6%	2324	16.22	65.50	1300	0.028 ±0.002
3030	890.39	44.52	89.68	1024.59	1556±1.52%	2391	16.72	67.12	1400	0.027 ±0.002
3220	946.21	47.31	95.31	1088.83	1641±2.2%	2511	17.76	70.21	1500	0.025 ±0.002
3310	972.67	48.64	97.97	1119.28	1678±3.1%	2563	18.26	71.41	1600	0.024 ±0.002
3500	1028.50	51.42	103.60	1183.52	(1843)	(2585)	19.31		1700	0.023 ±0.002
3590	1055.01	52.75	106.26	1214.02	1917	(2686)	19.80		1800	0.022 ±0.002
3680	1081.41	54.07	108.92	1244.40	1955	(2714)	20.50		1900	0.0225 ±0.002
									2000	0.0225 ±0.0016
									2100	0.0237 ±0.0017
									2200	0.025 ±0.002
									2300	0.026 ±0.002
									2400	0.027 ±0.002
									2500	0.029 ±0.002

C^{235} 的误差 1%， $\hat{\sigma}_r$ 误差 1%。发热率的误差是 6.34%。

铊热热电偶的刻度误差是 1%，三副热电偶测量值的均方根偏差在(0.6~8.8%)范围内，绝大部分在 5%以下，所以热导率的误差绝大部分小于 8.07%。

在内插法初次运算中得到的 k 与 T 的关系，在 1100 $^\circ\text{C}$ 以下，能满足 $k = \frac{1}{A + BT}$ 的关系，表明点阵热导的机制是可靠的^[1]。在 1100 $^\circ\text{C}$ 以下，采用 $k = \frac{1}{A + BT}$ 的关系，代入(1)

式, 逐次由相邻两个积分热导值定出 A 、 B , 确定这温度范围内的热导率, 并统一到确定的下限温度(205°C)的积分热导。在 1100°C 以上, 由 $\int_{205^{\circ}\text{C}}^{1112^{\circ}\text{C}} k dT$ 以下的积分热导曲线来取 $\int_{205^{\circ}\text{C}}^{T_1} k dT$ 的积分热导值, 加上 $\int_{T_1}^{T_2} k dT$ 实验值, 得到更高温度下的积分热导值, 并且逐次绘成曲线, 逐步进行。由此得到 $205 \sim 2563^{\circ}\text{C}$ 范围内的积分热导 $\int_{205^{\circ}\text{C}}^T k dT$ 与 T 的曲线, 相应地得到各温度下的热导率。它们都表示在图 3 中。

四、讨论

1. 我们获得的 $210 \sim 2500^{\circ}\text{C}$ 范围内的热导率, 可以与 Gyllander 的实验值^[7]、Schmidt 综合循环测量的平均值^[8]相比较, 这些数值都列于表 4 中第二, 五, 八栏中, 并表示在图 4 中。在 1600°C 以下, 我们的数值略高一些, 但都在实验误差范围之内, 而且是比较一致的。在 $1600 \sim 2100^{\circ}\text{C}$ 范围内, 数值上都都很一致, 并且在 1800°C 左右有极小值,

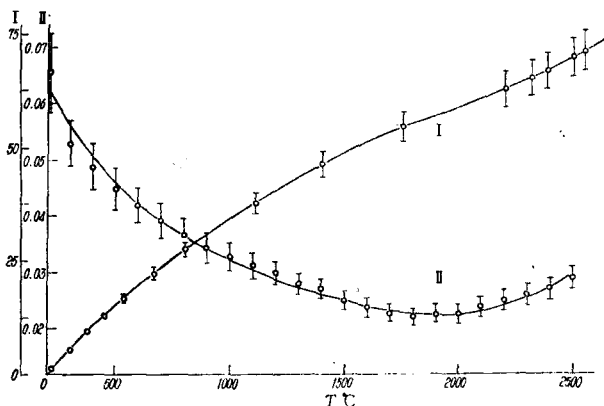


图 3 $\int_{205^{\circ}\text{C}}^T k dT \sim T$ 的实验结果曲线(I)和 $k(T)$ 实验曲线(II)

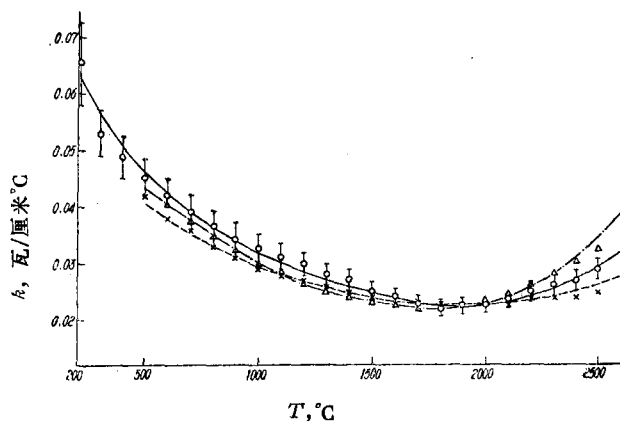


图 4 按(11)式计算的 $k(T)$ 曲线和相应的实验点
 ○——本工作实验结果; ×——Gyllander 实验结果; △——Schmidt 综合循环测量的平均值; ——(11)式对应本文实验结果的计算值; - - - (11)式对应 Schmidt 综合实验结果的计算值; ···· (11)式对应 Gyllander 实验结果的计算值。

以后热导率随温度升高而增加。在 2100~2500°C 范围内，我们的热导率数值介于 Gyllander 测量值与 Schmidt 综合的平均值之间，由于我们样品的密度介于他们两者之间，芯块的工艺条件亦有所不同，这些在实验误差范围内的差别是完全合理的，我们的实验测量值是可靠的。

2. 热导率的实验值符合下列关系式：

$$k(T) = \frac{1}{A + BT} + CT e^{-\epsilon/kT} \quad (11)$$

对于本文的实验值、Gyllander 实验值、Schmidt 综合循环测量的平均值，其 A 、 B 、 C 、 ϵ 分别列于表 3 中，按(11)式所得计算值分别列于表 4 中(在三、七、九栏内)，表明数值吻合得很好。

表 3 (11)式中符合实验值的 A 、 B 、 C 、 ϵ 值

	A , 厘米·°K/瓦	B , 厘米/瓦	C , 瓦/厘米	ϵ , 电子伏
本工作实验值	7.01	0.0189	2.29×10^{-3}	1.48
Gyllander 实验值	11.10	0.01755	2.69×10^{-4}	1.04
Schmidt 综合平均值	6.275	0.02109	2.17×10^{-3}	1.37

我们知道， UO_2 晶格热导可以表示为：

$$k_l = \frac{1}{A + BT} \quad (12)$$

A 是与缺陷性质、浓度有关的量， B 是与晶格的非谐振性质有关的量，前者是与声子和缺陷的散射有关，后者是与声子和声子的散射有关。各种制备工艺和杂质，对 A 、 B 值都有影响，但是对 B 值影响较小，这表明对于纯度较高、氧铀比为 2.00 的芯块，其晶格的非谐振性质相差较小。所以(11)式中第一项是晶格热导。

第二项类似于电子热导。Bates 等人^[12]测量了 UO_2 高温电导率 σ ，当 T 在 1400~2800°K 范围内，电导率 σ 可以表达为：

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\epsilon}{kT}} \quad (13)$$

ϵ 是电子激活能，它随温度升高而升高， $\epsilon = \epsilon_0 + bT$ ， ϵ_0 在 1.15~1.21 eV 之间，电子热导 k_e 是正比于 σT ^[13]，所以 k_e 可以表示为：

$$k_e = CT e^{-\epsilon/kT} \quad (14)$$

表 3 中的 ϵ 值，是比较接近于高温下电子的激活能，但是目前热导率的测量精度不高， ϵ 值的差别较大，只有提高实验精度，才能更好地讨论机制。

3. 在设计中，需要 $k(T)$ 的表达式^[1]，所以 $k(T)$ 的经验表达式是很有用的。能够满足上述三种实验值的另一种经验关系式是：

$$k(T) = \frac{1 + C' e^{-\epsilon'/kT}}{A + BT} \quad (15)$$

其中 A 、 B 、 C' 、 ϵ' 的值见表 5。

由(15)式计算的热导率列于表 4 中的第四、六、十栏中。表示成这样的关系式就有两

表 4 实验值与计算值的比较

T, °C	k	k	k	k	k	k	k	k	k	k
	实验值	计算值	计算值	实验值	计算值	计算值	实验值	计算值	计算值	计算值
	本工作	按(11)式	按(15)式	[7]	按(15)式	按(11)式	[6]	按(11)式	按(15)式	[6]
210	0.0656	0.0620	0.0620							
300	0.0530	0.0560	0.0560							
400	0.0488	0.0506	0.0506							
500	0.0451	0.0463	0.0463	0.042 ±0.004	0.04054	0.0405				
600	0.0420	0.0425	0.0426	0.039 ±0.004	0.03785	0.0379	0.0405	0.0405	0.0405	0.0413
700	0.0392	0.0394	0.0394	0.038 ±0.003	0.0355	0.0355	0.0375	0.0373	0.0373	0.0380
800	0.0367	0.0366	0.0366	0.033 ±0.003	0.0334	0.0334	0.0350	0.0346	0.0346	0.0352
900	0.0344	0.0343	0.0343	0.031 ±0.003	0.0316	0.0316	0.0325	0.0322	0.0322	0.0328
1000	0.0328	0.0322	0.0322	0.029 ±0.003	0.0299	0.0299	0.0300	0.0302	0.0302	0.0306
1100	0.0312	0.0304	0.0304	0.028 ±0.002	0.0285	0.0285	0.0282	0.0284	0.0284	0.0287
1200	0.030	0.0287	0.0287	0.027 ±0.002	0.0273	0.0273	0.0264	0.0269	0.0269	0.0271
1300	0.028	0.0273	0.0273	0.026 ±0.002	0.0262	0.0262	0.0250	0.0255	0.0255	0.0256
1400	0.027	0.0261	0.0260	0.025 ±0.002	0.0252	0.0252	0.0240	0.0244	0.0244	0.0245
1500	0.025	0.0250	0.0249	0.024 ±0.002	0.0245	0.0242	0.0234	0.0234	0.0235	0.0235
1600	0.024	0.0240	0.0240	0.024 ±0.002	0.0239	0.0236	0.0227	0.0227	0.0229	0.0229
1700	0.023	0.0233	0.0233	0.023 ±0.002	0.0234	0.0230	0.0220	0.0222	0.0225	0.0226
1800	0.022	0.0228	0.0228	0.023 ±0.002	0.0232	0.0227	0.0222	0.0221	0.0224	0.0227
1900	0.0225	0.0226	0.0226	0.023 ±0.002	0.0230	0.0226	0.0226	0.0224	0.0227	0.0231
2000	0.0225	0.0227	0.0228	0.023 ±0.002	0.0230	0.0227	0.0234	0.0230	0.0234	0.0237
2100	0.0237	0.0232	0.0232	0.023 ±0.003	0.0231	0.0230	0.0247	0.0242	0.0245	0.0252
2200	0.025	0.0241	0.0241	0.024 ±0.003	0.0235	0.0235	0.0265	0.0259	0.0260	0.0273
2300	0.026	0.0255	0.0255	0.024 ±0.003	0.0239	0.0242	0.0286	0.0282	0.0281	0.0295
2400	0.027	0.0274	0.0273	0.024 ±0.004	0.0244	0.0252	0.0304	0.0312	0.0305	0.0318
2500	0.029	0.0298	0.0298	0.025 ±0.004	0.025	0.0264	0.0325	0.0350	0.0335	0.0333

种可能性，一是晶格热导率与电子热导率有如下形式：

$$k = k_l \left(1 + \frac{k_e}{k_l} \right), \quad \frac{k_e}{k_l} = C' e^{-\epsilon'/kT} \quad (16)$$

另一种可能性是 Schmidt 指出的，在高温下，由于点缺陷浓度增加，固体的比热增加，这比热的增加量与点缺陷浓度成正比。我们知道，点缺陷浓度正比于 $e^{-\epsilon'/kT}$ ， ϵ' 是形成点缺

表 5 (15)式中符合实验值的A,B,C',e'值

	A, 厘米·°K/瓦	B, 厘米/瓦	C', 瓦/厘米	e', 电子伏
本工作实验值	7.01	0.0189	1947.4	1.875
Gyllander 实验值	11.11	0.01755	57.51	1.137
Schmidt 综合平均值	6.275	0.02109	932.9	1.598

陷的激活能。所以热导率呈现(15)式的形式。

目前, 实验数据精度不高, 又缺乏热导与电导同时测量的实验数据, 又没有做判别电子热导的实验, 很难进一步探讨电子热导的作用、点缺陷引起的固体比热的影响, 仅能做初步探索。

参加本工作的同志还有姚世彬、郭星渠、石永康、甄树权、朱凤鸣等全组同志, 在实验中得到游泳式反应堆室机械组、物理组、操纵组同志的指导和协助, 其中, 通量测量数据由物理组提供, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] D. R. Olander, TID-26711-P1 (1976).
- [2] R. R. Asamoto et al., *J. Nucl. Mater.*, **29**, 67 (1969).
- [3] M. F. Lyons et al., *Nucl. Eng. Des.*, **21**, 167 (1972).
- [4] J. L. Bates, BNWL-1431, UC-25 (1970).
- [5] J. B. Conway & A. D. Feith, GEMP-592 (1968); GEMP-715 (1969).
- [6] H. E. Schmidt, *J. Nucl. Mater.*, **39**, 234 (1971).
- [7] J. A. Gyllander, AE-411 (1971).
- [8] J. A. L. Robertson, AECL-807 (1959).
- [9] F. R. Taraba & S. H. Paino, ANL-5945 (1959).
- [10] 格拉斯登著, 和平等译, 原子核反应堆工程原理, 科学出版社, 1959, 16—17页。
- [11] C. H. Westcott, AECL-1101(1960).
- [12] J. L. Bates & C. A. Hinman et al., *J. Amer. Ceram. Soc.*, **50**, 652 (1967).
- [13] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, John Wiley & Sons Inc., 1956, p. 148.

(上接第348页)

验配置表现为入射的中子方向不同。可是这个方向不同, F_0/\bar{F} 和 q 都将不同。为了修正这样测得的微分截面, 须以不同的 α_1 和 α_2 分别乘到相应角度的微分截面上去。

参 考 文 献

- [1] J. B. Parker et al., *Nucl. Instrum. Methods*, **14**, 1 (1961).
- [2] J. B. Parker et al., *ibid.*, **30**, 77 (1964).
- [3] B. Holmqvist et al., *Arkiv for Fysik*, **34** (5), 481 (1967).