

堆内测量 UO_2 燃料元件的有效热导

郁金南 陈惠中 邓凤翔 郭星渠 奚道全

本文叙述装载 UO_2 芯块的元件有效热导的测定, 获得 632°C — 1988°C 范围内有效热导数据, 误差是 8.5%。最后分析了芯块、包壳材料、内壁温度对有效热导的影响。

一、引言

有效热导是燃料元件的一个重要性能, 它的定义是^[1]:

$$k_{\text{有效}} = \frac{\int_{T_s}^{T_c} k dT}{T_c - T_i}, \quad (1)$$

$$\int_{T_s}^{T_c} k dT = \frac{q}{4\pi} F. \quad (2)$$

式中, q 是元件单位长度发热率; F 是芯块的形状因子^[2], 对于实心圆柱形芯块, ^{235}U 浓缩度 C_m 低于 3%, F 很接近于 1; T_i 是元件包壳的内壁温度; T_c 是芯块的中心温度; T_s 是芯块的表面温度; k 是芯块的热导率。当测定了 q 与 $(T_c - T_i)$ 的关系, 即测定了元件的有效热导, 就能得出元件在各种工况下的中心温度和最大允许使用的热负荷。

元件表面热负荷 W 与单位长度发热率 q 之间关系是:

$$W = \frac{q}{2\pi a}. \quad (3)$$

式中, a 是元件包壳的外半径, 对于确定的表面热负荷和工质的流速、温度, 就确定了元件表面温度 T_0 , 相应的包壳内壁温度 T_i 是:

$$T_i = T_0 + \frac{W a}{k_{\text{包壳}}} \ln \frac{a}{r_2}. \quad (4)$$

其中, $k_{\text{包壳}}$ 是包壳材料的热导率; r_2 是包壳的内半径。由此元件中心温度 T_c 是:

$$T_c = T_i + \frac{F a}{2 k_{\text{有效}}} W \quad (5)$$

$$\simeq T_i + \frac{a W}{2 k_{\text{有效}}}. \quad (5')$$

元件运行不允许中心达到熔化, 因此表面热负荷的极限 W_m 是:

$$W_m = \frac{2 k_{\text{有效}}}{F a} (T_m - T_i) \quad (6)$$

$$\simeq \frac{2 k_{\text{有效}}}{a} (T_m - T_i). \quad (C_m \leq 3\%) \quad (6')$$

T_m 是芯块的熔点; C_m 为 ^{235}U 浓缩度。从(5), (6)式中看到, 当测定了元件有效热导, 就可以得出元件的中心温度和表面热负荷的极限。

另外, 比较直接和简便的方法是测出元件的 $\frac{q}{4\pi} F$ 与 $(T_o - T_i)$ 的曲线, 曲线上每点与原点连线的斜率就是有效热导。对确定的 F 按(3)式得出的 q , 由(7)式定出 F 值, 对应于 $\frac{q}{4\pi} F$ 值查曲线得出 $(T_o - T_i)$ 。由于已知 T_i , 同样得出 T_o 。

有效热导是芯块热导、气隙热导的综合描述。它包含芯块在运行时的状态, 如热裂和靠近包壳一侧等状态。对于它的测定, 不仅提供燃料元件的性能, 而且有助于对运行状态的分析。

为了对国产 UO_2 芯块在选定的元件参数下进行堆内有效热导的测量, 我们设计和制作了实验装置, 在堆内测得 $632^\circ\text{C} - 1988^\circ\text{C}$ 范围内的有效热导数据。元件的发热率是由芯块内平均热中子通量所确定, 同时还测量了不锈钢包壳的径向温度梯度, 算出发热率。这两种结果是一致的。芯块的中心温度由钨铼热电偶和双铂铑热电偶直接测定。包壳内壁温度由径向温度梯度直接推算定。

实验是在重水反应堆 5# 孔道动水迴路中进行的, 在堆功率为 2050 kW 到 8804 kW 范围内, 测量了芯块的中心温度、包壳温度, 数据稳定可靠。

二、实验装置

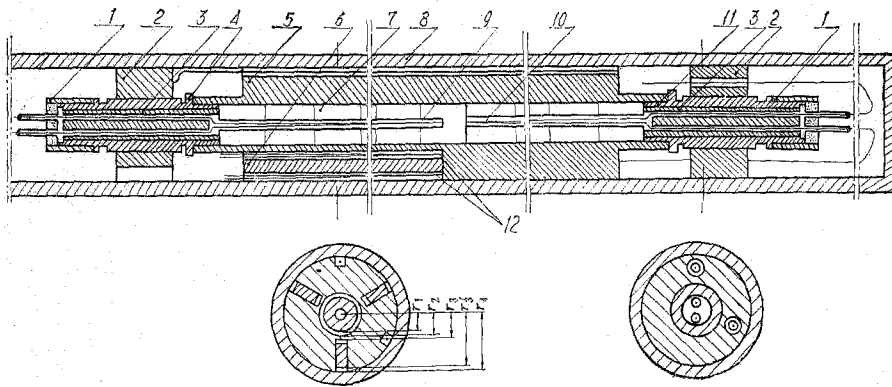


图 1 堆内测量元件有效热导的装置简图

1——金属陶瓷密封件; 2——定位块; 3——瓷管; 4——上端塞; 5——包壳(s.s.); 6——镶嵌条(s.s.); 7—— UO_2 芯块; 8——工艺管(Al); 9——W5Re/W20Re 热电偶; 10——双铂铑热电偶; 11——下端塞; 12——镍铬-镍铝热电偶, 共 6 副。

实验装置如图 1 所示, 元件包壳采用厚壁不锈钢, 其热导率、热膨胀系数见表 1, 内径 $\phi 6.7 \pm 0.005 \text{ mm}$, 壁厚 6.15 mm, 在壁面互成 120° 角的三个方向, 有深度 5.5 mm、宽 2 mm 的槽, 槽端部对应第 8 块样品的中点。在槽底内侧分别焊上镍铬-镍铝热电偶, 然后镶进 $2 \times 3 \times 80 \text{ mm}$ 不锈钢条, 再分别焊上镍铬-镍铝热电偶。

UO_2 芯块采用 1550°C 的高温烧结工艺制成, 直径 $\phi 6.55 \text{ mm}$ 、高 10 mm。样品中心有直径为 $\phi 1.3 \text{ mm}$ 的小孔, 处在中间部位的样品, 中心孔深 5 mm。烧结块的密度 $10.227 \pm 0.036 \text{ g/cm}^3$, ^{235}U 的浓缩度 C_m 是 $(10.1 \pm 0.2)\%$ 。为避免通量的“端部效应”^[3]和轴向热流对测量点的影响, 包壳内装有 15 块样品, 总长度 150 mm, 并在两端放置 Al_2O_3

表 1 材料和 He 气的热导性能

温 度, °C	不 锈 钢		Zr-2 合金管**		He 气热导率 ^[8] , 千卡/米·小时·°C	UO ₂ 热膨胀 系数 ^[6,7] , × 10 ⁻⁸ °C ⁻¹
	热导率*, 卡/秒·厘米·°C	热膨胀系数 ^[7] , × 10 ⁻⁸ °C ⁻¹	热导率, 卡/秒·厘米·°C	热膨胀系数, × 10 ⁻⁸ °C ⁻¹		
100	0.039	16.5	0.0430	5.51	0.1540	7.2
150					0.1690	
200	0.042		0.0400	5.81	0.1830	
250					0.1960	
300	0.045		0.0405	5.65	0.2100	
350			0.0420	5.56	0.2240	8.5
375			0.0427	5.51		
400	0.049			5.48	0.2370	
410			0.0440			
450				5.39		
500	0.052				0.2620	9.8
600		18.0			0.2860	
700					0.3100	
800						
1000		20.0				
1260						13.0

* 北京钢铁研究院测量值;

** 北京有色金属研究院测量值。

烧结块, 做隔热保护。

测量样品中心温度的热电偶, 一副是钨铼热电偶(W 5% Re-W 20% Re), 热电偶丝直径 ϕ 0.3 mm, 另一副是双铂铑热电偶(Pt 6% Rh-Pt 30% Rh), 热电偶丝直径 ϕ 0.25 mm, 套上双孔氧化镁瓷管, 瓷管的外径为 ϕ 1.2 mm, 孔径为 ϕ 0.3 mm, 插到第 8 块样品的测端, 它们与 UO₂ 短期内是相容的。据 Maquilkina 等作者^[10]综合铂铑热电偶和钨铼热电偶的辐照实验, 表明在一个月的照射后, 在 1371—1649°C 范围内和 1371—2038°C 范围内使用是可靠的。我们测量的数据亦是稳定的。

元件测量装置在组装、焊接、检漏以后, 放进手套箱, 进行抽空、充氦、堵焊, 组成测量装置。在钨铼热电偶、双铂铑热电偶末端接上补偿导线, 并在钨铼热电偶末端安上镍铬-镍铝热电偶, 测量钨铼热电偶末端的温度。这 3 副热电偶, 连同测量包壳温度的 6 副热电偶, 都缚在固定的铝杆上, 整体地装入工艺管中。在工艺管顶部, 9 副热电偶线用阿拉第胶密封, 并在工艺管内充以氦气, 改善导热能力。

三、实验测量和结果

实验装置于 19 日入堆, 20 日开堆测试 3 小时, 21 日在 2050 kW 到 7806 kW 的 9 个不同堆功率下稳定半小时到 2 小时, 进行稳态的温度测量。22 日堆功率在 8000 kW 运行, 23 日分别在 8283、8804 kW 功率下进行测量。热电偶测点的径向分布示于图 1 下方, 测量结果列于表 2, 温度测量的分度误差 1%

对于圆柱形芯块, 公式(2)中的形状因子 F 为^[2]:

$$F = \frac{I_0(xr_1) - 1}{\frac{1}{2}xr_1I_1(xr_1)}, \quad (7)$$

$$x^2 = 3 \frac{\Sigma_a \Sigma_t}{\left(1 + 0.4 \frac{\Sigma_a}{\Sigma_t}\right)^2}. \quad (8)$$

其中, x 是中子在芯块中扩散长度的倒数; r_1 是芯块半径; $I_0(xr_1)$, $I_1(xr_1)$ 是零级、一级修正贝塞尔函数, Σ_a , Σ_t 分别是芯块的宏观吸收截面和宏观总截面。用芯块参数值计算出 F 值是 0.9752。当采用 3% 浓缩度, 密度为 10.26 g/cm^3 的芯块, F 值是 0.9949。

q 值由两部分组成:

$$q = q_{(热)} + q_{(快)}. \quad (9)$$

$q_{(热)}$ 是热中子裂变所产生的单位长度上的发热率(简称元件线功率), $q_{(快)}$ 是快中子裂变所产生的单位长度上的发热率。 $q_{(热)}$ 为:

$$q_{(热)} = \frac{\rho_{UO_2} V}{M_{UO_2}} N C_m \hat{\sigma}_f \bar{\varphi} \epsilon_f. \quad (10)$$

ρ_{UO_2} 是 UO_2 芯块密度, 等于 $10.227 \pm 0.36 \text{ g/cm}^3$; V 是芯块单位长度体积 ($0.3237 \pm 0.0065 \text{ cm}^3/\text{cm}$); C_m 是 ^{235}U 的浓缩度 ($10.1 \pm 0.2\%$); M_{UO_2} 是 UO_2 分子量, 269.7 g ; N 是阿伏伽德罗常数; $\bar{\varphi}$ 是芯块内热中子平均通量; $\hat{\sigma}_f$ 是有效裂变截面; ϵ_f 是每次裂变在样品中生成的热量。

平均通量 $\bar{\varphi}$ 和中子温度是采用与装置相似的通量测量装置获得, 在样品内夹入 Au, Cu 探测片(金箔、铜箔一起夹在两片铝箔中间, 边缘用阿拉第胶封住, 防止污染探测片), 与监测点 Au, Cu 探测片做相对测量, 而后对监测点做绝对测量, 得出样品内平均热中子通量与堆功率的关系, 测量结果列于表 3 中, 相对测量的误差是 5.4%, 绝对测量的误差 2.4%, 堆功率(热功率)由冷却水进出口温差和流量确定的, 误差 3.6%。因此对一定堆功率下样品内平均热中子通量的误差是 7.1%。由测量的中子温度, 得出 $\hat{\sigma}_f$ 值是 $536.0 \pm 5.4 \text{ b}$ 。

ϵ_f 包括有: 裂变碎片的动能 $168 \pm 5 \text{ MeV}$; 裂变产物的 β 射线的能量 $7 \pm 1 \text{ MeV}$; 样品在堆内 γ 、 β 、中子场内吸收的能量, 折合到每次裂变应附加上的能量是 2 MeV ; 综合起来是 $177 \pm 6 \text{ MeV}$ 。

在公式(10)中, ρ_{UO_2} , V , C_m , $\bar{\varphi}$, $\hat{\sigma}_f$, ϵ_f 的误差分别为 0.35%, 2.01%, 1.98%, 7.10%, 1%, 3.39%, 因此 $q_{(热)}$ 的误差是 8.4%。

在 5# 孔道动水回路中, 快中子裂变只是热中子裂变的 2%, 由此得出的 $q_{(热)}$, $q_{(快)}$, q 的结果都列于表 3 中。

同时, 不锈钢包壳内径向不同半径 r_3' 和 r_3 之间的温度差 ($T_3' - T_3$) 与单位长度发热率有以下关系:

$$q_{(热)} = \frac{1}{\ln \frac{r_3'}{r_3}} \left[2 \pi k_{ss} (T_3' - T_3) + \pi r_3^2 P_\gamma \rho_{ss} \ln \frac{r_3'}{r_3} - \frac{\pi}{2} (r_3'^2 - r_3^2) \rho_{ss} P_\gamma \right], \quad (11)$$

这里单位长度发热率用 $q_{(热)}$ 表示, 以区别于用中子通量确定的 q 值; ρ_{ss} , k_{ss} 是不锈钢的密度、热导率; P_γ 是 γ 加热功率(W/g), 对于 5# 孔道, γ 加热功率是 $1.035 \times 10^{-4} \text{ W/g} \cdot \text{kW}_{(堆)}$; T_3' , T_3 是 r_3' , r_3 位置的温度值。 $q_{(热)}$ 的数据列于表 3 中, 结果表明, $q_{(热)}$ 与 q

表 2 实验测量数据

堆功率, kW	T ₀ 中心温度		不锈钢包壳内 T ₃ , T ₃ ' (T ₃ -T ₃ ')										T ₃ 平均值, °C	(T ₃ -T ₃ ') 平均值, °C	q 由平均温差得到, W/cm
	¹ T ₃ 钨钨热偶测定, °C	² T ₃ 双铂铑热偶测定, °C	第一对热偶		第二对热偶		第三对热偶								
			T ₃ , °C	T ₃ '-T ₃ , °C	T ₃ , °C	T ₃ '-T ₃ , °C	T ₃ , °C	T ₃ '-T ₃ , °C	T ₃ , °C	T ₃ '-T ₃ , °C	T ₃ , °C	T ₃ '-T ₃ , °C			
2050	632	600	202	153	49	216	177	39	214	112	102	211±6.3	63.3	95.75	
3010	818	776	246	172	74	265	209	56	265	127	138	256±9.3	89.3	137.8	
4060	1002	981	283	187	96	309	239	70	312	134	178	301±13	114.6	181.1	
5170	1192	1156	315	199	116	342	254	88	342	146	196	333±12.7	133.3	214.0	
6215	1413	1392	350	207	143	368	263	105	370	154	216	363±9	154.6	251.5	
6380	1480	1452	357	208	149	373	265	108	377	155	222	369±8.6	159.6	280.0	
6930	1588	1480	360	212	148	383	265	118	389	159	230	377±12.5	165.3	269.5	
7606	1728	1612	389	219	170	398	268	130	407	164	243	398±7.4	161.0	298	
7886	1789	1650	393	222	171	404	269	135	413	167	246	403±8.2	184.0	303.6	
8283	1950		219	219		400	267	133	406	169	237	403±4.7	185.0	306	
8804	1988		222	222		408	268	140	417	175	242	413±4.5	191.0	317.8	

表 3 堆功率、通量、芯块发热率、积分热导、包壳内壁温度、T₃-T₃' 的数据

堆功率, (热) kW	通量, ×10 ¹⁵ n/cm ² .s	q(热), W/cm	q(热)+q(快), W/cm	q(热) 由热偶测定, W/cm	$\frac{q-F}{4\pi}$, W/cm	$\frac{q-F}{4\pi}$, 95%理论密度 W/cm	T ₃ , °C	¹ T ₃ -T ₃ ' 钨钨热偶测定, °C	² T ₃ -T ₃ ' 双铂铑热偶测定, °C	k 有效, 95%理论密度	k 有效 ² , 95%理论密度
2050	1.796	89.59	91.38	95.75	7.09	7.47	235.8±8.9	396.2	364.2	0.01885±0.00159	0.020504±0.00173
3010	2.568	128.11	130.67	137.8	10.12	10.88	290.3±13.1	527.7	485.7	0.020238±0.00171	0.02199±0.00186
4060	3.377	168.47	171.84	181.1	13.32	14.05	344.4±17.8	657.6	636.6	0.02136±0.00180	0.02206±0.00186
5170	4.184	208.73	212.91	214.0	16.51	17.42	385.8±18.5	806.9	770.9	0.02157±0.00182	0.02258±0.00198
6215	4.898	244.34	249.23	251.5	19.33	20.38	422.3±15.6	990.7	969.7	0.02056±0.00174	0.02101±0.00178
6380	5.006	249.73	254.72	260.0	19.79	20.82	429.4±15.3	1050.6	1022.6	0.01981±0.00167	0.02036±0.00172
6930	5.361	267.44	272.78	269.5	21.19	22.30	441.2±19.5	1146.8	1038.8	0.01944±0.00164	0.02146±0.00181
7606	5.780	288.34	294.12	298.0	22.81	24.04	466.3±15	1261.7	1145.7	0.01905±0.00161	0.02098±0.00177
7886	5.948	296.72	302.66	303.6	23.48	24.78	473.0±16	1316.0	1177.0	0.01880±0.00159	0.021018±0.00178
8283	6.181	308.34	314.51	306.0	24.42	25.78	475.6±12.8	1474.6	1474.6	0.01743±0.00147	
8804	6.476	323.06	329.52	317.8	25.57	26.92	488.6±13	1499.4	1499.4	0.01796±0.00152	

值相一致,证明中子通量所确定的 q 值是可靠的。由于通量测量的精确度较高*, 我们采用中子通量所确定的单位长度发热率数据。

内壁温度 T_1 由下式确定:

$$T_1 = T_3 + \frac{q}{2\pi k_{ss}} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{\rho_{ss} P_v}{4 k_{ss}} (r_3^2 - r_2^2) - \frac{\rho_{ss} P_v r_2^2}{2 k_{ss}} \ln \frac{r_3}{r_2} \quad (12)$$

其中 r_2 是包壳内半径。 T_3 的均方根偏差是 $4.5^\circ - 13^\circ\text{C}$, T_1 的总偏差在 $8.9^\circ\text{C} - 19.5^\circ\text{C}$ 之间, 绝大部分的误差在 $2.6\% - 4.0\%$ 之间。实验结果见表 4。

表 4 元件线功率、中心温度、有效热导率的测量结果*

q , W/cm	T_{c1} , $^\circ\text{C}$	T_{c2} , $^\circ\text{C}$	T_1 , $^\circ\text{C}$	$k_{\text{有效}1}$, W/cm $\cdot^\circ\text{C}$	$k_{\text{有效}2}$, W/cm $\cdot^\circ\text{C}$
91.38	632	600	236.0	0.01791	0.01948
130.67	818	776	292.2	0.01925	0.02095
171.84	1002	981	345.2	0.02030	0.02098
212.91	1192	1156	386.3	0.02050	0.02147
249.23	1413	1392	423.3	0.01956	0.01998
254.72	1480	1452	431.0	0.01887	0.01935
272.78	1588	1480	442.9	0.01849	0.02040
294.12	1728	1612	467.9	0.01809	0.01993
302.66	1788	1650	474.6	0.01788	0.01999
314.51	1950		477.5	0.01659	
329.52	1988		490.5	0.01707	

* T_{c1} , 钨铼热电偶测量结果; T_{c2} , 双铂铑热电偶测量结果; T_1 , 元件内壁温度; $k_{\text{有效}1}$, 钨铼热电偶测量结果; $k_{\text{有效}2}$, 双铂铑热电偶测量结果。

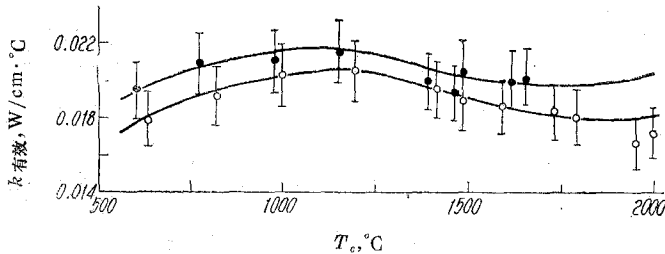


图 2 有效热导率与中心温度的关系

○——钨铼热电偶测量结果; ●——双铂铑热电偶测量结果; 芯块密度是 93.23% 理论密度。

从这些结果表明,有效热导开始阶段,随中心温度增加而增加,到一定值以后,逐渐下降,在 1800°C 左右开始回升,呈现 S 形曲线(见图 2)这是因为有效热导是由芯块热导和气隙热导项所组成,芯块热导随温度增加而减少,到 1800°C 左右,芯块热导又缓慢上升^[9];而气隙热导随中心温度升高而增加,这两者综合的结果就出现上述曲线。按有效热导定义:

* q (热)与 q 值都是准确的,但 q (热)的误差较大, r_3' 、 r_3 的测量误差 ± 0.020 厘米, $\ln \frac{r_3'}{r_3}$ 的误差是 6.9%, 不锈钢热导率误差是 3%, $(T_3' - T_3)$ 平均值的均方根偏差在 25.7 - 43.4% 之间,绝大部分在 30% 以下。由此得出的 q (热)的误差是 26.7% - 44%, 绝大部分在 30%。

$$\frac{1}{k_{\text{有效}}} = \frac{1}{\frac{T_c - T_s}{\int_{T_s}^{T_c} k dT} + \frac{T_s - T_i}{\int_{T_s}^{T_c} k dT}} = \frac{1}{\frac{1}{k(\bar{T}_{\text{UO}_2})} + \frac{\ln r_2 / r_1}{2k_g(\bar{T}_g)F}} \quad (13)$$

其中, \bar{T}_{UO_2} 是芯块的平均温度; k_g 是气隙内气体热导率; \bar{T}_g 是气隙的平均温度; r_1 是芯块

半径。当发热率较低, 中心温度较低, 运行气隙较大, 所以 $\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2k_g(\bar{T}_g)F} > \frac{1}{k(\bar{T}_{\text{UO}_2})}$, 有效

热导主要受气隙热导项影响, 因此, 开始阶段, 有效热导随发热率增加(中心温度升高)而增加。因为, 发热率增加, 中心温度升高, 运行气隙减少, 气隙热导项迅速增长, 有效热导就上升。当气隙热导项增长到与芯块热导项相等时, 芯块热导就起重要作用。当

$\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2k_g(\bar{T}_g)F} < \frac{1}{k(\bar{T}_{\text{UO}_2})}$ 时, 即运行气隙足够小, 有效热导主要受芯块热导所影响, 先随着

芯块热导下降而下降, 而后随芯块热导增加而增加。因此有效热导呈现 S 曲线。

为(5')式计算方便起见, 绘制有效热导与 $q (=2\pi aW)$ 的曲线, 表示于图 3。

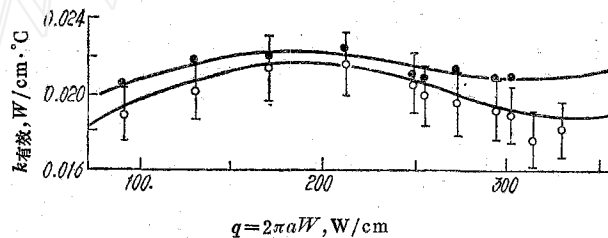


图 3 有效热导与元件线功率的关系

○——铊铂热电偶测量结果; ●——双铂铑热电偶测量结果; 芯块密度是 93.23% 理论密度。
为图形清晰, 图上未标出 ● 点的上下限。

实际上, 比较直接和方便的方法是绘制 $\frac{q}{4\pi}F$ 与 $(T_c - T_i)$ 的曲线图(表示于图 4)。对应元件的一定热负荷和工质的流速、温度, 算出 $\frac{q}{4\pi}F$ 值和 T_i 值, 对应 $\frac{q}{4\pi}F$ 查曲线, 得出 $(T_c - T_i)$, 加上 T_i 就是中心温度, 这样计算方便, 结果准确。另外, 元件线功率(发热率)的误差是 8.5%, 而 $(T_c - T_i)$ 的误差只有 1.5%, 所以绘制曲线, 主要标明 $\frac{q}{4\pi}F$ 的误差, 绘图方便、合理。

四、讨 论

1. $k_{\text{有效}}$ 对 C_m 的适用性: 从有效热导的定义中可以看到, $k_{\text{有效}}$ 主要由芯块热导率和气隙热导项所确定, 芯块热导率与 UO_2 烧结工艺、氧铀比、密度等有关, 而不受 ^{235}U 浓缩度 C_m 所影响, 因此 $k_{\text{有效}}$ 适用于一定范围内的 ^{235}U 浓缩度芯块所组成元件。

然而, 不同的 C_m 就有不同的 F 因子, 它反映了燃料中热中子通量的径向分布的不同, 如

果假定 $k_{\text{有效}}$ 和 $(T_c - T_i)$ 保持不变, 则与 C_m 有关的 F 因子必须反映在 q 上, 我们用一个等效元件线功率 q' 来表示, 根据假定:

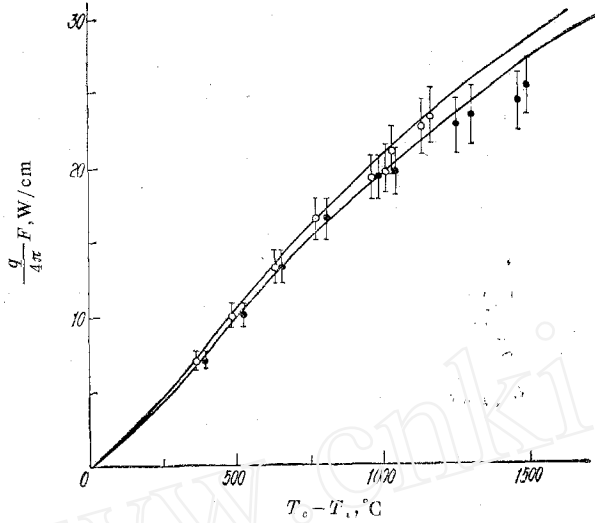


图 4 $\frac{q}{4\pi}F$ 与 $(T_c - T_i)$ 的关系曲线

—●— 钨铼热电偶测量值; ○— 双铂铑热电偶测量值; 芯块密度是 93.23% 理论密度。

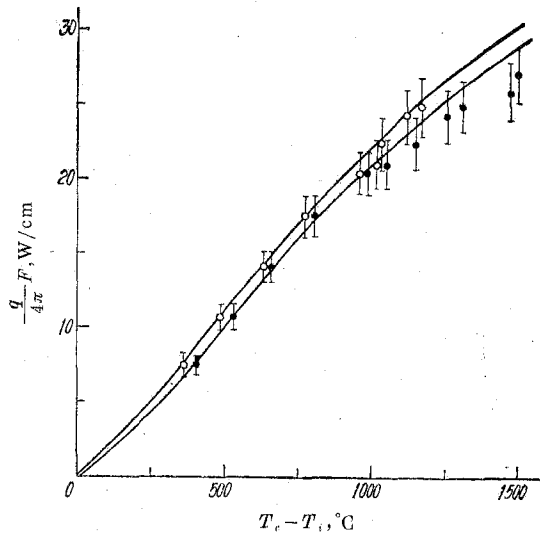


图 5 $\frac{q}{4\pi}F$ 与 $(T_c - T_i)$ 的关系曲线

—●— 钨铼热电偶测量值; ○— 双铂铑热电偶测量值; 芯块密度是 95% 理论密度。

$$q' = \frac{F}{F'} q, \tag{14}$$

通过这个关系, 把浓度为 C_m 的 $k_{\text{有效}}$ 与 q 的关系, 换算到 C_m' 的 $k_{\text{有效}}$ 与 q' 的关系, 这两者是等效的。

2. $k_{\text{有效}}$ 与芯块密度的关系。根据许多实验, UO_2 芯块的热导率与密度 ρ 的关系表示为^[4]:

$$k_p = k_l(1 - 2.5 p), \quad (15)$$

$$p = 1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{理}}}. \quad (16)$$

$\rho_{\text{理}}$ 是 UO_2 的理论密度; p 是烧结块的孔隙率; k_l 是具有理论密度的芯块热导率, 即孔隙率为零的热导率; k_p 是具有密度 ρ 的芯块热导率, 即孔隙率为 p 的热导率。因此,

$$\int_{T_s}^{T_c} k_p dT = \frac{1 - 2.5 p}{1 - 2.5 p_l} \int_{T_s}^{T_c} k_{p_l} dT'. \quad (17)$$

如果元件内装载孔隙率为 p 的芯块, 其有效热导为:

$$k_{p\text{有效}} = \frac{1 - 2.5 p}{1 - 2.5 p_l} k_{p_l\text{有效}}. \quad (18)$$

通过(18)式, 把实验结果换算成装载 95%理论密度芯块的元件有效热导值, 列于表 3 中。

我们直接绘 $\frac{q}{4\pi}F$ 与 $(T_c - T_i)$ 的曲线, 表示在图 5 中。对于具有 95%理论密度 UO_2 芯块的元件, 根据表面热负荷、工质的流速、温度和浓缩度, 算出 $\frac{F}{4\pi}q$ 和 T_i , 查曲线得出 $(T_c - T_i)$, 加上 T_i 得出元件中心温度。如 3%浓缩度, 95%理论密度芯块的元件, $F = 0.9949$, 当 $q = 2\pi aW = 350 \text{ W/cm}$, $\frac{F}{4\pi}q = 27.7 \text{ W/cm}$, 查曲线得 $(T_c - T_i)$ 在 $1325^\circ\text{C} - 1445^\circ\text{C}$, 元件内壁温度 410°C , 则中心温度 T_c 是 $1735 - 1855^\circ\text{C}$ 。

对于 3%浓缩度, 95%理论密度芯块的元件, 有效热导与 q 的关系如图 6。

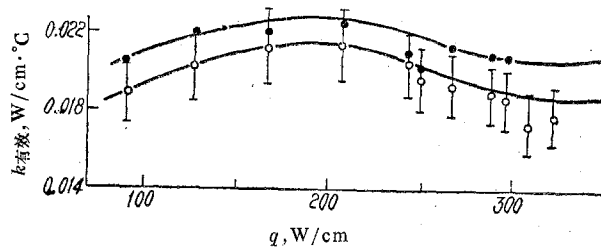


图 6 $k_{\text{有效}}$ 与元件线功率 q 的关系

○——钨铼热电偶测量值; ●——双铂铑热电偶测量值; 芯块密度是 95%理论密度; $C_m = 3\%$ 。

3. 内壁温度 T_i 对有效热导的影响。有效热导与 $(T_c - T_i)$ 相关, 而内壁温度在一定范围内变化, 对有效热导的影响较弱。我们做均匀气隙的分析, 按有效热导(1)式的定义, 保持元件线功率不变, 改变内壁温度 T_i 到 T_i' , 则 T_c 变为 T_c' , 相应的有效热导是:

$$k_{\text{有效}} = \frac{\int_{T_i'}^{T_c} k dT}{T_c' - T_i'} = \frac{\frac{q}{4\pi}F}{T_c' - T_i'}$$

与(1)式相减, 得出:

$$\frac{k'_{\text{有效}} - k_{\text{有效}}}{k'_{\text{有效}}} = \frac{(T_c - T_i) - (T_c' - T_i')}{T_c - T_i}. \quad (19)$$

我们采用两种情形来计算(19)式, 一种是工程上常用的 $k_{\text{UO}_2} = \text{常数} = 1.744 \times 10^{-2} \text{ W/cm}\cdot^\circ\text{C}$,

即取芯块热导的最低值。第二种采用芯块热导的经验公式^[6]：

$$k_{\text{UO}_2} = \frac{38.24}{T + 129.4} + 4.788 \times 10^{-13} T^3, \quad (20)$$

T 是芯块的温度，用开尔文温标($^{\circ}\text{K}$)，为简单起见，略去第二项辐射热导值。实际的芯块热导值在前述两种情形之间，用这两种取值来估计内壁温度对有效热导的影响，就是 $\frac{k'_{\text{有效}} - k_{\text{有效}}}{k'_{\text{有效}}}$ 的下限值和上限值，实际的影响在这之间。

对于 $k_{\text{UO}_2} = \text{常数}$ ，由 $\int_{T_s}^{T_c} k dT = \int_{T'_s}^{T'_c} k dT$ ，得到：

$$\frac{k'_{\text{有效}} - k_{\text{有效}}}{k'_{\text{有效}}} = \frac{(T_s - T_i) - (T'_s - T'_i)}{T_c - T_i}. \quad (21)$$

对于均匀气隙：

$$T_s - T_i = \frac{q}{2\pi k_g} \ln \frac{r_2 [1 + \alpha_{ss} (\bar{T}_{ss} - 20)]}{r_1 [1 + \alpha_{\text{UO}_2} (\bar{T}_{\text{UO}_2} - 20)]}, \quad (22)$$

$$T'_s - T'_i = \frac{q}{2\pi k'_g} \ln \frac{r_2 [1 + \alpha_{ss} (\bar{T}'_{ss} - 20)]}{r_1 [1 + \alpha_{\text{UO}_2} (\bar{T}_{\text{UO}_2} - 20)]}. \quad (23)$$

$$\bar{T}_{\text{UO}_2} = T_s + \frac{q}{8\pi k_{\text{UO}_2}}, \quad (24)$$

\bar{T}_{ss} ， \bar{T}'_{ss} 分别是包壳内壁温度为 T_i ， T'_i 时包壳平均温度：

$$\bar{T}_{ss} = T_i + \frac{q}{4\pi k_{ss}} \left[1 - 2 \frac{r_4^2}{r_4^2 - r_2^2} \ln \frac{r_4}{r_2} \right] + \frac{P_s \rho_{ss}}{2k_{ss}} \left[\frac{r_2^2 r_4^2}{r_4^2 - r_2^2} \ln \frac{r_4}{r_2} - \frac{r_4^2 + r_2^2}{4} \right], \quad (25)$$

$T_s, T'_s, \bar{T}_{\text{UO}_2}, \bar{T}'_{\text{UO}_2}$ 是内壁温度 T_i, T'_i 下的芯块表面温度和芯块的平均温度； α_{ss} ， α_{UO_2} 分别是包壳、芯块平均温度下的膨胀系数； k_g, k'_g 分别是 $\frac{T_s + T_i}{2}$ ， $\frac{T'_s + T'_i}{2}$ 下的气隙热导率。 $T_s, \bar{T}_{\text{UO}_2}$ 可以用(22)，(24)联立求出，一般用逐次近似法求出数值； $T'_s, \bar{T}'_{\text{UO}_2}$ 求法亦是如此。由这些数值代入(21)得出 $\frac{k'_{\text{有效}} - k_{\text{有效}}}{k'_{\text{有效}}}$ 数值，当 $T'_i < T_i$ ， $\frac{k'_{\text{有效}} - k_{\text{有效}}}{k'_{\text{有效}}} > 0$ ，亦就是说降低内壁温度，有效热导增加。

对于 $k_{\text{UO}_2} = \frac{38.24}{T + 129.4}$ ，由 $\int_{T_s}^{T_c} k dT = \int_{T'_s}^{T'_c} k dT$ 得出：

$$\frac{B + T_c}{B + T_s} = \frac{B + T'_c}{B + T'_s}, \quad (26)$$

代入(21)式，化简为：

$$\frac{k'_{\text{有效}} - k_{\text{有效}}}{k'_{\text{有效}}} = \frac{T_c - T_i}{T_c - T'_i} \cdot \frac{T_s - T'_s}{B + T_s} + \frac{(T_s - T_i) - (T'_s - T'_i)}{T_c - T_i}. \quad (27)$$

对于均匀气隙， $(T_s - T_i)$ ， $(T'_s - T'_i)$ 服从(22)，(23)式，但由于 $k_{\text{UO}_2} = \frac{38.24}{T + 129.4}$ ，芯块的平均温度 \bar{T}_{UO_2} 是：

$$\bar{T}_{\text{UO}_2} = (B + T_s) \frac{4\pi A}{q} (e^{\frac{q}{4\pi A}} - 1) - B. \quad (28)$$

其中 $A = 38.24$ ， $B = 129.4$ ，由(22)，(23)分别与(28)联立，解出 T_s, T'_s ，由这些数值

代入(27), 得出 $\frac{k'_{有效} - k_{有效}}{k'_{有效}}$ 的数值。我们对于 q 为 329.5 W/cm 的实验点, (T_c 是 488.6°C) 进行计算, 假使 T_c 改变到 333°C , 有效热导的增加量在 $0.7\text{--}7.6\%$ 之间, 亦就是在实验误差范围之内, 这表明有效热导数据有相当的适用范围。

4. 包壳材料对有效热导的影响。有效热导包含着运行气隙的热导, 对于不同的包壳材料, 由于膨胀系数不同, 运行气隙就不同, 但一般都在包壳内径的公差范围之内。例如 Zr-2 包壳内径公差 $\phi 6.7^{+0.03}$, 对于 $\phi 6.7$ 和 $\phi 6.73$ 的包壳, 元件线功率为 350 W/cm , 内壁温度为 410°C 时, 按(22), (28)二式联立得出的 ΔT_g 分别是 228°C 、 280°C 。我们控制实验用的不锈钢包壳内径为 $\phi 6.7^{+0.005}$, 按同样条件计算 ΔT_g 是 274°C , 它在 $[228^\circ\text{C}, 280^\circ\text{C}]$ 范围之内, 亦就是说其影响在 Zr-2 包壳内径公差范围之内, 而且实验结果是偏安全的。因此控制好试验管的精确尺寸, 就可以不考虑包壳材料对有效热导的影响, 或者可以修正包壳材料的影响。我们实验装置包壳的平均温度与 q 的关系如图 7, 运行气隙完全在 Zr-2 包壳内径公差范围之内, 因此有效热导数据亦适用于 Zr-2 包壳的元件情况, 并且是偏安全的。

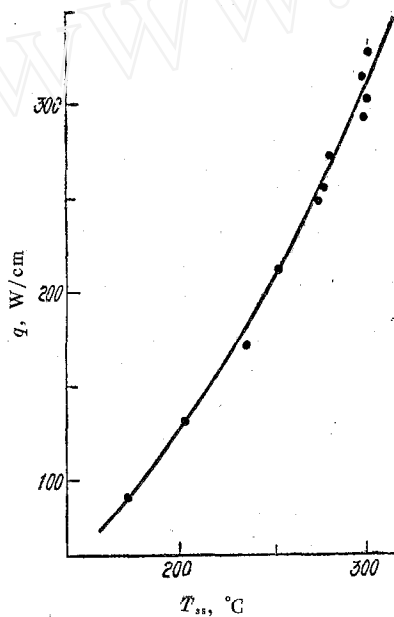


图 7 样品单位长度发热率 q 与包壳内平均温度 T_m 的关系

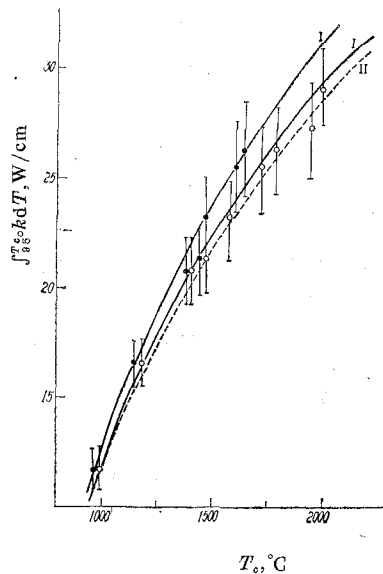


图 8 芯块积分热导与中心温度 T_c 的关系

○——钨铼热电偶测量值; ●——双铂铑热电偶测量值; I——由(22), (24)式联立求出 T_c , 得积分热导值; II——由(22), (28)式联立求出 T_c , 得积分热导值。

我们用均匀气隙模型, 按实验数据推算出芯块的积分热导, 表示在图 8 中。曲线 I 是采用(22), (24)两式联立求出 T_c , 得出积分热导值。曲线 II 是采用(22), (28)两式联立求出 T_c , 得出积分热导值, 二者很为接近, 因此这数据对这种工艺的芯块热导有一定参考价值。

五、结 束 语

这里介绍的有效热导的测量方法有一些优点，一是包壳材料可以采用通常的不锈钢材料，装置长度短，壁厚，可以精确控制内径尺寸。第二、芯块样品用量很少，仅 51.7 克， ^{235}U 量是 5.14 克。第三、可以不用高温、高压迥路测量动力堆元件的有效热导，装置简单，引线方便。第四、采用适当浓缩度的样品，在重水反应堆、游泳池式反应堆内即可测出动力堆元件的有效热导的各种曲线，这样的数据有相当的适用性。所以是一种既方便而有效的测量方法。

我们采用钨铍热电偶和双铂铑热电偶直接插入芯块中心，端部用金属陶瓷封接件引出热电偶线的方法亦是成功的。钨铍热电偶还可以测量出 2000°C 以上的温度，数据稳定可靠。

我们采用两种方法测量元件线功率，其结果是一致的，今后只需用通量测量来获得元件线功率，使装置的结构更为简化。另外，在元件包壳上装上加热、冷却结构，可以自由调节元件包壳的内壁温度，验证 T_i 对有效热导影响较弱的推断。

参 考 文 献

- [1] C. B. Lustman, WAPD-228 (1960).
- [2] J. A. L. Robertson, AECL-807 (1959).
- [3] F. R. Taraba & S. H. Paino, ANL-5945 (1959).
- [4] M. F. Lyons, *Nucl. Eng. Des.*, 21, 167 (1972).
- [5] M. F. Lyons, *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 7, 106 (1964).
- [6] O. J. C. Runalls, *Nuclonics*, 17 (5), 104 (1959).
- [7] C. R. Tipton Jr., *Reactor Handbook*, Vol. 1, Materials, 1960, Interscience Publishers, Inc., New York.
- [8] Н. Б. Варгафтик, *Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей*, Физматгиз, 1963, Москва.
- [9] Toraji Nishijima et al., *J. Am. Cer. Soc.*, 48 (1), 31 (1965).
- [10] F. R. Mcquilkiln et al., *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 8, 69 (1965).