

DOI:10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202605006

一种高温气冷堆乏燃料球衰变热功率快速测量方法

张锐, 许鹏, 蔡星会*, 郑程颖, 宋勇亮

(火箭军工程大学, 西安 710025)

摘要:为精准快速测量高温气冷堆球形乏燃料元件衰变热功率,基于稳态复合传热理论,提出一种衰变热功率测量方法,构建“钛合金壳体-铜外球壳”测量系统,通过测量温度分布计算热功率。首先,利用有限元仿真软件模拟了0.5~11 W共7种热功率样品的温度分布响应,再结合温度测量计算样品热功率,并采用不同涂层改变发射率以优化系统温度分布。结果显示:测量系统在3 h以内达到稳态,与直接量热法相比可有效缩短热功率测量时间;样品表面温度与热功率呈正相关性,在环境温度20℃、各发射率为0.9时,11 W高功率样品表面温度可达101.53℃。误差分析结果表明:计算功率与设定功率的相对误差均在±2.25%范围内,综合误差可稳定控制在3.26%以内,为乏燃料元件热功率测量提供了一种操作简单、可靠性强的解决方案。

关键词:球形乏燃料元件;衰变热功率测量;稳态复合传热;发射率调控

中图分类号: TL94

文献标志码: A

开放科学标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

文章编号: 2097-2741(2026)05-0062-09

高温气冷堆使用三层各向同性结构包覆燃料颗粒的燃料元件,其中,燃料元件将包覆颗粒弥散到石墨基体中^[1]。高温气冷堆乏燃料中含有大量的铀、1%钚和3%其他裂变产物和次锕系核素^[2],这些核素在衰变过程中通过 α 、 β 粒子及 γ 射线释放能量,约90%以上的衰变能最终以热能形式沉积,形成持续的热源。按照相关规定,乏燃料至少要在电站储存池储存5年后才能往外运输到容量较大的离堆暂存设施中^[3]。在乏燃料的存贮和转运过程中,导出剩余衰变热是确保乏燃料在安全密封、运输及贮存过程中保持结构完整性、防止事故发生的重要方面^[4]。在核燃料后处理领域,与相对成熟的传统轻水堆乏燃料处理处置技术相比,高温气冷堆乏燃料处理处置相关研究非常缺乏,且大多处于理论研究和前期探索^[5-7]阶段,因此,研制乏燃料元件热性质相关的实验装置十分必要^[8]。

直接量热法是一种测量放射性核素衰变产生

热功率的无损测量分析方法^[9],常用于结合样品的同位素组成来推算核素质量。其原理是通过测量材料发热导致的介质温度变化直接计算功率,优点是不受样品几何形状、基体材料组成、核材料分布影响^[10],但该方法需复杂的恒温控制系统,设备体积庞大、成本高且测量周期长。陈小洁^[11]使用直接量热法分别对一定量的铀以及工业钚进行衰变热功率测量,结果表明,单个样品测量通常需要10~20 h,难以满足现场快速测量需求。美国洛斯阿拉莫斯国家实验室将量热法用于瑞典核燃料临时储存设施的乏核燃料热量平衡测量^[12],但由于方法校准的不确定性和量热计设计特征限制,也无法实现短时间内准确预测热量。

为满足高温气冷堆球形乏燃料热功率测量分析操作简便、测量分析速度快、准确度高的核心需求^[13],本文基于热传导和辐射换热理论,通过测量材料表面温度与环境参数反推热功率,提出一种

收稿日期: 2026-01-05 修回日期: 2026-01-30 录用日期: 2026-02-17

第一作者: 张锐(1988—),男,工程师,主要从事能源动力研究。

* 通信作者: 蔡星会(1975—),男,副教授,主要从事核工程与核技术研究。

引用格式:张锐,许鹏,蔡星会,等. 一种高温气冷堆乏燃料球衰变热功率快速测量方法[J]. 火箭军工程大学学报,2026,40(5):62-70.
Zhang Rui, Xu Peng, Cai Xinghui, et al. Rapid measurement method for decay heat power of spent fuel pebbles in high temperature gas-cooled reactors[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2026, 40(5): 62-70.

精准快速测量单个高温气冷堆球形乏燃料元件衰变热功率的方法,为分析乏燃料衰变热特性提供参考。

1 基本原理

1.1 测量系统模型

本文提出一种用于高温气冷堆球形乏燃料元件热功率的测量系统,测量系统由钛合金壳体、铜外球壳和支撑结构组成,系统构成示意图如图 1 所示。乏燃料球、钛合金壳体和铜外球壳通过支撑结构构成同心结构,钛合金壳体和铜外球壳之间为空腔。其中,钛合金壳体包覆球形乏燃料元件,目的是使测量系统热源辐射换热发射率为固定值,降低测量复杂性,其外球半径 r_1 为 31 mm,外表面发射率和温度值分别为 ϵ_1 、 T_1 ;铜外球壳确保系统测量环境相对稳定,同时兼具温度测量点和包容屏蔽功能,其内球半径 r_2 为 50 mm,外球半径 r_3 为 52 mm,对应的表面发射率和温度值分别为 ϵ_2 、 T_2 和 ϵ_3 、 T_3 。整体热流方向为燃料元件→铜外球壳→环境。

为便于计算,系统模型假设如下。

1) 稳态假设:放射性核素半衰期远大于测量时间尺度,发热功率随时间衰减可忽略,系统温度场稳定;

2) 几何假设:燃料元件、钛合金壳体与铜外球壳同心,材料均匀,燃料元件为体积均匀热源;

3) 材料假设:钛合金壳体与铜外球壳的发射率、导热系数为常数;空腔内填充空气(标准大气压),气体视为连续介质,热传导与自然对流不可忽略。

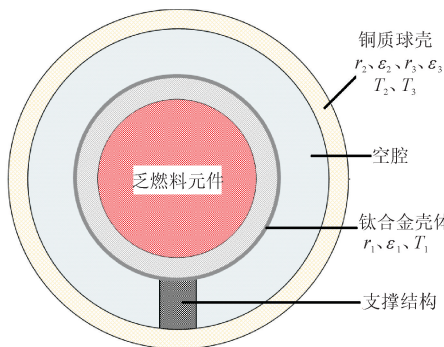


图 1 高温气冷堆乏燃料热功率测量模型示意

Fig. 1 Schematic of the heat-power measurement model for spent fuel in high-temperature gas-cooled reactors

1.2 计算方法

根据能量守恒定律,稳态时燃料元件总热功率 P_{tol} 等于空腔内从燃料元件到铜外球壳的换热量

P_{cavity} , 即 $P_{\text{tol}} = P_{\text{cavity}}$ 。

在标准大气压下,空腔内空气分子平均自由程远小于空腔尺寸,气体为连续介质,需同时考虑辐射换热、气体热传导以及自然对流 3 种传热机制,空腔总换热量计算表达式^[14]为

$$\begin{cases} P_{\text{cond}} = \frac{4\pi\lambda_{\text{air}}(T_1 - T_2)}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} \\ P_{\text{conv}} = h_{\text{cavity}} A_1 (T_1 - T_2) \\ P_{\text{rad}} = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} \\ P_{\text{cavity}} = P_{\text{cond}} + P_{\text{conv}} + P_{\text{rad}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{cond} 、 P_{conv} 、 P_{rad} 分别为气体热传导功率、自然对流功率、空腔辐射换热功率; λ_{air} 为空气导热系数,变化范围小,文中设为恒定值 $0.026 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[15]; h_{cavity} 为对流换热系数; A_1 为钛合金壳体外表面积; A_2 为铜外球壳内表面积; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

稳态系统的温度分布由热源功率与环境条件决定^[16-17],可通过测量钛合金球壳表面温度 T_1 和铜外球壳内表面温度 T_2 ,结合空腔气体物性参数与对流换热系数,按式(1)计算热功率。该测量系统结构简单,操作方法简便,无需复杂控制设备,通过不同功率模型有限元模拟计算,系统达到稳态的时间在 3 h 以内,以 11 W 乏燃料样品瞬态热分析为例,其计算结果如图 2 所示。该方法适合不同热功率的乏燃料元件现场快速测量场景。

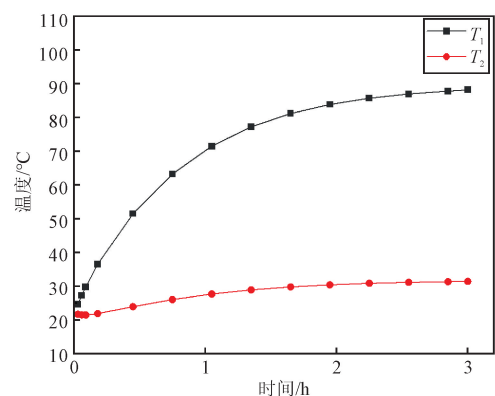


图 2 11W 样品瞬态热分析计算结果

Fig. 2 Results of transient heat-transfer analysis for the 11 W sample

2 乏燃料元件模拟样品热功率计算

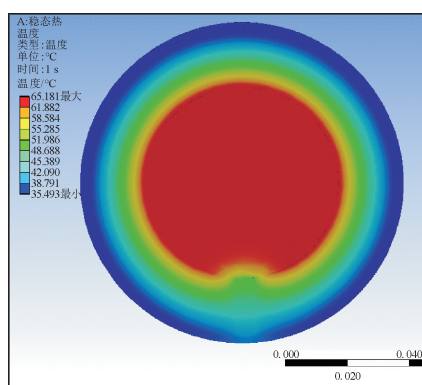
随着燃耗深度和贮存时间的变化,高温气冷堆

乏燃料中核素成分发生明显改变,衰变热功率也随之变化^[18],设置不同热功率样品开展理论计算。为便于计算,对部分参数进行合理设定。参考一般实验环境条件,设定测量环境温度为 20℃,发射率 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3$,铜球壳外表面对流换热系数 $h_{\text{cavity}} = 6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[14]。

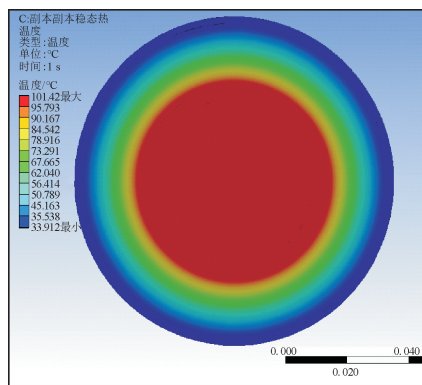
2.1 测量系统优化

燃料元件样品与铜外球壳设计参数如下:样品采用 1 mm 厚钛合金,兼顾结构强度与热阻控制,内装乏燃料元件。

为减小支撑结构散热对温度均匀性的影响,选取不同材质的支撑结构进行对比,以样品热功率 11 W 为例,选取铜材质和环氧树脂材质,对比稳态结果如图 3 所示。可以看出,由于铜材质支撑结构热导率较高,约 400 W/(m·K),会显著加速支撑部位散热效率,导致温度分布不均匀,测量温度时,引起较大的测量偏差。环氧树脂材料热导率较低,约 0.294 W/(m·K)^[19],对温度场扰动小,可以显著提升温度分布的均匀性,更有利于温度测量和计算的准确性。因此,选取环氧树脂材料作为支撑材料进行模拟计算。



(a) 铜质支撑结构温度分布



(b) 环氧树脂支撑结构温度分布

图 3 不同材质支撑结构温度分布对比

Fig. 3 Comparison of temperature distributions in support structures fabricated from different materials

此外,根据式(1)可知,测量系统中总热功率 P_{tol} 为固定值,通过不同涂层改变 ϵ_1 、 ϵ_2 ,辐射换热功率 P_{rad} 会发生变化,进一步,气体热传导功率 P_{cond} 与自然热对流功率 P_{conv} 会发生改变,从而导致整个系统的温度分布发生变化。本研究设计多套不同涂层(发射率不同)的测量系统,适配不同热功率样品,优化系统温度分布,便于温度测量。

2.2 乏燃料热功率理论计算

首先,采用有限元模拟方法对 7 个不同热功率乏燃料元件样品温度分布进行分析,对温度分析结果进行取样测量,再利用所提方法计算热功率,通过与样品设定功率进行对比,从而验证所提方法的可靠性,为工程实践提供理论依据。

2.2.1 有限元模拟计算

以热功率为 11 W 的样品进行有限元稳态热分析为例,通过计算空腔内空气在不同温度下的对流换热系数,迭代模拟温度分布,其结果如图 4 所示。可以看出,燃料元件样品整体温度分布均衡,受乏燃料石墨层和样品钛合金球壳影响较小,空腔内温度急剧下降,钛合金壳外表面温度 $T_1 = 101.53 \text{ }^\circ\text{C}$ 与铜外球壳内表面温度 $T_2 = 34.24 \text{ }^\circ\text{C}$ 形成显著温差,有利于提升热功率理论计算的准确性。

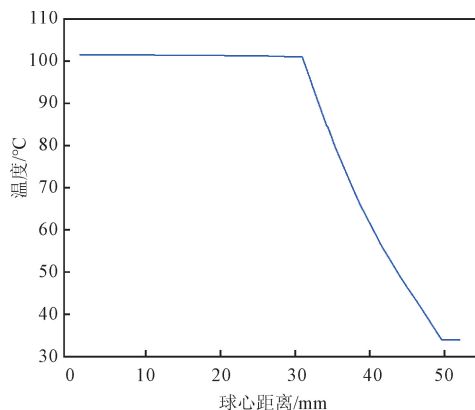


图 4 样品 1 模拟温度分布

Fig. 4 Simulated temperature distribution for Sample 1

2.2.2 样品热功率理论计算

通过对钛合金球壳外表面、铜外球壳内表面温度有限元模拟结果 T_1 、 T_2 取样,结合式(1)对样品热功率进行理论计算,其中,换热系数由 T_1 、 T_2 及系统结构尺寸计算,这里不予赘述。7 个样品的核心计算参数与结果如表 1 所示,计算功率与设定功率的相对误差 δ_{basic} 在 $\pm 2.25\%$ 范围内,验证了所提方法的正确性。此外, T_1 、 T_2 均随热功率增大而升高,但 T_1 更为敏感,变化范围大于 T_2 ,且 T_2 温度始终与环境温

度相差不大,进一步验证了将系统外表面对流换热系数设定为固定值 $6\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 的合理性。

表 1 不同热功率样品计算结果

Table 1 Calculated results for samples with different heat-power levels

样品	设定功率/W	ϵ	$h_{\text{cavity}}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	$T_1/^\circ\text{C}$	$T_2/^\circ\text{C}$	计算功率/W	$\delta_{\text{basic}}/\%$
样品 1	11.0	0.9	2.850	101.53	34.24	10.753	-2.25
样品 2	9.0	0.9	2.767	89.55	31.80	8.805	-2.17
样品 3	7.0	0.9	2.664	76.64	29.33	6.850	-2.14
样品 4	5.0	0.9	2.533	62.66	26.86	4.893	-2.14
样品 5	3.0	0.7	2.406	51.08	24.29	3.037	1.23
样品 6	1.0	0.7	2.049	31.51	21.70	1.011	1.10
样品 7	0.5	0.3	1.984	27.91	20.90	0.507	1.40

2.2.3 传热特征分析

为进一步分析传热特征,对各样品不同方式传热功率及其占比分布进行统计,结果如表 2 所示。对 7 个样品设定了不同发射率进行结果对比,由表

中数据可以总结以下特征:

温差(T_1-T_2)与热功率正相关, $P_{\text{tol}}\geqslant 7\text{ W}$ 时,温差 $\geqslant 47.31\text{ }^\circ\text{C}$, $P_{\text{tol}}\leqslant 1\text{ W}$ 时,温差 $\leqslant 9.81\text{ }^\circ\text{C}$ 。由此可见,功率是影响温差的主要因素。

表 2 不同热传导方式传热量统计

Table 2 Statistical analysis of heat transfer through different heat-transfer modes

代号	ϵ	$(T_1-T_2)/^\circ\text{C}$	计算热功率/W				各传热方式占总功率比例/%		
			自然对流	辐射换热	气体导热	总功率	自然对流	辐射换热	气体导热
样品 1	0.9	67.29	2.32	6.64	1.79	10.75	21.58	61.77	16.65
样品 1	0.7	78.11	2.78	6.30	2.08	11.16	24.91	56.45	18.64
样品 1	0.3	109.65	4.18	4.34	2.92	11.44	36.54	37.94	25.52
样品 2	0.9	57.75	1.93	5.34	1.54	8.81	21.91	60.61	17.48
样品 2	0.7	67.01	2.31	5.03	1.79	9.13	25.30	55.09	19.61
样品 2	0.3	93.66	3.45	3.38	2.50	9.33	36.98	36.23	26.80
样品 3	0.9	47.31	1.52	4.07	1.26	6.85	22.19	59.42	18.39
样品 3	0.7	54.91	1.82	3.80	1.46	7.08	25.71	53.67	20.62
样品 3	0.3	76.36	2.70	2.50	2.04	7.24	37.29	34.53	28.18
样品 4	0.9	35.80	1.10	2.84	0.95	4.89	22.49	58.08	19.43
样品 4	0.7	41.60	1.31	2.64	1.11	5.06	25.89	52.17	21.94
样品 4	0.3	57.67	1.92	1.69	1.54	5.15	37.28	32.82	29.90
样品 5	0.9	22.97	0.66	1.67	0.61	2.94	22.45	56.80	20.75
样品 5	0.7	26.79	0.78	1.55	0.71	3.04	25.66	50.99	23.36
样品 5	0.3	36.96	1.14	0.96	0.99	3.09	36.89	31.07	32.04
样品 6	0.9	8.38	0.20	0.55	0.22	0.97	20.62	56.70	22.68
样品 6	0.7	9.81	0.24	0.51	0.26	1.01	23.76	50.50	25.74
样品 6	0.3	13.55	0.35	0.31	0.36	1.02	34.31	30.39	35.29
样品 7	0.9	4.36	0.09	0.28	0.12	0.49	18.37	57.14	24.49
样品 7	0.7	5.12	0.11	0.26	0.14	0.51	21.57	50.98	27.45
样品 7	0.3	7.01	0.17	0.15	0.19	0.51	33.33	29.41	37.25

统计分析结果显示,对发射率 0.9 的样品,辐射换热为最主要传热方式,占比 56.70%~61.77%,说明可以通过各表面涂层调整发射率,有效实现温度分布与散热协同优化。

对于高功率段 $5\text{ W} \leq P_{\text{tol}} \leq 11\text{ W}$ (样品 1~4),使用发射率 $\epsilon = 0.9$ 可以强化辐射散热,避免 T_1 过高,引起的材料特征参数变化和测量误差过大;对于中功率段 $1\text{ W} \leq P_{\text{tol}} < 5\text{ W}$ (样品 5、6),将发射率调控至 0.7,可以解决平衡温差不足和散热过度的问题;对于低功率段 $P_{\text{tol}} < 1\text{ W}$ (样品 7),降低发射率可以增大热阻,有效放大 T_1 ,以 0.5 W 的样品 7 为例,将发射率从 0.9 下降至 0.3,辐射换热量占比从 57.14% 降至 29.41%,温差从 4.36 °C 上升至 7.01 °C,可有效解决温差过小、易受环境干扰的测量问题。

3 理论误差分析

3.1 温度偏差对热功率计算误差分析

基于误差传递理论,温度测量存在偏差 ΔT 时,会通过灵敏度系数 K_{sum} 传递为热功率相对误差^[20],可表示为

$$\delta_{\text{temp}} = \left(\frac{K_{\text{sum}} \cdot \Delta T}{P_{\text{ref}}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中: δ_{temp} 为温度测量引入的热功率相对误差,仅反映温度测量环节的附加误差; ΔT 为温度测量偏差; K_{sum} 为灵敏度系数; P_{ref} 为无偏差计算功率。

3.1.1 常用温度传感器精度

常用温度测量传感器类型及其误差范围,如表 3 所示。其中, t 表示测量温度。

表 3 工业铂电阻温度计和铂温度传感器公差等级规范^[21]

Table 3 Tolerance-class specifications for industrial platinum resistance thermometers and temperature sensors

精度等级	允许偏差	测温范围/°C
AA 级	$\pm(0.1\text{ °C} + 0.0017 t)$	0~+150
A 级	$\pm(0.15\text{ °C} + 0.002 t)$	-30~+300
B 级	$\pm(0.3\text{ °C} + 0.005 t)$	-50~+550
C 级	$\pm(0.6\text{ °C} + 0.01 t)$	-50~+600

3.1.2 误差计算结果与规律

通过表 2 中的计算结果对灵敏度系数 K_{sum} 进

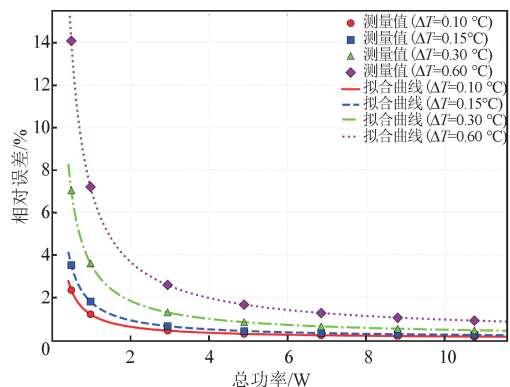
行线性拟合,其结果和综合可信度如表 4 所示。

表 4 不同发射率对应灵敏度系数线性拟合

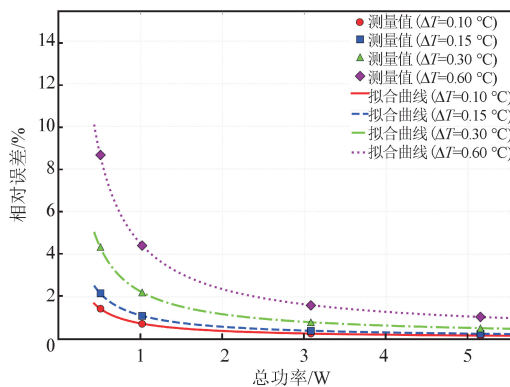
Table 4 Linear fitting of sensitivity coefficients at different emissivities

ϵ	$K_{\text{sum}} / (\text{W} \cdot \text{K}^{-1})$	综合可信度评级
0.9	$0.004\,515 \cdot P_{\text{tol}} + 0.112\,874$	极高可信度(99%+)
0.7	$0.004\,900 \cdot P_{\text{tol}} + 0.097\,505$	极高可信度(99%+)
0.3	$0.003\,622 \cdot P_{\text{tol}} + 0.071\,263$	高可信度

基于灵敏度系数拟合,依据式(2)计算不同温度测量偏差,取典型值 $\pm 0.10\text{ °C}$ 、 $\pm 0.15\text{ °C}$ 、 $\pm 0.30\text{ °C}$ 、 $\pm 0.60\text{ °C}$ 下的热功率相对误差,对比发射率分别为 0.90 和 0.30 的结果,如图 5 所示。可以看出,同温度偏差下,热功率相对误差随功率降低而增大。发射率越小,会放大 $T_1 - T_2$ 温差,温度测量偏差导致的相对误差会大幅下降。以 0.50 W 低功率样品为例,当发射率从 0.90 降至 0.30 时,温度偏差 0.60 °C 对应相对误差从 14.05% 下降至 8.65%,偏差 0.10 °C 时对应值从 2.34% 下降至 1.44%。



(a) $\epsilon = 0.9$ 时相对误差计算结果



(b) $\epsilon = 0.3$ 时相对误差计算结果

图 5 不同温度偏差对热功率计算相对误差的影响

Fig. 5 Influence of temperature deviations on the relative error in calculated heat power

样品热功率较高时,如样品 1~4,匹配发射率 0.9,温度测量偏差 0.1 °C 引起热功率相对误差小于 0.28%,0.6 °C 时相对误差仅 1.65%,满足基本测量需求,可选用精度等级为 B 级或者 C 级铂电阻热传感器,兼顾精度与成本。

对于中功率样品,如样品 5、6,匹配发射率 0.7,温度测量偏差 0.1 °C 引起热功率相对误差小于 1.01%,0.3 °C 时相对误差约 3.04%,0.6 °C 时相对误差约 6.08%,可选用精度等级为 A 级或者 B 级铂电阻热传感器,兼顾精度与成本,确保误差控制在 3.04% 以内。

样品热功率较低时,如样品 7,发射率 0.3,温度测量偏差 0.1 °C 引起的热功率相对误差小于 1.44%,0.15 °C 时相对误差升至约 2.16%,须采用精度等级为 AA 级铂电阻热传感器,可有效避免误差超限。

3.2 发射率偏差对热功率计算的影响

涂层发射率与其生产方式密切相关,如热调制、电调制、化学调制等^[22-26],可以设计不同发射率的测量系统,并根据热功率大小选择。

设材料表面标定发射率为 ϵ ,真实发射率 $\epsilon_{\text{real}} = \epsilon + \Delta\epsilon$, $\Delta\epsilon$ 为发射率偏差,会导致热功率计算出现误差,相对误差为

$$\delta_{\epsilon} = \frac{|P' - P_{\text{ref}}|}{P_{\text{ref}}} \times 100 \% \quad (3)$$

式中: P' 是使用真实发射率计算的热功率; P_{ref} 为无偏差计算功率,即使用标定发射率 ϵ 且不考虑温度测量误差时的计算功率。

3.2.1 发射率测量方法与精度

发射率是辐射换热的核心参数,设定各表面涂层标准化。但在实际应用中,发射率易受表面氧化、污染影响,如抛光黄铜,其发射率从 0.05 升至 0.22^[14],其偏差会直接导致辐射功率计算误差,需要定期进行发射率检定。

常用发射率基本测量方法分为 4 类,包括量热法、发射法、能量法和多波长法^[27-28],随着技术的发展,近年来发射率测量手段和精度已经有了极大提高^[29]。文献[30]提到一种便携式测量仪测定总半球发射率的精度优于 ± 0.02 ,本文采用偏差范围 ± 0.03 计算误差。

3.2.2 误差计算结果与规律

不同发射率偏差引起热功率相对误差的计算结果如图 6 所示。发射率偏差对相对误差的影响近似线性关系,同一功率下,相对误差随发

射率偏差绝对值的增大而显著上升。不同发射率样品的误差敏感度存在差异,发射率小的样品敏感度更高。

对于高功率样品,如样品 1~4,发射率 0.9,发射率偏差 0.01 引起的相对误差为 0.65%~0.69%,偏差 0.03 对应 1.94%~2.06%,总体满足工程实际要求。对于低功率 0.5 W 的样品 7,发射率偏差 0.03 导致相对误差达到 3%。因此,对于发射率小的模型,应采用更加精密的发射率检测仪对发射率进行检定,以降低相对误差。

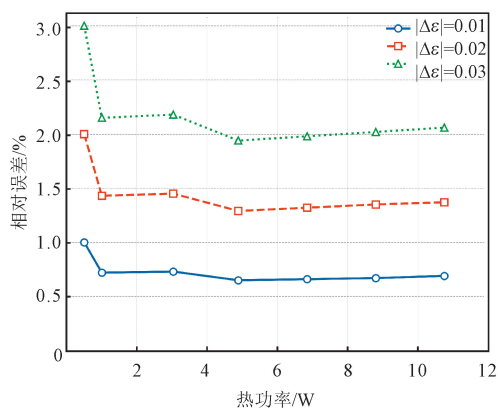


图 6 发射率偏差对热功率相对误差的影响

Fig. 6 Influence of emissivity deviations on the relative error in heat-power measurement

3.3 综合误差分析

实际工程应用中需综合考虑基本误差、温度测量偏差 ΔT_1 、 ΔT_2 与发射率偏差 $\Delta\epsilon$ 导致相对误差的耦合影响。

3.3.1 误差合成方法

本研究采用误差传递的均方根方法对主要误差源进行合成,合成误差 δ_{total} 可表示为

$$\delta_{\text{total}} = \sqrt{(\delta_{\text{basic}})^2 + (\delta_T)^2 + (\delta_{\epsilon})^2} \quad (4)$$

式中: δ_{basic} 为模型基本误差,源于理论模型与物理现实之间的固有差异,具体见表 1; δ_T 为温度测量误差,由温度传感器的精度决定; δ_{ϵ} 为发射率偏差误差,由发射率测量或检定偏差引起。

3.3.2 综合误差评估

以中等精度温度传感器 ± 0.15 °C 与发射率典型偏差 ± 0.02 这一普遍工程场景,进行综合误差计算,结果如表 5 所示。可以看出,所提方法的综合误差可控制在 $\pm 3.26\%$ 以内,具有较强可信性。其中高、中功率段综合误差不大于 2.64%,低功率段通过选用温度偏差 ± 0.1 °C 的 AA 级铂电阻,可将误差进一步压缩至 2.84% 以内。

表 5 典型工况下的综合误差分析

Table 5 Comprehensive error analysis under typical operating conditions

代号	设定功率/W	发射率	$\delta_{\text{basic}}/\%$	$\delta_T/\%$	$\delta_\epsilon/\%$	综合误差 $\delta_{\text{total}}/\%$
样品 1	11.0	0.9	-2.25	0.23	1.37	2.64
样品 2	9.0	0.9	-2.17	0.26	1.35	2.57
样品 3	7.0	0.9	-2.14	0.31	1.32	2.54
样品 4	5.0	0.9	-2.14	0.41	1.29	2.53
样品 5	3.0	0.7	1.23	0.56	1.45	1.98
样品 6	1.0	0.7	1.10	1.52	1.43	2.36
样品 7	0.5	0.3	1.40	2.16	2.00	3.26

等核材料衰变热功率测量场景也有一定参考意义。

4 结论

为满足高温气冷堆球形乏燃料元件衰变热功率快速简易测量需求,解决现有量热装置设备复杂、测量周期长的问题,提出一种基于稳态传热理论的热功率测量方法。通过合理简化部分参数,对 0.5~11 W 的 7 组不同衰变热功率乏燃料模拟样品进行了有限元温度模拟,结合钛合金壳表面温度和铜外球壳内表面温度计算热功率,并与设定功率进行对比,主要结论如下。

1)相较于传统直接量热法,所提方法无需复杂恒温控制与辐射屏蔽系统,设备结构简单,可实现乏燃料元件衰变热功率的现场快速测量,单个元件测量时间可从 10~20 h 下降至 3 h 以内。

2)利用所提方法计算功率与设定功率的相对误差在 $\pm 2.25\%$ 范围内,验证了测量方法的正确性,为工程实际应用提供可靠理论基础。

3)通过涂层调控各表面的发射率,可有效优化散热效率和温度分布。对于 0.5 W 低功率样品,将发射率从 0.9 下降至 0.3,辐射换热量占比从 57.14% 降至 29.41%,温差从 4.36 °C 上升至 7.01 °C,可有效解决温差过小、易受环境干扰的测量问题,提高热功率计算的准确性。

4)综合考虑基本误差、温度测量偏差与发射率偏差的耦合影响,0.5~11 W 功率范围内综合误差可控制在 $\pm 3.26\%$ 以内;低功率工况下选用更高精度的温度测量装置,如 AA 级铂电阻,可进一步降低综合误差。

后续可基于所提方法继续开展相关实验验证,并结合瞬态传热理论开展相关研究。此外,所提方法对于核废料地质处置设计、深空核电源功率校准

参考文献

- [1] 刘马林,程心雨,刘兵,等.超高温气冷堆燃料元件制备和性能评价研究[J].核动力工程,2024,45(增刊2):231-237.
Liu Malin, Cheng Xinyu, Liu Bing, et al. Preparation and performance evaluation of fuel elements for ultra-high temperature gas-cooled reactors [J]. Nuclear Power Engineering, 2024, 45(S2): 231-237.
- [2] 高立本,董玉杰.高温气冷堆及其乏燃料中核素的质谱分析技术[J].质谱学报,2017,38(3):349-360.
Gao Liben, Dong Yujie. Research progress of inorganic mass spectrometry applied to analysis of nuclear elements from high-temperature gas-cooled reactor and its spent fuel[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2017, 38(3): 349-360.
- [3] 石磊,李金英.四代核电:高温气冷堆乏燃料后处理的思考[J].能源,2019(10):79-82.
- [4] 王梦琪,彭超,黎辉,等.三代非能动核电厂乏燃料贮存系统衰变热计算及关键因素研究[J].辐射防护,2023,43(增刊1):14-19.
Wang Mengqi, Peng Chao, Li Hui, et al. The decay heat calculation and key factors study on spent fuel storage and transportation system of third generation nuclear power plant[J]. Radiation Protection, 2023, 43(S1): 14-19.
- [5] 张虎,林如山,唐洪彬,等.先进后处理技术研究进展[J].原子能科学技术,2025,59(9):1851-1869.
Zhang Hu, Lin Rushan, Tang Hongbin, et al. Research progress of advanced spent nuclear fuel reprocessing technology [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2025, 59(9): 1851-1869.
- [6] Kiegiel K, Herdzik-Koniecko I, Fuks L, et al. Manage-

- ment of radioactive waste from HTGR reactors including spent TRISO fuel:state of the art.[J]. *Energies*, 2022,15(3): 1099.
- [7] 黄健,李志容. 高温气冷堆球形乏燃料处置策略及容量探讨[J]. *核科学与工程*,2023,43(2):474-480.
Huang Jian, Li Zhirong. Discussion on the disposal strategy and the capacity analysis for the spherical spent fuel of high temperature gas-cooled reactor[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2023, 43 (2): 474-480.
- [8] 初泉丽,张亮,罗勇,等. 球床式高温气冷堆核材料管制方案研究[J]. *铀矿冶*,2021,40(2):174-178.
Chu Quanli, Zhang Liang, Luo Yong, et al. Nuclear material control scheme for pebble bed high temperature gas-cooled reactor[J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2021, 40(2): 174-178.
- [9] 于雪,李多宏,李鑫,等. 钚-238 量热样品的空间体积效应[J]. *当代化工研究*,2025(13):49-51.
Yu Xue, Li Duohong, Li Xin, et al. Spatial volume effect of plutonium-238 calorimetric samples[J]. *Modern Chemical Research*, 2025(13): 49-51.
- [10] 李多宏,潘玉婷,于雪,等. 量热法测定²³⁸Pu 样品热功率的不确定度评定[J]. *世界核地质科学*,2023,40(4): 1029-1036.
Li Duohong, Pan Yuting, Yu Xue, et al. Evaluation of uncertainty in measurement of ²³⁸Pu samples by calorimetry[J]. *World Nuclear Geoscience*, 2023, 40 (4): 1029-1036.
- [11] 陈小洁. 量热技术用于核材料衡算测量的研究进展[J]. *化工管理*,2021(18): 150-151.
Chen Xiaojie. Research progress of calorimetry applied to nuclear material accountability[J]. *Chemical Engineering Management*, 2021(18): 150-151.
- [12] Liljenfeldt H. Applying fast calorimetry on a spent nuclear fuel calorimeter[R/OL]. (2015-04-15)[2024-02-20]. <https://doi.org/10.2172/1178323>.
- [13] 左臣,张丽华,常志远,等. 我国乏燃料后处理分析技术研发与应用[J]. *原子能科学技术*,2025,59(9): 1898-1913.
Zuo Chen, Zhang Lihua, Chang Zhiyuan, et al. Research and application of analytical technique within used nuclear fuel recycling processes in China[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2025, 59(9): 1898-1913.
- [14] 陶文铨. 传热学[M]. 5 版. 北京:高等教育出版社, 2019:183-214.
- [15] 陈晨. 封闭圆柱腔体内外耦合自然对流传热研究[D]. 重庆:重庆大学,2023:21-33.
- Chen Chen. Study on the conjugate natural convection heat transfer inside and outside a closed cylindrical cavity[D]. Chongqing: Chongqing University, 2023: 21-33.
- [16] 陈露. 边界条件温度比对方腔内辐射参与性介质流动传热的影响及机理[D]. 大连:大连理工大学,2023: 36-70.
Chen Lu. Effects of boundary condition temperature ratio on fluid flow and heat transfer of radiative participating media in a square cavity and mechanisms[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2023:36-70.
- [17] 赵选科. SiC 三维光子晶体热防护结构及其等效导热系数计算[J]. *火箭军工程大学学报*,2023,37(4): 52-56.
Zhao Xuanke. Thermal protection structure and calculation of equivalent thermal conductivity of SiC 3D photonic crystals[J]. *Journal of Rocket Force University of Engineering*, 2023, 37(4): 52-56.
- [18] 张立国,尚仁成. 冷却衰变时间对球床模块式高温气冷堆在线燃耗测量的影响分析[J]. *核动力工程*, 2009,30(3):43-46.
Zhang Liguang, Shang Rencheng. Analysis of influence of decay-cooling time on on-line burnup measurement of HTR-PM[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2009, 30(3): 43-46.
- [19] 吴加雪,张天栋,张昌海,等. 高导热环氧树脂的研究进展[J]. *材料导报*,2021,35(13): 13198-13204.
Wu Jiaxue, Zhang Tiandong, Zhang Changhai, et al. Research status of epoxy resin with high thermal conductivity [J]. *Materials Reports*,2021,35(13):13198-13204.
- [20] 张华,赵文柱. 热工测量仪表[M]. 2 版. 北京:冶金工业出版社,2013:76-79.
- [21] IEC 60751:2022 industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensor[S].
- [22] 丁经纬,郝小鹏,于坤,等. 黑体涂层光谱发射率特性研究[J]. *红外与激光工程*,2023,52(10): 234-243.
Ding Jingwei, Hao Xiaopeng, Yu Kun, et al. Research on spectral emissivity characteristics of black-body coatings[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(10): 234-243.
- [23] 赵选科,徐斌. 木堆积结构三维光子晶体热防护涂层设计优化与仿真[J]. *火箭军工程大学学报*,2024,38(4):68-77.
Zhao Xuanke,Xu Bin. Optimization design and simulation of woodpile structure 3D photonic crystals thermal protection coating[J]. *Journal of Rocket Force University of Engineering*,2024,38(4):68-77.
- [24] 曹翠翠,曹逊. 红外发射率动态调制智能涂层的研究

- 进展[J]. 表面技术, 2022, 51(8):41-57.
- Cao Cuicui, Cao Xun. Research progress of infrared emissivity dynamic modulation intelligent coatings[J]. Surface Technology, 2022, 51(8): 41-57.
- [25] 王宇轩, 张洪芊, 张敏. 黄铜表面电镀镍层耐蚀和热发射性能研究[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(5):9-15, 52.
- Wang Yuxuan, Zhang Haoqian, Zhang Min. Investigations on corrosion resistance and thermal emission properties of electroplated nickel layer on brass surface [J]. Plating and Finishing, 2025, 47(5): 9-15, 52.
- [26] 王心怡, 罗发, 巩学慧, 等. C/C 复合材料表面低红外发射率薄膜研究[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38(5):88-95.
- Wang Xinyi, Luo Fa, Gong Xuehui, et al. Study of low infrared emissivity films on the surface of C/C composite[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2024, 38(5):88-95.
- [27] 刘胤. 基于热像仪的目标表面红外发射率测量方法研究[D]. 西安:西安理工大学, 2025:23-40.
- Liu Yin. A study on the measurement method of infrared emissivity for target surfaces using thermal imaging technology [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2025:23-40.
- [28] ASTM E1933-14:2022 Standard practice for measuring and compensating for emissivity using infrared imaging radiometers[S].
- [29] ISO 19618:2025 Fine ceramics(advanced ceramics, advanced technical ceramics)-measurement method for normal spectral emissivity using blackbody reference with an FTIR spectrometer[S].
- [30] ASTM C1371-15:2022 Standard test method for determination of emittance of materials near room temperature using portable emissometers[S].

Rapid Measurement Method for Decay Heat Power of Spent Fuel Pebbles in High Temperature Gas-Cooled Reactors

ZHANG Rui, XU Peng, CAI Xinghui*, ZHENG Chenghao, SONG Yongliang

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

ABSTRACT: To enable the accurate and rapid measurement of decay heat power in spherical spent-fuel elements used in high-temperature gas-cooled reactors (HTGRs), a measurement approach based on steady-state composite heat-transfer theory was developed. A measurement system composed of a “titanium-alloy shell and a copper outer spherical shell” was designed and established to determine heat power through the measurement and analysis of the temperature distribution. Finite element simulations were performed to characterize the temperature-distribution responses of the system under seven discrete heat-power conditions, ranging from 0.5 to 11 W. Subsequently, the heat power of each sample was calculated from the measured temperature data, while different surface coatings were applied to alter surface emissivity and, consequently, optimize the system's temperature distribution. The results indicate that the proposed measurement system attains steady-state conditions within 3 h, thereby significantly shortening the measurement duration compared with conventional direct calorimetry. The surface temperature of the samples exhibits a positive correlation with the corresponding heat power. Under an ambient temperature of 20 °C and surface emissivity of 0.9, the surface temperature of the high-power sample (11 W) reaches 101.53 °C. Error analysis shows that the relative deviations between the calculated and prescribed heat-power values remain within $\pm 2.25\%$, while the comprehensive errors can be consistently controlled within 3.26%. These findings establish the proposed approach as a simple, reliable, and practical solution for measuring the decay heat power of spent-fuel elements.

KEYWORDS: spherical spent fuel element; decay heat power measurement; steady-state composite heat transfer; emissivity regulation

(编辑:于福兴)