

放射性同位素辐照靶件包装容器外壁温度测量

刘 燕

(中国原子能科学研究院 中国先进研究堆工程部, 北京 102413)

摘要: 放射性同位素辐照靶件在堆内辐照过程中能否保持其完整性, 受到诸多因素的影响, 其中辐照靶件包装容器外壁温度和内腔温度是辐照安全的重要参数。本工作着重研究了测温用热电偶在放射性同位素辐照靶件包装容器外壁上的安装技术, 并在重水研究堆上进行模拟试验。将测量数据与理论计算结果进行比较, 用以校核辐照靶件温度理论计算的准确度, 为放射性同位素辐照靶件和包装容器的设计提供可靠依据。

关键词: 放射性同位素辐照靶件; 包装容器; 外壁温度; 堆内试验

中图分类号: TL921.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-7512(2008)03-0189-04

Wall Surface Temperature Measurement for the In-pile Radioisotope Target Capsule

LIU Yan

(Project of China Advanced Research Reactor, CIAE, Beijing 102413, China)

Abstract: The surface temperatures of the radioisotope target capsule is one of the important parameter to its structure integrity. In order to verify the results of theoretical calculation for design, an in-pile surface temperature of capsule wall was measured in Heavy Water Research Reactor (HWRR). The results showed that the temperature were accordant with the theoretical calculation. The measuring methods of the external and internal surface of capsule wall were described also, including instruments selection, the technology of embedded thermocouples and error analysis.

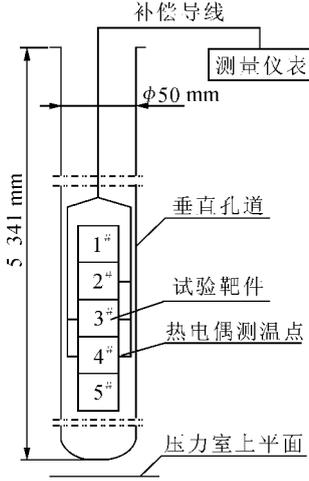
Key words: radioisotope target capsule; wall surface temperature; in-pile measurement

放射性同位素的辐照生产是研究堆的重要任务之一。保障放射性同位素辐照安全直接关系到反应堆的安全、人身安全和环境安全。是否能保证入堆辐照的安全, 关键条件是在辐照过程中始终保证辐照靶件的完整性。本工作拟通过在重水研究堆(HWRR)垂直孔道内辐照靶件的

模拟实验, 测量出辐照靶件包装容器外壁温度和内腔温度, 并将包装容器外壁温度测量值与理论计算值进行比较, 以验证辐照靶件温度理论计算方法是否可行, 保证辐照靶件包装容器外壁温度不超过温度限值, 满足强度要求, 为放射性同位素辐照靶件和包装容器的设计提供可靠依据。

1 实验装置及测量系统简介

实验装置由实验孔道及实验靶件组成,其示意图示于图 1。将模拟靶件放入包装容器构成一个试验靶件。在试验孔道内放入 5 个试验靶件,其中 2 号、3 号、4 号试验靶件内装有模拟靶件,1 号、5 号试验靶件为假靶件,假靶件为实心纯铝,其外形尺寸与包装容器外形尺寸相同,用



以模拟靶件的传热情况。

2 号试验靶件上安装一只热电偶,用于测量靶件包装容器内腔温度;3 号、4 号试验靶件上分别安装 2 只热电偶,用于测量靶件包装容器外壁温度,两测温点为 180° 对称布置,将所有热电偶通过补偿导线与测量仪表相连接,构成温度测量系统。

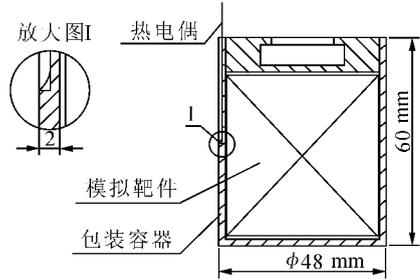


图 1 实验装置及测量系统示意图

2 热电偶及测量仪表的选型

依据试验靶件外形尺寸、在试验孔道里的安装位置及与孔道内壁的间隙,选用了 K 型铠装热电偶。K 型铠装热电偶材料为镍铬/镍铝,温度测量范围 $-200 \sim +1\ 200\ ^\circ\text{C}$ (热电偶经过检定 II 精度),精度为 $\pm 3\ ^\circ\text{C}$,不锈钢外包壳直径为 $0.3 \sim 0.5\ \text{mm}$,适合在被测物体表面埋设,能够有效提高测量的准确度。

测量仪表选用 DR020 型数字温度巡回检测仪,温度测量范围 $-200 \sim +1\ 200\ ^\circ\text{C}$,分辨率 $0.1\ ^\circ\text{C}$,测定精度 $\pm 1.2\ ^\circ\text{C}$,基准接点温度补偿精度 $\pm 0.3\ ^\circ\text{C}$ 。DR020 型数字温度巡回检测仪自配打印装置,对试验过程数据可实现连续打印记录。

3 实验装置安装

3.1 热电偶安装

热电偶在包装容器外壁表面的安装是否合理与可靠,对温度测量结果的准确性有很大影响。由于热电偶径向结构尺寸较小,极易损坏,靶件包装容器材料为铝材与热电偶外包壳材料不同,它们之间稳定可靠的连接成为实验需要解

决的一个难题。在本次实验中,为了保证热电偶安装的可靠性和测量数据的准确性,对热电偶在靶件包装容器上的安装方法设计了多种方案,并对每种安装方案做了多次试验。经过对多组试验数据的比较,最终选用了静电等离子喷涂纯铝方法。这种方法不但可使热电偶安装可靠,而且能真实反映被辐照靶件包装容器外壁温度。

测量容器外壁表面温度热电偶的安装方法,是在辐照靶件包装容器外表面沿轴向开横截面为 $1\ \text{mm} \times 1\ \text{mm}$ 、长约为容器总高一半的槽,将热电偶铺入槽内,使热电偶端部与包装容器外壁表面平齐,利用静电等离子喷涂纯铝将热电偶埋在槽内,最后将喷涂纯铝凸出部份修平,其示意图示于图 1。安装在试验靶件中的热电偶是测量靶件包装容器内腔温度的,与测量外壁表面温度热电偶的安装方式不同,热电偶通过包装容器上端盖中心小孔直接插入容器中心。该热电偶的测量值应高于外壁表面温度测量值,以证明试验数据合理性。

3.2 实验装置堆内安装

取 2 套放射性同位素辐照容器温度测量试验装置,分别将其安装于 HWRR 堆 8 号、9 号垂

直试验孔道内。

在入堆前,将试验靶件按编号顺序联接成一体,检查并确认各测量点的热电偶是否完好,编号是否正确(热电偶编号列于表 1 和表 2)。热电偶接线端从实验装置中引出,并与实验装置密封后,通过热电偶补偿导线将信号输送给测量仪表,测量仪表可直接显示出各测温点的温度,并自动打印记录下试验结果。

为了更好地分析靶件入堆后核发热不均匀对温度分布的影响,在试验靶件入堆时,设计了两种方案:在 8 号孔道内 3 号和 4 号试验靶件上的两只热电偶的布置,都分别与堆芯径向一致。

9 号孔道内 4 号试验靶件上的两只热电偶的布置与堆芯径向一致;而 3 号试验靶件上的两只热电偶两测点连线与堆芯径向垂直。

4 堆内模拟实验

反应堆按 1 000、3 000、5 000、7 000 kW 功率台阶开堆运行,并采用测量系统逐级进行温度测量。每个功率台阶稳定运行 20 min,在 7 198 kW 功率稳定运行 2 h 后,按正常停堆程序停止反应堆运行。测量系统自动记录了实验全过程的温度测量点数据,记录数据列于表 1 和表 2。

表 1 8 号孔道试验靶件温度测量点数据

试验靶件号	热电偶号	反应堆不同运行功率下测量点温度/℃				
		0	1 000 kW	3 000 kW	5 000 kW	7 198 kW
2	8	7.6	50.00	101.8	161.2	204.1
3	14	7.4	44.90	89.6	140.3	178.0
3	20	7.6	42.09	83.7	132.1	168.6
4	15	7.4	39.80	76.6	117.9	148.8
4	16	7.4	43.10	84.5	130.2	164.3

表 2 9 号孔道试验靶件温度测量点数据

试验靶件号	热电偶号	反应堆不同运行功率下测量点温度/℃				
		0	1 000 kW	3 000 kW	5 000 kW	7 198 kW
2	23	7.5	40.1	83.3	128.0	166.1
3	17	7.2	36.1	70.2	108.9	139.0
3	22	7.3	35.9	70.0	108.4	138.9
4	18	7.3	36.0	69.9	106.2	134.9
4	19	7.4	32.5	62.9	94.9	121.8

由表 1 和表 2 可以看出,8 号孔道的 3 号、4 号试验靶件和 9 号孔道 4 号试验靶件的测量数据,正好与安装时离堆中心线距离不等相符合,而 9 号孔道的 3 号试验靶件两只热电偶离堆中心线为等距离安装,所以温度测量值几乎相等,8 号孔道和 9 号孔道中的 2 号试验靶件中心部温度的测量数据比 3、4 号试验靶件的外壁表面温度测量数据都高。由此说明,热电偶的选型、安装是合理的,测量结果是准确可信的。

5 误差分析

每个温度测量点误差由下列因素组成:镍铝热电偶检定误差 δ_1 、基准接点温度补偿精度 δ_2 、二次仪表测量误差 δ_3 、补偿导线精度 δ_4 、热电偶的安装测量误差和热电偶辐照效应引起的误差。

据检定结果确定镍铬-镍铝电热电偶检定误差为 $\delta_1 = \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$,工作 II 级精度; δ_2 由测量二次仪表给定, $\delta_2 = \pm 0.3 \text{ }^\circ\text{C}$;二次仪表测量误差 δ_3 ,本实验使用数字温度巡检仪 K 型热电偶测量档,测量精度为 $\delta_3 = \pm 1.2 \text{ }^\circ\text{C}$;补偿导线精度 δ_4

$= \pm 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$; 由于热电偶与靶件包装容器采用静电离子喷涂纯铝法安装, 热电偶感温点完全被喷涂的纯铝紧密覆盖住, 传热条件好, 因此, 热电偶的安装测量误差可以忽略不计; 由于辐照期很短, 热电偶辐照效应引起的误差可以忽略。

根据误差计算公式 $\delta = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^4 \delta_i^2}$ 得出反应堆在 7 198 kW 功率时, 辐照靶件包装容器外表面温度测量值最高, 其每个测量点综合误差均为: δ

$= \pm 4.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

6 与理论计算值的比较

8 号孔道内轴向热中子注入量最高, 在不同堆功率台阶下各测量点所测数值均高于 9 号孔道各测量点所测量的数值。因此, 选用 8 号孔道内的 3、4 号试验靶件在堆功率为 7 198 kW 的测量数值与理论计算值进行比较, 结果列于表 3。

表 3 测量值与理论计算值^[1]比较

试验靶件编号	最高温度计算值/ $^{\circ}\text{C}$	测量点	测量值/ $^{\circ}\text{C}$	测量值平均值/ $^{\circ}\text{C}$	平均值与重水温差/ $^{\circ}\text{C}$	计算值与重水温差/ $^{\circ}\text{C}$	偏差
3	167.6	近堆芯点	178.0	173.3	109.3	103.6	+3.3%
		远堆芯点	168.6				
4	161.3	近堆芯点	164.3	156.6	92.6	97.3	-3.0%
		远堆芯点	148.8				

注: 重水温度 $64\text{ }^{\circ}\text{C}$

由表 3 可知, 实际测量结果与理论计算结果的偏差分别为 +3.3% 和 -3.0%。由于核发热与传热计算使用的是靶件包装容器外壁温度与重水的温差, 所以再将测量平均值和计算值两者与重水的温差进行比较, 实际测量结果与理论计算结果的偏差分别为 -5.3% 和 +5.0%。

7 结 论

通过采用放射性同位素辐照靶件包装容器外壁温度测量实验装置, 在堆内模拟试验中成功

测量了同位素辐照靶件包装容器外壁温度和内腔温度, 证实了温度测量系统设计合理、安装可靠。此项工作为同位素辐照靶件的设计提供了可靠数据, 为以后的堆内实验积累了一定实践经验。

参考文献:

- [1] 沈峰. 堆内辐照过程中辐照靶件的核发热和传热研究[J]. 原子能科学技术, 2003, 37(4): 345-348.