

# 燃料棒氦压无损检测方法可靠性分析

黄帆 朱浙楠 曹晖 于文昕 蒙笑缘

(中核建中核燃料元件有限公司 宜宾 644000)

**摘要** 为检测燃料棒内的氦气压力值,目前采用的破坏性穿刺法经济性不佳,且无法对每根燃料棒进行检测。为此,引入无损检测设备实现燃料棒内氦压无损测量。为验证无损检测设备的可靠性,进行了以下实验:选择三种不同氦压值的标准棒,先用实验燃料棒分别做传热法与穿刺测压法的结果对比,然后使用控制变量法,分别控制燃料棒自身温度、单次测量的时间间隔、环境温度,确定无损检测方法有无其他影响因素。实验结果表明:无损检测设备测量标准棒时,在24~30 °C下与穿刺测压法的所得结果基本一致,测量值的偏差不超过0.05 MPa,满足氦压测量的精度要求。同一支标准棒或燃料棒重复测量的时间间隔需 $\geq 2$  min。燃料棒氦压无损检测方法具有可靠性,不同环境下测量结果也具有稳定性。

**关键词** 燃料棒, 氦压, 无损检测, 穿刺测压, 可靠性

**中图分类号** TL352.2

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.070607

## Reliability analysis of helium pressure non-destructive testing method of the fuel rod

HUANG Fan ZHU Zhenan CAO Hui YU Wenxin MENG Xiaoyuan

(CNNC Nuclear Fuel Components Co., Ltd., Yibin 644000, China)

**Abstract** [Background] Currently, the destructive puncture manometry method is used to measure helium pressure inside fuel rods. However, this method is expensive and does not guarantee 100% coverage. Hence the non-destructive testing (NDT) equipment is introduced for non-destructive measurement of helium pressure inside fuel rods. [Purpose] This study aims to analyze the reliability of NDT testing method for the measurement of helium pressure inside fuel rods. [Methods] Three standard rods with helium pressure values of 0.98 MPa, 1.76 MPa, 2.45 MPa, respectively, were selected for experimental test. The experimental fuel rods were first used to obtain the results comparison of heat transfer method and puncture manometry, then the control variates were employed to control the fuel rod temperature, the time interval of a single measurement, and the ambient temperature respectively, so as to determine influencing factors in the NDT method. Finally, reliability analysis of NDT method was performed according to experimental results. [Results] The results of the NDT method are consistent with that of the puncture manometry method at a temperature range of 24~30 °C with less than 0.05 MPa deviation. Minimum repeat measurement time interval for NDT measuring helium pressure of the same standard rod or fuel rod is 2 min. [Conclusions] The NDT method for measuring the helium pressure of fuel rods is reliable, and the measurement results are stable in different environmental conditions.

**Key words** Fuel rods, Helium pressure, Non-destructive testing, Puncture manometry, Reliability

燃料棒在燃料芯块和包壳之间需充有纯度优于99.99%的氦气,压力约为2 MPa<sup>[1-2]</sup>。预填充的氦气压力在反应堆运行时能够对燃料棒包壳的完整性进

行保护,氦气泄漏则会影响反应堆的安全运行<sup>[3-7]</sup>。因此,检测燃料棒内氦气压力是否在正常范围是燃料棒检验的重要环节<sup>[8-11]</sup>。破坏性穿刺测量氦气压

第一作者:黄帆,男,1987年出生,2011年毕业于四川理工学院,无损检验专业,高工,研究领域为机械设计, E-mail: 879967686@qq.com

收稿日期:2023-02-09,修回日期:2023-04-13

First author: HUANG Fan, male, born in 1987, graduated from Sichuan Institute of Technology in 2011, major in non-destructive testing, senior engineer, focusing on mechanical design, E-mail: 879967686@qq.com

Received date: 2023-02-09, revised date: 2023-04-13

力的方式会破坏燃料棒,且效率低下、无法对所有燃料棒进行测量。俞冀阳等<sup>[12]</sup>利用 RODTRAN 程序发现,包壳表面升温速率可以推算燃料棒内的氦气压力,为测量仪器的设计提供数值模拟基础; Maximkin 等<sup>[13]</sup>基于燃料元件中氦气压力的增加导致燃料芯块和包壳之间的声学匹配的变化,利用超声波技术测量氦压。搭建了燃料棒模拟器用于验证,还需进一步验证所有系统的适配性。中核建中核燃料元件有限公司已购得氦压无损检测设备,该设备以传热法为原理对氦压进行测量,在国内尚未有单位使用该设备,故需对其测量数据可靠性进行验证,本文通过多个实验验证,并将设备与传统穿刺测量法进行对比,验证了燃料棒氦压无损检测方法的可行性与稳定性。

## 1 实验原理与方案

### 1.1 氦压检测方法

本次研究采用两种不同的氦压检测方法,即有损的穿刺测压法和无损的传热法。

#### 1.1.1 穿刺测压法

穿刺测压法的核心部分如图1所示。压力检测室内为空腔结构,空腔体积除去燃料棒、压力测量仪、打孔装置及其他占有空间的部分,大小为 $V_0$ 。燃料棒内部空间除去芯块、弹簧等部件的剩余体积为 $V$ 。测量时,将燃料棒的上端部插入压力检测室并密封,确认密封性良好且压力测量仪示数已清零后,在图中箭头处大致位置(检测室内)用打孔装置钻孔,使燃料棒内充入的氦气释放到检测室。钻孔一段时间后(待压力值稳定),读取压力测量仪上的压力读数 $P_0$ 。记录此时的环境温度 $T_0$ ,根据式(1)<sup>[6]</sup>即可计算 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时料棒内的氦气绝对压力。

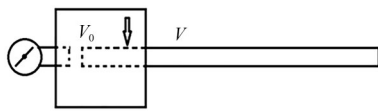


图1 穿刺测压法原理示意图

Fig.1 Principle diagram of puncture manometry method

$$P_{20^\circ\text{C}} = P_0 \times 293 \times \frac{k}{T_0 + 273} \quad (1)$$

式中: $k$ 为穿刺前后压力的比例系数,取决于检测装置和燃料棒设计,一般由实验验证取得。在当前燃料棒检测中, $k$ 取1.238;293、273单位为K。计算得到的合格棒的氦压应在1.8~2.3 MPa内,而此处算得的氦压为相对压力。

#### 1.1.2 传热法(无损检测)

燃料棒氦压无损检测设备的检测原理是传热法。如图2所示,右方的燃料棒插入左方的测压探头至最深处并密封。A处绕有电感,测温开始时通高频电流,使燃料棒被电感缠绕的部分发热,继而向右发生热扩散。在B处距离电感长度不同的两个位置各设置了热电偶测量包壳管表面温度。由于热扩散,两个热电偶测得的温度存在温度差,除掉包壳管、芯块、端塞对传热的贡献后,温度差主要由氦气的热对流导致,其大小与氦气密度成正比,即与氦气压力呈正相关。

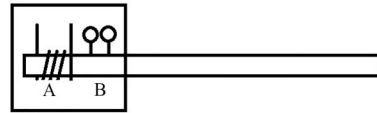


图2 传热法测氦压示意图

Fig.2 Diagram of helium pressure measurement using the heat transfer method

实际设备为了提升测量结果的精确性,两个热电偶被集成到采集卡NI6281的模数转换器(Analog to Digital Converter, ADC)电桥中,并测量升温、降温两条曲线,而每条曲线分别又在 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 两处取值,因此,可得到两组温度之差和温度之和的数据。利用式(2)<sup>[14]</sup>可以得出温度之差及温度之和所引起电阻的变化在经过采集卡处理后输出的模拟信号的值 $DU$ 为:

$$DU = \frac{Ex}{(kv)^\kappa} \quad (2)$$

式中: $Ex$ 和 $kv$ 为采集卡获取的中间变量,分别反映两个热电偶的温度之差和温度之和; $\kappa$ 是修正系数,一般取1。模拟信号 $DU$ 与 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 下的燃料棒氦气压力 $P$ 满足如下关系:

$$P = DU_{\text{imax}} \times \sqrt{DU - DU_{\text{imin}}} + P_0 (DU - DU_{\text{imin}}) \quad (3)$$

式(3)<sup>[14]</sup>中 $DU_{\text{imax}}$ 、 $DU_{\text{imin}}$ 和 $P_0$ 是三个未定常量,测量3支已知氦压而互不相同的标准棒并代入式(3)联立方程,即可得到这三个常量的解,从而用于燃料棒氦压值的测量,测量值采用相对压力,与穿刺法比较时,进行转换。

### 1.2 实验设备

穿刺测压法使用氦压装置C0550,主体结构为具备压力测量仪、打孔装置、内部为空腔的压力检测室,其余结构用于支撑检测室和被测燃料棒。压力测量仪的测量范围为1~4 MPa,测量偏差 $\leq 0.06\text{ MPa}$ 。

氦压无损检测设备整体结构如图3所示。图中

可见左下方的测量头和右方的配套工控机,两者即为设备的主体部分;附属结构包含料架、传感器、压空系统、电力开关等。设备运行要求环境温度为10~40 °C,氦压测量范围为0.98~2.45 MPa,测量偏差 $\leq 0.05$  MPa。



图3 燃料棒氦压无损检测设备实物图  
Fig.3 Snapshot of non-destructive testing equipment for measurement of helium pressure inside fuel rod

### 1.3 实验方案

#### 1.3.1 无损检测标准棒

根据要求,制作了3种规格的标准棒(外形结构、尺寸相同,但充入氦气压力值不同),其氦压值分

$$P_{25^{\circ}\text{C}} = \frac{1 - 0.142}{0.07 - \frac{P_0 \times 293 \times 1.238 \times [1 + 0.0004 \times (T_0 - 293)]}{T_0 + 273}} \quad (4)$$

#### 1.3.3 变量实验

为继续深入探索氦压无损检测方法的可靠性是否存在局限性,研究过程使用控制变量法,选取的变量有:燃料棒自身温度及单次测量的时间间隔。另外,为了测试氦压无损检测设备的测量稳定性,并探讨环境温度对设备检测结果的影响,一方面设置了一批实验燃料棒,除了测量时间点外的其他测量变量均一致;另一方面选取了棒号后7位为0710250的燃料棒进行长时间的持续测量,从而做出同一支棒在不同日期(环境温度下)测量结果的变化曲线。整理得到各实验燃料棒的序号和变量控制情况如表1所示。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 标准棒

采用三种规格的标准棒验证氦压无损检测设备。从表2和图5(a)可知,氦压无损检测设备测出0.98 MPa标准棒的测量偏差 $\leq 0.01$  MPa;从表3和图5(b)可知,氦压无损检测设备测出1.76 MPa标准棒的测量偏差 $\leq 0.02$  MPa;从表4和图5(c)可知,氦压

别为0.98 MPa、1.76 MPa和2.45 MPa,上述三种标准棒检定值的偏差 $\leq 0.01$  MPa。

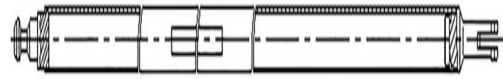


图4 标准棒结构图  
Fig.4 Structural diagram of a standard rod

具体流程为:分别取0.98 MPa、1.76 MPa和2.45 MPa三种标准棒,表面用酒精或丙酮清洁后按固定的时间间隔使用氦压无损检测设备对标准棒的氦压分别反复检测,各重复20次,分别记录三种标准棒测得的氦压数据。

#### 1.3.2 两种方法测燃料棒

取一支实验用燃料棒,表面用酒精或丙酮清洁后按固定的时间间隔使用氦压无损检测设备对燃料棒的氦压进行反复检测,重复20次;然后将该燃料棒送至氦压装置C0550进行穿刺测压,记录两种方法测得的氦压相关数据,并按式(4)将穿刺测压法测到的数据换算成25 °C下相应值。

无损检测设备测出2.45 MPa标准棒的测量偏差 $\leq 0.03$  MPa。综上所述,标准棒的测量偏差均 $< 0.05$  MPa,满足氦压无损检测设备测量偏差的要求<sup>[15]</sup>。

### 2.2 两种方法测燃料棒

控制无损检测单次测量时间间隔为2 min,测量次数20次,对10支合格燃料棒进行了检测,后又分别进行穿刺。检测结果如表5和图6所示。各实验棒无损检测法得到的数据总体稳定,标准差均 $\leq 0.01$  MPa。比较两种测量方法的测量结果,所有棒的测量偏差均 $< 0.05$  MPa。由此可见,当环境温度控制在24~30 °C范围时,无损检测法与穿刺测压法的所得结果是基本一致的。

#### 2.3 各变量对无损检测结果的影响

##### 2.3.1 单次测量的时间间隔、燃料棒自身温度

控制其他变量不变,对2-1~2-6等6支单次测量时间间隔分别为2 min、1 min和0 min的燃料棒,以及刚经过清洗和热烘、棒体温度偏高的3-1燃料棒进行了检测。检测结果如表6和图7所示。各实验

表1 实验所测燃料棒的信息和变量控制  
Table 1 Information and variable control of the fuel rods tested in the experiment

序号 Number	对应后7位棒号 Rod number	棒自身温度 Temperature of the rod itself	测量间隔时间 Measurement interval time / min	测量次数 Number of measurements	环境温度 Ambient temperature / °C
1-1	2370299	与环境温度一致	2	20	28
1-2	2390556	Consistent with ambient temperature			29
1-3	2420178		29		
1-4	2450656		30		
1-5	2460624		30		
1-6	2550899		27		
1-7	2600303		26		
1-8	2730543		25		
1-9	2780432		24		
1-10	2810405		24		
2-1	2580933		与环境温度一致	1	20
2-2	2630614	Consistent with ambient temperature			26
2-3	2660314		26		
2-4	2701024		27		
2-5	2751104		26		
2-6	2940287		0,2	27	
2-7	3100154	0		25	
3-1	2870898	刚经过清洗与热烘 Just undergone cleaning and hot drying	1	20	27
4-1	0710250	与环境温度一致 Consistent with ambient temperature	2	每日10次 10 times daily	每日变化 Daily changes

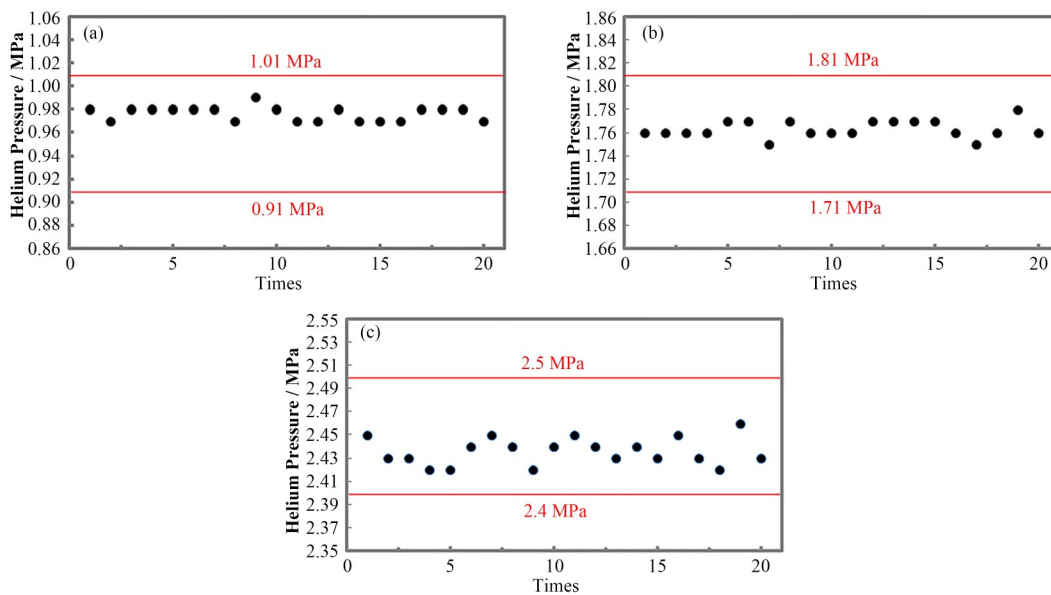


图5 三种氦压不同的标准棒测试结果  
(a) 标准棒(0.98 MPa)氦压值,(b) 标准棒(1.76 MPa)氦压值,(c) 标准棒(2.45 MPa)氦压值  
Fig.5 Test results of standard rods with three different helium pressures (a) Helium pressure value of 0.98 MPa, (b) Helium pressure value of 1.76 MPa, (c) Helium pressure value of 2.45 MPa

棒无损检测法得到的数据总体稳定,标准差均  $\leq 0.013$  MPa。比较发现,单次测量时间间隔为 1 min 时,无损检测法的结果和穿刺测压法的结果虽然大致符合,但已呈现前者小于后者的趋势;测量时间间

隔为 0 min 时,两种方法结果间的偏差已经达到 0.05 MPa。另外,时间间隔为 1 min,但棒自身温度偏高时,两种方法结果之间的偏差是该组实验棒中最大的。鉴于本组实验棒均属合格棒,且是先进行



表2 标准棒(0.98 MPa)检测结果  
Table 2 Test results of the standard rod (0.98 MPa)

序号 Number	标准棒氦压值 Helium pressure value of standard rod / MPa	实测值 Measured value / MPa	序号 Number	标准棒氦压值 Helium pressure value of standard rod / MPa	实测值 Measured value / MPa
1	0.98	0.98	11	0.98	0.97
2	0.98	0.97	12	0.98	0.97
3	0.98	0.98	13	0.98	0.98
4	0.98	0.98	14	0.98	0.97
5	0.98	0.98	15	0.98	0.97
6	0.98	0.98	16	0.98	0.97
7	0.98	0.98	17	0.98	0.98
8	0.98	0.97	18	0.98	0.98
9	0.98	0.99	19	0.98	0.98
10	0.98	0.98	20	0.98	0.97

注:标准棒氦压值按照名义值 0.98 MPa 进行规定

Notes: The helium pressure value of the standard rod is specified according to the nominal value of 0.98 MPa

表3 标准棒(1.76 MPa)测试结果  
Table 3 Test results of the standard rod (1.76 MPa)

序号 Number	标准棒氦压值 Helium pressure value of standard rod / MPa	实测值 Measured value / MPa	序号 Number	标准棒氦压值 Helium pressure value of standard rod / MPa	实测值 Measured value / MPa
1	1.76	1.76	11	1.76	1.76
2	1.76	1.76	12	1.76	1.77
3	1.76	1.76	13	1.76	1.77
4	1.76	1.76	14	1.76	1.77
5	1.76	1.77	15	1.76	1.77
6	1.76	1.77	16	1.76	1.76
7	1.76	1.75	17	1.76	1.75
8	1.76	1.77	18	1.76	1.76
9	1.76	1.76	19	1.76	1.78
10	1.76	1.76	20	1.76	1.76

注:标准棒氦压值按照名义值 1.76 MPa 进行规定

Notes: The helium pressure value of the standard rod is specified according to the nominal value of 1.76 MPa

表4 标准棒(2.45 MPa)测试结果  
Table 4 Test results of the standard rod (2.45 MPa)

序号 Number	标准棒氦压值 Helium pressure value of standard rod / MPa	实测值 Measured value / MPa	序号 Number	标准棒氦压值 Helium pressure value of standard rod / MPa	实测值 Measured value / MPa
1	2.45	2.45	11	2.45	2.45
2	2.45	2.43	12	2.45	2.44
3	2.45	2.43	13	2.45	2.43
4	2.45	2.42	14	2.45	2.44
5	2.45	2.42	15	2.45	2.43
6	2.45	2.44	16	2.45	2.45
7	2.45	2.45	17	2.45	2.43
8	2.45	2.44	18	2.45	2.42
9	2.45	2.42	19	2.45	2.46
10	2.45	2.44	20	2.45	2.43

注:标准棒氦压值按照名义值 2.45 MPa 进行规定

Notes: The helium pressure value of the standard rod is specified according to the nominal value of 2.45 MPa

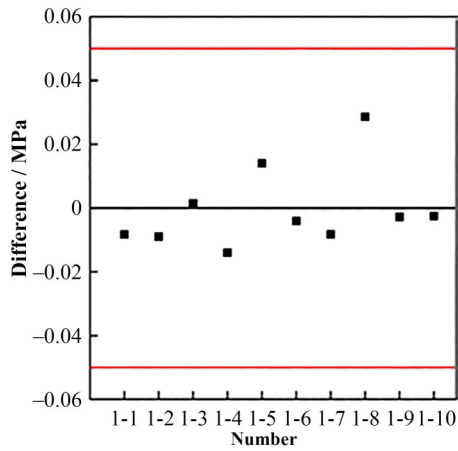


图6 无损检测法数据与穿刺测压法数据的偏差分布  
Fig.6 Deviation distribution between non-destructive testing data and puncture manometry data

无损检测法检测,可以认为进行穿刺时棒内外已经达到热平衡,穿刺法所得结果较无损检测法可靠。因此,其他条件相同时,棒自身温度越高,单次测量的间隔时间越短( $\leq 2$  min),无损检测法测得的棒内氦压越低。其中,较短的单次测量间隔时间也可以归结为提高棒自身温度的因素。

在实际工作中,检测每支燃料棒前,燃料棒自身温度均与环境温度一致,只有当燃料棒经氦压无损设备检测后,其温度才会显著升高,此时,若燃料棒检测结果合格,则燃料棒继续流向下一工序;若燃料棒检测结果不合格,才会重新进行氦压无损的复测,而在复测前,只要燃料棒放置足够时间( $\geq 2$  min),使得燃料棒自身温度降至与环境温度一致,则不会对复测结果有影响。

表5 无损检测法与穿刺测压法数据对比

Table 5 Comparison between non-destructive testing method and puncture manometry data

序号 Number	无损检测法数据平均值 NDT data mean / MPa	标准差 Standard deviation / MPa	穿刺测压法换算结果 Conversion result of puncture pressure measurement method / MPa	偏差(无损-穿刺) Deviation (lossless- puncture) / MPa	环境温度 Ambient temperature / °C
1-1	2.131	0.010	2.139	-0.008	28
1-2	2.140	0.009	2.149	-0.009	29
1-3	2.149	0.006	2.148	0.001	29
1-4	2.151	0.006	2.165	-0.014	30
1-5	2.165	0.006	2.151	0.014	30
1-6	2.142	0.006	2.146	-0.004	27
1-7	2.162	0.010	2.170	-0.008	26
1-8	2.223	0.009	2.194	0.029	25
1-9	2.175	0.009	2.177	-0.002	24
1-10	2.179	0.009	2.182	-0.003	24

表6 不同单次测量时间间隔和燃料棒自身温度的实验棒使用两种方法检测数据对比

Table 6 Comparison of test rods using two methods for different single measurement time intervals and fuel rod temperature

序号 Number	测量间隔时间 Measurement interval time / min	棒自身温度 Temperature of the rod itself	无损检测法 数据平均值 NDT data mean / MPa	标准差 Standard deviation / MPa	穿刺测压法换算结果 Conversion result of puncture pressure measurement method / MPa	偏差(有损-穿 刺) Deviation (damage- puncture) / MPa	环境温度 Ambient temperature / °C
2-1	1	与环境温度	2.148	0.011	2.162	-0.014	26
2-2		一致	2.187	0.006	2.197	-0.010	26
2-3		Consistent	2.150	0.009	2.182	-0.032	26
2-4		with	2.175	0.009	2.208	-0.033	27
2-5		ambient	2.176	0.008	2.184	-0.008	27
2-6	2	temperature	2.173	0.009	2.201	-0.028	27
	0		2.159	0.010	2.201	-0.042	27
2-7			2.169	0.013	2.220	-0.051	24
3-1	1	刚经过清洗与 热烘 Just under- gone cleaning and hot drying	2.128	0.007	2.208	-0.080	26

表7 检测期间无损检测设备标定值随时间变化趋势  
(部分数据)

Table 7 Trend of calibration value of non-destructive testing equipment over time during testing (partial data)

日期Date	环境温度 Ambient temperature / °C	标准棒标定值 Helium pressure value of standard rod / MPa		
		0.98	1.76	2.45
8月5日 August 5	30	0.98	1.77	2.46
8月17日 August 17	25	0.98	1.78	2.47
9月1日 September 1	24	1.00	1.78	2.45
9月19日 September 19	23	1.01	1.79	2.45
10月12日 October 12	22	1.02	1.81	2.47

注:此表中为部分数据,数据总体波动和趋势相同  
Notes: This table contains partial data, and the overall fluctuation and trend of the data are the same

### 2.3.2 环境温度

控制无损检测单次测量时间间隔为2 min,测量次数10次,对实验棒4-1 每日或隔日进行上述的一轮检测,分别从8月起持续了36次,从12月起持续了19次。由于检测期间标准棒标定数据发生偏离,如表7所示,设备于10月末进行了校准,因此两段时间的测量数据相互不具备可比性。无损检测结束后对4-1棒进行穿刺测压,测得内部氦压为2.204 MPa。

如图7所示,4-1实验棒单日的无损检测数据是稳定的,标准差均 $\leq 0.015$  MPa,总体数据的波动范围也在无损检测的总误差即0.05 MPa之内。而分别对夏季、冬季两组数据分别作温度-氦压检测值关系曲线,并作线性拟合,如图8所示,可以发现由于检测误差的存在,或者温度数据的精确度不够,在夏季也就是23~30 °C的温度范围未见温度对检测数据的影响;而在冬季也就是16~20 °C的温度范围则呈现出较弱的变化趋势,温度越低,测量结果越大,这一点在表7的标定数据中也可得到印证。

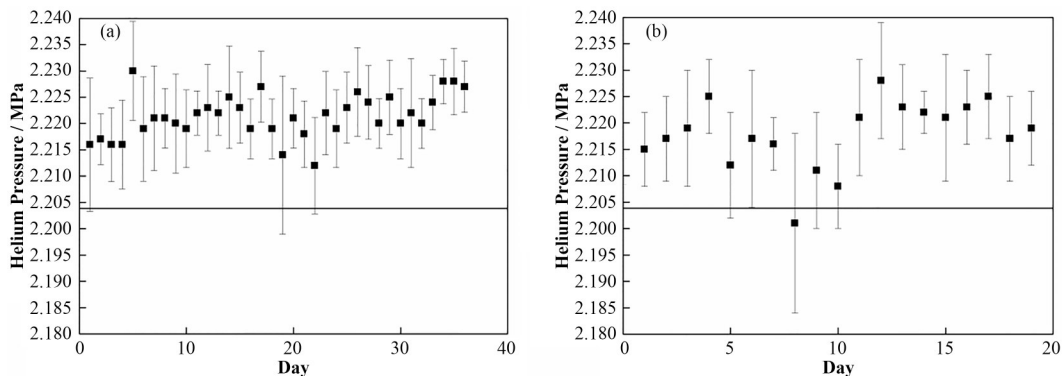


图7 实验棒4-1使用无损检测法检测结果对照图 (a)夏季,(b)冬季

Fig.7 Comparison chart of test results using nondestructive testing method for test rod 4-1 (a) Summer, (b) Winter

环境温度越高,无损检测法测得氦压越小的原因可以从测温原理上进行解释。由于4-1实验棒在检测前未作其他处理,可以认为环境温度事实上等同于实验棒自身的温度。由前述可知, $DU$ 是无损检测法中的关键变量,而式(3)显示,氦压与 $DU$ 值正相关。由式(2)可知,由于 $\kappa$ 一般取1, $DU$ 与 $Ex$ 成正比,与 $kv$ 成反比。而 $Ex$ 、 $kv$ 分别反映了热电偶的温度差与温度和。

对于同一支燃料棒,温度变化时, $Ex$ 直接反映棒内氦的热对流速率,温度变化通过影响热导系数间接影响 $Ex$ ,自然环境下热导系数变化很小,因而 $Ex$ 变化相对较小,而直接反映棒自身温度的 $kv$ 变化相对较大。因此,本试验温度范围内,温度越高, $DU$ 越小,计算得到的氦压就越小。

## 3 结语

1) 本文从实际使用情况出发,为检验无损检测设备测试燃料棒氦压的可靠性,针对性地设置了多组实验。经过实验验证,可以得出以下结论:对于不同氦压的标准棒,利用无损检测设备能够准确得出其氦压值。

2) 在与传统穿刺测压法进行对比测试中,无损检测法在温度为24~30 °C的范围内,与穿刺测压法所得结果基本一致,可以替代穿刺测压法进行燃料棒氦压测试。

3) 燃料棒自身温度与环境温度不一致时,会影响无损检测设备氦压测量准确性,为了避免产生测量误差,同一支标准棒或燃料棒进行重复测量前需间隔至少2 min。

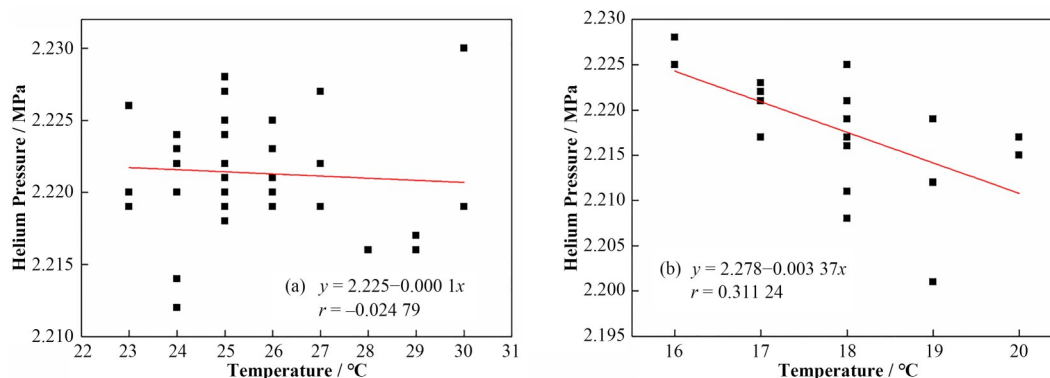


图8 实验棒4-1无损检测氦压数值与温度的关系 (a)夏季,(b)冬季

Fig.8 Relationship between helium pressure value and temperature in the non-destructive testing of experimental rod 4-1 (a) Summer, (b) Winter

**作者贡献声明** 黄帆起草文章,实验方案初步拟定,实验过程数据采集,解释实验数据,文章最终版修订;朱浙楠实验方案修订完善,实验过程指导;曹晖实验过程协助采集数据,统计分析数据真实性;于文昕设备操作并得出测试数据,文章格式检查;蒙笑缘文档内容部分修订。

#### 参考文献

- 傅冀庆. AFA 3G 含钐燃料棒上端塞环缝 TIG 焊接研究[J]. 东方电气评论, 2004, 18(2): 115 - 120. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9006.2004.02.011.  
FU Jiqing. AFA 3G Gd rod top end plug girth TIG wilding [J]. Dongfang Electric Review, 2004, 18(2): 115 - 120. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9006.2004.02.011.
- 蒋慧静, 杨小勇, 丁铭, 等. 10 MW 高温气冷堆氦气透平循环的泄漏特性分析[J]. 高技术通讯, 2015, 25(4): 411 - 416. DOI: 10.3772/j.issn.1002-0470.2015.04.012.  
JIANG Huijing, YANG Xiaoyong, DING Ming, *et al.* Analysis of leakage characteristics of helium turbine cycle in 10 MW high temperature gas cooled reactor[J]. Chinese High Technology Letters, 2015, 25(4): 411 - 416. DOI: 10.3772/j.issn.1002-0470.2015.04.012.
- Rosenkrantz E, Ferrandis J Y, Leveque G, *et al.* Ultrasonic measurement of gas pressure and composition for nuclear fuel rods[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2009, 603(3): 504 - 509. DOI: 10.1016/j.nima.2009.02.028.
- 杨炯, 雷春辉, 马先宏. 核电厂蒸汽发生器传热管氦气检漏系统研究[J]. 核动力工程, 2021, 42(6): 219 - 224. DOI: 10.13832/j.jnpe.2021.06.0219.  
YANG Jiong, LEI Chunhui, MA Xianhong. Study on helium leak detection system for heat transfer tube of steam generator in nuclear power plant[J]. Nuclear Power Engineering, 2021, 42(6): 219 - 224. DOI: 10.13832/j.jnpe.2021.06.0219.
- Ferrandis J Y, Rosenkrantz E, Lévêque G, *et al.* Full-scale hot cell test of an acoustic sensor dedicated to measurement of the internal gas pressure and composition of a LWR nuclear fuel rod[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(4): 2894 - 2897. DOI: 10.1109/TNS.2013.2264111.
- 刘艳东, 刘金华, 高振波, 等. 压力容器的氦泄漏检测方法简介[J]. 一重技术, 2002(4): 2. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3355.2002.04.035.  
LIU Yandong, LIU Jinhua, GAO Zhenbo, *et al.* Introduction to helium leakage detection methods for pressure vessels[J]. Yizhong Technology, 2002(4): 2. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3355.2002.04.035.
- 姜伟, 苗振宇. 核电厂高压加热器检漏技术研究[J]. 真空, 2019(1): 3. DOI: CNKI:SUN:ZKZK.0.2019-01-020.  
JIANG Wei, MIAO Zhenyu. Research on leakage detection technology for high pressure heaters in nuclear power plants[J]. Vacuum, 2019(1): 3. DOI: CNKI:SUN:ZKZK.0.2019-01-020.
- Kuang L, Jiang L, Ren L, *et al.* Study on helium leak detecting for post irradiation fuel rods[C]//International Conference on Nuclear Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2013, 55782: V001T02A021. DOI: 10.1115/ICONE21-15637.
- 薛大同, 肖祥正, 王庚林. 密封器件压氦和预充氦细检漏判定漏率合格的条件[J]. 真空科学与技术学报, 2013(8). DOI: 10.3969/j.issn.1672-7126.2013.08.03.  
XUE Datong, XIAO Xiangzheng, WANG Genglin. Conditions for determining qualified leakage rate through



- fine leak detection of sealed devices by pressing helium and pre filling helium[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 2013(8). DOI: 10.3969/j.issn.1672-7126.2013.08.03.
- 10 李涛, 张斌, 刘鲁北, 等. 基于 162.5 MHz HWR 超导腔的氦压调谐器的设计与测试[J]. 核技术, 2015, 38(10): 100201. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.100201. LI Tao, ZHANG Bin, LIU Lubei, *et al.* Design and test of the helium pneumatic tuner based on 162.5 MHz superconducting cavity[J]. Nuclear Techniques, 2015, 38(10): 100201. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.100201.
- 11 王庚林, 李宁博, 李飞, 等. 多次压氦法和预充氦压氦质谱细检漏方法研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2014, 9(1): 6. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5692.2014.01.021. WANG Genglin, LI Ningbo, LI Fei, *et al.* Study on multiple helium pressure and pre filled helium pressure mass spectrometry fine leak detection methods[J]. Journal of China Academy of Electronic Sciences, 2014, 9(1): 6. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5692.2014-01.021.
- 12 俞冀阳, 王松涛, 张向宇, 等. 燃料棒内氦气压力无损检测的数值模拟[J]. 核科学与工程, 2007, 27(3): 193 - 197. DOI: 10.3321/j.issn:0258-0918.2007.03.001. YU Jiyang, WANG Songtao, ZHANG Xiangyu, *et al.* Numerical simulation on scatheless measurement of helium pressure in fuel rod[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2007, 27(3): 193 - 197. DOI: 10.3321/j.issn:0258-0918.2007.03.001.
- 13 Maximkin A I, Kryukov I S, Ableev A N, *et al.* Experimental research and development of safety analysis systems for advanced types of fuel rods[C]//Proceedings of 2018 26th International Conference on Nuclear Engineering. London, England, 2018. DOI: 10.1115/ICONE26-82387.
- 14 张剑, 徐建平, 陈长友, 等. 快堆燃料棒内氦气容积比的测定[J]. 科技创新导报, 2014, 11(9): 195 - 197. DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098x.2014.09.074. ZHANG Jian, XU Jianping, CHEN Changyou, *et al.* The determination of helium volume ratios in the fuel rod of Fast breeder reactor[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2014, 11(9): 195 - 197. DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098x.2014.09.074.
- 15 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 无损检测 氦泄漏检测方法: GB/T 15823—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Non-destructive testing—test methods for helium leak testing: GB/T 15823—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.