

文章编号: 0258-0926(2021)03-0085-05; doi:10.13832/j.jnpe.2021.03.0085

# 反应堆控制棒组件超声检测探头的研制

金晓明, 孙加伟, 李炳乾, 胡晨旭

中广核检测技术有限公司, 江苏苏州, 215021

**摘要:** 为了检测核电站反应堆控制棒组件, 保障核电站在役检查顺利实施、降低检测成本。对反应堆控制棒组件 (RCCA) 检测用超声探头进行自主研发, 本文详细介绍了 15 MHz- $\Phi$ 4 mm- $\Phi$ 8 mm RCCA 超声探头制作流程, 通过对压电晶片、声透镜、背衬 3 方面详细介绍探头制作工艺。通过对超声探头进行性能测试, 测试脉冲周期数为 1.5 周, 频带宽度为 105%, 在高温环境下仍能保持优良性能。对超声探头进行模拟检验测试, 缺陷测试结果清晰可见, 满足检验需求, 可完全实现国产化替代进口产品。

**关键词:** 反应堆控制棒组件; 超声探头; 声透镜; 背衬

**中图分类号:** TL329 **文献标志码:** A

## Development of Ultrasonic Transducer for Rod Cluster Control Assembly

Jin Xiaoming, Sun Jiawei, Li Bingqian, Hu Chenxu

CGN Inspection Technology Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu, 215021, China

**Abstract:** It is necessary to detect the defects of Rod Cluster Control Assembly used in nuclear power plant reactors to ensure the successful implementation in service inspection and reduce the cost of nondestructive testing. The ultrasonic probe for Rod Cluster Control Assembly (RCCA) inspection is developed independently. This paper describes the development process of ultrasonic probe about 15MHz- $\Phi$ 4mm- $\Phi$ 8mm-OD6mm. The development process is described in detail in three aspects: piezoelectric wafer, acoustic lens and backing. The performance of the ultrasonic probe was tested. The number of pulse cycles is 1.5 weeks and the frequency band width is 105%. The defect test results are clearly visible, and the sensitivity and signal-to-noise ratio meet the inspection requirements in the simulation and inspection of the ultrasonic probe. It can completely replace the imported products with domestic ones.

**Key words:** Rod cluster control assembly, Ultrasonic probe, Acoustic lens, Backing

### 0 引言

反应堆控制棒组件 (RCCA) 用于调节反应堆运行功率, 在核电站发生事故时快速引入负反应, 使反应堆紧急停堆<sup>[1]</sup>。反应堆控制棒组件长期在水中、高温、高辐照的特殊环境下往复机械运动, 在此特殊工况下金属材料容易出现热老化现象。由于长期往复机械运动, 可能会导致控制棒组件出现磨损、肿胀、裂纹等缺陷。

根据 1992 年至 2012 年我国核电厂以及其他国家核电厂调研资料显示, 控制棒异常事件共发生 17 起, 引起该事件主要原因为控制棒肿胀、燃料组件变形等<sup>[2]</sup>。

RCCA 检验的目的是评估磨损速度、肿胀等缺陷的扩展趋势, 以便及时更换可能影响反应堆下一循环正常运行的 RCCA。RCCA 检验采用的是集超声检验和涡流检验于一体的检验方法。其

收稿日期: 2020-04-02; 修回日期: 2020-07-21

作者简介: 金晓明 (1985—), 男, 高级工程师, 现主要从事核电站在役检查技术与超声波换能器开发, E-mail: jinxiaoming911@163.com

中超声检测方法用于测量磨损和肿胀缺陷, 涡流检测方法用于检测裂纹类缺陷<sup>[3]</sup>。

## 1 检验技术

以 17×17 型 RCCA 为例进行论述, 控制棒束由 24 根插入燃料组件的控制棒组成, 控制棒外径为 9.7 mm, 壁厚为 0.475 mm, 材料为 AISI 316L。这种特殊结构造成超声探头难以与管材表面耦合, 通常采用水浸超声波聚焦方法进行检验。另外由于管壁仅有 0.475 mm, 一般要求 RCCA 中不能存在大于等于 10%壁厚的磨损存在, 利用常规脉冲式超声探头回波测厚的方法会形成多次反射回波混叠在一起, 造成测量失败。解决薄壁小直径管材的途径有 2 步: 研制窄脉冲、宽频带的超声波探头; 采用信号处理手段提取表征厚度的超声波信息<sup>[4]</sup>。超声探头作为超声检测系统最重要的部件之一, 其性能的好坏直接影响超声检测系统的性能与缺陷检测结果<sup>[5]</sup>。

本文通过研制高性能窄脉冲水浸超声探头, 着重介绍超声探头的制作工艺及关键核心点, 最终通过运用快速傅里叶变换处理实验棒超声波信号, 得到壁厚的谐振频率并计算出壁厚。

## 2 反应堆控制棒组件超声探头的制作

RCCA 超声探头为高频水浸点聚焦探头, 频率为 15 MHz、晶片尺寸 4 mm、探头高度 4 mm、焦距 8 mm、频带宽度 > 90%。因此为了研制出高性能 RCCA 探头 (图 1), 需从压电晶片、背衬、透镜 3 方面进行研究, 最后将上述 3 个关键部件封装在高度 4 mm 的 316L 不锈钢外壳内, 与滑刷机械部件进行装配, 组成一套 RCCA 超声探头。

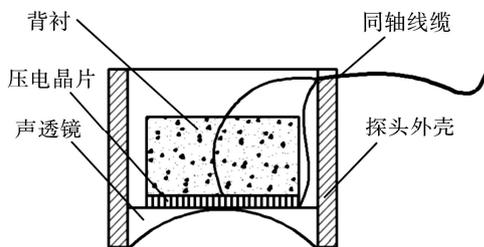


图 1 反应堆控制棒组件超声探头示意图

Fig. 1 Ultrasonic Probe of Rod Cluster Control Assembly

### 2.1 压电晶片选择

窄脉冲探头的研制, 普遍采用复合材料、偏铌酸铅或碘酸锂等压电材料, 主要是因为声阻抗

低易于进行背衬阻尼匹配, 且径向机电耦合系数 ( $K_p$ ) 低, 低频谐振波少, 发射脉冲窄, 容易制作窄脉冲探头<sup>[6]</sup>。但复合晶片大于 10 MHz 加工良品率低、价格昂贵; 偏铌酸铅厚度方向机电耦合系数  $K_t$  值小, 灵敏度不高, 同样价格昂贵, 制造困难; 碘酸锂为水溶性晶体, 制造过程中工艺复杂必须采用特殊工艺才能保证良好的压电特性<sup>[7]</sup>。

普遍认为钛酸铅 (PT) 机械品质因子 ( $Q_m$ ) 较大, 阻抗高, 背衬阻尼匹配难度大, 但该材料压电晶片  $K_p$  值低, 居里温度高, 价格便宜, 压电晶片制作加工难度低, 易于量产, 因此本文压电晶片选择 PT 材料。

由于宽频带的要求, 使得背衬阻尼很高, 导致降频明显。因此需采用更高频率的压电晶片以抵消频率下降的损失。

### 2.2 RCCA 超声探头声透镜制作

由图 1 可知, 由于该探头为点聚焦探头, 因此需在探头晶片前端加曲面声透镜以保证超声波入射到透镜后在水内产生聚焦作用。由焦距公式可知, 焦距与透镜曲率半径、透镜声速、水声速有关。

$$F = \frac{R}{1 - C_{\text{水}}/C_{\text{透}}} \quad (1)$$

式中,  $F$  为球面声透镜在水中的焦距, mm;  $R$  为球面声透镜曲率半径, mm;  $C_{\text{水}}$  为水中声速, m/s;  $C_{\text{透}}$  为声透镜中声速, m/s。

设定在役检测时工况水温为 70 °C, 那么  $C_{\text{水}}$  声速约为 1555 m/s。RCCA 超声探头焦距为 8 mm, 那么需计算出  $R$  以及  $C_{\text{透}}$ 。一般声透镜的制作使用环氧树脂直接浇注在晶片上, 再用相应曲率半径的球体压制加工而成。为了提高声透镜的透声效果以及带通滤波功能, 需对声透镜进行特定配方研制, 本文将氧化铝与环氧树脂按照一定比例混合, 进行充分搅拌后放入真空脱泡机排除气泡, 放入模具中加温加压固化 24 h。共进行 4 组配比实验, 如表 1 所示。考虑式 (1) 中透镜曲率半径加工难易程度以及保证焦距在 8 mm 处, 经计算最佳透镜声速值  $C_{\text{透}} = 2600$  m/s 为宜, 因此选择样品 2 进行加工制作, 进而计算出  $R$  约为 3.5 mm。

为了提高探头可靠性, 尤其是针对环氧树脂固化后具有一定收缩率以及吸水率的影响, 为此

表 1 声透镜配比性能表

Tab. 1 Acoustic Lens Formulation

样品	氧化铝 占比/%	声速 /(m·s <sup>-1</sup> )	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	声阻抗 /(10 <sup>6</sup> g·cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )
1	40	2800	1.42	3.97
2	53	2600	1.64	4.26
3	60	2500	1.69	4.22
4	64	2450	1.75	4.28

对环氧树脂聚合物进行了改性处理,同时对探头外壳进行了离子化处理,以提高与环氧树脂混合物的粘接力。

### 2.3 RCCA 超声探头背衬制作

反应堆控制棒组件 RCCA 检测用超声探头要求窄脉冲、宽频带。为了保证探头满足性能要求,最有效的方法就是在晶片背面附加高阻抗、高衰减的背衬材料,通过背衬的阻尼特性使压电晶片的谐振状态快速停止。有研究表明,当背衬声阻抗不低于晶片声阻抗的 2/3 时,制作出的探头脉冲周期和频带宽度满足窄脉冲、宽频带要求<sup>[8-9]</sup>。由于晶片声阻抗在  $35 \times 10^5 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$  左右,因此背衬声阻抗应大于  $23.3 \times 10^5 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。

本文采用热压固化成形法,将聚合物、固化剂与重金属粉末按一定比例混合均匀,放入模具中,然后加压固化成型,之后进行脱模处理。具体步骤如下:称量混料;加热烘干;真空混胶;加压固化;退火处理;脱模加工。采用高密度金属粉末钨粉。采用流动性好、密度低、粘度小、粘接力强的专用吸声阻尼胶以保证金属粉末与胶水充分混合。

将钨粉放入烘干箱中烘干 24 h,保证水分充分挥发,阻尼胶放入 50 左右干燥箱中加温处理以提高其流动性,钨粉按照 90%质量占比与阻尼胶进行初步混合,直至混合成泥状。混胶完成后将物料放入模具中并放置于热压机中进行加压固化,固化 24 h 后取出。

将固化完成的样品再次放入干燥箱中加温至 120 进行 1 h 的退火处理,经测试热处理后可使样品声阻抗有明显提高,主要是因为热处理使样品的刚度系数变大,提高了样品声速。最后对样品进行脱模处理,将样品切割成 1 mm 厚薄片进行声速测量,整个测试过程在水中进行,将一发一收 2 个水浸探头置于水中,样品薄片放置于 2 探头中间,记录脉冲时间坐标,将样品取出后记

录无样品时脉冲坐标,计算方法如下<sup>[10]</sup>:

$$C_{\text{样}} = (C_{\text{水}}l) / (C_{\text{水}}\Delta t + l) \quad (2)$$

式中,  $C_{\text{样}}$  为样品声速, mm/s;  $l$  为样品薄片厚度, mm;  $\Delta t$  为 2 个水浸探头之间插入样品薄片后造成的透射脉冲时移,  $\mu\text{s}$ 。

由上述方法测得的样品声速约为 2000 m/s,采用阿基米德排水法进行密度测量,密度为  $13 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,则样品声阻抗为  $26 \times 10^5 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ,满足大于压电晶片声阻抗 2/3 的技术要求。将背衬柱机加工成直径 4 mm、高 2 mm 的圆柱体,背衬柱加工研磨后用粘接剂与晶片粘接在一起。

### 3 RCCA 超声探头功能测试

测试环境:由于 RCCA 检测期间处于乏燃料水池中,且不同核电厂乏燃料水池水温不尽相同。因此为了模拟现场环境,测试探头的稳定性,将测试温度分别设置为 25、45、60、75。

测试过程:将 50  $\Omega$  射频线缆与脉冲发生器、示波器连接,并使用 100 V 负脉冲尖波激励探头,对大平底反射体进行回波信号分析。调整 RCCA 超声探头与大平底反射体的距离至 8 mm 处,微调 RCCA 超声探头角度使探头脉冲回波声束与大平底反射体垂直,以此为基准向前、向后分别移动探头,脉冲回波最大反射处探头所处位置即为探头焦点位置。

当探头移至最大回波处时,采集此时射频脉冲回波波形,再通过离散傅里叶变换,将时域信号转换成频域信号得到探头频谱图,探头性能测试结果如图 2 所示。

测试结果见表 2,对于自主研制的 15 MHz- $\Phi 4 \text{ mm}$ -FP8 mm 超声探头,在室温 25 环境下其中心频率为 14.1 MHz,焦距为 7.8 mm,脉冲周期数为 1.5 周,频带宽度为 105%,产品满足验收要求。

随着温度的升高,探头焦点略有变大,带宽略有降低。主要原因是由于水温升高导致声透镜声速降低,造成透镜焦点变大。同时透镜声速降低进而造成透镜声阻抗的降低,因此频带宽度略有下降。但高温环境下测试结果仍满足 EN-12668.2 的探头验收标准。

将 RCCA 超声探头与组件进行装配。装配完成后放入 RCCA 扫查器中进行模拟件扫查,扫查

器如图 3 所示。

被检部件为 RCCA 控制棒，每根棒长 3857.5 mm、外径 9.7 mm、壁厚 0.475 mm，材质为不锈钢。模拟件上刻有 20%和 40%壁厚环形槽、长度分别为周长的 25%和 100%，以及采用胀管工艺制作的肿胀缺陷一处。由于被检棒壁厚较小，采用脉冲反射法会使各个回波混叠在一起，造成测

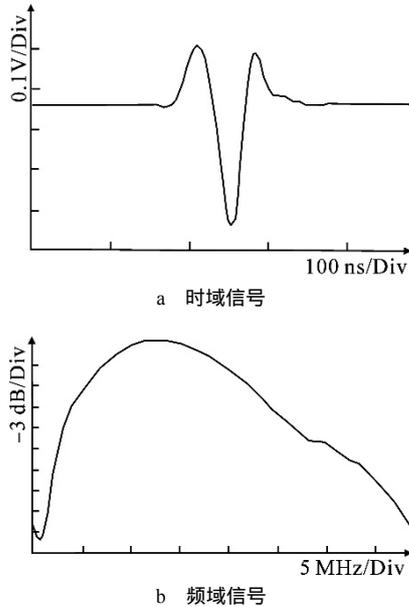


图 2 探头信号  
Fig. 2 Probe Signal

表 2 探头性能测试表

Tab. 2 Probe Performance Test Sheet

样品	温度/	中心频率/MHz	焦距/mm	频带宽度/%
1	25	14.1	7.8	105
2	45	14.2	7.8	103
3	60	13.8	8.0	99
4	75	13.6	8.3	95

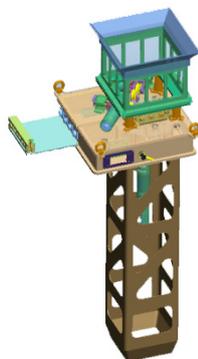


图 3 反应堆控制棒组件扫查器  
Fig. 3 RCCA Scanning Device

量失效，无法计算出厚度值。因此需将获得的时域信号进行离散傅里叶变换，得到壁厚谐振频率，再通过式 (3) 计算出壁厚，通过 InspectView 分析软件进行数据分析及测量。

$$t = \frac{v}{2f} \quad (3)$$

式中， $t$  为材料的壁厚，mm； $v$  为材料中的声速，mm/s； $f$  为材料壁厚的特征频率，MHz。

磨损缺陷检验结果如图 4 所示，4 处缺陷特征信号与噪声区分明显，且缺陷轮廓信号清晰可见，信噪比高。

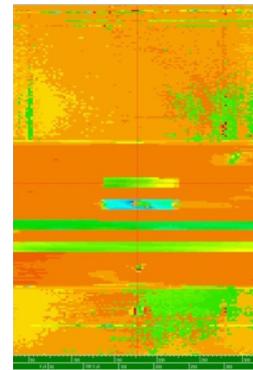


图 4 模拟棒磨损缺陷检验结果  
Fig. 4 Simulated Block Wear Defect Detection Results

肿胀缺陷检验结果通过外径轮廓进行分析判定，计算出肿胀值为 10.054 mm 和肿胀区域壁厚减薄剩余值为 0.451 mm。缺陷轮廓信号清晰可见，检测数据精度较高，满足 RCCA 超声检测需求。

## 4 结 论

通过对压电晶片、声透镜、背衬 3 方面进行选型及研制，通过性能测试及模拟检验验证得到如下结论：

(1) 在保证探头足够的灵敏度、耐高温以及考虑量产成本的前提下，采用 PT 材料压电晶片。根据此材料进行声透镜及背衬阻抗的研制。

(2) 考虑到探头制作空间，通过声透镜关键参数进行计算，最终确定 RCCA 超声探头声透镜曲率半径为 3.5 mm。选用氧化铝与阻尼胶混合制作成声透镜，声速为 2600 m/s。

(3) 通过热压法特殊工艺，制作出大于 2/3 压电晶片声阻抗的高阻抗背衬，背衬阻抗达到

$26 \times 10^5 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。

(4) 对探头进行功能性测试, 探头脉冲周期数为 1.5 周期, 频带宽度 105%, 探头放置在扫查器上进行模拟检验, 检验结果清晰可见, 检验精度高, 满足检验要求。

(5) 良品率: 由于宽频带的要求, 使得背衬阻尼很高, 导致降频明显。因此需采用更高频率的压电晶片, 晶片厚度仅有约 0.1 mm, 在装配时难度较大, 良品率的提升是后续工作的重点方向。因此, 需经验丰富、心细手稳的专业人员进行装配操作。

#### 参考文献:

- [1] 吴金锋, 孙加伟, 王春晓, 等. 基于 FFT 的核电站反应堆控制棒组件的超声测厚[J]. 无损检测, 2017, 39(3): 40-43.
- [2] 周红, 肖志, 陶书生, 等. 运行核电厂控制棒组件及其驱动机构异常事件的经验反馈[J]. 核安全, 2013 (1): 19-22.
- [3] 蔡家藩, 陈增武, 乔维, 等. 核电站反应堆控制棒束组件自动检测[J]. 无损检测, 2013, 35(5): 71-77.
- [4] 刘镇清, 王路. 脉冲超声波幅度谱测厚技术[J]. 计量技术, 1999(5): 6-8.
- [5] 凌海军, 宫秋云, 王健, 等. 高频窄脉冲探头在铝合金小径薄壁管超声检测中的应用[J]. 无损检测, 2017, 39(7): 61-64.
- [6] 张家骏, 向丹, 崔建英. 奥氏体不锈钢焊缝超声检测用换能器研究[J]. 清华大学学报, 1989, 29(2): 20-27.
- [7] 郑开胜, 刘景忠. 超声水浸聚焦窄脉冲探头的研制[J]. 无损检测, 1990, 12(10): 281-283.
- [8] LOW G C, JONES R V. Design and construction of short pulse ultrasonic probes for non-destructive testing[J]. ULTRASONICS, 1984, 22(2): 85-95.
- [9] ROKHLIN S, GOLAN S, GEFEN Y. Acoustic properties of tungsten-tin composites[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1981, 69(5): 1505-1506.
- [10] 冯若. 超声手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 1999: 105.

(责任编辑: 张祚豪)