

CNIC-01956

SNERDI-0040

长寿命、高性能核级滤芯国产化研制

张静华

(上海核工程研究设计院,上海,200233)

摘 要

描述了用于核电站一回路工艺系统,用来截留放射性腐蚀产物、机械杂质及破碎树脂的长寿命、高性能核级过滤器滤芯的研制开发,其中玻璃纤维滤芯用于压水堆核电站,纸质滤芯用于重水堆核电站。在研制中,对滤材的选用、骨架材料的选取和黏结剂配方的改进都经过了各单项试验,加工成型的滤芯也做了过滤器滤芯通量测试和模拟工况下的综合性能试验,各项技术指标满足在役电厂的使用要求,结构上的可靠性和安全性得到了验证,总体性能与国外同类产品水平相当。现已批量生产,用于工程。

关键词:过滤器滤芯 一回路工艺系统

Development of Nuclear Safety Class Filter Elements with Long Life and High Quality

(In Chinese)

ZHANG Jinghua

(Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute,
Shanghai, 200233)

ABSTRACT

This paper describes the development on nuclear safety class filter elements with long life and high quality used for collecting radioactive contaminants, fragments of resin and impurities in primary systems of NPPs. The filter elements made of glass fibre elements are used for PWR, and of paper elements are used for PHWR. During the research, a series of tests for optimization were performed for selection of filter material and the improvement of binder. The flow rate and comprehensive performance have been measured in simulated conditions. The result shows that the application requirements for operational NPPs can be met, and the reliability and safety of the frame are also be verified. The comprehensive performance of the filter elements is equivalent to that of oversea similar products. The products have been used in NPPs in operation.

Key words: Filter element, Primary process system

引言

在核电站一回路工艺系统运行中,为净化工艺系统水质和截留放射性腐蚀产物、机械杂质及破碎树脂等颗粒杂质,设置了十几只过滤器来满足核电站运行的水质要求。但过滤器滤芯都有其使用寿命,早期开发的滤芯一般3~6个月就需更换,而且在我国目前已建成的压水堆核电站中除了秦山核电站的滤芯是由国内自行研制的纸质滤芯(3个月更换)外,其余都是国外引进的核级玻璃纤维滤芯。已建成的重水堆核电站(秦山Ⅲ期)的过滤器是从国外进口的纸质滤芯,运行成本相当大。随着国内核电站的逐渐建成,过滤器的使用量越来越多,作为消耗品,迫切需要研制能适合各核电站使用而价格合理的系列产品,来改变国内核电站过滤器滤芯依靠进口的现状,实现国产化,降低核电站的运行成本,这将具有明显的经济效益和社会效益。

研制工作主要立足于国内,依据国内现有的生产能力,从滤材的选材、配方、加工工艺等研究着手并尽可能做到生产工艺稳定。将研制的滤芯经各项测试、热态模拟寿命试验以及同国外同类产品对比测试,性能满足使用要求,滤芯结构上的可靠性和安全性得到验证。经研制完成了秦山Ⅰ期压水堆使用的玻璃纤维滤芯(使用寿命 ≥ 12 个月)替代原纸质滤芯(使用寿命3个月),秦山Ⅲ期重水堆使用的纸质滤芯实现国产化,现已投入批量生产。

1 长寿命、高性能核级滤芯技术指标的确定

玻璃纤维滤芯的研制是以秦山Ⅰ期为开发目标来替代纸质滤芯,由于秦山Ⅰ期压水堆一回路工艺系统所用过滤器滤芯是自主设计、自主制造的,使用至今近20年,运行一直正常,证明其结构是可靠的、合理的,因此研制的滤芯结构基本沿用秦山Ⅰ期一回路工艺系统所用过滤器滤芯结构,只是由玻璃纤维滤材代替纸质滤材。另外为了确保滤芯寿命能延长至超过12个月,进一步提高结构设计的可靠性,在保证安装使用的前提下,结构上增设了加固措施。

在研制重点——玻璃纤维滤材的研制上,充分考虑回路的实际运行工况,立足自主开发。通过对国外同类产品的分析、原材料的选取、添加剂的配比和加工工艺的分析,认为要解决的关键技术是玻璃纤维滤材 SiO_2 析出量问题和满足最长的使用寿命15个月。另外为与国外核电发展提高过滤精度趋势同步,在研制 $5\ \mu\text{m}$ 滤材的经验基础上,对高精度的滤材($1\ \mu\text{m}$)进行了研制和探索。

纸质滤芯用于秦山Ⅲ期重水堆,其过滤器的结构和滤芯更换程序保持不变,因此,滤芯的结构也是沿用秦山Ⅲ期目前使用的过滤器结构。为确保滤材在运行中不对重水水质产生降级污染,过滤器滤材仍沿用纸质,而纸质滤材的原材料为天然植物——木材,品种繁多,同种木材生长在不同区域其组分也会稍有差别,因此除选取材料成分与进口滤材相似外,必须控制加工过程中各类杂质的摄入。同时调整滤芯黏结剂的配方,以满足 ≥ 10 个月的使用寿命。

1.1 玻璃纤维滤芯的技术指标

介质:硼酸水溶液,硼酸浓度 $0\% \sim 4\%$ (重量), $\text{pH}5.4 \sim 10.5$;

工作温度: $\leq 60\ ^\circ\text{C}$;

滤材:玻璃纤维;

过滤精度： $\geq 5\ \mu\text{m}$ ， $\geq 25\ \mu\text{m}$ (固体粒子和胶体)，以 $5\ \mu\text{m}$ 滤芯作为研制目标；

过滤效率：98%；

滤芯通量：2 t/h(单根滤芯)；

耐辐照剂量： $1 \times 10^4\ \text{Gy}$ ；

使用寿命： ≥ 12 个月(原为 3 个月)；

过滤器压差：初装时 $\Delta P = 0.035\ \text{MPa}$ ；失效时 $\Delta P = 0.25\ \text{MPa}$ (原为 $0.15\ \text{MPa}$ ，提高了纳污量)；

确保一回路中二氧化硅的量： $\leq 1\ \text{ppm}$ 。

1.2 纸质滤芯的技术指标

研制过滤器滤芯主要是在滤芯滤纸开发研制的基础上，以运行条件最为苛刻的主泵轴封过滤器滤芯为研制对象。如果此滤芯能满足要求，其他的过滤器滤芯应都能满足以上工况使用要求。

介质：重水；

工作温度： $\leq 65.6\ ^\circ\text{C}$ ；

滤材：纸质；

过滤精度： $\geq 5\ \mu\text{m}$ ， $\geq 25\ \mu\text{m}$ (固体粒子和胶体)，以秦山 III 期主泵轴封过滤器滤芯 ($5\ \mu\text{m}$) 作为研制目标；

过滤效率：98%；

滤芯通量：19 t/h(单根滤芯)；

耐辐照剂量： $1 \times 10^4\ \text{Gy}$ ；

使用寿命： ≥ 10 个月；

过滤器压差：初装时 $\Delta P = 0.035\ \text{MPa}$ ，失效时 $\Delta P = 0.206\ \text{MPa}$ 。

2 滤芯的研制

2.1 玻璃纤维滤芯

2.1.1 滤材成分的确定

国内玻璃纤维种类很多，都能耐 $1 \times 10^4\ \text{Gy}$ 的辐射剂量，但其耐水性不同，在水溶液中其 SiO_2 析出量也不同。因此，首先对国外同类产品进行分析比较，针对压水堆核电站弱酸性水质(硼酸水溶液介质)，结合国内生产工艺反复筛选和分析测试，选用中碱玻璃为基材，适当添加一些氧化物组分以提高滤材的耐水性，这样滤材本身具有了很好的耐酸性和耐水性，并有效降低了 SiO_2 的析出。

2.1.2 防止滤材 SiO_2 析出的措施

由于压水堆核电站一回路工艺系统所用过滤器长期浸泡在硼酸水溶液中，并且一回路水质对 SiO_2 含量的控制要求较高， SiO_2 析出物极容易沉结在燃料包壳上，加重对锆合金材料的腐蚀，因此，如何抑制玻璃纤维滤材长期浸泡在含硼介质中 SiO_2 的析出是研制过程中的最大难点。玻璃纤维是由 $[\text{SiO}_2]_4$ 网络构成，其表面未断裂的 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 键和断裂的 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 键都可以与水或水蒸气实现化学吸附，形成 OH^- 的基团的表面吸附层，然后再通过 OH^- 层的氢键吸附水分子。玻璃纤维表面吸附水分子，从而改变玻璃纤维表面原来的结构和性质，严重影响了玻璃纤维和树脂间的结合力。为了消除玻璃纤维表面

—OH的影响,研制合成了有机硅型贵重添加剂,对玻璃纤维表面进行处理,不仅获得了良好的黏结效果,而且进一步有效地阻止了硼酸溶液对玻璃纤维表面的侵蚀,使 SiO_2 不易析出。

2.1.3 加工工艺的确定

利用特有的造纸技术制造玻璃纤维滤材的坯纸,再对坯纸进行贵重添加剂处理,烘干后再在坯纸的两面复合有机纤维保护层,提高滤材的强度,以延长滤材的使用寿命。其中,配料的成分及配比、贵重添加剂成分及配比、打浆时间的控制、pH 的调节等都经过反复试验确定,并在制造过程中有效控制。

2.1.4 提高滤芯的结构可靠性

为确保滤芯热态寿命试验(秦山 I 期业主要求 12+3 个月)的顺利完成,并彻底消除下封端盖脱落的隐患,除改进黏结剂配方外,在保证安装使用的前提下,滤芯结构增设了加固措施。滤芯成品的结构完整性和黏结剂拉力经测试满足技术要求。

2.1.5 高精度玻璃纤维滤材的开发

由于过滤精度越高,玻璃纤维越细,越容易析出 SiO_2 ,因此在研制 $5\ \mu\text{m}$ 滤材的基础上,对 $1\ \mu\text{m}$ 玻璃纤维滤材作了探索性的研究和开发,完成各单项试验。经试验分析,初步满足技术要求。

2.2 纸质滤芯

2.2.1 进口滤材纤维成分的确定

由于纸质滤材原料取材于木材,而木材的品种繁多,同时,不同产地即便是同种木材,其化学成分也会稍有差别。考虑重水回路的运行工况,水质控制的要求,避免过多微量元素的析出造成重水降级等因素,必须选择与在役电厂现在使用的滤材纤维配比类似的材质,同时控制加工过程中各类杂质的摄入并防止其在水溶液中析出,以免造成重水污染。以秦山 III 期提供的慢化剂净化过滤器滤芯用滤纸进行滤材的纤维配比检测。

2.2.2 滤材的筛选

进口滤材纤维成分及配比确定后,根据 1) 基本材质相似;2) 耐破度、最大孔径、通流能力等参数能基本相当;3) 能满足使用要求原则,与多家造纸厂家一起,从滤纸的外形、颜色、柔软性、折叠性等各方面进行研究、探讨,在国内生产厂家现有的产品中筛选与进口滤材比较接近的纸质滤材,并充分考虑回路运行的条件和水质控制要求,尽量不对回路重水产生污染。经反复比对,确定滤材 HXHM-180-1 型滤纸和目前秦山 I 期主泵轴封水过滤器滤纸 AK210/30 型滤纸与秦山 III 期提供的滤材作对比测试。

经滤材纤维配比测试结果显示,AK210/30 型滤纸的纤维成分比较接近秦山 III 期目前使用的过滤器滤材。

同时,将进口滤材与 HXHM-180-1 型和 AK210/30 型滤纸在 $100\ ^\circ\text{C}$ 沸水中连续浸泡 90 h(累计),充分自然干燥后测定其重量、厚度、耐破度、最大孔径和通油能力,进行对比、评判。结果显示 HXHM-180-1 滤纸的最大孔径大于进口滤纸,即过滤精度低于进口滤纸,不满足使用要求。AK210/30 滤纸除通油能力比较低以外,其余技术指标都接近进口滤纸,特别是过滤精度比进口滤纸还要高。为确认 AK210/30 型滤纸是否可用于秦山 III 期回路运行,又进行了进口滤纸和 AK210/30 型滤纸的通水能力测试。结果同等面积 AK210/30 滤纸的水通量为 $111.92\ \text{m}^3/\text{h}$,远大于主泵轴封水的设计流量 $19\ \text{m}^3/\text{h}$,也大于秦山 III 期所有

工艺系统用过滤器滤芯(单根)的水通量。

2.2.3 滤材成分控制

控制滤材的加工工艺,以确保 AK210/30 滤纸在实际使用过程中不对回路重水产生污染。为验证所选滤材最终满足在役电厂的使用要求,对滤材进行了浸泡、测试。进口滤纸和 AK210/30 两种滤材经 93 °C 浸泡五天后,分别测试浸泡液中析出物的含量(见表 1)。从测试结果得出两种滤纸浸出物的成分基本相同,含量也基本相当。

表 1 浸泡液中析出物含量

滤材型号	滤材浸泡后析出的元素/(mg/kg)										
	Al	B	Ba	Ca	Fe	K	Na	S	Zn	Mg	Mn
进口(pH5.6)	11.4	28	0.7	185	1.1	22	152	74	3	56	<0.001
AK210/30(pH4.8)	2.6	—	0.3	130	1.1	44	290	190	6.3	97	1.2
进口(pH10.3)	16	12	0.7	82	1.1	33	—	75	3.7	48	<0.001
AK210/30(pH10.4)	14	30	0.3	140	1.9	53	—	130	3.3	48	0.3

2.2.4 滤芯的设计及制造

滤芯的结构设计基本参照秦山Ⅲ期工艺系统用过滤器滤芯,测绘后形成设备制造加工图进行滤芯加工。滤芯所采用的材质尽量与进口滤芯所用材质一样,国内无法采购的,也必须用相容的材料替代,以免产生对重水水质污染的不确定性。滤芯的滤材为 AK210/30 纸,改进的黏结剂和黏结工艺与秦山Ⅰ期纸质滤芯基本保持一致。

对滤芯成品进行结构完整性和黏结剂拉力测试,其拉力值以秦山Ⅲ期提供的进口滤芯样品数据为准,测试结果满足技术条件要求。

3 验证试验

3.1 玻璃纤维滤芯

3.1.1 滤材的单项试验

(1) 辐照试验:滤材辐照剂量为 1×10^4 Gy,满足核电站一回路工艺系统用过滤器耐辐照要求。

(2) 浸泡试验:进行了辐照前后研制滤材在不同水质条件及温度的浸泡试验以及国外同类滤材(已在国外核电站和国内核电站一回路工艺系统使用多年)和研制滤材的浸泡对比试验(见表 2),并进行了 SiO_2 析出量的分析测试,得到在同等浸泡条件下,研制产品比国外同类产品 SiO_2 析出量要小的结果,达到了预期的目标。

(3) 通油能力、最大孔径、耐破度测试:研制的玻璃纤维滤材经通油能力、最大孔径、耐破度测试均满足技术要求。

(4) 过滤精度和过滤效率测试:对滤材及过滤器芯子(满足多次通过试验台架要求的小样)进行了滤材过滤精度和过滤效率的测试。测试结果,HL-5($5 \mu\text{m}$)滤材和 SL-1($1 \mu\text{m}$)滤材的过滤精度分别达到了 $5 \mu\text{m}$ 和 $1 \mu\text{m}$,滤纸的过滤效率大于 98%。

表 2 研制滤材与国外同类滤材的对比数据

序号	浸泡液成分	浸泡温度/ ℃	进口滤材(5 μm) SiO ₂ 析出量/(mg/g)					研制滤材(5 μm) SiO ₂ 析出量/(mg/g)				
			浸泡天数/d					浸泡天数/d				
			3	6	10	14	18	3	6	10	14	18
1	200×10 ⁻⁶ B+1.3×10 ⁻⁶ LiOH 去离子水	50	0.32	0.51	0.75	0.91	1.08	0.08	0.18	0.35	0.49	0.64
2	500×10 ⁻⁶ B+2.2×10 ⁻⁶ LiOH 去离子水		0.25	0.44	0.65	0.83	0.98	0.07	0.15	0.29	0.42	0.57
3	1 000×10 ⁻⁶ B+2.2×10 ⁻⁶ LiOH 去离子水		0.16	0.35	0.55	0.74	0.94	0.04	0.09	0.19	0.31	0.46

3.1.2 冷态流量试验

完成各单项测试的滤芯,在流量 $2^{+0.05}$ m³/h 和室温条件下,通过冷、热态工况模拟试验台,测试过滤器滤芯初始压差为 0.02 MPa,满足初始压差 $\Delta P=0.035$ MPa 的要求。

3.1.3 热态寿命试验

将试制成的单根过滤器滤芯装入试验用过滤器,在模拟运行工况下作综合性能试验,以验证研制的过滤器滤芯实际应用于核电站的可靠性和使用寿命(见图 1 和图 2)。

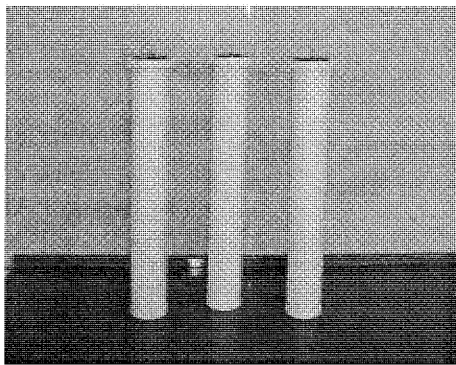


图 1 核级玻璃纤维滤芯

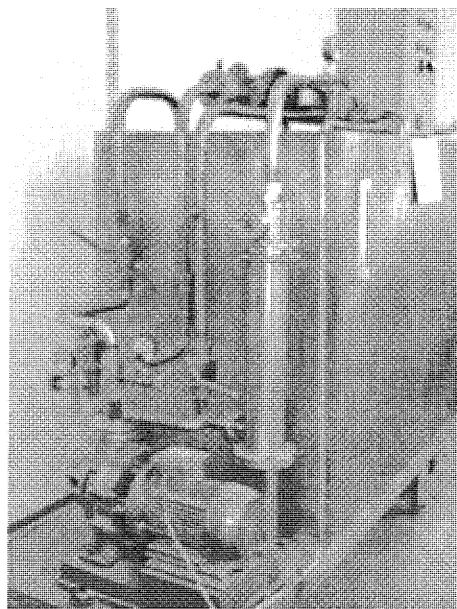


图 2 玻璃纤维滤芯冷、热态工况模拟试验台

热态模拟寿命试验运行了 12+3 个月。回路运行温度 45^{+5} °C,流量 $2^{+0.05}$ m³/h,回路运行正常,过滤器压差基本稳定。在回路水取样测试中,玻璃纤维滤芯试验水质 SiO₂ 析出量虽随时间变化有所上升,但在滤材加工工艺中添加了贵金属添加剂后,SiO₂ 析出有了较好

的抑制,在与国外同类产品的对比试验(≥ 1 个月)中, SiO_2 析出量也低于国外同类产品(见表3),而且随着水溶液中硼酸浓度($200 \times 10^{-6} \text{ B}$, $1\,000 \times 10^{-6} \text{ B}$)的提高, SiO_2 析出量也会相应的减少(见表4)。15个月热态模拟寿命试验完成后,把试验回路加热至 $80\text{ }^\circ\text{C}$,运行 8 h,过滤器压差基本稳定。完成上述试验后,介质更换成自来水,进行冷态失效压差试验,失效压差 $\geq 0.25 + 0.05(\Delta P_{\text{空}})$ MPa。随后将经过热态寿命试验和冷态失效压差试验的单根滤芯进行结构完整性和黏结剂强度测试,结果满足技术要求。

表3 $200 \times 10^{-6} \text{ B}$ 试验液 SiO_2 析出量对比测试数据 $\times 10^{-6}$

滤芯型号	试验时间/d								
	本底	3	6	9	13	17	21	27	34
研制	0.04	0.06	0.10	0.12	0.15	0.15	0.16	0.19	0.23
进口	0.03	0.10	0.14	0.16	0.17	0.20	0.22	0.24	0.27

表中 SiO_2 析出量未扣除原始液中的 SiO_2 含量(本底)。

表4 $1\,000 \times 10^{-6} \text{ B}$ 试验液 SiO_2 析出量对比测试数据 $\times 10^{-6}$

滤芯型号	试验时间/d								
	本底	3	6	9	13	17	21	27	34
研制	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	0.04	0.05	0.05
进口	<0.03	<0.03	<0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.07	0.08

表中 SiO_2 析出量未扣除原始液中的 SiO_2 含量(本底)。

3.2 纸质滤芯

3.2.1 冷态流量试验

在流量 $19^{+1} \text{ m}^3/\text{h}$ 和室温条件下,通过冷、热态工况模拟试验台,测试过滤器滤芯初始压差,进口滤芯为 0.018 MPa ,国产滤芯为 0.020 MPa ,基本相当,满足初始压差 $\Delta P = 0.035 \text{ MPa}$ 的要求。

完成上述试验后,进行国产滤芯失效压差试验,介质为自来水,失效压差 $\geq 0.206 + 0.05(\Delta P_{\text{空}})$ MPa,满足技术条件要求。

为进一步确保研制产品安全、可靠地用于在役电厂,滤芯进行了强度压差试验,主要检验滤芯结构中承受压差的金属零件——内骨架的强度,其指标值是失效压差值的 2 倍为 0.412 MPa 。为了顺利地进行此项试验,把滤芯的滤材更换成强度比较高的玻璃纤维,在冷、热态工况模拟试验台上进行试验,滤芯压差 $\geq 0.412 + 0.05(\Delta P_{\text{空}})$ MPa,没有发生损坏和变形,满足要求。

3.2.2 热态模拟寿命试验

完成各单项测试的滤芯样品,在热态模拟寿命试验台架上进行 ≥ 10 个月的热态试验(见图3和图4),以验证研制的过滤器滤芯实际应用于核电站的可靠性和使用寿命。回路运行温度 $65.6 \sim 70\text{ }^\circ\text{C}$,流量 $19^{+1} \text{ m}^3/\text{h}$,正常运行约 10.5 个月,过滤器压差基本稳定。

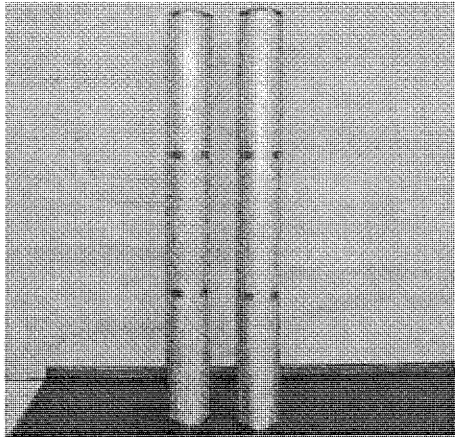


图3 核级纸质滤芯图

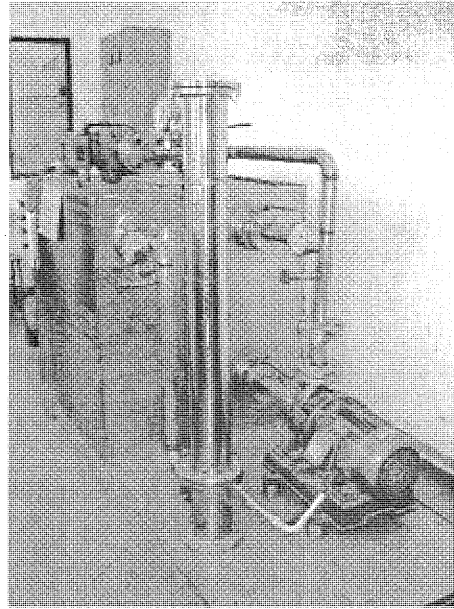


图4 纸质滤芯冷、热态工况模拟试验台

为了验证加工成型后的过滤器滤芯能更可靠地应用于在役电厂,而不对重水水质产生影响,造成重水降级,根据滤材浸泡后析出元素的对比数据,再结合重水堆核电站实际运行工况下的水质控制,与核电站技术人员共同确定了需重点控制的 K,Na,Mg,Mn 4 种元素的析出量。对国外同类产品在同等试验条件下进行了滤芯在试验液中微量元素析出量的对比试验,运行时间 ≥ 69 d(研制产品取样时间为 69 d),测试结果基本相当(见表 5)。

表 5 研制滤芯与进口产品 4 种元素析出量比较

滤芯型号		K	Na	Mg	Mn
进口	原始试验液	0.10	0.48	0.15	0.01
研制	成分/ 10^{-6}	0.09	0.50	0.16	0.01
进口	69 d 试验液	0.32	1.50	0.85	0.02
研制	成分/ 10^{-6}	0.44	2.84	1.31	0.02

4 长寿命、高性能核级滤芯的技术特点

(1) 核级玻璃纤维 SiO_2 析出量控制

针对压水堆核电站一回路运行水质,用抗酸性玻璃纤维作为基材,并根据玻璃纤维表面结构和化学稳定性,对滤材表面进行贵重添加剂处理,有效地阻止了硼酸水溶液对玻璃纤维表面的侵蚀。经过反复的摸索和不断的改进,并有效地稳定生产工艺过程,形成了一定的操作工艺,达到了 SiO_2 析出量微量(10^{-6} 级)控制的预期目标。

(2) 高精度($1 \mu\text{m}$)玻璃纤维滤材制造工艺

国内目前没有 $\leq 1 \mu\text{m}$ 的玻璃纤维滤材,必须从喷丝工艺开始摸索,并克服玻璃纤维丝

越细,越容易析出 SiO_2 的难题。研制的滤材试样在多次通过试验台(国际通用过滤设备精度和效率测试方法)上测定其过滤效率和过滤精度,5 μm 和 1 μm 滤材其过滤效率都大于 98%。

(3) 长寿命核级玻璃纤维滤芯结构设计

除提高滤材的运行寿命外,改进黏结剂配方,并在滤芯结构上增设加固措施,以确保滤芯在长期运行工况下的结构完整性。在经过 15 个月的热态模拟试验运行后滤芯保持完好。

(4) 纸质滤材筛选

以在役电厂提供的过滤器滤芯用滤纸的纤维配比测试数据为依据,从滤纸的外形、颜色、柔软性、折叠性等方面进行研究分析,将筛选出的类似产品与进口滤材作各项对比试验,最终选取 AK210/30 型滤材,其各项技术指标均达到预期目标。

5 结 论

研制的滤芯经过反复试制及对比测试,其各项技术指标与国外同类产品相当,结构上的可靠性和安全性也得到了验证,满足了在役电厂的使用要求,并可逐步推广至国内其他核电站使用,替代进口产品实现国产化,降低运行成本。

新型玻璃纤维滤材与改进的长寿命核级滤芯结构设计相结合,使玻璃纤维滤芯的使用寿命延长至 15 个月(业主要求。国外同类产品也未达到这一目标),大大减少了放射性过滤器滤芯的更换周期,这样即减少了操作人员在放射性工作场所的工作时间,又大大降低了固体废物量,对后期处理、储存、最终处置都极为有利。

研发的 1 μm 高精度的玻璃纤维滤材,单项指标均满足技术要求,过滤效率达到 98%。为跟上国外核电发展趋势,既满足尽量延长使用寿命以减少废物量,又希望提高其过滤精度,更有效的净化反应堆冷却剂、降低冷却剂中颗粒度杂质的含量,最终降低反应堆冷却剂和环境的放射性剂量水平打下了扎实的基础。

长寿命、高性能压水堆用玻璃纤维滤芯,其技术性能达到了国外同类产品水平,使用寿命达到 15 个月(一个换料周期+3 个月余量)。现已在出口巴基斯坦的恰希玛一期一回路工艺系统试用,完全满足使用工况;国产重水堆用纸质过滤器滤芯,其技术性能与国外同类产品相当,使用寿命达到 10 个月,并已应用于部分系统。该产品的研制成功,大大降低了核电站的运行成本,为实现核电国产化作出了积极的贡献。