



## 核电厂一回路钝化研究

于淼, 顾钰, 曾晓敏, 徐刚, 桂璐廷, 武桐

### Study on Passivation of Primary Circuit of Nuclear Power Plant

Yu Miao, Gu Yu, Zeng Xiaomin, Xu Gang, Gui Luting, and Wu Tong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2023.05.0163>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### [压水堆核电厂一回路首次钝化工艺研究](#)

Study on Initial Passivation Process of Primary Loop of PWR Nuclear Power Plants

核动力工程. 2020, 41(2): 84–88

#### [基于iForest-Adaboost的核电厂一回路故障诊断技术研究](#)

Research on Fault Diagnostic Technology of Primary Loop of Nuclear Power Plant Based on iForest-Adaboost

核动力工程. 2020, 41(3): 208–213

#### [核电厂一回路管座焊缝超声波检测仿真研究](#)

Simulation Research of Ultrasonic Inspection of Primary Tube Seat Weld in Nuclear Power Plants

核动力工程. 2020, 41(2): 145–149

#### [岭澳核电站一回路抽真空排气方法研究与应用](#)

Research and Application of Vacuum Exhaust Method in Primary Loop of Ling'ao Nuclear Power Plant

核动力工程. 2018, 39(5): 91–94

#### [基于泄漏监测数据综合的核电厂反应堆一回路压力边界泄漏诊断技术研究](#)

Comprehensive Leakage Diagnosis Technology of Primary Loop Pressure Boundary of Nuclear Power Plants Based on Leakage Monitoring Data Synthesis

核动力工程. 2021, 42(3): 188–193

#### [基于数据挖掘的一回路小泄漏故障预警研究](#)

Study on Early Warning of Small Leakage in Primary Loop Based on Data Mining

核动力工程. 2021, 42(5): 232–239



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2023)05-0163-06; DOI:10.13832/j.jnpe.2023.05.0163

# 核电厂一回路钝化研究

于 淼, 顾 钰, 曾晓敏, 徐 刚, 桂璐廷, 武 桐

上海核工程研究设计院股份有限公司, 上海, 200233

**摘要:** 在核电厂一回路的设备表面形成致密的钝化膜是核电厂热态功能试验的一项重要工作。钝化膜的质量直接影响核电厂带核运行期间的辐射源项。因此, 做好热态功能试验期间一回路的钝化具有重要意义。热态功能试验期间化学控制决定着钝化膜的质量, 本文首先简要分析了国内核电商用各堆型水化学的特点, 其次分析了一回路冷却剂运行温度下的 pH 值 ( $\text{pH}_T$ ) 的影响因素和硼碱曲线。重点分析了国内 4 种堆型的钝化应用实例, 并讨论了钝化膜形成的化学控制机理, 最后对一回路钝化期间的化学控制给出改进措施。

**关键词:** 核电厂; 硼碱曲线; 一回路; 钝化

**中图分类号:** TG174.4; TL4 **文献标志码:** A

## Study on Passivation of Primary Circuit of Nuclear Power Plant

Yu Miao, Gu Yu, Zeng Xiaomin, Xu Gang, Gui Luting, Wu Tong

Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute Co., Ltd., Shanghai, 200233, China

**Abstract:** It is an important work to forming a dense passivation film on the surface of the primary equipment in the hot functional test (HFT). The quality of the passivation film directly affects the radiation source term during the nuclear operation of the power plant. Therefore, it is of great significance to do a good job in the passivation of primary circuit during the HFT. Chemical control determines the quality of passivation film. This paper first briefly analyzes the characteristics of water chemistry of various types of nuclear power reactors in China, and then analyzes the influencing factors of pH value ( $\text{pH}_T$ ) and boron-alkali curve at the operating temperature of primary coolant. The passivation application examples of four types of reactors in China are emphatically analyzed, and the chemical control mechanism of passivation film formation is discussed. Finally, the improvement measures for chemical control during primary circuit passivation are given.

**Key words:** Nuclear power plant, Boron-alkali curve, Primary circuit, Passivation

## 0 引言

核电厂在首次装料前, 需验证在设计规定的运行模式下和在整个设计的运行范围内构筑物、系统和部件的全部运行特性<sup>[1]</sup>, 包括冷态功能试验和热态功能试验 (简称冷试和热试)。热试是模拟核电厂实际运行工况, 在典型的温度、压力和流量下的预期运行事件, 验证系统性能与设计要求相一致。

在一回路设备表面形成致密的钝化膜是核电厂热试的一项重要工作。钝化膜的质量直接影响核电厂带核运行期间的辐射源项。因此, 做好热试期间一回路的钝化具有重要的意义。热试期间化学控制决定着钝化膜的质量, 因此本文首先简要分析了国内各压水堆型水化学的特点, 其次简要分析了一回路冷却剂运行温度下的 pH 值 ( $\text{pH}_T$ ) 的影响因素及硼碱曲线。重点分析了国内各压水

收稿日期: 2022-10-27; 修回日期: 2023-01-09

作者简介: 于 淼 (1983—), 男, 高级工程师, 现从事核电化学环保相关工作, E-mail: 274416088@qq.com

堆型一回路钝化应用实例,并讨论了钝化膜形成的化学控制机理。

## 1 核电厂水化学特点

目前,国内核电商用压水堆堆型主要有M310、VVER、EPR、AP1000、CANDU以及具有自主知识产权的三代核电——华龙一号(HPR1000)。反应堆压力容器一般用锰铜镍低合金钢(内衬奥氏体不锈钢)材质;一回路主管道采用奥氏体不锈钢材质;蒸汽发生器传热管管材不同堆型采用的材质不同,共有Inconel 600、Inconel 690、Incoloy 800及奥氏体不锈钢<sup>[2]</sup>4种。燃料包壳材料有Zr-4、M5、Zirlo、E110、Zr-1%Nb五种。

各堆型均采用还原弱碱性水化学方法进行化学控制。VVER机组采用添加KOH的方式维持pH值为碱性,通过在一回路加氨辐照生成氢的方式维持还原环境。CANDU重水堆采用普通LiOH调节一回路pH值,并且将pH值控制在10.2~10.8(期望值10.2~10.4),维持一回路系统过量溶解氧(3~10 mg/kg)以降低氧浓度<sup>[3]</sup>。其他堆型均采用添加富集LiOH,通过硼-锂协调的方法控制一回路pH值,通过向一回路添加H<sub>2</sub>来控制氧含量。

## 2 pH<sub>T</sub>的影响因素和硼碱曲线

pH<sub>T</sub>是反应堆冷却剂最主要的水化学参数。水的电离程度随温度的升高而增加,温度升高,H<sup>+</sup>浓度增加,pH<sub>T</sub>降低,一般一回路系统的平均温度为300℃,中性水的pH<sub>T</sub>为5.6。制定pH<sub>T</sub>的范围主要考虑3个因素:燃料元件的完整性、结构材料的完整性、腐蚀产物在堆芯的沉积与迁移。这3个因素最终确定一回路pH<sub>T</sub>的范围为6.9~7.4,目前国内各堆型pH<sub>T</sub>目标值为7.1~7.3。

目前通过硼与碱金属协调控制一回路pH值,即硼碱曲线理论。硼碱曲线理论最早由美国专家提出,因腐蚀产物类型的不同,加上燃料包壳材料的不断改进和降低寿期初辐射源项等原因,硼碱曲线理论经历了协调硼碱曲线、改进硼碱曲线和高pH协调硼碱曲线3个阶段。目前国内外均采用改进硼碱曲线,只有少数机组采用高pH协调硼碱曲线。在运行温度300℃下,国外某

VVER机组采用协调硼碱曲线,pH<sub>T</sub>随运行时间的变化见图1<sup>[4]</sup>;采用改进硼碱曲线,pH<sub>T</sub>随运行时间的变化见图2<sup>[4]</sup>。

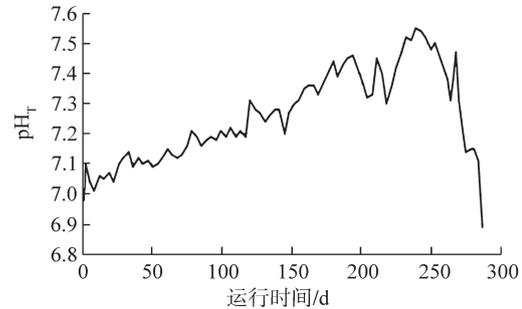


图1 采用协调硼碱曲线时pH<sub>T</sub>随运行时间的变化  
Fig.1 Change of pH<sub>T</sub> with Operation Time Using Coordinated Boron Alkali Curve

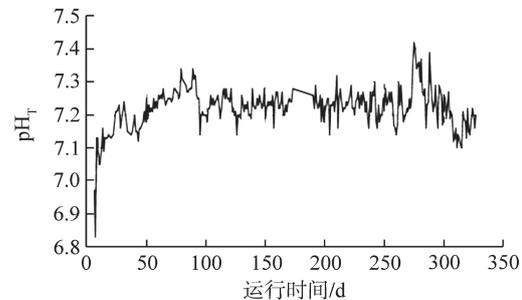


图2 采用改进硼碱曲线时pH<sub>T</sub>随运行时间的变化  
Fig.2 Change of pH<sub>T</sub> with Operation Time Using Improved Boron Alkali Curve

## 3 国内各堆型一回路钝化化学控制实例

### 3.1 M310 机组

M310机组一回路钝化的主要特点是只加入碱化剂LiOH,维持一回路的弱碱性。

钝化持续时间、pH<sub>T</sub>值、悬浮物浓度作为确定钝化效果的重要指标。加入LiOH的一回路冷却剂温度一般为90℃,钝化开始的温度为260℃,维持时间在300 h以上<sup>[5]</sup>。钝化期间的水质要求见表1<sup>[6]</sup>,具体流程如图3<sup>[6]</sup>所示。

个别国外的M310机组钝化持续时间有26 d,长于国内机组,同时维持pH<sub>T</sub>值在7.2,Li的平均浓度为0.51 ppm(ppm=mg/L)。

### 3.2 VVER 机组

VVER机组一回路钝化的主要特点是只加入碱化剂KOH,维持一回路的弱碱性。

加入KOH的温度一般为177℃,钝化开始

表 1 M310 机组热态功能试验钝化期间水质要求  
Tab. 1 Water Quality Requirements during Passivation in M310 HFT

参数名	取值范围
pH <sub>25℃</sub>	9.80~10.50
LiOH浓度/ppm	0.40~2.20
O <sub>2</sub> 浓度/ppm	<0.10 (温度大于120℃时)
Cl <sup>-</sup> 浓度/ppm	<0.15
F <sup>-</sup> 浓度/ppm	<0.15
SO <sub>4</sub> 浓度/ppm	<0.15
SiO <sub>2</sub> 浓度/ppm	<0.40
悬浮物浓度/ppm	<0.10
Na <sup>+</sup> 浓度/ppm	<0.20
H <sub>2</sub> 浓度/ppm	<5.00

时一回路冷却剂温度和压力为 285℃/15.7 MPa, 钝化持续时间在 300 h 以上<sup>[4]</sup>。钝化期间的水质要求如表 2<sup>[4]</sup> 所示。

水质标准较 M310 机组多了 H<sub>2</sub> 指标, 因为即便不向一回路中加氢, 钝化反应也会产生少量的 H<sub>2</sub>, 因此, 为了在一回路冷却剂中保持足够的氢含量, 热试期间下泄流不经除气器。同时, 整个钝化全过程中化学与容积控制系统净化床在最大流速下连续运行, 以去除冷却剂中腐蚀产物。

### 3.3 HPR1000 机组

HPR1000 机组一回路钝化与 M310 和 VVER 机组不同, 主要特点是加入了碱化剂 LiOH 和 H<sub>2</sub><sup>[7]</sup>, 维持一回路弱碱性的同时保证了一回路的还原性。

具体流程为: 机组至热停平台时, 向一回路注入氢, 此时作为钝化的开始时间, 达到目标 H<sub>2</sub> 浓度 35 NmL/kg, 然后向一回路注入 LiOH,

浓度目标 2ppm, 钝化过程中保持温度高于 260℃。

一回路冷却剂温度 25℃ 时, pH<sub>25℃</sub> 值控制在 9.8~10, 悬浮物浓度小于 1ppm, 钝化持续时间 300 h 以上。在钝化结束时向一回路注入 H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, 其目标浓度为 20ppm。

一回路冷却剂温度低于 80℃ 时, 注入双氧水 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 将表面一些化合物氧化成可溶状态, 同时启动化学与容积控制系统净化床最大流量进行净化。

### 3.4 AP1000 机组

AP1000 机组一回路钝化与 M310、VVER、HPR1000 三类机组均不同, 除了加入了碱化剂 LiOH 和 H<sub>2</sub>, 为了更好地控制源项及优化钝化膜, 加入了 (CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>Zn, 从一回路冷却剂温度为 292℃ 开始计算钝化时间, 需维持在 336 h 以上。

这种钝化方案有 2 个主要目标: ①在系统表面形成保护性的氧化膜; ②通过净化系统去除可释放的腐蚀产物, 主要是镍和铁, 从而形成富含铬的氧化物。同时, 在金属氧化物表面加锌, 从而将后续钝化期间的腐蚀降至最低。

整个钝化过程分为 3 个阶段: ①碱性环境阶段, 一回路冷却剂温度为 177℃ 时, 加入 LiOH、H<sub>2</sub> 和 (CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>Zn, 以维持碱性还原环境。这一阶段与正常运行期间水质环境基本一致, 只是在没有燃料的情况下, 不添加 H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, 可以使用更高浓度的锌; ②酸性还原阶段, 在正常工作温度和压力 (NOT/NOP) 平台结束时停止加锌, 去除 LiOH, 同时将 H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 添加到反应堆冷却剂中, 从而开始促进腐蚀产物的释放; ③酸性氧化性环境阶段, 机组冷却后, 添加 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 以创造氧化条件, 促进镍的溶解, 后通过净化系统去除。

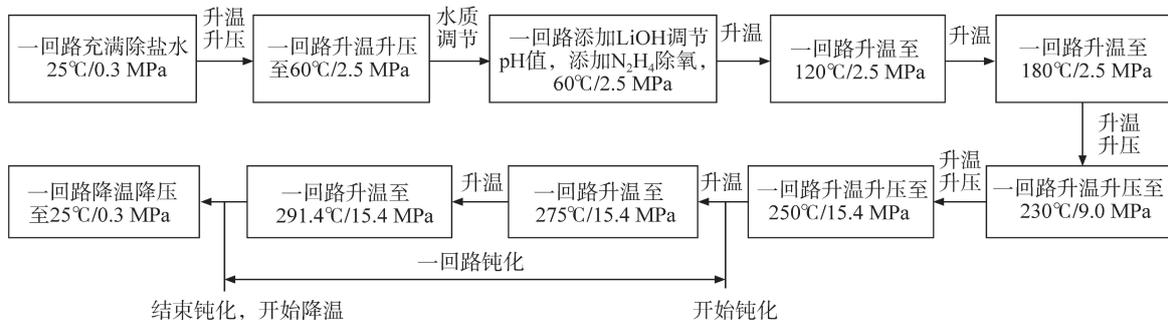


图 3 M310 型压水堆核电机组热试期间一回路钝化工艺流程  
Fig. 3 Process Flow of Primary Circuit Passivation during HFT of M310 PWR Unit

表2 VVER 机组热态功能试验钝化期间水质要求

Tab. 2 Water Quality Requirements during Passivation in VVER HFT

参数名	取值范围
pH <sub>25℃</sub> <sup>①</sup>	5.6~7.5
pH <sub>25℃</sub> <sup>②</sup>	9~10.5
pH <sub>300℃</sub> <sup>②</sup>	6.9~7.5
Cl <sup>-</sup> 浓度/ppm	<0.1
F <sup>-</sup> 浓度/ppm	<0.1
K <sup>+</sup> 浓度/ppm <sup>②</sup>	2~5
O <sub>2</sub> 浓度/ppm <sup>③</sup>	<0.02
SiO <sub>2</sub> 浓度/ppm	<0.2
悬浮物浓度/ppm	<0.2
H <sub>2</sub> 浓度/(NmL·kg <sup>-1</sup> ) <sup>④</sup>	2~5

注：①加钾前；②加钾后；③>120℃时O<sub>2</sub>要求；④指标期望值，NmL为标准状态下的体积。

水质要求及具体流程见表3<sup>[5]</sup>；AP1000型压水堆核电机组热试的钝化工艺流程详见文献[8]。

表3 AP1000 机组热态功能试验钝化水质要求

Tab. 3 Water Quality Requirements during Passivation in AP1000 HFT

参数名	限值与范围	参数名	限值与范围
pH <sub>292℃</sub>	7.3	O <sub>2</sub> 浓度/ppm	<0.1
pH <sub>25℃</sub> <sup>①</sup>	9.5~10.1	Zn <sup>2+</sup> 平均浓度/ppb <sup>③</sup>	46
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 浓度/ppm	<0.15	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> 浓度/ppm	500~1000
Cl <sup>-</sup> 浓度/ppm	<0.15	H <sub>2</sub> 浓度/(NmL·kg <sup>-1</sup> )	30
F <sup>-</sup> 浓度/ppm	<0.15	悬浮物浓度/ppm	<2
Li <sup>+</sup> 平均浓度/ppm	0.63	pH <sub>25℃</sub> <sup>②</sup>	4.0~5.6

注：①钝化期间；②冷却后；③ppb=μg/L

### 3.5 小结

热试期间化学控制主要有3种方式：碱性控

制、碱性还原控制和注锌碱性还原控制，具体对比见表4。

汲大朋<sup>[6]</sup>通过试验论证得出碱性控制下，钝化膜的结构为双层膜，内层为富Cr氧化层，外层为磁铁矿结构的氧化物，同时证实钝化时间与钝化温度存在函数关系，钝化温度提高，钝化时间缩短，钝化试验温度应不低于260℃。Milan Zmítko<sup>[4]</sup>通过扫描电子显微镜（SEM）、能谱仪（EDX）和X射线衍射分析（XRD）技术对钝化膜的形貌、化学成分和相组成进行了研究，发现VVER机组的碱性控制方案中钝化膜由具有不同晶格参数的2个尖晶石组成。腐蚀层的元素组成对应于尖晶石(Ni<sub>0.05</sub>Fe<sub>0.8</sub>Cr<sub>0.15</sub>)<sub>3</sub>O<sub>4</sub>至(Ni<sub>0.1</sub>Fe<sub>0.6</sub>Cr<sub>0.3</sub>)<sub>3</sub>O<sub>4</sub>，其钝化膜具有相当均匀和紧凑的结构，厚度为(0.6±0.1) μm。

### 4 钝化膜形成的化学控制机理分析与讨论

热试在特定的水化学条件下进行，目的是在一回路表面形成保护性钝化膜，并通过净化系统去除可释放的腐蚀产物。在一回路设备表面上形成稳定的保护性钝化膜要求的水化学条件，应尽可能接近正常运行条件。只有以这种方式，才有可能避免钝化膜的任何变形以及在带核运行时钝化膜保护特性。除了特定的水化学条件外，热试过程中工艺参数（温度、压力等）的稳定性、净化系统的投用和足够的钝化时间是影响钝化膜质量的另一个关键因素。核电厂一回路钝化技术导则<sup>[5]</sup>中还提到了影响因素还应包括一回路的材料及材料的加工制造水平。

正常运行主要通过控制一回路pH<sub>T</sub>值、氧化还原电位（溶氢含量）、杂质浓度来实现水质控

表4 各堆型热试期间化学控制对比

Tab. 4 Comparison of Chemical Control in HFT of Each PWR Type

堆型	M310和VVER	HPR1000	AP1000
方式	碱性控制	碱性还原控制	注锌碱性还原控制
化学添加物	LiOH/KOH	LiOH+H <sub>2</sub>	LiOH+H <sub>2</sub> +Zn
钝化开始温度/℃	260	H <sub>2</sub> 达到目标浓度时的温度	292
钝化维持时间/h	>300	>300	>336
pH <sub>25℃</sub>	9.8~10	9.8~10	9.5~10.1（注硼后4.0~5.6）
Li <sup>+</sup> 或K <sup>+</sup> 浓度/ppm	0.5~2.0（目标2~5）	约2.0	0.3~0.8（目标0.5）
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> 浓度/ppm	—	20	500~1000
悬浮物浓度/ppm	<1	<1	<2

制，热试钝化期间也应按此进行考虑。

#### 4.1 pH<sub>T</sub> 值

功率运行期间 pH<sub>T</sub> 值的通用范围为 6.9~7.4。各堆型具体 pH<sub>T</sub> 值的控制通过硼碱曲线实现，各堆型有各自的目标 pH<sub>T</sub>。

热试期间，因生成钝化膜的短时间内一回路没有添加 H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>，所以无需协调，只需要按照各自的目标 pH<sub>T</sub> 计算目标 Li<sup>+</sup>浓度和 K<sup>+</sup>浓度，加碱量的具体计算结果见表 5（示例为 300℃）。

表 5 热试期间目标 pH<sub>T</sub> 需加碱量对比

Tab. 5 Comparison of Alkali Dosage Required for Target pH<sub>T</sub> in HFT

pH <sub>T</sub>	6.9	7.0	7.1	7.2	7.3	7.4
Li <sup>+</sup> 浓度/ppm	0.22	0.3	0.35	0.45	0.55	0.7
K <sup>+</sup> 浓度/ppm	1.20	1.6	2.00	2.50	3.20	4.0

各堆型应根据各自的钝化温度和 pH<sub>T</sub> 控制策略来合理选择碱化剂量。

#### 4.2 钝化过程中联氨问题

热试期间一回路冷却剂需要在 120℃ 下除掉冷却剂中的氧气，各堆型添加联氨的温度不同，数量亦不同，核电厂一回路钝化技术导则<sup>[5]</sup>中指出加锌的碱性还原控制中联氨的注入量应为氧气浓度的 1.5 倍，以避免其在冷却剂中形成氨。根据美国电力科学研究所（EPRI）对各种表面处理技术的研究结果<sup>[9]</sup>，氨和联氨存在下的表面预处理导致形成厚、多孔、低密度的钝化层，与其他预处理技术相比，钝化层具有更高的腐蚀释放和<sup>60</sup>Co 活性。因此联氨的加入量需慎重考虑。

#### 4.3 碱化剂加入时间

各种控制方案中，加入碱化剂的时间点是不相同的。碱性控制方案中，90℃ 前加入 LiOH；VVER 机组 177℃ 时加入 KOH；加锌碱性还原控制方案中 177℃ 时加入 LiOH。一回路冷却剂温度高于 170℃ 时开始投加碱化剂，可以促进 Fe(OH)<sub>3</sub> 转化为 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub><sup>[4]</sup>。因此，碱化剂的加入时间需要予以关注。

关于氢气、醋酸锌的加药量及时间对电化学电位及氧化膜的影响，国内外未见有相关研究及报道。

#### 4.4 悬浮物的浓度测量

核电厂一回路钝化技术导则<sup>[5]</sup>中指出悬浮物

是衡量钝化膜质量的重要标准。此外，在 EPRI 的许多文献中也多次将其作为水质控制的重要参数。有的机组将个别系统的悬浮物浓度限值定为小于 50ppb。

透光率、浊度和悬浮物含义相近。透光率是通过测定水的吸光度，再换算为透光率，VVER 机组常用。悬浮物和浊度虽然都是表示水中悬浮物固体含量，但是两者所表示的悬浮颗粒直径却不相同，悬浮物所表示的颗粒粒径为 1 μm 以上，而浊度表示的颗粒粒径为 1 nm~1 μm，即通常所说的胶体物质，而且两者的测试方法也不同，前者是过滤法测定，后者是利用光学原理测定，两者并没有换算关系。美国对于悬浮物推荐的分析方法为美国材料与试验协会（ASTM）D5907—2010《水中可过滤性和非过滤性物质的标准试验方法》，适用于悬浮物浓度大于 4ppm 的测量。国内悬浮物浓度的测量有 DZ/T 0064.8—2021《地下水水质分析方法 悬浮物的测定》和 GB/T 11901—1989《水质悬浮物的测定重量法》，原理与美国分析方法一致，均不适用于痕量悬浮物的测量。

#### 4.5 化学与容积控制系统运行

化学与容积控制系统的运行是影响钝化膜质量及正常运行期间辐射源项的另一重要因素。钝化期间在一回路设备表面上形成稳定的保护性钝化膜与正常运行期间要求的水化学条件接近。钝化膜的结构为双层膜，内层为富 Cr 氧化层，外层为磁铁矿结构的氧化物。钝化过程中会有腐蚀产物释放。国外某核电机组<sup>[4]</sup>运行经验表明因钝化阶段时间较短，同时钝化期间化学与容积控制系统净化床的运行时间较短，钝化过程中释放的腐蚀产物未被去除，在随后的反应堆运行期间被激活并重新分布在一回路。因此，建议钝化期间净化床保持大流量运行，以去除钝化期间释放的腐蚀产物。

## 5 结论与建议

本文重点分析了国内各堆型的一回路钝化应用实例，并讨论了钝化膜形成的化学控制机理，最后对一回路钝化期间化学控制给出如下建议：

（1）热试钝化期间 pH<sub>T</sub> 指标非常重要。因钝化期间没有加入硼酸，所以无需用硼碱协调曲线

表征,需重点关注加入碱化剂的量。同时,依据 pH 控制大纲,重点关注常温下  $\text{pH}_T$  的控制。

(2) 钝化期间联氨的注入量不应太高。同时,温度高于  $170^\circ\text{C}$  时开始投加碱化剂。关于氢气、醋酸锌的加药量及时间对电化学电位及氧化膜的影响,国内外未见有相关研究及报道,国内科研单位应予以相关研究。

(3) 痕量悬浮物的检测难度偏大,高温气冷堆中已不再将悬浮物作为水化学参数控制,建议我国各压水堆钝化期间不再将悬浮物作为化学控制参数。

(4) 化学与容积控制系统净化床的运行是影响钝化膜质量及正常运行期间辐射源项的另一重要因素,建议钝化期间净化床保持大流量运行,以去除钝化期间释放的腐蚀产物。

#### 参考文献:

- [1] 国家能源局. 压水堆核电站装料前热态性能试验要求: NB/T 20316-2014[S]. 北京: 中国原子能出版社, 2014.
- [2] 王海平, 于森, 任丽娟. 田湾核电站一回路水化学优

化与辐射源项控制[J]. 辐射防护, 2018, 38(5): 415-421.

- [3] 刘新福. 压水堆一回路水化学对燃料包壳完整性的影响[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [4] ZMÍTKO M. Primary coolant technology and experience in VVER units[C]. Japan:14th International Conference on the Properties of Water and Steam, Kyoto, 2010: 539-544.
- [5] 国家能源局 发布. 核电厂一回路钝化技术导则: NB/T 20535-2018[S]. 北京: 中国原子能出版社, 2018.
- [6] 汲大朋, 张烨亮. 压水堆核电站一回路首次钝化工艺研究[J]. 核动力工程, 2020, 41(2): 84-88.
- [7] 陈旭, 尹锐佳. 三代核电机组一回路钝化加氢工艺问题研究及改进应用[J]. 核科学与工程, 2022, 42(2): 359-364.
- [8] 西屋电气有限责任公司. 用于核电厂的热态功能试验期间的主系统材料钝化的化学工艺: 中国, CN111254442A[P]. 2020-06-09.
- [9] OCKEN H. Surface treatments to reduce radiation fields: Test-loop studies and plant demonstrations: EPRI-NP-5209-SR[R]. Palo Alto: Electric Power Research Institute (EPRI), 1988.

(责任编辑: 刘 君)