

AP1000 核电机组二回路系统加药量计算

马现奇, 许梧君, 潘荣辉
(国核工程有限公司, 上海 200233)

摘要:以 AP1000 核电机组为例, 在凝结水精处理系统(CPS)投运和未投运两种运行模式下进行二回路系统加药量的计算, 得出机组运行时氨与联氨的理论添加量, 为 AP1000 核电机组二回路加药系统的设计及配置提供依据和参考。

关键词: AP1000 核电机组; 氨; 联氨; 凝结水精处理系统

中图分类号: TM 623.99 文献标志码: A 文章编号: 1674-1951(2017)08-0021-03

0 引言

三代核电 AP1000 机组对二回路水质的控制比常规核电机组更加严格。AP1000 核电机组二回路系统一般通过控制 pH 值和溶解氧含量来减少系统以及设备的腐蚀。AP1000 核电机组二回路系统采用分别添加氨(NH₃)和联氨(N₂H₄)的全挥发处理(AVT)方法来控制系统的 pH 值和溶解氧含量, 以保持二回路系统水化学参数在适当的范围内, 使蒸汽发生器(SG)在正常运行和停运保养过程中的腐蚀和固体物质的沉积减至最少^[1]。

凝结水精处理系统(CPS)在机组启动、停运或凝汽器泄漏期间投入运行, 机组运行正常水质稳定后 CPS 退出运行。AP1000 核电机组在 CPS 投运时控制二回路系统的 pH 值 ≥ 9.3 , CPS 退出运行时控制二回路系统的 pH 值 ≥ 9.6 ^[2]。本文针对 CPS 投运与未投运 2 种运行工况, 对二回路系统 NH₃ 与 N₂H₄ 的加药量进行计算, 为 AP1000 核电机组二回路加药系统的设计与配置提供依据。

1 二回路系统基础参数

二回路系统热平衡图是进行二回路系统 NH₃ 与 N₂H₄ 的加药量计算的基础, 图 1 为某 1 000 MW 机组二回路系统简化热平衡图^[3], 图中: q_{mVAC} 为抽气(VAC)流量; q_{mFW} 为主给水(FW)流量; q_{mSGBD} 为 SG 排污流量; q_{mCON} 为凝结水流量; q_{mLP} 为低压缸(LP)乏汽流量; q_{mHP} 为高压缸(HP)乏汽流量; q_{mMSR} 为汽水分离再热器(MSR)再热蒸汽流量; q_{mMSRE} 为 MSR 抽气流量; q_{mLPE} 为 LP 抽气流量; q_{mHPE} 为 HP 抽气流量; K_{NH_3} 为 NH₃ 气液分配系数; $K_{N_2H_4}$ 为 N₂H₄ 气液分配系数。

2 NH₃ 和 N₂H₄ 的化学特性

2.1 气液分配系数的计算

根据美国电力研究协会(EPRI)的研究报告, 不同温度下 NH₃ 与 N₂H₄ 的气-液分配系数见表 1^[4]。根据线性插入法, 计算不同温度下 SG, MSR 和凝汽器(CON)的气液分配系数, 计算结果见表 2。

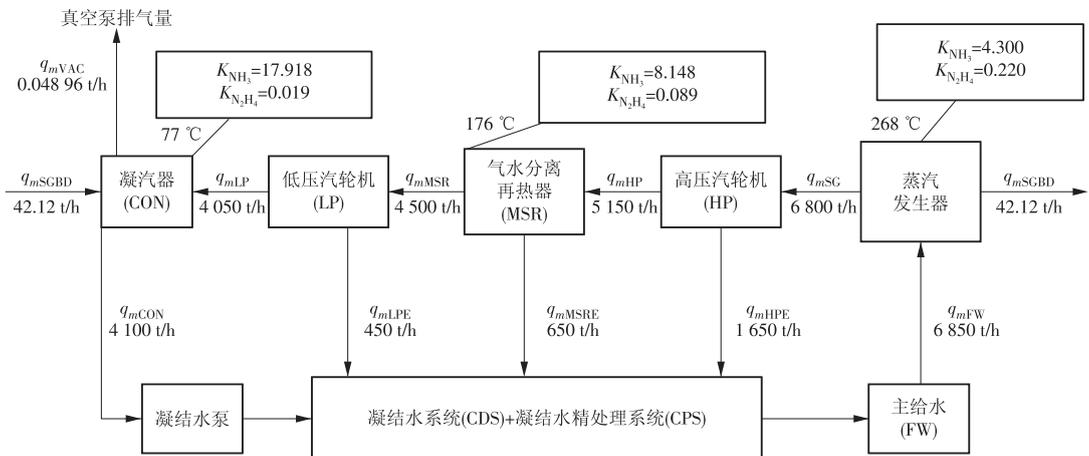


图 1 二回路系统简化数学模型

2.2 NH₄⁺ 质量浓度与 pH 值的关系

NH₃ 对 pH 值的影响远远大于 N₂H₄, 计算时可

表 1 不同温度下 NH₃ 与 N₂H₄ 的气液分配系数

| 项目 | 不同温度下的气液分配系数 | | | | | |
|---|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 50 °C | 100 °C | 150 °C | 200 °C | 250 °C | 300 °C |
| lgK _{NH₃} | 1.35 | 1.15 | 0.98 | 0.84 | 0.69 | 0.52 |
| K _{NH₃} | 22.4 | 14.1 | 9.5 | 6.9 | 4.9 | 3.3 |
| lgK _{N₂H₄} | -1.99 | -1.57 | -1.22 | -0.94 | -0.72 | -0.56 |
| K _{N₂H₄} | 0.0102 | 0.0269 | 0.0603 | 0.1148 | 0.1905 | 0.2754 |

表 2 特定温度下 NH₃ 与 N₂H₄ 在不同设备中的气液分配系数计算结果

| 气液分配系数 | SG(268 °C) | MSR(176 °C) | CON(77 °C) |
|---|------------|-------------|------------|
| K _{NH₃} | 4.300 | 8.148 | 17.918 |
| K _{N₂H₄} | 0.220 | 0.089 | 0.019 |

忽略 N₂H₄ 对 pH 值的影响^[5]。NH₄⁺ 质量浓度与 pH 值的关系见表 3。

3 二回路加药量的计算

3.1 CPS 未投运时加药量的计算

当 CPS 未投运时, NH₃ 与 N₂H₄ 的消耗主要包括 SG 排污(SGBD)、SG 中反应(SG-R)、CON 内抽气损耗, 下面以 CPS 未投运时二回路系统 pH 值控制在 9.7 为例进行计算。

3.1.1 SG 中化学反应损耗

在 SG 中存在以下化学反应: 8N₂H₄ → 10NH₃ + 3N₂ + H₂, N₂H₄, 在此化学反应中可达到 0~50% 的转化率, 故因 N₂H₄ 分解可导致

$$\Delta\rho_{(\text{NH}_3)_{\text{SG-R}}} = \rho_{(\text{N}_2\text{H}_4)_{\text{FW}}} \times (0 \sim 0.5) \times 170/256, \quad (1)$$

$$\Delta\rho_{(\text{N}_2\text{H}_4)_{\text{SG-R}}} = \rho_{(\text{N}_2\text{H}_4)_{\text{FW}}} \times (0 \sim 0.5), \quad (2)$$

式中: 170 为 NH₃ 的增加量, g; 256 为 N₂H₄ 的减少量, g; $\rho_{(\text{N}_2\text{H}_4)_{\text{FW}}}$ 为主给水中 N₂H₄ 的质量浓度; $\Delta\rho_{(\text{NH}_3)_{\text{SG-R}}}$ 为 NH₃ 在 SG 中反应损耗量; $\Delta\rho_{(\text{N}_2\text{H}_4)_{\text{SG-R}}}$ 为 N₂H₄ 在 SG 中反应损耗量。

根据表 3, 二回路系统 pH 值控制在 9.7 时, $\rho_{(\text{NH}_3)_{\text{FW}}} = 3.05 \text{ mg/L}$, $\rho_{(\text{N}_2\text{H}_4)_{\text{FW}}} \approx 0.10 \text{ mg/L}$ 。根据式 (1), (2) 可得: $\rho_{(\text{NH}_3)_{\text{SG}}} = 3.050 \sim 3.083 \text{ mg/L}$, $\rho_{(\text{N}_2\text{H}_4)_{\text{SG}}} = 0.050 \sim 0.100 \text{ mg/L}$, $\Delta\rho_{(\text{NH}_3)_{\text{SG-R}}} = 0.000 \sim 0.033 \text{ mg/L}$, $\Delta\rho_{(\text{N}_2\text{H}_4)_{\text{SG-R}}} = 0.000 \sim -0.050 \text{ mg/L}$ 。

3.1.2 SG 排污损耗

SG 排污中 NH₃ 和 N₂H₄ 的质量浓度与 SG 中 NH₃ 和 N₂H₄ 的质量浓度存在以下关系

$$\rho_{(\text{NH}_3)_{\text{SGBD}}} = \rho_{(\text{NH}_3)_{\text{SG}}} / K_{(\text{NH}_3)_{\text{SG}}}, \quad (3)$$

$$\rho_{(\text{N}_2\text{H}_4)_{\text{SGBD}}} = \rho_{(\text{N}_2\text{H}_4)_{\text{SG}}} / K_{(\text{N}_2\text{H}_4)_{\text{SG}}}, \quad (4)$$

表 3 NH₄⁺ 质量浓度与 pH 值的关系

| | | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| $\rho_{\text{NH}_4^+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | 0.26 | 0.37 | 0.50 | 0.71 | 1.05 | 1.50 | 2.10 | 3.05 | 5.00 | 7.10 | 11.00 |
| pH 值 | 9.0 | 9.1 | 9.2 | 9.3 | 9.4 | 9.5 | 9.6 | 9.7 | 9.8 | 9.9 | 10.0 |

式中: $\rho_{(\text{N}_2\text{H}_4)_{\text{SG}}}$ 为 SG 中 N₂H₄ 的质量浓度; $\rho_{(\text{N}_2\text{H}_4)_{\text{SGBD}}}$ 为 SG 排污中 N₂H₄ 的质量浓度; $\rho_{(\text{NH}_3)_{\text{SG}}}$ 为 SG 中 NH₃ 的质量浓度; $\rho_{(\text{NH}_3)_{\text{SGBD}}}$ 为 SG 排污中 NH₃ 的质量浓度; $K_{(\text{NH}_3)_{\text{SG}}}$ 为 NH₃ 在 SG 中的气液分配系数, 4.30; $K_{(\text{N}_2\text{H}_4)_{\text{SG}}}$ 为 N₂H₄ 在 SG 中的气液分配系数, 0.22。

根据式 (3), (4) 可得: $\rho_{(\text{NH}_3)_{\text{SGBD}}} = 0.709 \sim 0.717 \text{ mg/L}$, $\rho_{(\text{N}_2\text{H}_4)_{\text{SGBD}}} = 0.227 \sim 0.455 \text{ mg/L}$ 。

3.1.3 CON 抽气损耗

NH₃ 和 N₂H₄ 在 CON 和 MSR 中的质量浓度存在如下关系

$$q_{\text{MSR}} \cdot \rho_{\text{MSR}} = q_{\text{HP}} \cdot \rho_{\text{HP}} - q_{\text{MSRE}} \cdot \rho_{\text{MSRE}}, \quad (5)$$

$$\rho_{\text{HP}} = \rho_{\text{SG}}, \rho_{\text{LP}} = \rho_{\text{MSR}}, \rho_{\text{MSRE}} = \rho_{\text{MSR}} / K_{\text{MSR}}, \quad (6)$$

$$\rho_{(\text{NH}_3)_{\text{VAC}}} = \rho_{(\text{NH}_3)_{\text{LP}}} \cdot K_{\text{CON}} = \rho_{(\text{NH}_3)_{\text{MSR}}} \cdot K_{\text{CON}}, \quad (7)$$

$$\rho_{(\text{N}_2\text{H}_4)_{\text{VAC}}} = \rho_{(\text{N}_2\text{H}_4)_{\text{LP}}} \cdot K_{\text{CON}} = \rho_{(\text{N}_2\text{H}_4)_{\text{MSR}}} \cdot K_{\text{CON}}, \quad (8)$$

式中: ρ_{MSR} 为 MSR 中的质量浓度; ρ_{HP} 为 HP 中的质量浓度; ρ_{SG} 为 SG 中的质量浓度; ρ_{LP} 为 LP 中的质量浓度; ρ_{MSRE} 为 MSR 抽气中的质量浓度; K_{MSR} 为 MSR 中的气液分配系数; K_{CON} 为 CON 中的气液分配系数; $\rho_{(\text{NH}_3)_{\text{VAC}}}$ 为 CON 抽气系统中 NH₃ 的质量浓度; $\rho_{(\text{N}_2\text{H}_4)_{\text{VAC}}}$ 为 CON 抽气系统中 N₂H₄ 的质量浓度。

根据式 (5) ~ (8) 可得: $\rho_{(\text{NH}_3)_{\text{MSR}}} = \rho_{(\text{NH}_3)_{\text{LP}}} = 3.430 \sim 3.467 \text{ mg/L}$, $\rho_{(\text{N}_2\text{H}_4)_{\text{MSR}}} = \rho_{(\text{N}_2\text{H}_4)_{\text{LP}}} = 0.022 \sim 0.044 \text{ mg/L}$; $\rho_{(\text{NH}_3)_{\text{VAC}}} = 61.459 \sim 62.122 \text{ mg/L}$, $\rho_{(\text{N}_2\text{H}_4)_{\text{VAC}}} = 0.00042 \sim 0.00084 \text{ mg/L}$ 。

3.1.4 平衡计算

在 CPS 未投运时, 二回路加药系统中 NH₃ 所需的总添加量 q_{VNH_3} ($w(\text{NH}_3) = 2\%$) 由 3 部分组成: NH₃ 在 SG 化学反应中的增加量、蒸汽发生器排污与凝汽器抽气所消耗的量。N₂H₄ 所需的总添加量 $q_{\text{VN}_2\text{H}_4}$ ($w(\text{N}_2\text{H}_4) = 2\%$) 也由 3 部分组成: N₂H₄ 在 SG 中因发生化学反应所消耗的量、蒸汽发生器排污与凝汽器抽气所消耗的量。

$$q_{\text{VNH}_3} = -\Delta\rho_{(\text{NH}_3)_{\text{SG-R}}} \cdot q_{\text{mFW}} + \rho_{(\text{NH}_3)_{\text{SGBD}}} \cdot q_{\text{mSGBD}} + \rho_{(\text{NH}_3)_{\text{VAC}}} \cdot q_{\text{mVAC}} = -9.640 \sim 1.644 \text{ (L/h)},$$

$$q_{VN_2H_4} = \Delta\rho_{(N_2H_4)SG-R} \cdot q_{mFW} + \rho_{(N_2H_4)SGBD} \cdot q_{mSGBD} + \rho_{(N_2H_4)VAC} \cdot q_{mVAC} = 0.478 \sim 18.083 \text{ (L/h)}。$$

3.2 CPS 投运时加药量的计算

当 CPS 投运时, NH_3 与 N_2H_4 的消耗主要包括 SG 排污、SG 中反应、凝汽器内抽气损耗及 CPS 消耗,下面以 CPS 投运时二回路系统 pH 值控制在 9.4 为例进行计算。

3.2.1 SG 中化学反应损耗

根据表 3,二回路系统 pH 值控制在 9.4 时, $\rho_{(NH_3)FW} = 1.05 \text{ mg/L}$, $\rho_{(N_2H_4)FW} \approx 0.10 \text{ mg/L}$ 。根据式 (1), (2) 可得: $\rho_{(N_2H_4)SG} = 0.050 \sim 0.100 \text{ mg/L}$, $\rho_{(NH_3)SG} = 1.050 \sim 1.083 \text{ mg/L}$; $\Delta\rho_{(NH_3)SG-R} = 0.000 \sim 0.033 \text{ mg/L}$, $\Delta\rho_{(N_2H_4)SG-R} = 0.000 \sim -0.050 \text{ mg/L}$ 。

3.2.2 SG 中排污损耗

根据式 (3), (4) 可得: $\rho_{(NH_3)SGBD} = 0.244 \sim 0.252 \text{ mg/L}$, $\rho_{(N_2H_4)SGBD} = 0.227 \sim 0.455 \text{ mg/L}$ 。

3.2.3 凝汽器抽气损耗

根据式 (5) ~ (8) 可得: $\rho_{(NH_3)MSR} = \rho_{(NH_3)LP} = 1.181 \sim 1.218 \text{ mg/L}$, $\rho_{(N_2H_4)MSR} = \rho_{(N_2H_4)LP} = 0.022 \sim 0.044 \text{ mg/L}$; $\rho_{(NH_3)VAC} = 21.161 \sim 21.824 \text{ mg/L}$, $\rho_{(N_2H_4)VAC} = 0.00042 \sim 0.00084 \text{ mg/L}$ 。

3.2.4 CPS 消耗

NH_3 和 N_2H_4 在凝结水、抽气系统、凝汽器中的质量浓度存在如下关系

$$\rho_{(NH_3)CON} = (\rho_{(NH_3)LP} \cdot q_{mLP} - \rho_{(NH_3)VAC} \cdot q_{mVAC}) / q_{mCON}, \quad (9)$$

$$\rho_{(N_2H_4)CON} = (\rho_{(N_2H_4)LP} \cdot q_{mLP} - \rho_{(N_2H_4)VAC} \cdot q_{mVAC}) / q_{mCON}, \quad (10)$$

式中: $\rho_{(NH_3)CON}$ 为凝结水中 NH_3 的质量浓度; $\rho_{(NH_3)LP}$ 为低压缸乏汽中 NH_3 的质量浓度; $\rho_{(NH_3)VAC}$ 为凝汽器抽气中 NH_3 的质量浓度; $\rho_{(N_2H_4)CON}$ 为凝结水中 N_2H_4 的质量浓度; $\rho_{(N_2H_4)LP}$ 为低压缸乏汽中 N_2H_4 的质量浓度; $\rho_{(N_2H_4)VAC}$ 为凝汽器抽气中 N_2H_4 的质量浓度。

根据式 (9), (10) 可得: $\rho_{(NH_3)CON} = 1.166 \sim 1.203 \text{ mg/L}$, $\rho_{(N_2H_4)CON} = 0.022 \sim 0.043 \text{ mg/L}$ 。

3.2.5 平衡计算

在 CPS 投运时,二回路加药系统中 NH_3 所需的添加量 $q_{VN_2H_4}$ 由 4 部分组成: NH_3 在 SG 化学反应中的增加量,蒸汽发生器排污、凝汽器抽气与 CPS 所消耗的量。 N_2H_4 所需的添加量 $q_{VN_2H_4}$ 也由 4 部分组成: N_2H_4 在 SG 中因发生化学反应所消耗的量,蒸汽发生器排污、凝汽器抽气与 CPS 所消耗的量

$$q_{VN_2H_4} = -\Delta\rho_{(NH_3)SG-R} \cdot q_{mFW} + \rho_{(NH_3)CON} \cdot q_{mCON} + \rho_{(NH_3)SGBD} \cdot q_{mSGBD} + \rho_{(NH_3)VAC} \cdot q_{mVAC} = 235.897 \sim$$

$$239.596 \text{ (L/h)},$$

$$q_{VN_2H_4} = \Delta\rho_{(N_2H_4)SG-R} \cdot q_{mFW} + \rho_{(N_2H_4)CON} \cdot q_{mCON} + \rho_{(N_2H_4)SGBD} \cdot q_{mSGBD} + \rho_{(N_2H_4)VAC} \cdot q_{mVAC} = 5.024 \sim 26.471 \text{ (L/h)}。$$

根据以上计算结果,在 CPS 投运与未投运的 2 种运行模式情况下,二回路加药量的计算结果见表 4。从表 4 可以看出:在 CPS 未投运时,仅添加 N_2H_4 或添加少量 NH_3 即可维持二回路系统中较高的 pH 值;而在 CPS 投运时需添加较大量的 NH_3 才能维持二回路系统较高的 pH 值,这与实际运行情况符合。

表 4 CPS 投运与未投运模式下加药量计算结果 L/h

| 溶液 | CPS 未投运 (pH=9.7) | CPS 投运 (pH=9.4) |
|-------------------|------------------|-------------------|
| $w(NH_3) = 2\%$ | -9.640 ~ 1.644 | 235.897 ~ 239.596 |
| $w(N_2H_4) = 2\%$ | 0.478 ~ 18.083 | 5.024 ~ 26.471 |

4 结束语

在 AP1000 核电机组二回路 CPS 投运与未投运 2 种运行模式下,通过计算 NH_3 与 N_2H_4 的理论添加量,为 AP1000 核电机组二回路加药系统的设计及配置提供了依据,也可为其他核电机组二回路加药系统的设计提供参考。

参考文献:

- [1] 刘涛,周丽霞,高立新,等. 核电站二回路系统水化学控制[C]//中国石油和化工勘察设计协会热工专委会. 全国化工热工设计技术中心站 2012 年年会论文集,2012.
- [2] 慕晓炜,郑敏聪,李建华. 凝结水精处理混床运行控制指标分析与确定[J]. 热力发电,2013,42(10):134-136.
- [3] 邓德兵,赵清森,陈伟,等. 核电站汽轮机运行性能监测与诊断[J]. 动力工程学报,2011,31(8):585-589.
- [4] EPRI. Pressurized water reactor secondary water chemistry guidelines[R]. Palo Alto: EPRI,2004.
- [5] 胡蓉. 三门核电一期工程二回路 pH 控制方案研究[J]. 中国高新技术企业,2015(13):15-17.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

马现奇(1986—),男,山东潍坊人,工程师,工学硕士,从事核电水化学系统的调试工作。

许梧君(1993—),女,福建漳州人,工程师,从事核电水化学系统的调试工作(E-mail:xuwujun@snpec.com.cn)。

潘荣辉(1976—),男,山西运城人,工程师,从事核电站水处理化学系统的调试工作。