排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
第28卷 第4期
Vol. 28 No. 4

核电站余热排出泵热冲击回路设计

孔繁余，王 婷，黄道见，王文廷
（江苏大学 流体机械工程技术研究中心，江苏 镇江 212013）

摘 要：为检验余热排出泵的耐热冲击能力及其运行稳定性，基于能量守恒定律和冷态、热态回路不同工况的实际要求，设计了热冲击回路系统，并对主要设备进行热平衡计算，以确定设备型号. 设计的热冲击回路系统包括冷态、热态两回路，通过三通阀的自动切换作用，进行冷态、热态条件的及时切换试验，以模拟核动力装置中余热排出泵的实际工作状况. 试验结果表明，设计的余热排出泵热冲击回路系统可较为真实地模拟核动力装置实际运用情况；对设备进行的热平衡计算确定了主要设备型号；构建便捷的冷态、热态切换方式，可验证泵各部件的耐热冲击能力.

关键词：余热排出泵；热冲击回路；热平衡计算；耐热冲击
中图分类号：S277.9；TH311 **文献标志码**：A **文章编号**：1674-8530(2010)04-0291-04

Design for thermal shock loop of residual heat removal pump in nuclear power plant

Kong Fanyu, *Wang Ting*, *Huang Daojian*, *Wang Wenting*
(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: In order to test heat shock resistance and operation stability of residual heat removal pump, thermal shock loop was designed based on energy conservation law and different working conditions of both cold-state and hot-state loops. The equipment types were determined by heat balance calculation. The thermal shock loop designed included both cold-state and hot-state loops, and in-time switching experiment from cold-state to hot-state was carried out with a three-way valve to simulate actual working conditions of residual heat removal pump. The experimental results show that the thermal shock loop system designed can really simulate practical working conditions of nuclear power plant. The equipment types are determined by heat balance calculation, and the heat shock resistance of pump parts is validated by means of convenient switching mode.

Key words: residual heat removal pump; thermal shock loop; heat balance calculation; heat shock resistance

核电是目前世界上最具发展前景的能源，在清洁电力品种中，核电具有高效、环保、低耗、发展空间巨大等优点，但技术壁垒高. 美国、法国等都已具备第二代成熟的核电技术，第三代核电技术在美国和法国等已被应用，同时，美国已开始联合其他核电技术先进的国家进行第四代核电站的研究论证工作. 在我国，核电作为能源领域重点发展项目，其发展路线是轻水压水堆，技术处在二代以上，接近第三代[1].

余热排出泵属一回路系统中的核二级泵，是余热排出系统的组成部分[2]，它位于安全壳内，使一回路冷却剂流过余热排出系统的热交换器，导出余热从而获得或保持冷停堆状态. 在反应堆冷却剂泵

收稿日期：2010-01-06
基金项目："十一五"国家科技支撑计划项目(2008BAF34B10)
作者简介：孔繁余(1956—)，男，江苏扬州人，教授，博士生导师(kongfy2918@sohu.com)，主要从事流体机械技术及工程研究.
王 婷(1985—)，女，河北石家庄人，硕士研究生(arywang@126.com)，主要从事流体机械技术研究.

万方数据

停运过程中，使一回路水循环，并防止一回路出现冷态压力偏移，在蒸汽管道破裂事故后冷却一回路. 在许多核电站中，余热排出系统也同时兼顾低压安全注射功能.

余热排出泵承担堆芯余热冷却的作用，在热反应堆停堆时，余热排出泵开始运行，一回路水温直接达到 180 ℃. 为检验余热排出泵的耐热冲击能力及其运行稳定性，余热排出泵需做常温至 180 ℃热冲击试验. 文中对热冲击过程中所要求的热冲击回路进行初步设计，并根据能量守恒定律和冷态、热态回路不同工况要求，对主要设备进行热平衡计算，以确定热冲击回路及其相关设备型号，验证泵各部件的耐热冲击能力.

1 热冲击回路设计

1.1 目的和要求

设计热冲击回路的目的是对余热排出泵样机机组进行预运行，在热冲击条件下验证触液件及轴承体等部件的耐热冲击能力. 设计要求余热排出泵在运行过程中性能稳定，应力、应变符合要求；轴承温升不超过 80 ℃；振动噪声不超过规定值；口环无较大磨损[3-5].

文中选用水作为流动介质，需要实现的过程为余热排出泵样机介质瞬时(≤10 s)从温度 15 ℃、压力 0.1 MPa，升至温度 180 ℃、压力 2.7 MPa，连续运行 4 h 后降温至 80 ℃，然后再连续运行 4 h，重复此热冲击过程 2 次.

1.2 基本参数

1.2.1 泵及其性能参数

余热排出泵结构如图 1 所示.

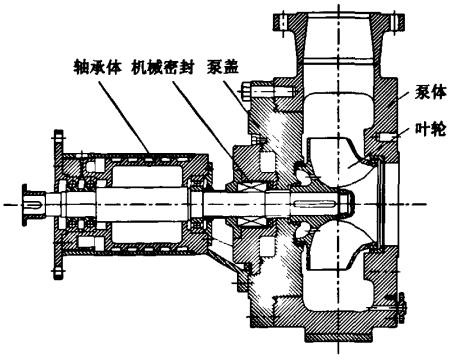


图 1 余热排出泵结构示意图

Fig. 1 Structural sketch of residual heat removal pump

余热排出泵机组由泵和电机组成，余热排出泵为卧式、单级离心泵，轴向吸入，径向向上排出. 泵和电机安装在独立的底座上，通过地脚螺栓固定在混凝土基座上.

泵的主要性能参数为流量 $Q=910\ m^3/h$，扬程 $H=77\ m$，装置汽蚀余量 $NPSHA<4.6\ m$，配套电机功率 $P=322\ kW$，最高吸入温度 $t=180\ ℃$，最低吸入温度 $t=15\ ℃$.

1.2.2 冷态回路性能参数

冷态回路系统为余热排出泵提供冷态工况，需保证介质温度 15 ℃、压力 0.1 MPa. 泵运行产生的热量被换热器吸收，用以保证泵在 15 ℃水温条件下运行.

1.2.3 热态回路性能参数

热态回路系统为余热排出泵提供热态工况，运行初期需保证介质温度 180 ℃、压力 2.7 MPa，连续运行 4 h 后降温至 80 ℃，然后再连续运行 4 h. 泵运行过程中，利用电加热器、蛇管式换热器、加压泵来保持运行过程中的温度、压力符合要求.

通过三通阀可以实现冷态、热态回路之间的自动切换，确保热冲击试验的顺利进行.

1.3 回路设计

热冲击回路系统主要由两部分组成，即冷态回路系统和热态回路系统，如图 2 所示，其中 *SV* 为设定值，*MV* 为阀门开度. 两回路为相对独立的系统，利用 2 个三通阀瞬时(≤10 s)实现冷态、热态回路之间的切换.

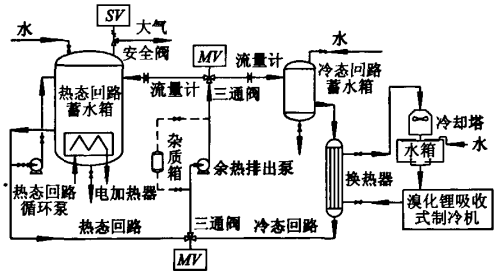


图 2 热冲击回路示意图

Fig. 2 Sketch of thermal shock loop

1.3.1 冷态回路设计

冷态回路如图 2 右半部分所示. 冷态回路蓄水箱为冷态回路系统中的冷水储存设备，换热器为冷态回路系统中的制冷设备，其制冷采用溴化锂吸收式制冷机.

当余热排出泵在冷态回路系统中运行时，水流

万方数据

经三通阀、流量计后进入冷态回路蓄水箱，然后流经换热器将水冷却到 15 ℃，经三通阀回到余热排出泵，重复此循环过程. 运行过程中泵产生的热量被换热器带走，换热器的冷却水由溴化锂吸收式制冷机提供，冷态回路系统中需保证水的温度 15 ℃、压力 0.1 MPa. 当冷态回路中流经余热排出泵的水温度、压力恒定时，利用 2 个三通阀瞬时(≤10 s)切换到热态回路系统.

1.3.2 热态回路设计

热态回路如图 2 左半部分所示. 热态回路蓄水箱为热态回路系统中的热水储存设备，其加热采用电加热器，降温采用蛇管式换热器，加压采用加压泵. 箱体侧部装有液位计，用于监测水位；顶部装有安全阀，用于防止蓄水箱(热态回路系统)超压.

余热排出泵在热态回路系统中运行时，水流经三通阀、流量计后进入热态回路蓄水箱，经电热器、加压泵分别加热、加压后从蓄水箱下部流出. 在初始状态下，从热态回路蓄水箱内流出的是冷水，利用热态回路循环泵可实现冷水的二次加热，提高运行可靠性. 从热态回路蓄水箱流出的温度(180 ℃)、压力(2.7 MPa)达到要求的水在动力作用下，对余热排出泵造成热冲击后，最终流入热态回路蓄水箱，在此水被重新加热至指定温度.

由于热冲击回路设计中需考虑到杂质试验，故应在试验回路中添加一个用于储存杂质的杂质箱，实现杂质试验回路的设计. 杂质试验时只用小回路，其中小回路由杂质箱和余热排出泵组成.

2 热平衡计算

2.1 冷态回路中相关设备选型计算

为保持冷态回路的水温为 15 ℃，需对换热器进行选型计算. 原料水的进、出口温度分别为 20，15 ℃，冷却水的进、出口温度分别为 10，15 ℃.

根据热量衡算方程

$$Q = C_{p1}q_{m1}(t_{11} - t_{12}) = C_{p2}q_{m2}(t_{22} - t_{21}), \quad (1)$$

式中 Q 为经过换热器的总热量；C_{p1}，C_{p2} 分别为原料水、冷却水的比定压热容；q_{m1}，q_{m2} 分别为原料水、冷却水的质量流量；t_{11}，t_{12} 分别为原料水进、出口温度；t_{21}，t_{22} 分别为冷却水进、出口温度.

根据计算，冷却水流量 $q_{m2} = 9.67 \times 10^5$ kg·h^{-1}，然而冷却水的流量一般情况下不能达到这么大，因此不采用此方法. 文中拟采用溴化锂吸收式制冷机，该制冷机利用溴化锂溶液在常温下能吸收水蒸气，在一定压力下水蒸气很容易蒸发的特性来工作，通过加热或冷却使溶液在机内产生状态变化，从而使冷剂水在真空下蒸发吸热获得制冷效应[6-7].

2.2 热态回路中相关设备选型计算

热态回路条件为热态回路蓄水箱需要从常温(20 ℃)加热到指定温度(180 ℃)，并且在一定时间内保持温度 180 ℃不变. 选定蓄水箱的体积约为 8 m^3，直径约 1.8 m，加热时间 5 h.

2.2.1 电加热器总功率选择计算

计算功率是为了满足加热介质所需发热量，确保加热器能正常加热. 由于电加热的热效率近似为 1，可以这样认为电加热器的功率即为单位时间的发热量. 功率的计算选择应考虑 4 个方面：①从初始状态，按规定时间要求实现加热介质至设定温度(工作温度)；②在工况条件下，发热量足以维持介质温度；③应有一定的安全裕度，一般取 1.2；④比较①和②结果，选择较大的功率，乘以安全裕度即为应选的功率.

选择蓄水箱加热器功率的步骤如下：

(1)初始加热所需要的功率

$$P_d = \frac{Q_d}{t}, \quad (2)$$

$$Q_d = (C_{pv}m_1 + C_{pm}m_2)\Delta t + \frac{Q_c}{2}, \quad (3)$$

式中 C_{pv}，C_{pm} 分别为容器和介质的比定压热容；m_1，m_2 分别为容器和介质的质量；Δt 为所需温度和初始温度之差；t 为初始温度加热到设定温度所需要的时间；Q_c 为在设定温度下容器的散热量；P_d 为电加热器加热到指定温度所需功率.

(2) 维持介质温度所需要的功率

$$P_m = C_{pm}q_{m3}\Delta t + \frac{Q_c}{t}, \quad (4)$$

式中 P_m 为电加热器维持介质温度所需功率；q_{m3} 为每小时增加的介质质量.

(3) 比较(1) 和(2) 结果，选择较大的功率，乘以安全裕度 1.2，得出最终选取的加热器功率约为 300 kW.

2.2.2 蛇管式换热器的选型计算

电机带动泵运转过程中会产生部分热量，通过能量传递作用，该部分热量传给流动介质，导致介质温度升高. 文中采用蛇管式换热器将介质中多余的热量移走，保持蓄水箱中的温度 $t \leq 180$ ℃.

计算过程中所涉及的公式有

万方数据

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}, \quad (5)$$

$$Q = KA\Delta t_m = C_{p2} m \Delta t, \quad (6)$$

式中 Δt_m 为换热器进、出口的对数平均温差;Δt_1,Δt_2 分别为蓄水箱内热水与冷却水进、出口温度之差;K 为蛇管式换热器传热系数;A 为蛇管式换热器的换热面积.

通过相应计算,可得到蛇管式换热器的换热面积和蛇管内水流速率[7].

2.2.3 热态回路蓄水箱的选型计算

设计条件为压力 $p = 4.75$ MPa,温度 $t = 180$ ℃,容器直径(筒体内径)$d = 1\,800$ mm.

设计过程中需要确定其理论计算厚度 δ、设计厚度 δ_d、名义厚度 δ_n、有效厚度 δ_e、最小厚度 δ_{min}. 对于设计好的压力容器,需要进行强度校核.

经过选型设计,初步选择为筒体,其封头选用标准椭圆形封头. 具体项目的材料及厚度见表 1. 可以看出,不同材料所对应项目的厚度不同,这是由于它们的许用应力各不同. 当蓄水箱选择为圆筒形状时,筒体所对应的壁厚偏大,故可采用"多层包扎"结构或将蓄水箱设计为球体. 从经济性、耐腐蚀性、强度以及安全可靠性等方面考虑,一般选用材料为 0Cr18Ni9(304)[8].

表 1 内压容器材料和壁厚的选择

Tab. 1 Material and wall thickness choice of internal pressure vessel mm

项目	材料			
	1Cr18Ni9Ti	0Cr18Ni9(304)	00Cr17Ni14Mo2(316L)	16MnR
筒体	42	42	50	38
封头	36	36	42	30
球体	15	15	18	12

3 结 论

(1)设计的核电站余热排出泵热冲击回路系统包括冷态、热态两回路,可较为真实地模拟核动力装置实际运行情况.

(2)对回路中各主要设备进行热平衡计算,确定了电加热器、蛇管式换热器、热态回路蓄水箱等主要设备的型号.

(3)构建了热冲击回路系统的冷态、热态便捷切换方式,验证了触液件及轴承体等部件的耐热冲击能力.

参考文献(References)

[1] 蔡 龙,张丽平. 浅谈压水堆核电站主泵[J]. 水泵技术,2007(4):1-5.
Cai Long, Zhang Liping. Discussion about main pump used in pressurized water reactor nuclear power plant [J]. *Pump Technology*, 2007(4):1-5. (in Chinese)

[2] 朱荣生,管荣国,付 强,等. 核电站冷却水循环泵模型试验[J]. 排灌机械,2008,26(2):49-52.
Zhu Rongsheng, Guan Rongguo, Fu Qiang, et al. Model experiment of circulating cooling water pump in nuclear power plant [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2008, 26(2):49-52. (in Chinese)

[3] 彭德迟,余良旺. 提高泵站供电系统可靠性的技术措施[J]. 排灌机械,2006,24(3):42-44.
Peng Dechi, Yu Liangwang. Technical measures to improve reliability for pumping station power supply system [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2006, 24(3):42-44. (in Chinese)

[4] Tong L L, Lu F, Cao X W, et al. Thermal hydraulic behaviors during loss of RHR system at mid-loop operation of Chinese 300 MWe PWR NPP[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2009, 239(12): 3027-3033.

[5] Birchley J, Haste T J, Richner M. Accident management following loss of residual heat removal during mid-loop operation in a Westinghouse two-loop PWR[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2008, 238(9): 2173-2181.

[6] 国家医药管理局上海医药设计院. 化工工艺设计手册[M]. 2 版. 北京:化学工业出版社,1996.

[7] 谭天恩,窦 梅,周明华,等. 化工原理[M]. 3 版. 北京:化学工业出版社,2006.

[8] 李世玉,桑如苞. 压力容器工程师设计指南[M]. 北京:化学工业出版社,1994.

(责任编辑 陈建华)

万方数据