

核电厂主蒸汽母管疏水多级孔板设计研究

李明杰¹, 张宏伟², 王永¹, 江帅¹, 朱光强¹

¹中核武汉核电运行技术股份有限公司, 湖北 武汉

²中核核电运行管理有限公司, 浙江 嘉兴

收稿日期: 2024年1月17日; 录用日期: 2024年1月31日; 发布日期: 2024年4月7日

摘要

为了缓解某核电厂常规岛主蒸汽疏水管道的振动严重、噪声大等现象, 本文采用零维理论计算的方法对疏水用多级孔板进行了初步结构设计, 并通过比例模化设计多级孔板试验件的形式, 对试验件的性能展开了验证, 从而指导了多级孔板的最终设计。得出如下结论: 采用零维理论公式设计多级孔板时, 误差较小, 为 $\pm 3\%$; 在对试验件进行性能验证时, 一级孔口处出现临界流现象, 根据临界流量与设计流量的偏差对一级孔进行适当修正, 最终误差在 $\pm 1\%$ 。

关键词

多级孔板, 理论计算, 试验验证, 结构设计

Research on Design of Multistage Orifice Plate for Steam Master Tube in Nuclear Power Plant

Mingjie Li¹, Hongwei Zhang², Yong Wang¹, Shuai Jiang¹, Guangqiang Zhu¹

¹China Nuclear Power Operation Technology Corporation, Ltd., Wuhan Hubei

²CNNP Nuclear Power Operations Management Corporation, Ltd., Jiaxing Zhejiang

Received: Jan. 17th, 2024; accepted: Jan. 31st, 2024; published: Apr. 7th, 2024

Abstract

In order to alleviate the serious vibration and loud noise of the conventional island main steam tube in a nuclear power plant, this paper has done the preliminary structural design of multistage orifice plate for hydrophobic use by using the method of zero-dimensional theoretical calculation, then through the scale modeling design multistage orifice plate test piece to test the performance of the

validation, so as to guide the final design of the multistage orifice plate. The conclusions are as follows: When the zero-dimensional theoretical formula is used to design multistage orifice plate, the error is little ($\pm 3\%$). During the performance verification of the test piece, the critical flow phenomenon appears at the first-stage orifice. According to the deviation between the critical flow rate and the designed flow rate, the first-stage orifice is properly corrected, and the final error is $\pm 1\%$.

Keywords

Multistage Orifice Plate, Theoretical Calculation, Test Verification, Structural Design

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

核电厂常规岛汽轮机组在运行中产生的主蒸汽为干度接近 1 的饱和蒸汽，饱和蒸汽的极少部分易在主蒸汽母管中凝结成饱和水，最终借助疏水管道以疏水的方式排至凝汽器。某核电厂在运行过程中，出现主蒸汽母管疏水管道振动严重、疏水阀汽蚀、现场噪音较大等问题，不仅增加了检维修的任务难度，更为汽轮机组安全经济的运行埋下了隐患。

汽蚀的影响极大，当疏水流经一喉部截面时，流型会变细收缩，在收缩的最小截面处流速达到最大值，流体自身的静压力会在此时转变成动压力，前后压降会迅速增大，由于此时水温接近饱和温度，在后端压力迅速降低后，部分饱和水将汽化变成气泡，当这些气泡流经下游的压力恢复区时会产生破裂，局部形成高于周围压力数千倍的冲击压[1]。由于气泡不能在瞬间全部的破裂，在冲击挤压作用下又会分裂成许多小气泡，小气泡会再次被高压流体压缩破裂，反复循环，从而引起管道振动并产生类似沙石流过管道的噪音[2]。长期该状态下运行不仅会降低管道壁厚产生安全隐患，严重时更会由于疏水阀频繁动作对汽轮机组的经济性造成影响。因此，对疏水管道的节流孔板进行合理设计，避免汽蚀的发生，具有重要安全、经济意义。

经前期调研评估，拟在疏水阀后增加多级孔板，从而缓解原疏水管道前后压降过大造成的管道振动、汽蚀噪音等问题。钱锦远[3]采用数值模拟和含阻系统的分析方法对多级孔板的阻力特性和汽蚀特性开展了一系列研究，分析了孔板厚度、开孔率等结构参数的影响。李旭东等[4]采用 CFD 对核电厂中某节流管路开展了数值计算分析，并提出了既能有效避免汽蚀又能降低孔板间流速的优化设计方案。目前，针对多级孔板进行理论分析计算的较多，但分析结果与实际产品的关联性不强，本文采用理论计算和试验研究相结合的方法对某运行参数下的多级孔板进行了设计研究，并最终得出了能够有效解决上述问题的目标产品结构尺寸。

2. 多级孔板理论设计

根据某核电厂实际运行参数，拟新增疏水用多级孔板技术参数如表 1 所示。

现针对该技术参数对多级孔板进行结构设计，本次设计的多级孔板入口介质为 4.511 MPa 饱和水，出口压力为 0.057 MPa，总压降为 4.454 MPa，根据文献建议，多级孔板各级的压降按照几何级数递减[5]，即：

$$\Delta P = 2\Delta P_2 = 4\Delta P_3 = \dots 2^{n-1} \Delta P_n \quad (1)$$

Table 1. Technical parameters of multistage orifice plate**表 1.** 多级孔板技术参数

| 参数 | 数值 | 单位 |
|----------|--------------|-------------------|
| 运行介质(入口) | 饱和水 | - |
| 最大流量 | 59.1 | m ³ /h |
| 设计压力 | 5.171 | MPa |
| 设计温度 | 266 | °C |
| 最大运行入口压力 | 4.511 | MPa |
| 最大运行入口温度 | 257.58 | °C |
| 多级孔板总长 | <500 | mm |
| 管道尺寸 | 114.3 × 6.02 | mm |

结合多级孔板现场安装长度限制, 考虑将孔板设计为三级, 由于介质流经各级孔板的过程为等焓过程, 因此可知孔板各级腔体的物性参数如表 2 所示。由于多级孔板延长度方向的参数为不可预计的持续变量, 因此在分析过程中采用零维理论计算, 即仅对多级孔板各级前后假设处于稳定的某点进行参数计算, 计算过程中用到的公式源自常规工程流体力学, 最终结果公式均是基于不同状态下原始公式逐步推导转变而成。公式中涉及符号含义详见附录。

Table 2. Physical parameters of each cavity**表 2.** 各级腔体物性参数

| 腔体 | 1 级前 | 2 级前 | 3 级前 | 3 级后 |
|---------|--------|--------|--------|-------|
| 压力(MPa) | 4.511 | 1.966 | 0.693 | 0.057 |
| 温度(°C) | 257.58 | 211.52 | 164.56 | 84.62 |
| 干度 | 0 | 0.11 | 0.18 | 0.27 |

由于多级孔板内部存在闪蒸现象, 因此采用均相流动模型推导流经孔板的双相流动压损, 再根据各级腔体的物性参数反算出孔板各级孔径。

根据均相流动模型可推导出气体单相单独流经孔口的压降为:

$$\Delta P_g = \frac{W_g^2 v_g}{2A_c^2} = \frac{W^2 x^2 v_g}{2CD^2 A_0^2} \quad (2)$$

由于:

$$\left(\frac{\Delta P_p}{\Delta P_f} \right)^{0.5} = \frac{x}{1-x} \left(\frac{v_g}{v_f} \right)^{0.5} = Y \quad (3)$$

可以导出气体单相流动压降表达式为:

$$\frac{\Delta P_p}{\Delta P_g} = 1 + C \frac{1}{Y} + \frac{1}{Y^2} \quad (4)$$

其中, C 的表达式为:

$$C = k \left(\frac{v_f}{v_g} \right)^{0.5} + \frac{1}{k} \left(\frac{v_g}{v_f} \right)^{0.5} \quad (5)$$

式中:

$$\frac{1}{Y} \geq 1 \text{ 时, } k = \left(\frac{v}{v_f} \right)^{0.5}, \quad \frac{1}{Y} < 1 \text{ 时, } k = \left(\frac{v_g}{v_f} \right)^{0.25}$$

式中, $\bar{v} = xv_g + (1-x)v_f$ (气水混合物的比容)。

CD 为流量系数, 与孔板截面比和管道直径有关, 计算时可按照相应的图表查询获取[6]。采用该理论计算得到的多级孔板各级孔径, 见表 3。

Table 3. Each bore diameter of multistage orifice plate

表 3. 多级孔板各级孔径

| 级数 | 1 级 | 2 级 | 3 级 |
|--------|----------|----------|----------|
| 直径 d | 19.82 mm | 40.92 mm | 66.50 mm |

根据强度校核相关要求[7], 计算多级孔板各级最小厚度, 见表 4。

Table 4. Each minimum thickness of multistage orifice plate

表 4. 多级孔板各级最小厚度

| 级数 | 1 级 | 2 级 | 3 级 |
|--------|---------|---------|---------|
| 厚度 n | 5.63 mm | 3.48 mm | 1.94 mm |

文献[8]指出, 偏心度对多级孔板的阻力系数几乎无影响, 因此不设置偏心度。由于压降越大, 流体恢复稳定状态所需距离越长, 因此本次设计多级孔板各级腔体距离按照压降差进行等比例分配, 具体尺寸见表 5。

Table 5. Each cavity spacing of multistage orifice plate

表 5. 多级孔板各级腔体间距

| 腔体号 | 1 | 2 | 3 |
|--------|-----------|-----------|----------|
| 间距 l | 275.19 mm | 137.08 mm | 68.54 mm |

3. 多级孔板比例模化

由于该多级孔板参数较高, 流量较大, 直接 1:1 热态试验代价巨大, 既不经济也不必要。因此, 拟采用比例模化设计试验件的方法, 确定试验件具体尺寸, 通过对试验件进行试验研究, 间接验证产品性能。

根据相似准则原理[9], 要想证明试验件性能可以代表原型性能, 需要保证两者单值条件相似, 即流动几何相似、流动边界条件相似和物理条件相似, 由于粘性流体具有自模性, 当 Re 数大于 10^5 时, 流动特性与 Re 无关, 故本研究可以不用考虑 Re 数的相似条件影响。令 p 代表原型, m 代表试验件, 则各个相似准则数为:

$$\begin{aligned}(\pi_1)_p &= \left(\frac{L}{D_e}\right)_p, (\pi_1)_m = \left(\frac{L}{D_e}\right)_m \\(\pi_2)_p &= \left(\frac{d}{D_e}\right)_p, (\pi_2)_m = \left(\frac{d}{D_e}\right)_m \\(\pi_3)_p &= \left(\frac{\varepsilon}{D_e}\right)_p, (\pi_3)_m = \left(\frac{\varepsilon}{D_e}\right)_m\end{aligned}$$

当准则数近似为 1 时, 则能够保证原型和试验件相似, 现基于相似准则原理, 按照试验件内径为 10 mm 对多级孔板试验件进行尺寸设计, 可以得到多级孔板试验件各级尺寸, 如表 6、表 7 所示, 经强度计

算，且为了方便加工制造，各级厚度均取为 1 mm。

Table 6. Each bore diameter of multistage orifice plate test piece
表 6. 多级孔板试验件各级孔径

| 级数 | 1 级 | 2 级 | 3 级 |
|--------|---------|---------|---------|
| 直径 d | 1.94 mm | 4.00 mm | 6.50 mm |

Table 7. Each cavity spacing of multistage orifice plate test piece
表 7. 多级孔板试验件各级腔体间距

| 腔体号 | 1 | 2 | 3 |
|--------|----------|----------|---------|
| 间距 l | 26.90 mm | 13.40 mm | 6.70 mm |

4. 多级孔板性能验证

根据多级孔板比例模化设计的试验件结构如图 1 所示，为防止各级孔板焊接时造成形变，该试验件设计成套管型式，并采用垫片螺纹密封，前后端留有测压管焊接点。

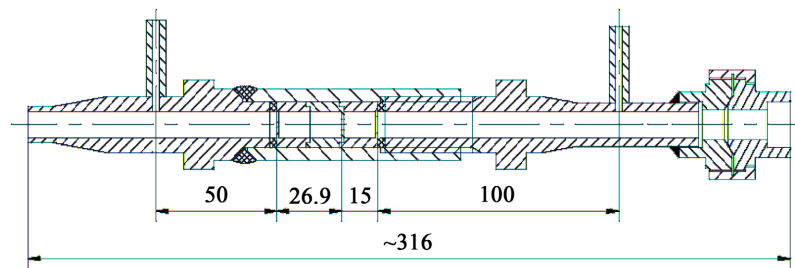


Figure 1. Structure chart of multistage orifice plate test piece
图 1. 多级孔板试验件结构图

为了能够满足试验参数要求，设计并搭建试验系统，试验系统流程图如图 2 所示。其中，给水泵为变频式柱塞泵，最大流量为 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ ，频率最大为 50 Hz，电加热器功率为单级最高 60 kW。

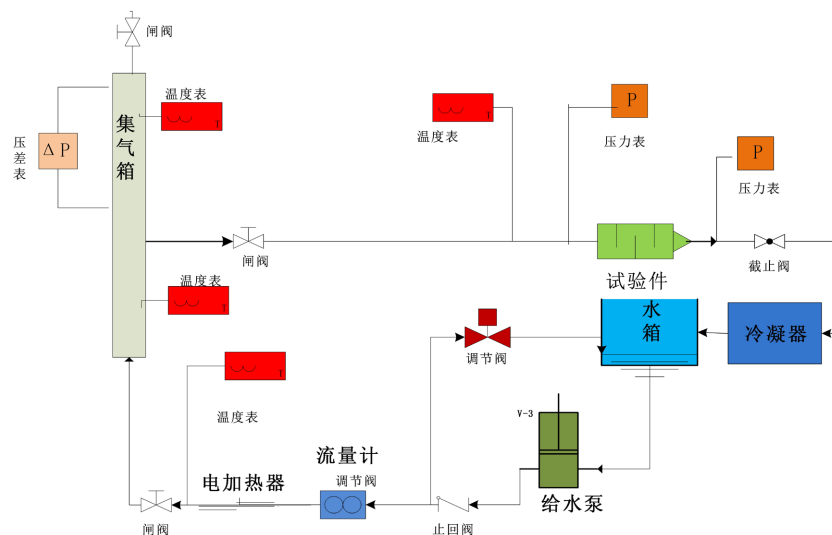


Figure 2. Flow chart of the test system
图 2. 试验系统流程图

水箱中的水被电加热器加热后通过试验件降压汽化,最后排入到冷凝器中,冷凝器中的水借助重力流入水箱,完成开式循环。考虑到试验件入口前的管路系统中存在饱和和水部分汽化的可能,在试验件入口处装集气箱,通过集气箱上端的差压值实现对入口管路气体含量监测的目的,并通过集气箱上侧的排气阀完成排气过程,当集气箱上端差压为零并且系统流量、温度满足试验参数要求时,稳定一段时间开始记录数据。

为达到试验目的,试验运行参数应满足多级孔板试验件额定参数要求,即:在入口为 4.511 MPa 饱和水、出口为 0.1 MPa 的额定参数条件下,测量试验系统回路流量值。其中,考虑到出口管道具有阻力,试验件背压以实际测量值为准。

针对试验参数对多级孔板试验件开展试验研究,当试验件一级孔径为 1.94 mm,入口试验运行状态达到 4.511 MPa 饱和水状态时,对应的试验件入口流量仅为 435 kg/h (试验值),跟缩比后设计流量 445 kg/h (理论值)相比存在一定差距。试验中发现,随着出口运行压力的逐渐降低(1 MPa~0.5 MPa),试验件入口压力和流量均不发生变化,根据该现象可以认为试验件一级孔处已达到临界状态,因此流量达到最大值,且背压的降低对流量不产生影响,故出口压力高于理论设计值对流量无影响。

由于试验件入口压力为理论设计给定压力,且近似为该流动状态下的滞止压力,因此在该压力下流经一级孔板处的临界速度为定值,为满足临界流量与理论设计对应的流量相等,最终根据面积比求得试验件一级孔径应为 1.97 mm。

按照 1.97 mm 的尺寸对一级孔口进行重新开孔后,开展试验研究,研究表明,当入口试验运行状态达到 4.511 MPa 饱和水状态时,对应的试验件入口流量值为 441 kg/h (试验值),与理论设计流量值误差仅在 $\pm 1\%$,满足设计要求,具体试验数据见表 8。

Table 8. Test data of multistage orifice plate test piece

表 8. 多级孔板试验件试验数据

| 进口压力(MPa) | 出口压力(MPa) | 进口温度($^{\circ}\text{C}$) | 流量(kg/h) |
|-----------|-----------|----------------------------|----------|
| 4.516 | 0.528 | 257.7 | 441.8 |
| 4.510 | 0.747 | 257.6 | 441.3 |
| 4.508 | 0.947 | 257.7 | 440.8 |

因此,在多级孔板试验件性能验证的基础上,为了能够满足多级孔板的设计要求,响应核电厂实际运行的技术参数,现对多级孔板的一级孔板尺寸进行修正,通过试验数据以及流体流经一级孔板的临界状态,可以计算出一级孔板处临界速度为 51.28 m/s,为使流量达到 59.1 m³/h,根据临界速度最终求得需将一级孔板孔径加大到 20.19 mm 才能满足流量设计要求。

5. 结论

目前,该孔板已应用于某核电厂中,经过多年运转证明该结构在保证有效疏水流量的前提下,大幅降低了现场管道振动和流动噪声现象的发生。

本研究相关总结如下:

- 1) 研究表明,采用零维理论公式的方法对多级节流孔板进行结构设计,误差相对较小,约为 $\pm 3\%$ 。
- 2) 试验中出现多级孔板试验件一级孔口处达到临界流的现象,出口压力的降低对流量不造成影响,在此基础上根据临界流速及设计流量要求对孔径进行加大处理,最终得到试验流量值与设计流量值误差在 $\pm 1\%$ 。
- 3) 在多级孔板的最终设计阶段,根据试验求得的临界速度将孔径进一步优化,尽可能地消除了多种

因素造成的流量偏差。

参考文献

- [1] 彭凤祥. 阀门气蚀研究[J]. 阀门, 1994(3): 11-16.
- [2] 李彦辉, 李如源, 杨璋. 孔板气蚀诱发管道振动问题分析与处理[J]. 管道技术与设备, 2016(5): 58-60.
- [3] 钱锦远. 含阻系统中多孔板的流动分析及其工业应用研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [4] 李旭东, 李勇, 曾小康, 等. 大压降管路节流特性分析及孔板优化设计[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(5): 808-815.
- [5] 张宝峰. 多级节流孔板的设计计算[J]. 智慧电力, 2005, 33(5): 27-28.
- [6] 曾丹苓, 等. 工程热力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [7] 上海工业自动化仪表研究所, 编著. 流量测量节流装置设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1973.
- [8] 李妍, 陆道纲, 曾小康. 适用于大压降小间距管道的节流件设计及分析[J]. 核动力工程, 2013, 34(4): 126-129.
- [9] 孔珑, 等. 工程流体力学第二版[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

附录

符号:

| 拉丁字母 | 含义 | 单位 |
|------------|---------|--------------------|
| A | 流道面积 | m ² |
| C | 系数 | - |
| CD | 流量系数 | - |
| d | 直径 | mm |
| D | 管子内径 | m |
| k | 系数 | - |
| W | 质量流量 | kg/s |
| x | 干度 | - |
| Y | 比数 | - |
| l | 长度 | mm |
| Re | 雷诺数 | - |
| n | 厚度 | mm |
| Δp | 压差值 | MPa |
| 希腊字母 | 含义 | 单位 |
| v | 流体比容 | m ³ /kg |
| \bar{v} | 平均比容 | m ³ /kg |
| 下角标 | 含义 | |
| 0 | 孔口处 | |
| c | 孔口后收缩断面 | |
| tp | 两相流 | |
| g | 气相 | |
| f | 液相 | |