# 大压降管路节流特性分析及孔板优化设计

李旭东,李 勇,曾小康,杜代全,郑 华

(中国核动力研究设计院中核核反应堆热工水力技术重点实验室,四川成都 610213)

摘要:大压降孔板节流管路面临汽蚀导致的高频振动和孔板间流速过大导致的低频振动这两方面的危害。针对核电厂容积和硼控制系统典型大压降节流管路的振动现象,基于 CFD 方法分析了单级孔板节 流管路中压降、速度、流线、涡流等关键水力特性,发现单级孔板下游产生负压区而发生汽蚀,且因孔板 射流导致局部速度过大而形成涡流。采用阻塞压差评估了多级同心孔板的节流性能。相比于单级孔 板,多级同心孔板的汽蚀危害得到了较大改善,但最后一级孔板仍存在过度节流的风险。按多级孔板节 流压降几何级数递降的原则设计的渐扩型五级孔板可消除汽蚀的发生,但一级孔板压降过大导致其下 游流速过大。综合考虑汽蚀特性和流速分布而设计的多级偏心孔板结构既能规避汽蚀危害,又能最大 程度降低流速过大引发的管路低频振动,且增大孔板间距可提高上游孔板的节流能力,增加下游孔板的 汽蚀裕度,可作为大压降孔板节流管路振动综合治理的优化设计方案。

关键词:节流;孔板;汽蚀;振动

 中图分类号:TL353.11
 文献标志码:A
 文章编号:1000-6931(2018)05-0808-08

 doi:10.7538/yzk.2018.52.05.0808

## Throttling Characteristic Analysis for Pipeline with Large Pressure Drop and Optimal Design of Orifice Plate

LI Xudong, LI Yong, ZENG Xiaokang, DU Daiquan, ZHENG Hua

(CNNC Key Laboratory on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics Technology, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

**Abstract**: The orifice plate throttling pipeline with large pressure drop suffers damages from high frequency vibration caused by cavitation and low frequency vibration caused by high flow velocity. Aim at solving the vibration phenomenon of typical throttling pipeline with large pressure drop in KBA system of nuclear power plant, the key hydraulic characteristics such as pressure drop, flow velocity, streamline and eddy current were simulated and analyzed for single-stage orifice plate throttling pipeline based on CFD method. The negative pressure area was found in the downstream of the orifice plate, which means cavitation occurred, and eddy current was formed due to the large local velocity caused by the orifice plate jet. Then, the throttling performance of multi-stage concentric orifice plate was found to be relieved greatly but not eliminated especially in the last stage orifice plate. The expanding type five-stage orifice plate was designed according to pressure drop stage-decreasing principle, with which the possibility of cavitation was eliminated but large pressure drop resulted in large flow velocity at the downstream of the first orifice plate. Multi-stage eccentric orifice plate was designed considering cavitation characteristics and velocity distribution, which can not only eliminate the harm of cavitation, but also reduce the low frequency vibration caused by large flow velocity furthest. By increasing the spacing of the orifice plates, the throttling capacity of the upstream plates can be increased and the cavitation margin of the downstream plates can be improved. As a result, multi-stage eccentric orifice plate can be recommended as an optimized design scheme for the vibration control of the orifice plate pipeline with large pressure drop.

Key words: throttling; orifice plate; cavitation; vibration

孔板作为常见的节流元件,广泛应用于核 电厂管道设计中,旨在将上游设备中的高压流 体降至低压后排入下游的低压设备中。目前, 节流孔板的设计通常依据设计者的经验和经验 公式,由于孔板设置不合理加剧管道振动的情 况并不少见,其主要原因有以下两种:节流过度 导致的汽蚀和孔板间流速过大且分布不均匀导 致的涡流。由于严重的汽蚀会引起管道强烈的 振动和噪音,还会引起管内壁压力波动、剥蚀损 坏和流体加速腐蚀,故当前的研究更多地集中 在汽蚀的缓解和改善。李妍等[1]基于计算流体 力学(CFD)方法对大压降小间距孔板管道的节 流进行分析和设计,提出多级偏心孔板可有效 抑制汽蚀和闪蒸的发生;钱锦远<sup>[2]</sup>采用数值模 拟和含阻系统的分析方法对单级孔板和多级孔 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、中心孔等孔板结构的 影响;杨元龙等[3] 对船用大压降给水管道节流 设计进行了分析,对比分析了同心孔板和偏心 孔板的压降特性、流场结构及湍流脉动规律。 但实际运行工况下,汽蚀的发生通常伴随着大 压降高流速,孔板间流体速度过大则会引发管 道和孔板的低频机械振动,长期则会极大缩短 材料的使用寿命,引发结构破坏失效,给核电厂 带来严重安全隐患<sup>[4]</sup>。本文采用 CFD 方法对 核电厂容积和硼控制系统(KBA)中大流量上 冲泵下游的节流管路开展流场数值计算分析, 并提出既能有效避免汽蚀又能降低孔板间最大 流速而削弱涡流的优化设计方案。

### 1 管系振动诱发机理

工程上通过孔板增加管道的局部阻力,较 高压头的流体高速流经孔板,由于节流产生较 大的局部压力损失,从而降低流体压力,但孔板 设置不合理易导致大压降管道的过度节流。过 度节流会从两个方面诱发管道振动:孔板下游 汽蚀现象导致的管道高频振动和涡流诱发的管 道低频振动。

汽蚀诱发机理如图 1 所示,当高压流体流经 流通截面相对较小的孔板时,流体速度突然增 大,这是由于流体的静压部分转化成动压造成 的,所以在孔板及其下游将产生大幅压降,当孔 板缩流断面处的压力 p<sub>ve</sub>小于运行温度对应的饱 和蒸汽压力 p<sub>v</sub>时,部分液体即汽化成蒸汽泡。 若孔板下游的压力 p<sub>2</sub>仍低于液体饱和蒸汽压 力,则气泡仍将存在于下游管道中并继续产生, 这种现象为闪蒸。下游压力恢复到液体饱和蒸 汽压力之上时,气泡将会快速溃灭,流体以极高 的速度填充原本被闪蒸汽泡占有的空间,并在气



图 1 孔板汽蚀示意图 Fig. 1 Diagram of orifice plate cavitation

泡破裂的瞬间形成高强度的微射流,局部形成高 于周围压力数千倍的冲击,且在短时间内持续几 万次地冲击管壁,产生汽蚀破坏,从而诱发流体 管路剧烈振动并伴有强烈的噪声。故避免汽蚀 的关键在于合理设计节流孔板不致使 pre低于 pr,避免产生气泡。其次,流体快速通过孔板的 过程中诱发的射流效应,会在孔板缩流断面及其 下游产生较大速度的射流,从而导致局部流速分 布极不均匀,由此诱发多级孔板之间较大尺寸的 局部涡流易导致管道和孔板的低频振动,故避免 流体流速过大能缓解管道低频振动。

### 2 计算模型

### 2.1 单级孔板模型

本模型以核电厂 KBA 中大流量上冲泵下 游的典型单孔板节流管路作为研究对象。管道 直径为 46 mm,孔板孔径为 13 mm,孔板厚度 为 5.5 mm,孔板前管道长度为 145 mm,孔板 后管道长度为 300 mm。

基于 ICEM 软件对单孔板节流管路进行 结构化网格划分(图 2),在管道内壁面及孔板 壁面设置较密的边界层网格,基于网格敏感性 分析,确认该网格模型包含 38 万网格,网格精 度满足数值模拟要求。



图 2 单级孔板节流管路结构及网格模型 Fig. 2 Structure and grid model of single-stage orifice plate throttling pipeline

### 1) 计算边界条件

本文采用 Fluent 软件进行数值模拟,数值 求解采用 k-ε 湍流模型,根据实际运行参数,设 置边界条件:入口压力为 19.3 MPa,出口压力 为 1.3 MPa,工质为 120 ℃的含硼水。

### 2) 结果分析

单级孔板节流管路纵截面流线分布如图 3

所示。从图 3 可看出,在孔板上游,液体流速较 小,当流体流经孔板时,速度急剧增大,在孔板 下游流速快速减小。其中管路中轴线上流速最 大(图 4),从图 4 可看到最大流速达 206 m/s,由 孔板导致的射流长度约为 200 mm,在射流的 作用下,在节流孔板下游形成了较大尺寸的涡 流,诱发了流体的湍流动量耗散,进而可能导致 管路低频振动。







单级孔板节流管路纵截面压力分布如图 5 所示。从图 5 可知,在孔板上游,由于管道距离 较短,流阻较小,所以孔板上游压力基本维持不 变。沿着液体流动的方向,在节流孔板区域,由 于节流孔板的局部节流作用使得压力急剧减 小。从图 6 所示的管路中轴线压力变化曲线可 看出,孔板下游形成了长度约为 50 mm 的负压 区,其中最低压力达一0.5 MPa,该流体压力低 于给水温度为 120 ℃时对应的饱和蒸汽压力 0.2 MPa,之后下游压力恢复到 1.3 MPa,表明 节流管路发生了汽蚀现象,将诱发管路的高频 振动和噪声。











### 2.2 多级孔板优化设计

单孔板节流管路面临涡流导致的低频振动 和汽蚀导致的高频振动危害,优化设计旨在消除 汽蚀危害,同时削弱孔间高流速诱发的涡流问 题。对于单孔板导致的汽蚀问题,通常采用多级 孔板节流实现分级节流,使各级节流孔板后的最 低压力高于流体对应的饱和蒸汽压力,以确保多 级节流管路不发生汽蚀,从而规避汽蚀危害。

1) 多级孔板管路汽蚀判定方法

为评估多级孔板管路是否发生汽蚀,还需 引入阻塞压差这个概念。当孔板两端的压差 Δp 增大时,经过孔板的流量也会增加,但当压 差增大到一定值时,孔板缩流断面的压力 pvc降 到流体饱和蒸汽压力pv之下,由于部分气体汽 化,流量不再随压差增加而增加,即产生所谓的 阻塞流现象,此时孔板两侧的压差即为阻塞流 压差,阻塞压差可由式(1)计算得到。孔板两端 的压差大于阻塞压差则会发生闪蒸,若孔板下 游液体压力恢复到饱和蒸汽压力之上,则会发 生汽蚀<sup>[5]</sup>。

$$\Delta p_{\rm s} = F_1^2 \left( p_1 - F_{\rm f} p_{\rm v} \right) \tag{1}$$

$$F_{\rm f} = 0.96 - 0.28 \sqrt{\frac{p_{\rm v}}{p_{\rm c}}}$$
 (2)

式中, $\Delta p_s$ 为阻塞压差; $F_1$ 为压力恢复系数,取 0.9; $p_1$ 为进口压力; $F_f$ 为临界压力比系数;  $p_v$ 为设计温度下的饱和蒸汽压力; $p_c$ 为水的热 力学临界压力,取 22.5 MPa。

2) 同心多级孔板模型及结果分析

基于单级孔板节流管路的尺寸,分别建立 了二级、三级、四级、五级节流孔板管路模型。 其中,管道直径为46 mm,孔板孔径为13 mm, 孔板厚度为5.5 mm。考虑到多级孔板节流管 路的布置空间有限,孔板间距设定为100 mm, 计算边界条件和单级孔板节流管路相同,得到 4 种多级孔板节流管路中轴线压力变化曲线, 如图7 所示,发现多级孔板由于实现了分级降 压,消除了最后一级孔板的下游的负压区,一定 程度上改善了汽蚀情况,但具体是否发生汽蚀 须进一步对各级孔板的压差情况进行判断。

多级孔板管路的分级压差情况列于表 1。 从表 1 可发现,由于多级孔板孔径相同,所以多 级孔板的压降基本相当,而每级孔板的阻塞压 差则随级数的增加而递减,所以导致最后一级 孔板均出现了压差大于阻塞压差的情况,即发 生了汽蚀。但随孔板级数的增加,最后一级孔 板发生汽蚀的情况已逐步得到了改善。

多级孔板节流管路中轴线速度变化曲线如 图8所示,发现由于射流作用,中轴线的最大速



图 7 多级孔板节流管路中轴线压力变化曲线





Table 1 Stage pressure difference and evaluation of cavitation for multi-stage orifice plate throttling pipeline



多级孔板节流管路中轴线速度变化曲线 图 8

Centerline velocity variation curves of multi-stage orifice plate throttling pipeline Fig. 8

度均发生在第1级孔板下游。从图9可直观看 出,最大流速随孔板的增加而降低,说明多级孔 板不但能改善汽蚀情况,还能有效降低管路最 大流速。



图 9 最大流速随孔板级数变化曲线 Variation of maximum flow velocity Fig. 9 with orifice plate series

#### 渐扩型同心多级孔板模型 2.3

多级孔板虽能很大程度上改善管路的汽 蚀,但同一孔径的多级孔板易引发最后一级孔 板的汽蚀,考虑到阻塞压降随孔板级数的增加 而降低,将多级孔板设计成口径渐扩的结构能 解决该问题,为确保每级孔板的压差均小于阻 塞压差,每级孔板的压降应按几何级数递减<sup>[6]</sup>。

 $\Delta p_{\rm H} = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 + \dots + \Delta p_n \quad (3)$  $\Delta p_1 = 2\Delta p_2 = 4\Delta p_3 = 2^{n-1}\Delta p_n$ (4)式中, n 为孔板级数。

根据《DL/T 5054—1996 火力发电厂汽 水管道设计级数规定》,节流孔板孔径[7]可表 示为:

$$D_{\rm k} = \sqrt{\frac{421.\,6G}{\sqrt{\rho\Delta\rho}}}\tag{5}$$

式中,Dk为节流孔板的孔径,mm;G为流量, t/h;o 为流体密度,kg/m<sup>3</sup>。

得到五级孔板的孔径分别为13、14.6、 19.4、20.8、24.8 mm。渐扩型同心五级孔板节 流管路结构如图 10 所示。



渐扩型五级孔板节流管路结构 图 10 Fig. 10 Structure of expanding type five-stage orifice plate throttling pipeline

渐扩型五级孔板中轴线压力变化如图 11 所示,每级孔板压降随孔板级数的增加呈几何



图 11 渐扩型五级孔板节流管路中轴线压力和速度变化曲线 Fig. 11 Centerline pressure and velocity variation curves of expanding type five-stage orifice plate throttling pipeline

式递降;从中轴线的速度变化曲线可看出,通过 第1级孔板的流速最大,达148 m/s。渐扩型 五级孔板管路分级压差及汽蚀情况判定列于表 2。由表2可看出,渐扩型五级孔板管路中的每 级孔板均不会发生汽蚀,但由于第1级孔板上 下游压降接近于总压降的1/2,导致最大流速 偏大。

### 表 2 渐扩型五级孔板管路分级压差及汽蚀情况判定 Table 2 Stage pressure difference and evaluation

of cavitation for expanding type five-stage orifice plate throttling pipeline

孔板级数	$\Delta p/\mathrm{MPa}$	$\Delta p_{ m s}/{ m MPa}$
第1级	10.74	15.48
第2级	4.09	7.14
第3级	2.84	4.22
第4级	1.39	2.22
第5级	0.64	1.29

### 2.4 多级偏心孔板模型

1) 模拟结果及评估

多级同心孔板由于最后一级孔板存在过 度节流的风险,易导致汽蚀;渐扩型多级同心 孔板采用几何级数递减降压方法,避免汽蚀 的同时却使得第1级孔板的压降超过了总压 降的1/2,导致流体快速通过多级孔板时形成 大尺寸的涡流区域,极易导致管道和孔板的 低频振动。为综合考虑汽蚀危害和涡流因 素,建立了多级偏心孔板,如图12所示。偏 心孔板采用了同一类型的孔板结构,仅将相 邻两级孔板的孔口按180°旋转错位布置,孔 口直径为13 mm。

五级偏心孔板节流管路流线分布如图 13 所示,发现最大流速仍出现在第1级孔板下游, 但相比多级同心孔板和渐扩型多级同心孔板已 有了大幅降低,最大流速约 85 m/s,该最大流 速已接近孔板缩流断面的流速 71 m/s,在节流 管路中流体的流动方向上,相邻的两级孔板之 间依然形成了漩涡,但尺寸较前两种设计已大 为减小,这是由于五级偏心孔板结构的逐级导 流作用,削弱了节流孔板区域流体射流效应,降 低了各级孔板之间涡流的诱发概率,减小了流 体局部涡流的尺度,因此能减缓管道和孔板的 低频振动。



图 12 五级偏心孔板节流管路结构 Fig. 12 Structure of five-stage eccentric orifice plate throttling pipeline



图 13 五级偏心孔板节流管路流线分布 Fig. 13 Distribution of streamline of five-stage eccentric orifice plate throttling pipeline 五级偏心孔板节流管路压力分布如图 14 所示,各级孔板下游并未出现负压区,依次取各 级孔板上、下游截面上的最大压力差得到分级 压差列于表 3,发现各级孔板最大压差均小于 相应的阻塞压差,说明五级偏心孔板节流管路 不会发生汽蚀。





### 2) 孔板间距敏感性分析

由图 13 的流线分布可发现,上一级孔板产 生的射流直接冲击到下一级孔板,说明相邻孔 板的间距限制了流体的流动,有必要进一步对 孔板间距进行敏感性分析。为此对孔板间距为 120、150、200、250 mm 的 4 种节流管路进行模 拟,得到对应的流线分布如图 15 所示。可发现 随孔板间距的增大,流体流速增加幅度较小,流 体冲击下游孔板的趋势减缓,涡流程度进一步 减小。

### 表 3 五级偏心孔板节流管路分级压差 及汽蚀情况判定

 Table 3
 Stage pressure difference and evaluation

of cavitation for five-stage eccentric

orifice plate throttling pipeline

孔板级数	$\Delta p/\mathrm{MPa}$	$\Delta p_{ m s}/{ m MPa}$	
第1级	3.56	15.42	
第2级	4.93	13.52	
第3级	5.18	10.44	
第4级	5.37	7.36	
第5级	3.8	3.89	

多级偏心孔板综合了多级同心孔板和渐 扩孔板的优点,但汽蚀裕度(阻塞压差和级压 差的差值)逐级减小。为探究间距对各级孔 板汽蚀裕度的影响,得到各级孔板汽蚀裕度 随孔板间距的变化如图 16 所示。发现从第 1级到第5级孔板,汽蚀裕度随孔板间距增加 的变化趋势由降低逐渐转变成增加:第1级孔 板的汽蚀裕度持续降低,第2级孔板汽蚀裕度 先降低再增加,第3级孔板汽蚀裕度同样是先 降低再增加,但增加的趋势在间距为120 mm 时已经出现,第4级孔板汽蚀裕度先增加后持 平,而第5级孔板汽蚀裕度随间距的增加而持 续增加。说明在相同的总压降下,适当增加 孔板间距能在一定程度上提高上游孔板的节 流能力,增加下游孔板的汽蚀裕度,从而进一 步降低下游孔板的汽蚀风险。



图 15 不同孔板间距下五级偏心孔板节流管路流线分布

Fig. 15 Distribution of streamline of five-stage eccentric orifice plate throttling pipeline

under different orifice plate spacings



Fig. 16 Variation of cavitation margin with orifice plate spacing at all levels

### 3 结论

本文针对核电厂容积和硼控制系统中大流 量上冲泵下游的节流管路开展了振动分析和节 流特性评估,首先采用了 CFD 数值模拟方法验 证了单级孔板节流管路诱发的汽蚀现象和射流 作用导致的涡流现象。多级孔板的设计能在一 定程度上缓解汽蚀危害和降低最大流速,但最 后一级孔板仍存在由过度节流导致汽蚀的可 能。采用降压逐级几何递减方法设计的渐扩型 同心多级孔板能有效消除汽蚀的发生,但在射 流作用下,第1级孔板下游流速过大且分布不 均匀诱发了大尺寸涡流,不利干消除管道和孔 板的低频振动。多级偏心孔板改善了流体的流 动结构,既利用逐级倒流削弱了孔板的射流作 用,降低了最大流速和减小了涡流尺寸,又使得 流体在孔板间充分流动而改善了节流效果,消 除了各级孔板的汽蚀危害,并且增大孔板之间 的间距能提高上游孔板的节流能力,提高下游 孔板的汽蚀裕度,能为大压降节流管路的振动 综合治理提供借鉴。

### 参考文献:

[1] 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.

> LI Yan, LU Daogang, ZENG Xiaokang. Design and analysis of throttle orifice applying to small

space with large pressure drop[J]. Nuclear Power Engineering, 2013, 34(4): 126-129(in Chinese).

- [2] 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].杭州:浙江大学,2016.
- [3] 杨元龙,郑文.船用大压降给水管道多级孔板设 计及节流特性研究[J].船海工程,2015,44(3): 164-168.
   YANG Yuanlong, ZHENG Wen. Design of the multistage orifice plate and throttle characteris-

tics for marine feed pipe with large pressure drop [J]. Ship & Ocean Engineering, 2015, 44(3): 164-168(in Chinese).

- [4] 何超,赖姜,颜军明,等. 孔板汽蚀诱发管道振动 问题研究[J]. 核动力工程,2016,37(S2):65-69.
  HE Chao, LAI Jiang, YAN Junming, et al. Research on vibration issue due to pipe orifice cavitation[J]. Nuclear Power Engineering, 2016, 37 (S2): 65-69(in Chinese).
- [5] 陈娟.节流孔板在发电厂的应用[J].广东电力, 2004,17(4):46-48.
  CHEN Juan. Applying throttle orifice to power plants[J]. Guangdong Electric Power, 2004, 17 (4): 46-48(in Chinese).
- [6] 张宝峰. 多级节流孔板的设计计算[J]. 西北电 力技术,2005,33(5):27-28.
- [7] 电力工业部东北电力设计院.DL/T 5054—1996 火力发电厂汽水管道设计技术规[S].北京:中 国电力出版社,1996.