

# 大流量旁通节流空化现象 数值模拟对比分析

王明鹤<sup>1</sup>, 刘建军<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>海军驻大连地区第一军事代表室, 辽宁 大连

<sup>2</sup>中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉

Email: \*liujianjun\_1@163.com

收稿日期: 2020年9月24日; 录用日期: 2020年10月9日; 发布日期: 2020年10月16日

## 摘 要

利用FLUENT多相流模型中的混合模型对大流量给水旁通节流空化现象进行了数值仿真对比分析, 结果表明随着给水旁通管内介质流量的增加节流孔板后高温给水的空化现象越严重; 当给水旁通管内介质流动达到某一临界值时节流孔板后高温给水几乎全部空化; 多级节流孔板会显著降低高温给水节流空化的程度, 同时3级节流孔板会明显增加给水旁通管路的阻力, 3级节流孔板的阻力是1片节流孔板的2.5倍; 随着管内压力的波动高温给水与水蒸气之间出现了瞬间的相互转化, 这一转化过程造成了给水管路内壁的剥蚀及给水管路振动。

## 关键词

给水旁通, 节流调节, 空化, 数值模拟

# Comparative Analysis on Numerical Simulation of Cavitation Phenomenon of Large Flow Bypass Throttle

Minghe Wang<sup>1</sup>, Jianjun Liu<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>The First Military Representative Office of the Navy in Dalian District, Dalian Liaoning

<sup>2</sup>China Ship Development and Design Center, Wuhan Hubei

Email: \*liujianjun\_1@163.com

Received: Sep. 24<sup>th</sup>, 2020; accepted: Oct. 9<sup>th</sup>, 2020; published: Oct. 16<sup>th</sup>, 2020

\*通讯作者。

## Abstract

The mixed model of fluent multiphase flow model is used to simulate and analyze the cavitation phenomenon of large flow bypass throttling. The results show that the cavitation phenomenon of high temperature feed water is more serious with the increase of medium flow rate in the bypass pipe. When the medium flow in the bypass pipe reaches a certain critical value, the high temperature water supply after the orifice plate will almost be cavitating. The multi-stage orifice will significantly reduce the cavitation degree of high temperature feed water. At the same time, the multi-stage orifice will obviously increase the resistance of feed water bypass pipeline, and the resistance of the three-stage orifice is 2.5 times of that of one orifice. With the fluctuation of the pressure in the pipe, there is an instantaneous transformation between the high temperature water supply and the water vapor, which causes the erosion of the inner wall of the water supply pipe and the vibration of the water supply pipe.

## Keywords

Water Supply Bypass, Throttle Adjustment, Cavitation, Numerical Simulation

Copyright © 2020 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

水力管路中空化现象是由于管道中流体的压力小于流体的汽化压力时流体开始汽化,生成大量小气泡,这些小气泡随着流体运动到下游速度较低、压力较高的区域时又凝结破灭[1]。该现象的产生通常是由管道外部加热或者管内流体局部加速使当地压力下降造成的[2]。水力管道中空化现象不仅会造成管道中流体流量减少,还会严重影响管道中流体的流动模式[3]。

蒸汽动力装置给水系统通常都采用给水旁通调节来实现系统给水量调节,节流孔板是给水旁通调节中的关键控制部件。其主要原理是高压力的给水高速流过节流孔板时,节流孔板的限流作用产生较大的局部压力损失,从而使流体压力大幅度降低,以满足后续系统运行的需求[4]。

目前国内外学者针对节流孔板的节流特性已经开展了大量的研究分析工作,但大多数应用对象都为电站锅炉给水系统、污水处理、化工等领域[5]。蒸汽动力船舶锅炉给水系统具有工况多、工况变化幅度大、给水流量与节流压差大等特点,因此本文将船舶锅炉给水旁通系统节流孔板为研究对象,对节流孔板水力空化现象产生规律及影响因素进行数值模拟计算。

## 2. 数学理论及方法

给水系统中给水流动过程中都遵循某些物理定律,例如:质量守恒、动量守恒、能量守恒等。针对这些物理定律,结合实际流体状态规律建立封闭的流体运动方程,然后求解方程组就能得到给水的流动状态和规律。

### 2.1. 湍流数值方程

湍流流动是常见的自然流动现象,在绝大多数工程问题中流体的流动都是湍流状态。湍流流动是一种高度非线性的复杂流动,常用于水力空化的湍流模型有  $k-\omega$  模型,其控制方程为[6]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (2)$$

式中,  $G_k$  是平均速度梯度产生的湍动能;  $G_\omega$  是湍流耗散产生的能量;  $\Gamma_k$  与  $\Gamma_\omega$  分别是  $k$  与  $\omega$  的扩散率;  $Y_k$  与  $Y_\omega$  分别是湍流引起的  $k$  与  $\omega$  的耗散率;  $S_k$  与  $S_\omega$  分别是  $k$  与  $\omega$  的源项。

## 2.2. 多项流空化方程

混合模型可以求解混合相的连续、动量、第二相体积分数和相对速度的控制方程[7]。在模型中定义了平均速度  $\bar{v}_m$  :

$$\bar{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \bar{v}_k}{\rho_m} \quad (3)$$

式中,  $\alpha_k$  是第  $k$  相的体积分数;  $\rho_m$  是混合密度; 则可得出两相流的控制方程。

连续方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_m + \nabla \cdot (\rho_m \bar{v}_m) = \dot{m} \quad (4)$$

式中,  $\dot{m}$  是空化产生的质量源项。

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \bar{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \bar{v}_m \bar{v}_m) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \bar{v}_m + \nabla \bar{v}_m^T)] + \rho_m \bar{g} + \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \bar{v}_k \bar{v}_k \right) \quad (5)$$

式中,  $n$  是流体相数;  $\mu_m$  是混合粘度。

多相流动中, 整个流域内都含有不可冷凝气体, 其密度随着当地压力的变化而变化。因此, 引入混合密度函数  $\rho$ , 它和蒸汽质量分数  $f_v$  的关系如下:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{f_v}{\rho_v} + \frac{f_g}{\rho_g} + \frac{1-f_v-f_g}{\rho_l} \quad (6)$$

式中, 下标  $v$ 、 $g$ 、 $l$  分别代表蒸汽、气体、和液体状态。

## 3. 孔板空化现象数值模拟

### 3.1. 计算模型

蒸汽动力船舶动力系统给水系统的功能是将除氧器中除氧后的凝水经给水泵送入锅炉, 是实现蒸汽动力系统封闭循环的一个重要环节[8]。船舶实际运行过程中对动力系统的机动性要求较高, 各工况切换过程中锅炉对给水的的需求量变化巨大, 因此通过设置给水再循环管路来减小工况变化对给水系统运行的影响, 给水系统原理如图 1 所示[9]。当船舶离码头、狭水道航行、防台风等极端状态下, 动力系统需要保持最大机动性。此时, 动力系统对外几乎没有功率输出, 锅炉对给水的的需求量几乎为零, 给水泵的全部给水流量均需经节流孔板减压后通过给水再循环管路返回至除氧器, 计算中用到的给水系统旁通节流孔板及管道几何结构如图 2 所示, 管道直径为 90 mm, 孔板前端管路长度为 200 mm, 单片孔板后端管路长度为 1000 mm, 孔板厚度简化为 0 mm, 孔径为 20 mm; 3 片孔板相互间隔 200 mm, 后端孔板后端管路长度为 600 mm, 如图 3 所示。

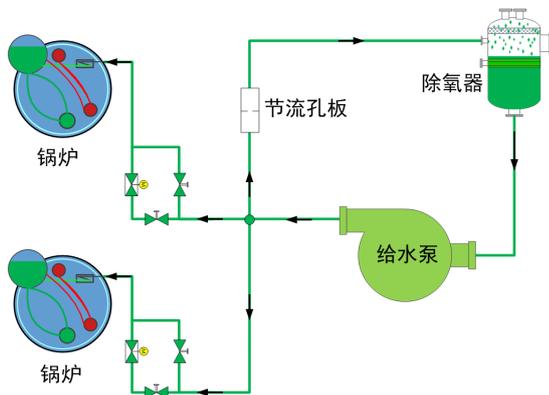


Figure 1. Schematic diagram of feed water system  
图 1. 给水系统原理图

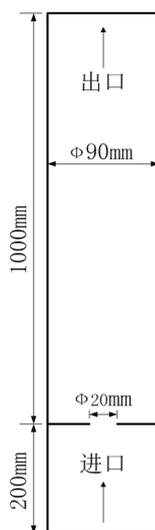


Figure 2. Single piece throttle orifice  
图 2. 单片节流孔板

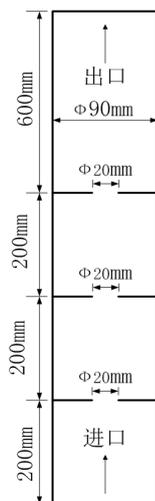


Figure 3. 3 pieces of orifice plate  
图 3. 3 片节流孔板

### 3.2. 网格划分及数值计算

为捕捉高温给水经过节流孔板后压降产生的空化现象, 将计算流体区域内的网格进行了加密处理, 基于网格敏感性分析确认该模型共含 100 万个单元, 网格精度满足数值模拟要求, 网格如图 4 所示。

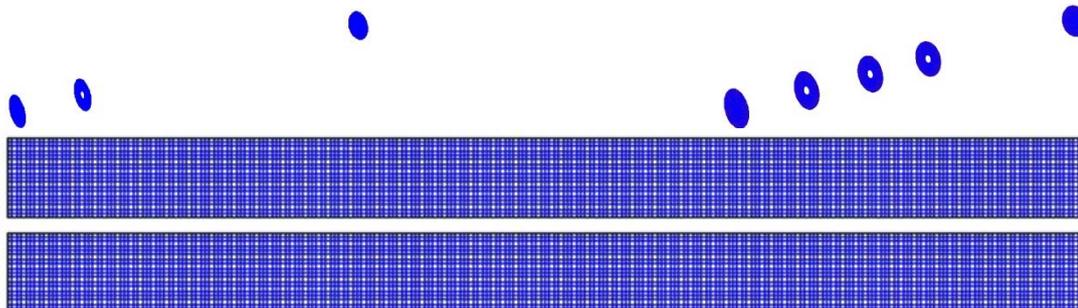


Figure 4. 3D and grid map of computing domain

图 4. 计算域三维及网格图

### 3.3. 计算工况

计算了不同给水流量下, 高温给水通过 1 片节流孔板和 3 片节流孔板后的空化情况, 具体工况如表 1 所示。

Table 1. Calculation conditions

表 1. 计算工况

序号	给水流量(kg/s)	给水温度(°C)	出口背压(pa)
工况 1	22	105	305,000
工况 2	26	105	305,000
工况 3	30	105	305,000
工况 4	34	105	305,000

### 3.4. 计算结果分析

图 5 给出了各计算工况下管路内高温给水所占的体积百分比, 从图中可以明显看出随着管路内流量的增加高温给水逐步汽化, 管内水蒸气的体积百分比逐步增加, 即高温给水的体积百分比逐步减小。在孔板的节流下, 孔板靠近管壁两侧下游首先出现了低压的斡旋区域, 同时在该区域首先产生了高温给水的空化; 随着管内流量的增加, 高温给水通过节流孔板的压力降也逐步增加, 压降增加同时也加剧了管内高温给水的空化现象。相同流量的情况下, 1 片节流孔板后的空化程度明显比 3 片节流孔板恶劣; 当给水旁通管路内设置 3 片节流孔板时, 迎流方向第一节流孔板和第二节流孔板后方均没有出现空化现象, 仅在第三节流孔板后出现了较弱的空化现象。因此, 大流量给水旁通管路设置多级节流孔板是缓解节流空化的有效手段。

图 6 给出了各工况下水管内高温水及空化水蒸气混合物的速度分布, 从图中可以明显看出随着工况的增加, 管内的流速逐步增大; 在管内发生空化的部位, 介质的流速也出现了增大; 当管内介质流量达到一定量的时候, 节流孔板后面管路内的介质出现大面积空化, 管内介质流速瞬间增大, 实际工程实例中管内会出现了噪声啸叫及振动现象。当给水旁通管路内设置 3 片节流孔板时, 管内介质流速逐步分级降低。

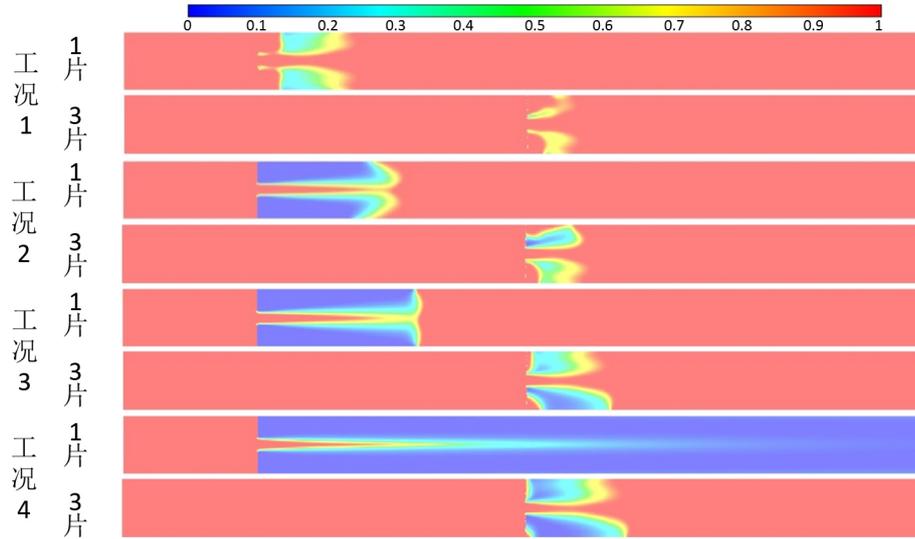


Figure 5. Variation of water content under different working conditions

图 5. 不同工况下水含量变化

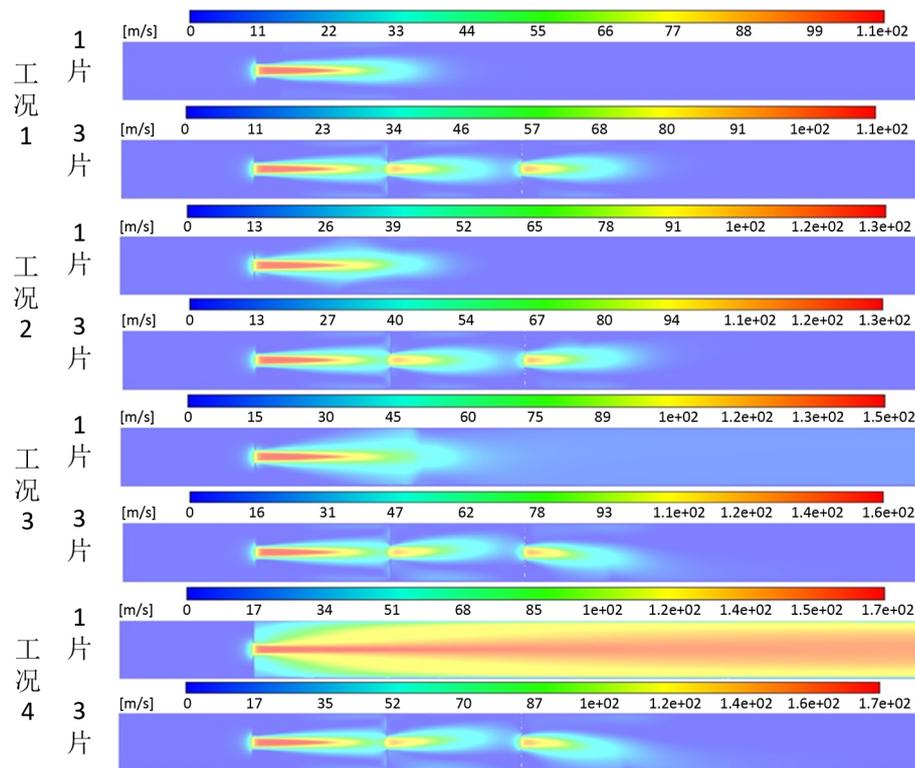
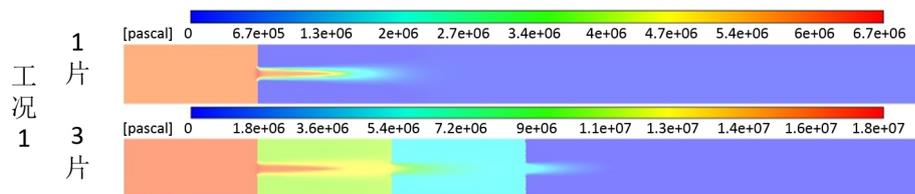
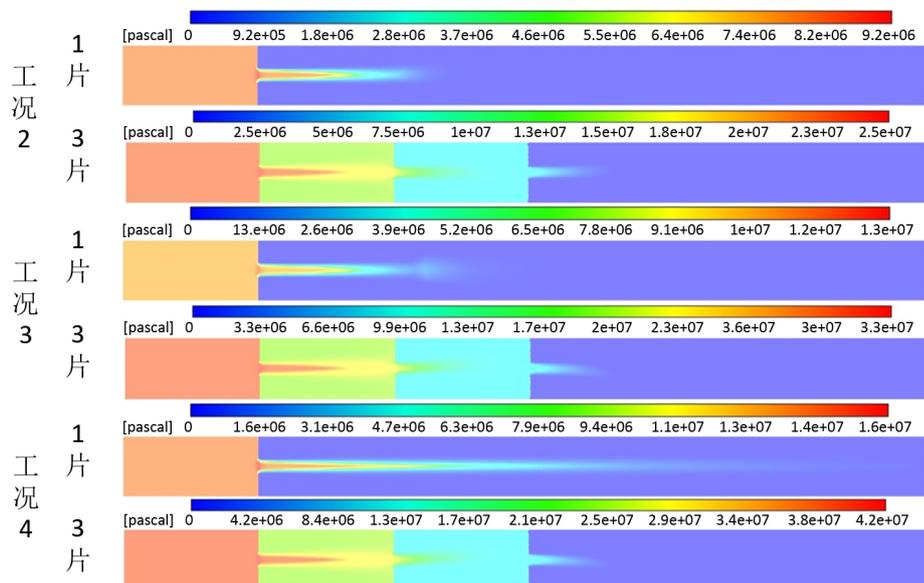


Figure 6. Variation of velocity in pipe under different working conditions

图 6. 不同工况下管内流速变化





**Figure 7.** Variation of total pressure under different working conditions  
**图 7.** 不同工况下总压变化

图 7 给出了各工况下管内高温水及空化水蒸气混合物的总压分布, 在保持出口计算压力不变时, 随着管内介质流量的增加及管内空化程度的增大管路进出口压差逐步加大。当给水旁通管路内设置 3 片节流孔板时, 给水旁通管路节流孔板前后的压降较 1 片节流孔板增大非常多, 压降几乎增加 2.5 倍。实际工程中多级节流孔板大压降会导致给水离心泵改变功率流量特性运行点, 造成给水离心泵出口压力增加, 同时给水离心泵的流量下降。

#### 4. 结论

本文针对蒸汽动力船舶动力系统给水系统旁通节流调节管内发生的空化现象, 采用 CFD 数值仿真的方法进行了现象复现。仿真计算结果表明随着给水旁通管内介质流量的增加, 管内节流孔板后方介质空化的现象越严重, 直至管内全部充满空化的水蒸气; 给水管路内设置 3 片节流孔板与设置 1 片节流孔板相比可以大大降低高温给水空化的程度, 但给水旁通管路的压力会显著增加。实际工程中由于给水旁通管内出现了非常严重的高温给水空化现象, 给水管内压力波动造成了不锈钢给水管路内壁金属剥蚀、且给水空化过程中水蒸气产生和泯灭的过程中造成了给水管路的剧烈振动。给水旁通管路采用多级节流孔板降压后虽然高温给水空化现象有所缓解, 但给水旁通管路的阻力成倍的增加可能造成给水泵偏离工况运行点, 造成给水泵振动增大或者烧毁。所以大流量高压差给水旁通管路节流孔板的设置需要综合权衡考虑, 投入更多的研究。文中的研究成果可为后续大流量高压差给水旁通管道设计提供参考。

#### 参考文献

- [1] 白泽宇. 复杂多相流动的数值模拟与分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- [2] Berg, A., Iben, U., Meister, A., *et al.* (2005) Modeling and Simulation of Cavitation in Hydraulic Pipelines Based on the Thermodynamic and Caloric Properties of Liquid and Steam. *Shock Waves*, **32**, 385-388.
- [3] Li, X.J., Yuan, S.Q., Pan, Z.Y., *et al.* (2013) Numerical Simulation of Leading Edge Cavitation within the Whole Flow Passage of a Centrifugal Pump. *Science China-Technological Sciences*, **56**, 2156-2162.  
<https://doi.org/10.1007/s11431-013-5311-5>
- [4] 杨元龙. 船用锅炉给水再循环管路上的节流孔板设计与优化[J]. 中国舰船研究, 2015, 10(5): 99-103.

- [5] 张宁宁. 水力空化规律研究及其在油田污水处理上的应用[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学, 2005.
- [6] 徐志程. 基于多相流的通气超空泡形态研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [7] 张伟. 汽蚀模型及湍流修正对非稳态汽蚀影响机理[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [8] 杨元龙, 吴金祥, 郑子都, 等. 汽轮给水机组切换工况下船舶蒸汽动力系统的响应特性[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(2): 150-155.
- [9] 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.