

仿生引流式煤液化调节阀阀座空化抑制行为研究

刘秀梅¹, 刘威威¹, 贺杰², 李贝贝¹, 张雨佳¹

(1. 中国矿业大学机电工程学院, 221116, 江苏徐州; 2. 徐州工程学院电气与控制工程学院, 221018, 江苏徐州)

摘要: 为了抑制煤液化调节阀中空化的产生与发展,本文基于 Bio-TRIZ 仿生学理论,以墨鱼喷嘴结构作为生物原型,设计一种仿生引流式结构的煤液化调节阀,通过数值模拟方法研究并比较仿生阀和原始阀内部流场中压力和汽相体积分数的分布。引入特征量空化抑制效率 η ,定量地评价该仿生引流式阀座结构抑制空化的效果。同时,搭建了调节阀可视化实验系统,采用高速相机对不同阀座的空化形态进行捕捉,分析了仿生引流式阀座对空化长度的影响。结果表明:作为关键部位的阀芯头部易受空化损伤,优化后的仿生引流阀座结构能有效抑制空化的产生与发展,汽相有效体积和空化长度均减小;此外,小开度工况下仿生引流阀座结构抑制了空化发生剧烈程度,在大开度工况下仿生引流阀座结构加速了空化的发展与溃灭;随着调节阀开度的增加,该仿生结构的空化抑制效率提高,在 70% 开度下空化抑制效率达到了 32.81%。

关键词: Bio-TRIZ; 仿生引流; 煤液化调节阀; 空化抑制

中图分类号: TH137 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202209004 **文章编号:** 0253-987X(2022)09-0028-09



OSID 码

Cavitation Suppression of Bionic Valve Seat with Drainage Hole of Coal Liquefaction Regulating Valve

LIU Xiumei¹, LIU Weiwei¹, HE Jie², LI Beibei¹, ZHANG Yujia¹

(1. School of Mechanical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. School of Electrical and Control Engineering, Xuzhou Institute of Engineering, Xuzhou, Jiangsu 221018, China)

Abstract: To inhibit the generation and development of cavitation, a bionic coal liquefaction regulating valve with a drainage structure is designed by following the Bio-TRIZ bionics theory and taking the cuttlefish nozzle structure as the biological prototype. The distributions of pressure and vapor volume fraction in internal flow fields of the bionic valve and the original valve are studied and compared by numerical simulation. The characteristic quantity of cavitation suppression efficiency (η) is introduced to quantitatively evaluate the cavitation suppression effect of the bionic valve seat structure. At the same time, a visual experiment system of the regulating valve is built and the cavitation images of different valve seats are captured by high-speed cameras. The influence of the bionic valve seat on the cavitation length is analyzed. The results show that the head of the valve, which is a key part, is vulnerable to cavitation damage. The optimized bionic seat structure can effectively inhibit the generation and development of cavitation, and the effective volume of vapor phase and the cavitation length are reduced. In addition, the bionic valve seat can suppress the severity of cavitation under small opening

conditions and accelerate the development and collapse of cavitation under large opening conditions. The cavitation suppression efficiency improves with the gradual increase in opening and reaches 32.81% at 70% opening.

Keywords: Bio-TRIZ; bionic drainage; coal liquefaction regulating valve; cavitation suppression

调节阀作为煤液化系统中的重要液压元件,其性能的优劣严重影响着煤液化系统的安全性和稳定性^[1]。然而,空化汽蚀是调节阀长期运行中常见的失效形式,通常会对调节阀的结构造成严重损坏。特别是在调节阀喉部的节流部位,介质流速的突然增大导致静压明显低于饱和蒸汽压,析出的气泡与流体介质形成“两相”运动,产生节流空化现象^[2-3]。这不仅缩短了调节阀的使用寿命,而且增加了维护和维修的成本。另外,调节阀内的空化流动也会引起噪声和振动。因此,开展对调节阀空化特性的研究迫在眉睫,提高煤液化调节阀的抗空化性能更为重要。

针对调节阀空化失效的问题国内外许多学者开展了相关研究。Zheng等^[6]研究煤液化调节阀阀芯头部的失效形式,分析得出在阀芯头部出现高速回流区域,由于空泡的坍塌和回流的驱使下,阀芯头部发生严重的空蚀磨损。吴姿宏等^[7]研究调节阀的进口压力对空化位置、形状、面积和强度在轴向和径向上的影响,并分析轴向和径向的压力分布,结果表明空化过程径向呈环形,轴向呈不规则多边形。Liu等^[8]针对调节阀内部复杂的空化流动现象,采用实验研究的方法分析了沿着流道轴向方向上空化区域分布的形式、空化轴向长度随背压的发展。Cobera等^[9]提出了一种新的蝶形阀多参数优化模型,研究了蝶形阀流场的变化,并对蝶形阀的结构进行了优化。Ou等^[10]研究了减压阀的内流空化特性,研究了压力变化对空化的影响,为减压阀的优化提供了理论依据。

为了进一步提高调节阀的抗汽蚀性能,延长使用寿命,国内外学者提出抑制调节阀空化的方法^[11-12]。一方面,研究人员专注于开发高强度材料,使用高强度、高刚性和高韧性材料代替常规材料^[13],然而这种提高调节阀强度的方法并不经济。另一方面,开展了添加仿生结构以改变流动模式的研究^[14]。在自然界中,生物为了适应不断变化的复杂外部环境,生物各自进化出独特的生活方式,这些能为工程问题提供快速有效的解决方案^[15]。徐贺等^[16]根据红柳树皮的形态设计出6种仿生抗冲蚀凹槽结构,以汽相体积百分比与冲蚀磨损率作为变

量,验证该仿生阀芯结构可有效减少含沙水流对阀芯的冲蚀作用。李畅等^[17]分析了具有仿生射流孔阀芯和非光滑槽阀座结构对主阀口空化特性的影响,并通过 ISIGHT 对不同结构参数进行优化,最后通过可视化实验观察不同工况下的阀口空化现象。Wang等^[18]研究一种将动物(功能仿生)和植物(形状仿生)的优点结合在一起的新方法,设计一种新型的水液压阀阀芯结构,以提高阀芯的抗颗粒侵蚀性能和阀芯的使用寿命。

本文针对煤液化调节阀内的严重空化问题,主要基于 Bio-TRIZ 方法设计调节阀的仿生引流式阀座结构,采用数值和实验相结合的方式对仿生引流式结构调节阀的空化情况进行定量分析。本文的研究结果可为阀门类空化现象研究与延长调节阀的使用寿命提供有益的借鉴。

1 实验系统

实验系统装置如图1所示,主要包括高速相机(Phantom VEO-710L)、光纤灯(LA-100USW)、透明阀和计算机。压力表用于测量入口和出口压力,上游涡轮流量计用于测量进口流量。调节阀的几何结构来源于煤直接液化工程中的热高分调节阀,根据流体力学相似理论,其尺寸是原始几何尺寸的1/10,实验阀材料采用透明光滑的有机玻璃(PM-MA),以便观察空化流场。实验过程中,采用光纤光用作高强度照明光,高速相机的拍摄帧率设置为20 000 帧/s,用于观察空化瞬时形态,实验中采用同

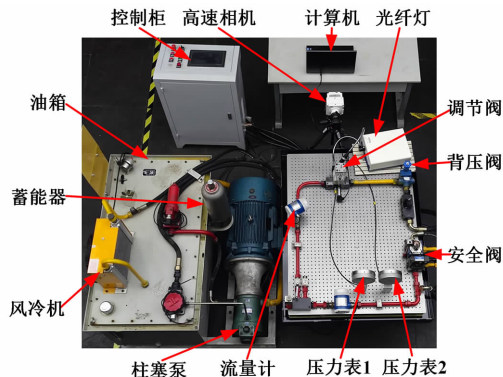


图1 实验系统装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

向照明的方式,即光纤源和高速相机安装在同一侧。

2 数值模拟

借助于 Fluent 软件对煤液化调节阀空化流场的分布特性进行仿真研究,通过数值模拟方法模拟和分析不同阀座(原始阀座和仿生阀座)结构的流场分布特征,并探究仿生引流式阀座结构对空化流场特性的影响。

2.1 控制方程

在数值模拟中,忽略流体重力和传热性能的影响,并且假定液压油是完全不可压缩的流体。基于上述假设,调节阀数值模拟控制方程如下。

(1)连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0 \quad (1)$$

式中: $\mathbf{v}_m$ 为速度矢量; ρ_m 为混合相密度。

(2)动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \mathbf{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = -\Delta p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T)] \quad (2)$$

式中: μ_m 为混合相黏度; Δp 是流体微元压力梯度。

(3)本文基于 Schnerr-Sauer 的空化模型,液体蒸汽传质受蒸汽输送方程控制

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \mathbf{v}_v) = R_e - R_c \quad (3)$$

从 Rayleigh-Plesset 方程导出的源项定义如下空化模型

$$R_e = \frac{\rho_l \rho_v}{\rho_m} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_B} \left(\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_l} \right)^{1/2}, \quad p \leq p_v \quad (4)$$

$$R_c = \frac{\rho_l \rho_v}{\rho_m} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_B} \left(\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_l} \right)^{1/2}, \quad p \geq p_v \quad (5)$$

式中: α_v 为蒸汽相体积分数; R_B 为流体微元半径; p 和 p_v 为流体微元中心压力与流体饱和蒸汽压; R_e 为蒸汽相产生率; R_c 为蒸汽相凝结率。

2.2 几何建模与网格划分

根据煤液化调节阀的工程结构和空化流动的基础理论建立如图 2 所示的调节阀三维结构,流体的流动方向与 X 轴的正方向一致,调节阀的入口和出口直径分别为 5 mm 和 25 mm,喉部的孔口直径为 6.5 mm。

由于调节阀流道为旋转对称结构,为了减少数值计算时间并提高仿真效率,本文采用 1/4 对称模型结构进行数值仿真,图 3 为对应的调节阀流体域

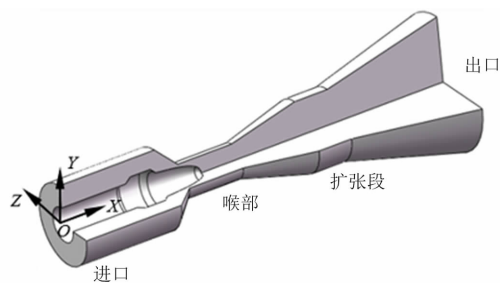


图 2 煤液化调节阀几何模型

Fig. 2 Geometric model of coal liquefaction regulating valve

几何模型。采用 ANSYS ICEM 进行网格划分,调节阀模型采用混合网格划分方式对流体域进行网格划分。由于喉部区域流场结构复杂,采用非结构化网格且进行网格加密处理,其余部分采用结构化网格以提高仿真计算效率。根据图 4 可知,当网格数大于等于 25 万,调节阀入口质量流率的变化小于 1%,因此本文选择的网格数为 251 635。

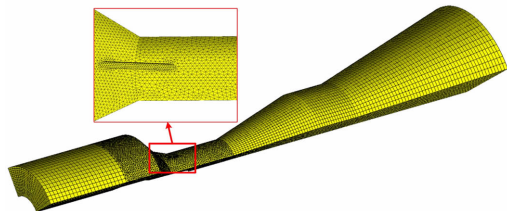


图 3 调节阀网格划分

Fig. 3 Control valve mesh division

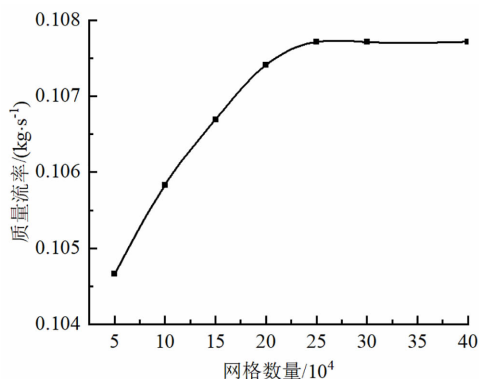


图 4 网格无关性验证

Fig. 4 Grid independence verification

本文数值模拟的边界条件和流体物理参数如表 1 所示。基于压力求解器,采用 Mixture 多相流模型、Standard $k-\epsilon$ 湍流模型和 Schnerr-Sauer 空化模型;采用标准壁面函数处理靠近壁面处流场的流动状态,压力离散格式为 PRESTO!,各方程离散格式都为二阶迎风格式,计算收敛残差均设置为 1×10^{-5} 。

表 1 调节阀的操作条件和流体物理参数

Table 1 Operation condition and fluid physical properties of control valve

操作条件	参数	汽相	液相
进口压力 4 MPa	动力黏度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	9.6×10^{-6}	0.036
出口压力 1 MPa	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	0.156	889
操作环境 0.101 MPa	饱和蒸汽压/Pa		400

3 仿生设计

本文基于 Bio-TRIZ 的仿生创新方法^[19],首先,针对调节阀失效等工程实际问题进行描述,使用

Bio-TRIZ 中的结构、空间和物质等操作域表达工程实际问题^[20-21];其次,利用 Bio-TRIZ 冲突矩阵确定 Bio-TRIZ 的特解;最后,对自然界生物特解进行分析,并完成几何模型的重构建模。

当调节阀工作时,常处于高压差大流量的工作环境下,由于节流口部位的节流作用,该区域的流速最高,而压力会降低到介质的饱和蒸气压以下,产生空化。高速介质流体会破坏阀座结构,导致调节阀空蚀失效,而海洋生物墨鱼可通过喷嘴结构改变周围流场流动,实现在海水进行快速的运动,其特性与调节阀的边界条件与功能特性极为相似。因此,结合墨鱼喷嘴的结构和功能特性,设计了调节阀的抗空蚀的仿生引流式阀座结构。阀座仿生设计的框架如图 5 所示。

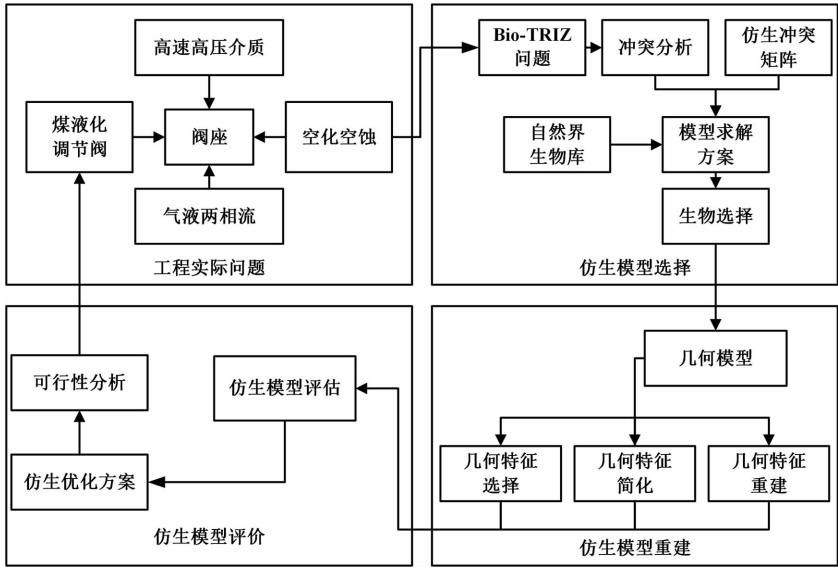


图 5 煤液化调节阀的仿生设计模型

Fig. 5 Bionic design model of coal liquefaction regulating valve

为了确保该仿生生物模型在设计后起到空化抑制的作用,在对墨鱼喷嘴结构与调节阀进行结构映射后,研究仿生结构与设计目标之间的相似性对比。相似性分析主要从功能、结构和边界条件的相似性 3 个方面进行研究。

根据相似性评价方法,分析墨鱼喷嘴结构与设计目标之间的相似性,选择权重系数的评估因子集为 $U=[u_1, u_2, u_3]=[功能, 结构, 边界条件]$,基于评价因素集并结合判断矩阵标度,判断矩阵 P 可以表示如下

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 4 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/4 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

求解判断矩阵 P 的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 以及最大特征值所对应的特征向量 $W=[w_1, w_2, \dots, w_n]$,整理计算得 $W=[0.902\ 7, 0.394\ 3, 0.172\ 2]$, $\lambda_{\max}=3.073\ 5$,为保证判断矩阵 P 的准确性和可信度,需要对判断矩阵进行一致性检验。使用随机一致性比率 P_{CR} 进行判断矩阵 P 的一致性检验

$$P_{CR} = \frac{P_{CI}}{P_{RI}} \tag{7}$$

$$P_{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{8}$$

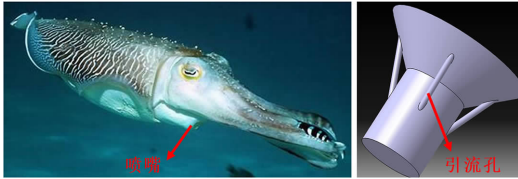
式中: P_{CI} 为一致性指标; n 为矩阵阶数; P_{RI} 为平均随机一致性指标。

查表得 $P_{RI}=0.514\ 9$,结合式(7)和式(8)计算可知 $P_{CI}=0.036\ 8$, $P_{CR}=0.071\ 3$,当 $P_{CR}<1$ 时,则

认为判断矩阵具有良好的一致性,即判断矩阵 $\boldsymbol{P}$ 的单位特征可以用作相似元素的权重系数因子。最后,生物原型与设计目标的相似度 Q 可以计算如下

$$Q = w_1q(u_1) + w_2q(u_1) + \cdots + w_nq(u_n) \quad (9)$$

其中 $q = [0.7, 0.5, 0.6]$ 。根据式(9)计算得 $Q = 0.932\ 4 > 0.9$,表明墨鱼喷嘴结构可用作仿生模型来优化煤液化调节阀的结构。因此,设计该仿生引流式阀座结构如图 6 所示,且由于尺寸结构限制,引流孔直径为 1.0 mm。



(a)墨鱼的喷嘴仿生模型 (b)调节阀仿生优化结构

图 6 墨鱼的喷嘴仿生模型及调节阀仿生优化结构

Fig.6 The bionic model of the cuttlefish nozzle and the bionic optimized structure of the regulating valve

4 结果分析与讨论

4.1 空化场分析

为了描述调节阀内部流场流体流动的变化特征,选取节流口处压力场、速度场和空化场进行分析,如图 7 所示,沿 X 轴进行均匀切片处理,计算每一个横截面上的平均值,将优化结果进行量化,来表征各个参数在轴向上的变化规律。

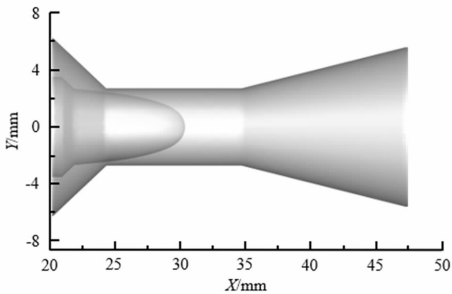
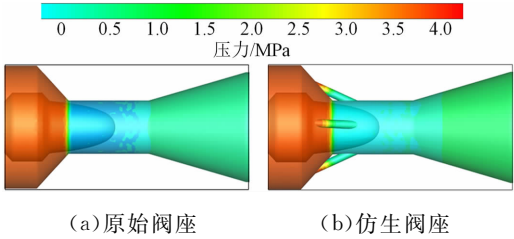


图 7 调节阀空化区域示意图

Fig.7 Schematic diagram of the cavitation area of the regulating valve

图 8 为煤液化调节阀在进口压力 4 MPa、出口压力 1 MPa 的工况下,节流口处的压力分布云图,由于流体在该区域受到的流动阻力较大,所以压力梯度较大,压力急速下降,导致空化的产生。对比原始阀座(图 8(a)),可以发现仿生阀座结构(图 8(b))中压力变化的分布位置与原始阀座相似,然而仿生引流式调节阀内部流场的压力变化梯度小,从高压

区域到低压区域的过渡相对平滑。由于该仿生引流孔结构的存在,将调节阀高压区的流体引流到喉部低压区,以改善节流口区域的压力梯度分布。



(a)原始阀座 (b)仿生阀座

图 8 压力云图

Fig.8 Pressure cloud diagram

为了分析不同阀座附近空化区域的压力变化,提取了优化前后调节阀流场压力沿轴向变化曲线如图 9 所示。仿生阀座附近由于引流口的存在会引起较小的压力波动,从而使得喉部区域的最低压力由 3 255.89 Pa 提高到 6 921.52 Pa,且处于最低压力区域的轴向长度也大幅度减小。仿生引流孔阀座结构能够提高喉部区域的最低压力,从而可以有效改善喉部局部压力分布。

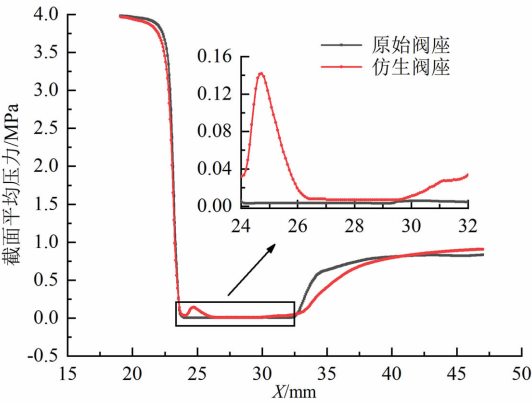


图 9 不同阀座的压力变化曲线

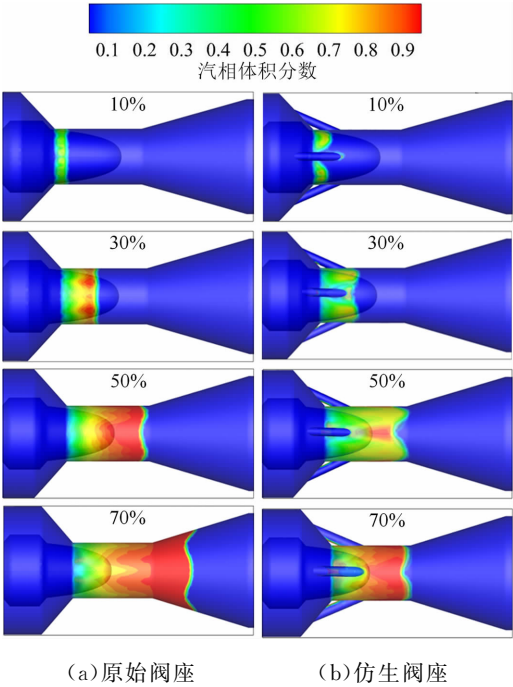
Fig.9 Pressure variation curve of different valve seats

当调节阀喉部节流区域的压力低于饱和压力时,阀芯头部会出现严重的空化现象。图 10 为具有两种阀座的调节阀在不同开度(1%、30%、5%和 7%)下的空化汽相体积分数云图,其中调节阀相对开度为

$$K = l/l_{\max}$$

式中: l 为阀芯在某一开启开度的位移; $l_{\max}$ 为阀芯的总升程。从图 1 中可以发现,仿生阀座附近空化分布位置与原始阀座相似。随着开度的增加,空化区域长度以及空化剧烈程度都在提高尽管调节阀开度不同,但是与原始阀座(图 10(a))相比,仿生引流式阀座(图 10(b))附近空化均得到了不同程度的抑

制。仿生阀座附近不仅空化长度得到了抑制,且不同位置处汽相体积分数的数值都不同程度地降低,即空化发生与发展均得到了有效抑制。



(a)原始阀座 (b)仿生阀座

图 10 不同阀座的汽相体积分数云图

Fig. 10 Cloud map of vapor phase volume fraction of different valve seats

图 11 为不同开度下两种阀座附近汽相体积分数变化曲线,汽相体积分数随着轴向距离增加先逐渐增大后急剧下降,表明空化在节流口下游附近区域产生,并向下游扩张段发展并进入溃灭阶段。由于空泡溃灭发生时较为迅速,导致汽相体积分数急

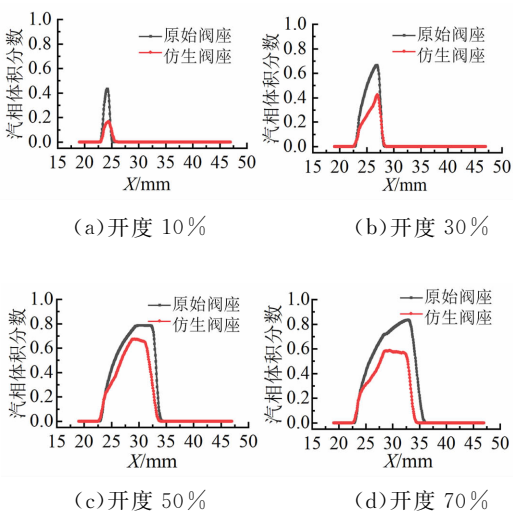


图 11 不同开度下汽相体积分数变化曲线

Fig. 11 Variation curve of vapor phase volume fraction under different opening degrees

剧下降,即在小开度工况下,如图 11(a)、(b)所示,仿生阀座结构的汽相体积分数曲线的峰值显著降低,流场各处空化得到了改善,空化区域长度没有发生改变,小开度下仿生阀座结构抑制了空化发生的剧烈程度;在大开度工况下,如图 11(c)、(d)所示,仿生引流孔结构不仅影响了汽相体积分数的大小,而且减小了空化区域的长度,加速了空化的发展与溃灭,进一步证实仿生阀座能够抑制调节阀空化的产生与发展。

4.2 空化抑制效率

为了定量评价该仿生阀座结构对空化抑制的效果,本文提出空化抑制效率 η 。调节阀内部流场汽相有效体积为

$$V = \sum_{i=1}^N \alpha_i V_i \tag{10}$$

$$\eta = 1 - V'/V \tag{11}$$

式中: N 为控制体总数; α_i 为每个控制体内的汽相体积分数; V_i 每个控制体单元体的体积; V 为原始阀座的汽相有效体积; V' 为仿生阀座的汽相有效体积。

图 12 为根据式(1)计算获得的不同开度下两种阀座结构的内部流场的汽相有效体积。从图中可以看出:随着相对开度的增大,原始阀座结构的汽相体积呈线性增大趋势,即随着开度的增加,空化剧烈程度逐渐加剧。相比较而言,仿生阀座的汽相体积增大较为平缓,特别当达到 5%开度时,汽相有效体积不再明显增加。因为仿生引流孔结构的剪切作用,使空泡在剪切作用下快速溃灭,从而抑制了空化的发展。

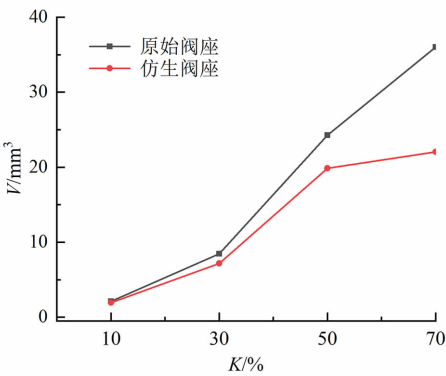


图 12 不同开度下空腔体积变化曲线

Fig. 12 Cavity volume change curve under different opening degrees

图 13 为根据式(11)计算获得的不同开度下仿生阀座的空化抑制效率变化曲线。从图中可看出,

空化抑制效率 η 随着开度的增加呈现出线性增长趋势,在 7% 开度下,空化抑制效率达到了 32.81%,表明调节阀在大开度情况下,该仿生引流式阀座结构抑制空化的效果更为显著。

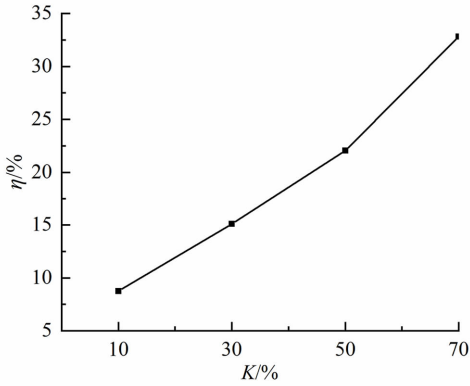


图 13 不同开度下空化抑制效率变化曲线

Fig. 13 Variation curve of cavitation suppression efficiency under different opening degrees

4.3 空化图像分析

由于空化的发展、溃灭等动力学行为使空泡群的密度和数量分布不同,其在空化图像上对应的灰度值亦会发生变化^[22-23]。为了更加深入地探究空化附着区域的分布特性,本文基于图像后处理技术,分析了空化图像沿流动方向上灰度值的变化规律。

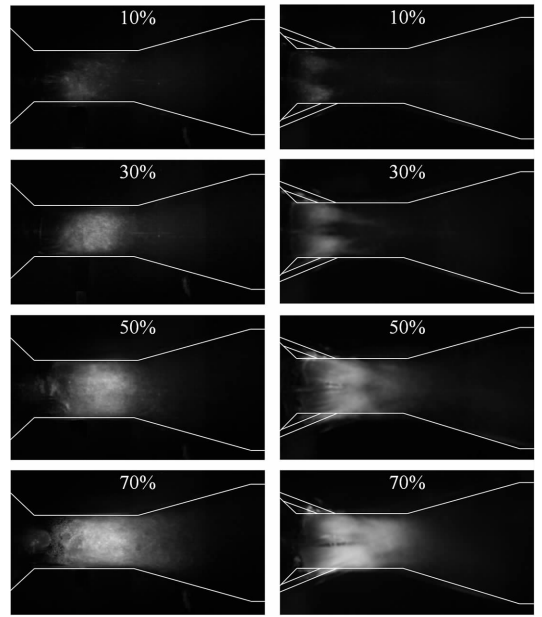
由于空化的形成、发展和溃灭具有周期性^[24],为了减小其对稳态空化形态的影响,下文所提到的空化灰度图像都是将同一工况下连续拍摄的 8 张图像进行叠加计算得到的^[25],并借助空化灰度图像灰度值变化来描述空化区域的变化规律。图 14 为拍摄进口压力为 4 MPa、出口压力为 1 MPa 的工况下,不同开度下两种阀座附近空化区域的发展过程。实验结果表明,随着相对开度的增加,两种阀座附近图像平均值图像的灰度值均增大,空化剧烈程度都增强。但是,与原始阀座相比,不同开度下仿生阀座的空化图像平均灰度值均减小,说明仿生引流孔结构能够抑制空化的发展,与仿真结论相一致。

为了进一步定量分析该仿生阀座的空化抑制效果,采用空化图像的平均灰度值 ψ 来进一步量化空化的轴向长度,其数学表达式为

$$\psi(j) = \frac{1}{X} \sum_{j=1}^X \varphi(i, j) \quad (12)$$

式中 $\varphi(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I(i, j, n)$ 为图像的平均灰度值矩阵元素。

本文将平均灰度值 ψ 大于其中值 ψ_0 的轴向长



(a) 原始阀座

(b) 仿生阀座

图 14 不同开度下两种阀座附近空化区域平均灰度图像
Fig. 14 Average grayscale images of the cavitation area near the two valve seats under different opening degrees

度定义为空化长度 L ,其中 $\psi_0 = (\psi(j)_{\max} + \psi(j)_{\min}) / 2$ 。计算获得了平均值图像中轴向上的平均灰度值 ψ 的变化曲线,如图 15 所示。

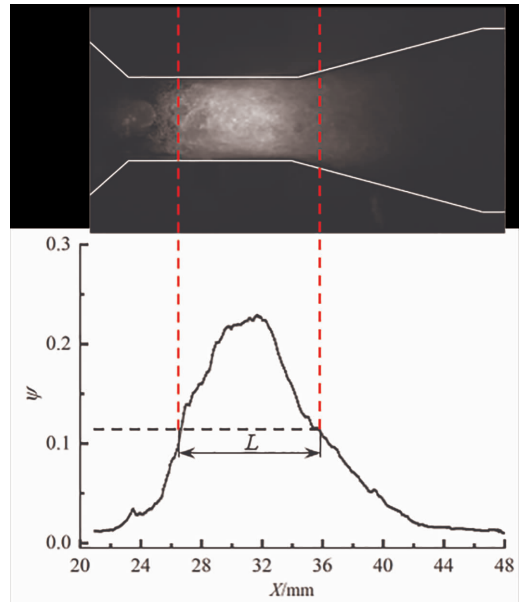


图 15 空化长度处理过程

Fig. 15 Cavitation length processing process

图 16 为不同开度下具有两种阀座结构得调节阀流场中空化长度 L 变化情况。从图中得出:在不同开度情况下,不同阀座结构空化长度的变化发展趋势相似,均随着相对开度的增加而增大;相对于原

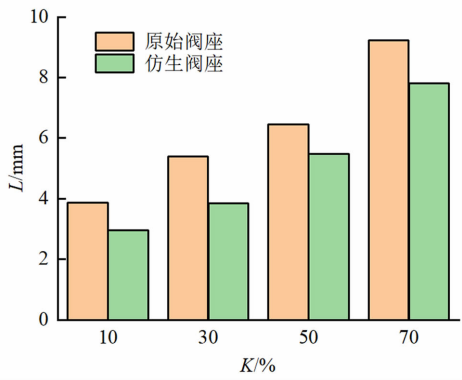


图 16 不同阀座在开启过程中的空化长度变化
Fig. 16 Variation of cavitation length of different valve seats during opening

始阀座,该仿生阀座结构的空化长度整体上都有所减小,抑制了空化的发展。

5 结 论

本文针对煤液化调节阀空化失效和服役寿命短的问题,设计了一种新型仿生引流式调节阀阀座,并采用数值模拟和实验研究的方法开展调节阀空化流场特性研究,得到如下结论。

(1)基于 Bio-TRIZ 仿生学理论设计了仿生引流式阀座结构,并利用数值模拟方法分析仿生阀流道中压力场和空化场的分布。结果表明:仿生引流式阀座结构有助于抑制空化的产生与发展;当进出口压力固定不变,随着开度的增加,仿生阀的空化抑制效率提高,当开度为 7% 时,仿生阀的空化抑制效率提高了 32.81%。

(2)搭建了可视化实验方案,基于图像灰度统计的方法,通过空化图像中灰度值的变化识别空化区域,对比分析不同阀座结构的空化流场特性。结果表明,具有仿生引流式阀座的调节阀内流道中空化长度有效降低,该变化趋势与数值模拟结果吻合良好,验证了该仿生引流式阀座优化结构的抑制空化的有效性,可为煤液化调节阀空化抑制方法提供有益的借鉴。

参考文献:

[1] 康红普, 王国法, 王双明, 等. 煤炭行业高质量发展研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(5): 130-138.
KANG Hongpu, WANG Guofa, WANG Shuangming, et al. High-quality development of China's coal industry [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(5): 130-138.

[2] 杜学文. 液压阀口空化机理及对系统的影响 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008: 27-33.
[3] 张长润. 我国煤化工技术现状及发展趋势分析 [J]. 石化技术, 2020, 27(11): 282-283.
ZHANG Changrun. Analysis of the status quo and development trend of coal chemical technology in my country [J]. Petrochemical Industry Technology, 2020, 27(11): 282-283.
[4] 陆亮. 液压节流阀中的空化流动与噪声 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 31-39.
[5] 郑智剑, 偶国富. 煤化工严苛工况阀门多相流冲刷磨损气蚀机理及预测方法研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(8): 45.
ZHENG Zhijian, OU Guofu. Research on the erosion wear-cavitation mechanism and prediction method of multiphase flow of valves in severe coal chemical industry [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(8): 45.
[6] ZHENG Zhijian, OU Guofu, YE Haojie, et al. Investigation on failure process and structural optimization of a high pressure letdown valve [J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 66: 223-239.
[7] 吴姿宏. 煤液化调节阀空化流场轴向和径向分布特性研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020: 50-78.
[8] LIU Xiumei, WU Zihong, LI Beibei, et al. Influence of inlet pressure on cavitation characteristics in regulating valve [J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2020, 14(1): 299-310.
[9] CORBERA S, OLAZAGOITIA J L, LOZANO J A. Multi-objective global optimization of a butterfly valve using genetic algorithms [J]. ISA Transactions, 2016, 63: 401-412.
[10] OU G F, XU J, LI W Z, et al. Investigation on cavitation flow in pressure relief valve with high pressure differentials for coal liquefaction [J]. Procedia Engineering, 2015, 130: 125-134.
[11] PAAR A, AIGNER M, BEAL C, et al. Metallurgy of highly wear-resistant indefinite-chill work roll materials for hot rolling mills [J]. Materials Science Forum, 2021, 1016: 1085-1090.
[12] 陈亮, 金迎村. 内流式阀件中的空化抑制新方法探究 [J]. 液压与气动, 2015(10): 115-119.
CHEN Liang, JIN Yingcun. New method to limit cavitation in internal flow valve [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2015(10): 115-119.
[13] 王再友, 朱金华. 相变在铁基合金抗空蚀中的作用机理 [J]. 机械工程学报, 2008, 44(3): 94-98.
WANG Zaiyou, ZHU Jinhua. Action mechanism of

- phase transformation on cavitation erosion resistance for ferrous alloy [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(3): 94-98.
- [14] WANG G R, CHU Fei, TAO S Y, et al. Optimization design for throttle valve of managed pressure drilling based on CFD erosion simulation and response surface methodology [J]. *Wear*, 2015, 338/339: 114-121.
- [15] 陈小兰, 曾良才, 湛从昌, 等. 仿生技术在液压领域中的应用和展望 [J]. *液压与气动*, 2016(8): 28-31.
CHEN Xiaolan, ZENG Liangcai, ZHAN Congchang, et al. The application and prospects of bionic technology in hydraulic field [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2016(8): 28-31.
- [16] 徐贺, 赵琬达, 于洪鹏, 等. 仿生水液压阀的抗磨损特性研究 [J]. *舰船科学技术*, 2016, 38(S1): 100-104.
XU He, ZHAO Wanda, YU Hongpeng, et al. Research on anti-wear characteristics of bionic water hydraulic valve [J]. *Ship Science and Technology*, 2016, 38(S1): 100-104.
- [17] 李畅. 阀芯仿生射流式水液压先导溢流阀设计及研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017: 41-63.
- [18] WANG Haihang, XU He. Design of a bio-inspired anti-erosion structure for a water hydraulic valve core: an experimental study [J]. *Biomimetics*, 2019, 4(3): 63.
- [19] 刘晓敏, 黄水平, 王建辉, 等. 基于 TRIZ 及功能类比的产 品概念设计创新 [J]. *机械工程学报*, 2016, 52(23): 34-42.
LIU Xiaomin, HUANG Shuiping, WANG Jianhui, et al. Conceptual design based on TRIZ & function analogy for product innovation [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(23): 34-42.
- [20] 吉祥, 顾新建, 代风, 等. 基于 BioTRIZ 的产品创新设计过程 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2014, 48(1): 35-41, 99.
JI Xiang, GU Xinjian, DAI Feng, et al. BioTRIZ-based product innovative design process [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2014, 48(1): 35-41, 99.
- [21] 刘成浩. 基于 TRIZ 与仿生学的创新设计方法研究 [D]. 济南: 济南大学, 2019.
- [22] WANG Jiong, XU Shuangjie, CHENG Huaiyu, et al. Experimental investigation of cavity length pulsation characteristics of jet pumps during limited operation stage [J]. *Energy*, 2018, 163: 61-73.
- [23] WANG Jiong, WANG Luyan, XU Shuangjie, et al. Experimental investigation on the cavitation performance in a venturi reactor with special emphasis on the choking flow [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, 106: 215-225.
- [24] 郑直, 赵鹏坤, 闵为, 等. 液压阀口空气型空化周期特性的实验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(10): 72-78, 150.
ZHENG Zhi, ZHAO Pengkun, MIN Wei, et al. An experimental investigation on periodic characteristics of gaseous cavitating flow in hydraulic valve orifices [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(10): 72-78, 150.
- [25] 吴姿宏, 刘秀梅, 李贝贝, 等. 基于图像灰度统计的调节阀空化分布特性研究 [J/OL]. *机械工程学报* [2022-01-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20211116.1650.022.html>.
WU Zihong, LIU Xiumei, LI Beibei, et al. Research on cavitation distribution characteristics of control valve based on image grayscale statistics [J/OL]. *Journal of Mechanical Engineering* [2022-01-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20211116.1650.022.html>.

(编辑 荆树蓉 杜秀杰)