

一种新型 V 型节流槽式阻尼器的性能及结构设计

姜奇志

(重庆科技学院 机械与动力工程学院,重庆 401331)

摘要:传统单出杆式粘滞阻尼器受到大冲击时,其内部流体介质流经圆环缝隙或圆孔时流速极高,易发生空化而产生震动或噪音。本文提出了一种使用 V 型节流槽的单出杆式阻尼器,利用 V 型节流槽出口的导流特性以及变化的过流面积,增强阻尼器的稳定性及阻尼性能。为了验证该结构阻尼器应对大冲击时的流场稳定性能,利用 ANSYS Fluent 软件的 RNGk- ε 湍流模型对阻尼器 V 型节流槽内流场流动进行模拟,利用 Mixture 模型对流场内空化现象进行模拟。结果表明:1)通过对比不同节流槽开度的情况,发现较大开度和较小开度情况下空化发生的位置以及范围均不同;2)通过对比节流槽开口角度大小,发现开口角度影响活塞壁面空化区域的位置;3)通过对比不同黏度的流体介质,发现使用介质的黏度对空化发生有着明显影响。

关键词:阻尼器; V 型节流槽; 空化; 仿真

中图分类号:TH703.62

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)07-0022-06

doi:10.13402/j.gcjs.2024.07.087

Performance and structural design of a new type of V-shaped throttling groove baffle

JIANG Qizhi

(School of Mechanical and Power Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: When the traditional single-rod viscous baffle is subjected to a large impact, the flow velocity of the internal fluid medium through the annular gap or round hole is extremely high, which is prone to cavitation, vibration or noise. A single-rod baffle using a V-shaped throttling groove is proposed, which uses the diversion characteristics of the outlet of the V-shaped throttling groove and the variable overflow area to enhance the stability and damping performance of the baffle. In order to verify the stability of the flow field of the structural baffle in response to large impact, the RNGk- ε turbulence model of ANSYS Fluent software is used to simulate the flow field flow in the V-shaped throttling groove of the baffle, and the Mixture model is used to simulate the cavitation phenomenon inside the flow field. The results show that: 1) By comparing the openings of different throttle troughs, it is found that the positions and ranges of cavitation occur differently under the conditions of larger openings and smaller openings; 2) By comparing the opening angle of the throttling groove, it is found that the opening angle affects the position of the cavitation area of the piston wall; 3) By comparing the fluid media with different viscosities, it is found that the viscosity of the used medium has a significant impact on the occurrence of cavitation.

Key words: baffle; V-shaped throttling groove; cavitation; emulation

我国是一个地震、台风多发国家^[1], 建筑物和桥梁均需具备良好的抗震、抗强风能力。结合

以往地震经验, 地震引起的山崩、滑坡、地陷、地面裂缝或错位等地面变形, 会造成地基失效,

收稿日期: 2023-10-31

基金项目: 重庆科技学院研究生创新计划资助项目(YKJCX2220305)

作者简介: 姜奇志(1998—),男,硕士研究生,从事流体机械设计。

并且在震动过程中会激发建筑物和桥梁震动,导致强度不够的支撑结构变形过大而失效,最终遭到破坏。除地震外,强风流过建筑物时,不仅直接引起建筑物的振动,还会带来高紊流度的横向尾流。当建筑物处于这类气动不稳定区域时,建筑物的振动形态会发生改变,更容易受到振动影响而发生事故。对于建筑物以及桥梁来说,强震强风会使其产生颤振和抖振问题。采用增加配筋率或关键构建尺寸的方法,意味着更多的振动能量传递到结构,不仅不经济而且不安全。因此,在特定位置使用阻尼器进行能量吸收成为大型建筑物和桥梁必备的缓冲手段。

目前,应用于工程实际的阻尼器有金属阻尼器、粘滞阻尼器、调谐质块阻尼器等。其中粘滞阻尼器的应用最为广泛,其结构利用小孔节流的原理,使得震动能量转化为阻尼介质的内能和动能,达到缓冲吸能的目的。单出杆式粘滞阻尼器在应对高强度的外力冲击时,其密封端承受压力较弱,理论上能承载更高的工作压力。对比传统单出杆式粘滞阻尼器使用间隙或圆孔节流结构,V 型节流槽节流时介质流体对阻尼器内壁的冲击更加平滑,并且随着阻尼器工作行程的增加,V 型节流槽的过流面积随之变化,阻力也随之增大,获得的阻尼效果更强。研究发现,V 型节流槽内部流场,在较大强度的外力作用下,流出节流槽的介质流体会发生空化现象,产生的振动和噪声会影响阻尼器的正常工作。

随着计算流体力学的发展,节流槽内部流场的仿真分析成为研究热点。冀宏等^[2-4]对典型节流槽阀口的过流面积求解进行研究,发现阀口位置会随阀芯位置的改变而改变,并据此建立了两种适用于典型节流槽的数学模型,并得出等效过流面积的计算方法;王东升^[5]对节流槽阀口的流量特性和稳态液动力进行了分析,得出稳态液动力与开口量、流体流动方向和节流槽结构的关系,这对节流槽结构与流量关系的计算提供了参考,为研究节流槽压力分布,液动力特性,以及抑制气穴、噪声提供了理论基础;张远深等^[6]利用数值模拟的方法比较了双三角节流槽和三角形节流槽的流场压力分布,发现双三角节流槽阀口能量损失较大,压力脉动更强,更容易产生空化现象,在平衡回路中,具有三角形节流槽

阀口的平衡阀稳定性表现更佳;杨国来等^[7]采用模拟仿真的方法研究了小开度下节流阀流场分布和最小稳定流量,发现阀口的最小稳定流量对流动速度、湍流强度、阀口空化和油液纯净度极其敏感,获得小开度下稳定流量非常困难;袁士豪等^[8-10]研究了典型节流槽阀口的节流特性,并对阀口结构进行优化改善。本文提出一种新型 V 型节流槽式阻尼器,并利用流体力学方法进行内部流场的可视化分析及数值模拟,以期为节流式阻尼器的结构设计提供数据支持。

1 阻尼器结构设计

1.1 阻尼器主要结构

V 型节流槽式阻尼器采用单端出口设计,主体结构由活塞、阻尼器缸体、缸盖、弹簧、活塞挡块 5 部分组成,如图 1 所示。当承受外界载荷时,活塞杆受推力向内运动推动阻尼介质流过节流槽,阻尼介质流入外部腔室并推动活塞挡块移动,外部腔室的可变容积容纳被活塞挤出的阻尼介质。节流槽入口处载荷压力较大,而由于出口处流体的压力转化为动能和内能,节流槽出口区域的压力相对小很多。这使得阻尼器的密封结构受到较小压力,从而使阻尼器结构可以承受更大的载荷。

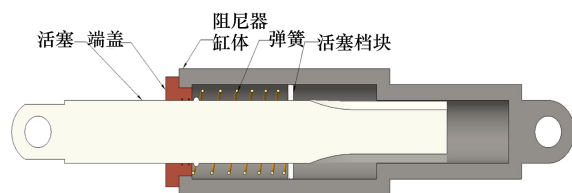


图 1 节流式阻尼器结构示意图

1.2 节流槽结构设计

V 型节流槽具有平滑的过流面积变化,其出口处设有弧形的流道用于流体导流,减小了对活塞的冲蚀和冲击^[11-12];且当阻尼器工作行程增大时,过流面积逐渐减小,阻尼效果逐渐增强。针对阻尼器内部流场的仿真分析,参考粘滞阻尼器的结构尺寸,以确定活塞直径以及液压缸的内径尺寸。节流槽采用 V 型结构,槽底半径为 100 mm,夹角为 90°,总长度为 50 mm,槽深为 4 mm,具体如图 2 所示。

2 阻尼器模型及网格建立

利用三维建模软件 Creo 建立阻尼器模型,并根

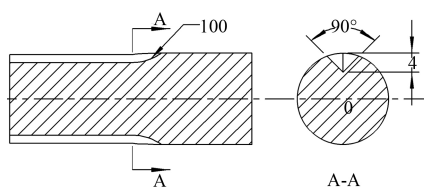


图 2 节流槽结构

mm

据研究内容对模型进行简化。将简化后的模型导入 ANSYS Workbench 流体计算模块中,抽出流场的三维模型后进行网格划分。仿真计算中的网格质量往往对结果以及计算效率有直接影响,因此在模型整体网格划分后,对节流槽部分的网格进行进一步细化。由于节流槽出口处为计算重点,且流场模型不规则,先使用四面体进行整体网格划分,之后修改节流槽出口构成面的面网格尺寸,对出口流场进行加密,完成划分后的网格模型如图 3 所示。网格节点数为 87 732,单元数为 429 903。

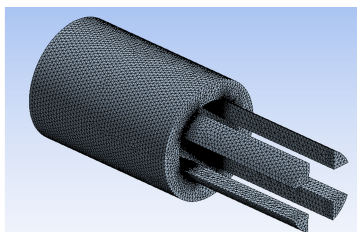


图 3 模型网格

3 仿真计算条件

3.1 控制方程

假设内部硅油为不可压缩流体,忽略其质量力。采用标准 RNGk-e 模型,基本控制方程为连续性方程、动量方程和标准 k-e 模型两项方程^[13-14]。

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; $\vec{v}$ 为速度, m/s 。

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \nabla \cdot \left(\frac{2}{3} \mu_m \nabla \cdot \vec{v} \right) \quad (2)$$

式中: p 为压力, Pa ; μ_m 为混合相动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

标准 k-ε 方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

(4)

式中: x_i, x_j 为流向分量 m ; u 为分子动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; P_k 为平均速度梯度产生的湍流动能 J ; $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, G_{k1}, G_\varepsilon$ 均为模型常数,默认值分别为 1.44、1.92、1、1.3。 μ_t 为湍黏性系数; k 为单位质量的湍流动能, J ; t 为时间变量, s ; μ_i 为流速分量, m/s ; ε 为湍流耗散率。

3.2 空化模型选择

计算流体动力学软件 ANSYS Fluent 包含 Schnerr-Sauer 模型、Zwart-Gerber-Belamri 模型和 Singhal 模型 3 种空化模型。前两者与 Singhal 有着完全不同的数值计算程序。其中, Schnerr-Sauer 模型和 Zwart-Gerber-Belamri 模型忽略计算域内非凝结性气核对空化的影响,并且在与湍流模型的兼容性表现比 Singhal 模型好。尽管比 Singhal 模型的计算精度高,但其计算稳定性不好,且不容易收敛。综上所述,选择 Zwart-Gerber-Belamri 模型进行空化计算^[15-17]。

3.3 边界条件

参考粘滞阻尼器的常用设计额定载荷,在模型的几何边界设定压力进出口,阻尼器工作过程中,流出节流槽的介质推动弹簧,弹簧受压后对介质产生反作用力。为了模拟弹簧推力,设计出口压力为固定值 1 MPa。假设阻尼器受恒定外载荷作用于活塞上,通过计算活塞端面受到的压力得到入口流体介质内部压强,由此将模型的进口压力设置为 100 MPa。固体壁面采用滑移边界条件,近壁面采用标准壁面函数,进出口参考压力设置为 0 MPa 且气泡相体积分数为 0。多相流计算选用 Mixture 模型,设置气液两相之间无滑移。使用流体介质密度为 970 kg/m^3 。

4 内部流场仿真结果及分析

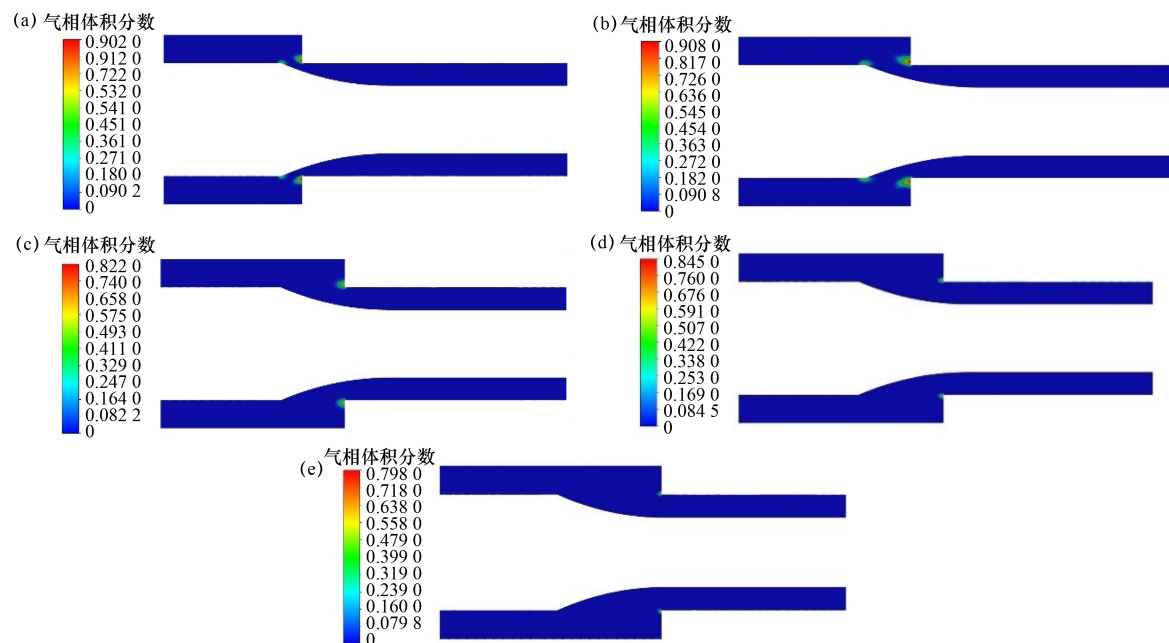
4.1 节流槽开口程度对空化的影响

图 4、5 为运动黏度为 5 cst 的介质在节流槽开口程度为 20、16、12、8、4 mm 时的气泡体积分及速度分布。由图 4、5 可知:当开度减小时,流体的过流面积减小,流体速度随之上升,空化现象

首先出现在节流槽出口液缸台阶转角处；当开口程度继续减小时，在活塞壁面也出现了空化现象。从结构上分析，液缸转角处射流与壁面的角度较大，压力的恢复速度较慢，导致其首先出现空化区域；对比活塞处，射流与壁面的角度较小，压力恢复速度较快，在更小的开度才出现空化现象。

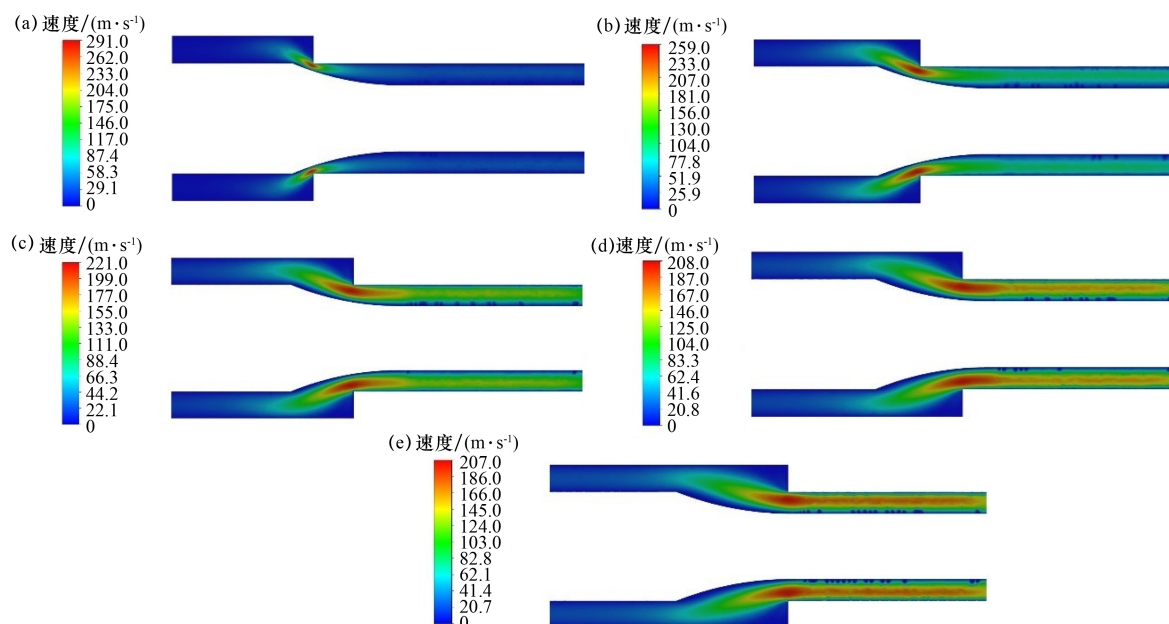
4.2 节流槽开口角度对空化的影响

图 6 为开口为 8 mm、节流槽开口角度分别为



开口程度/mm: (a) 4; (b) 8; (c) 12; (d) 16; (e) 20

图 4 不同开口程度下的气相占比云图



开口程度/mm: (a) 4; (b) 8; (c) 12; (d) 16; (e) 20

图 5 不同开口程度下的速度云图

60°、90°、120°的气相占比。由图 6 可知：通过几何模型调整槽深使得节流槽过流面积在不同的开口角度情况下保持一致，以此控制流速。当节流槽开口角度较小时，空化出现在出口液缸台阶处和活塞壁面上；当开口角度增大时，活塞壁面上的空化区域向出口方向移动；当开口角度较大时，活塞壁面上的空化区域消失。

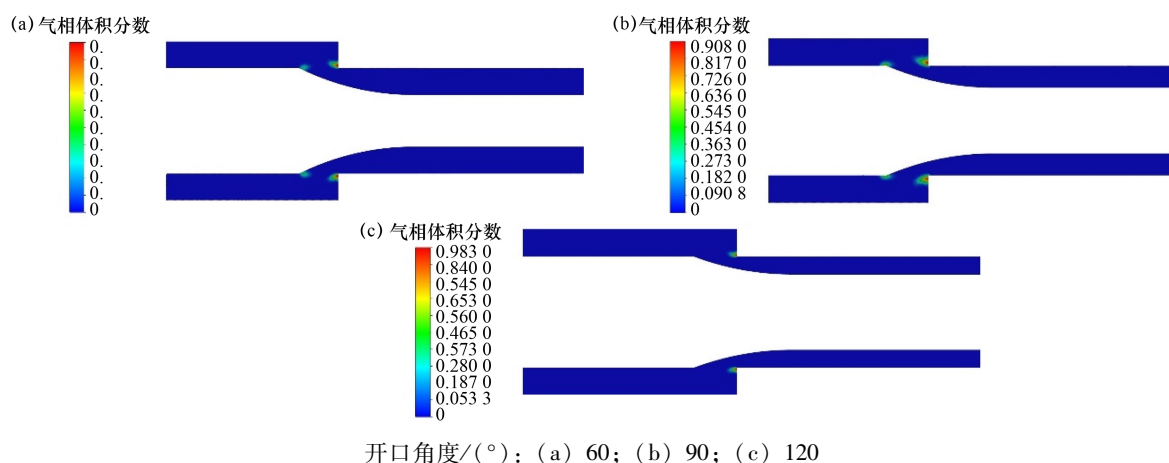


图 6 不同开口角度下的气相占比云图

4.3 不同黏度介质对空化的影响

图 7、8 为运动黏度为 1、5、10、50、100 cst 的介质在阻尼器节流槽开口为 4 mm 时的气相体积分数以及速度分布。由图 7、8 可知:当流体从压力入口输入至活塞与台阶的交界面时,过流面积发生突变,流体速度随之突然增大。当流体运动黏度为 1 cst 时,空化发生在液压缸台阶转角和流出节流槽后的活塞壁面上;当流体运动黏度为 5 cst 时,带状的空化区域变为两个集中点,分别在节流槽出口的两个拐角处;当流体运动黏度为 10 cst 时,处于节流槽出口处活塞壁面的空化区域消失。对比流体运动黏度为 50、100 cst 的仿真结果可知,台阶转角的空化区域内气相体积分数变化不大。从速度分布云图来看,节流

槽出口中心部分速度最快,在出口射流的作用下,壁面流体脱离壁面区域使得该区域气体的体积分数增大。综上,使用介质运动黏度过小时易发生空化现象,气穴主要分布在节流槽出口处壁面区域。

5 结 论

本文设计了一种使用 V 型节流槽代替圆环形缝隙和圆孔的新型单出杆式粘滞阻尼器,并仿真分析不同节流槽结构参数和不同运动黏度的流体介质对阻尼器内部流场产生空化的影响。

(1) 当节流槽在较小的开度、较小的开口角度或使用运动黏度较小的阻尼介质时,容易在节流槽出口处发生空化现象。当改变节流槽开口角

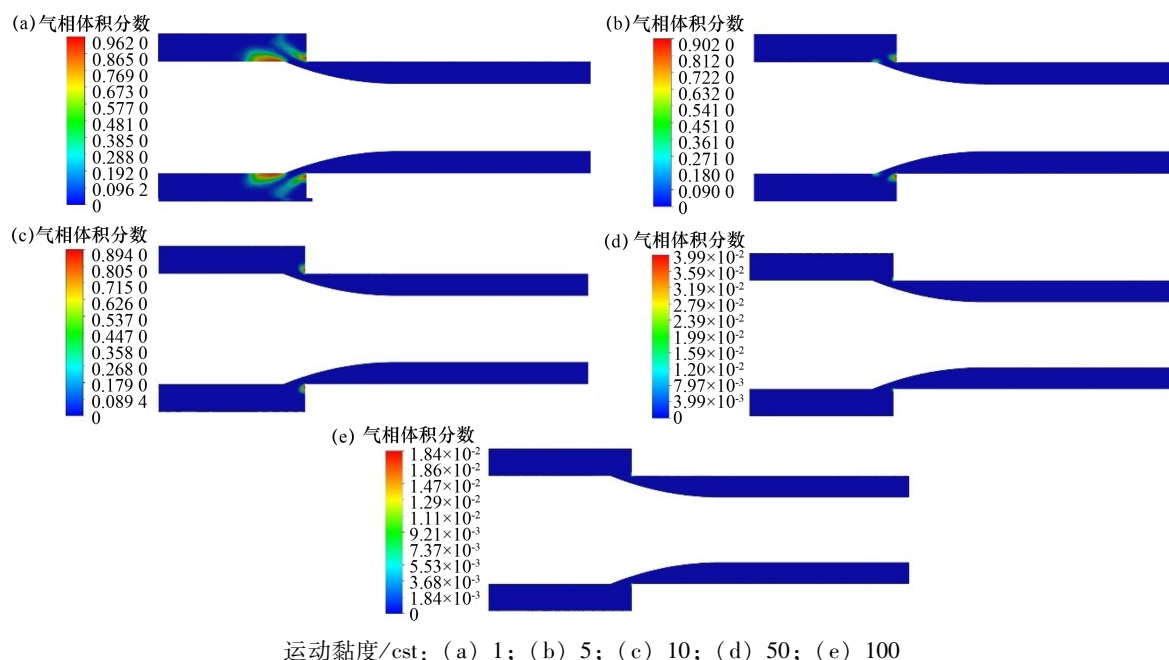
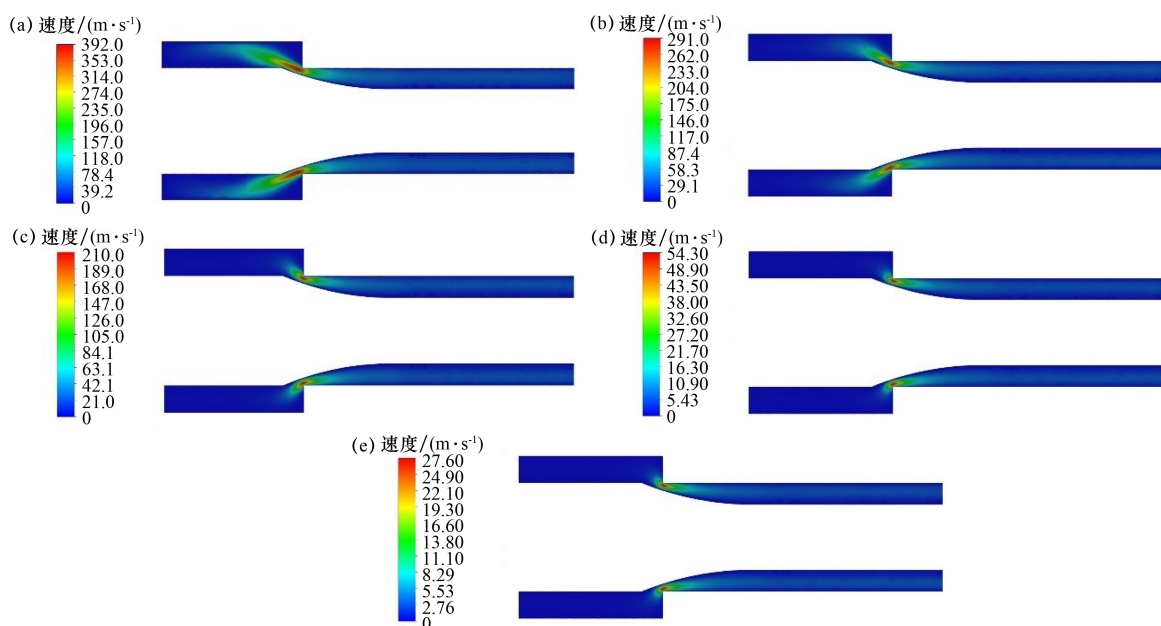


图 7 不同运动黏度介质的气相占比云图



运动黏度/ cst : (a) 1; (b) 5; (c) 10; (d) 50; (e) 100

图 8 不同运动黏度介质的速度云图

度时, 活塞壁面上的空化区域发生移动。综合节流槽的结构参数和介质运动黏度对阻尼器内部流场空化现象的仿真, 可为节流式阻尼器的结构设计提供一些参考。

(2) V 型节流槽式阻尼器面对大冲击、高载荷时, 节流槽出口的流向引导以及节流槽阻尼持续加强的特性, 能有效削弱冲击, 减少振动, 且拥有更好的稳定性。

参考文献:

- [1] 郑一峰, 钱盛域. 粘滞阻尼器与钢阻尼器在桥梁横向震动控制中的应用[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2021, 49(12): 89–100.
- [2] 冀宏, 傅新, 杨华勇. 非全周开口滑阀稳态液动力研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(6): 13–17.
- [3] 冀宏, 张继环, 王东升, 等. 滑阀矩形节流槽阀口的流量系数[J]. 兰州理工大学学报, 2010(3): 47–50.
- [4] 冀宏. 液压阀芯节流槽气穴噪声特性的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [5] 王东升. 节流槽滑阀阀口流量系数及稳态液动力计算的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2008.
- [6] 张远深, 刘志姣, 薛飞, 等. 螺纹插装式平衡阀中单向阀节流槽对阀芯稳定性的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2016, 42(5): 51–56.
- [7] 杨国来, 杨长安, 刘志刚, 等. 节流阀小开度下流场仿

- 真和最小稳定流量的研究[J]. 2009, 37(9): 109–111.
- [8] 袁士豪. 基于规范正交多项式的分压节流阀口节流特性[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(12): 1056–1061.
- [9] 袁士豪, 殷晨波, 刘世豪. 液压阀口二级节流特性[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(6): 716–720.
- [10] 袁士豪, 殷晨波, 叶仪. 基于模糊综合判断的液压阀口节流特性优化[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2013, 35(6): 23–28.
- [11] 郭畅, 武一民, 付强, 等. 粘滞阻尼器模型修正及关键参数的仿真研究[J]. 液压与气动, 2017(12): 101–106.
- [12] 孙泽刚, 肖世德, 王德华, 等. 液压滑阀 V 型节流槽气穴流仿真分析及结构优化研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(2): 345–354.
- [13] 徐小进, 卢永锦. 基于 Fluent 的液力阻尼器的仿真研究[J]. 船舶工程, 2012, 34(6): 20–22; 96.
- [14] 谭宗荣, 叶惠军, 周玉琼, 等. 基于 Fluent 的直动式纯水溢流阀内部流场建模与仿真分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2012, 34(4): 69–71.
- [15] 杜学文, 邹俊, 傅新, 等. 节流槽结构对气穴噪声的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007(3): 456–460; 465.
- [16] 李勇, 刘志友, 安亦然. 介绍计算流体力学通用软件: Fluent[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2001(2): 254–258.
- [17] 林言丕, 赵鹏坤, 李清华, 等. 液压滑阀 V 型节流槽内部空化流动仿真分析[J]. 液压气动与密封, 2019, 39(12): 19–22.