

金属橡胶高压精密流量阀流场分析*

张蕊华^{1,2}, 张建辉²

(1. 丽水学院工学院 丽水, 323000) (2. 南京航空航天大学机械机构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

摘要 为确保阀出口处输出流量和压力的稳定性,提出了采用压电陶瓷和金属橡胶两种材料设计的一种金属橡胶高压精密流量阀,利用压电陶瓷驱动流量阀的主阀芯实现对阀芯与阀体开口间位移的精密控制,利用金属橡胶材料的多孔性以及减压、节流和过滤等特点实现对阀出口处流体脉动的平纹波处理。运用Fluent 仿真分析了阀出口处的平纹波特性和金属橡胶参数对阀腔内流体湍动能分布的影响规律。分析结果表明:在阀进、出口处安装金属橡胶环后,阀出口处流体速度变化平缓、方向趋于一致,流动更为平缓,一定程度上确保了阀输出流量和压力的稳定性;阀腔内流体的湍动能明显减小,阀腔内的流场更趋于平稳,从而提高了阀的使用寿命和启闭可靠性。

关键词 金属橡胶; 压电陶瓷; 精密流量阀; 湍动能; 平纹波特性

中图分类号 TH13; TB3

引言

随着科技的发展,在航空航天、深海探测及生物医学等方面,对流体控制特别是对高压精密微流体控制技术的要求越来越高,往往只需要较小的流量来驱动执行元件,以达到降低能耗的目的。国外已研制和开发出一些(超)高压元件产品^[1],并在一些工业生产中得到推广。近年来,国内学者在(超)高压换向阀方面取得了较为突出的研究成果^[2],开展了超高压微流量阀及新功能材料驱动控制阀^[3-4]等方面的研究。目前,该研究方向的难点和关键问题是阀工作时阀体内部流畅特性的精确数学描述。

笔者采用压电陶瓷与金属橡胶两种新型功能材料研制一种金属橡胶高压精密流量阀。利用金属橡胶材料实现对阀进、出口处流体压力急剧变化时的减压过滤及平纹波处理,确保阀输出流体流量和压力的稳定性。

1 高压精密流量阀的工作原理

研究的金属橡胶精密流量阀如图1所示。该流量阀的工作原理:压电陶瓷通电后输出微位移的同时输出推力,驱动低压腔阀芯带动节流阀芯和高压腔阀芯在垂直方向产生位移,节流阀芯与阀体之间

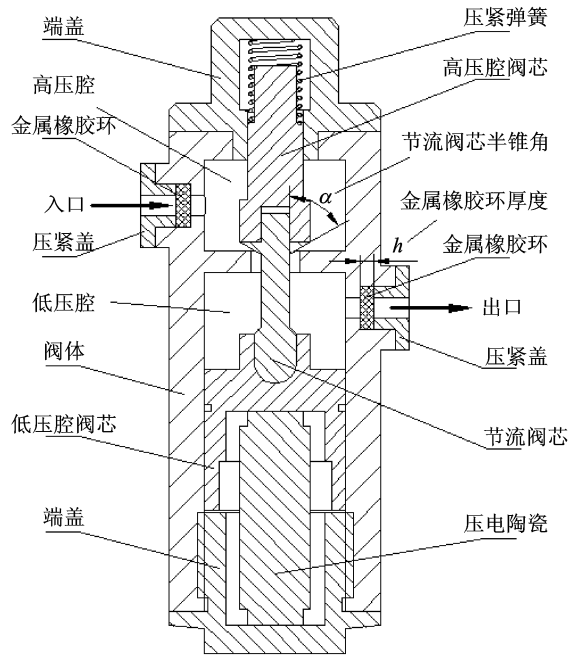


图1 金属橡胶高压精密流量阀结构简图

的节流口被打开,高压流体经入口处金属橡胶环节流过滤后,从高压腔流经节流口进入低压腔,再经出口处金属橡胶环平纹波处理后流出口^[5]。

该流量阀利用压电陶瓷的精密压电位移特性来驱动阀芯,实现对阀的精密流量控制;利用金属橡胶材料的减压、降噪、隔振和多孔过滤等特点^[6]实现阀

* 国家自然科学基金资助项目(50965014,50905083);江西省自然科学基金资助项目(2010GZC0121);江苏省博士后科研资助计划(1002010C);国家外专局引智项目(20103600054)

收稿日期:2012-04-16;修改稿收到日期:2012-06-29

入口处的节流过滤、出口处流体脉动的平纹波处理,一定程度上能确保阀输出流量和压力的稳定性。

2 CFD模型建立

2.1 数学模型

假设流动介质为不可压缩粘性流体,流体为湍流流动^[7],采用Fluent中标准k-ε模型计算,不考虑能量方程,其数学模型如下。

连续性方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial u_i \partial u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + f_i \quad (2)$$

标准k-ε模型的湍动能k的输运方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (3)$$

湍流耗散率ε的输运方程为

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\epsilon} G_k \frac{\epsilon}{k} - G_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

其中: u_i 为沿 $x_i(1, 2, 3)$ 方向的速度分量; ρ 为流体密度; ν 为动力粘度; ν_t 为湍动粘度; $\nu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$; G_k 为平均速度梯度引起的湍动能。

金属橡胶环孔隙度φ的表达式^[8]为

$$\varphi = 1 - \frac{V_g}{V_c} \quad (5)$$

其中: V_g 为金属丝体积; V_c 为金属橡胶环体积。

金属橡胶环渗透率k与惯性阻力系数 C_2 的表达式^[8]为

$$k = \frac{2\varphi^3 d_n^2}{153(1-\varphi)^2} \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{3.5(1-\varphi)}{d_n \varphi^2} \quad (7)$$

其中: d_n 为金属丝直径。

2.2 有限元模型

由于阀腔流体域为非轴对称结构,不能简化为二维模型进行分析,需建立三维模型。首先,采用solidworks软件对阀建立计算机辅助设计(CAD)模型,其中,阀腔直径为15 mm,阀口直径为5 mm,出

入口直径为2.5 mm,根据经验取节流阀芯半锥角α为45°;然后,利用Ansys DesignModeler从CAD模型中抽取阀腔流体域,简化倒圆角等特征,将流体区域切片,划分出金属橡胶环区域和流体区域;最后,导入ICEM中进行网格划分。

在入、出口处采用相同参数的金属橡胶环,金属橡胶环厚度δ为2 mm,金属丝直径 d_n 为0.08 mm,孔隙度φ为0.7,采用多孔介质模型来模拟金属橡胶环处的流体域,假设金属橡胶环为各项同性,根据公式算出渗透率和惯性阻力系数,阀的三维CAD模型及流体区域网格划分如图2所示。

由于该流量阀在高压条件下工作,且压电陶瓷输出位移是微米级。在用Fluent进行前处理过程中,取进、出口压差为10 MPa,压电陶瓷输出位移为50 μm,液压油密度为900 kg/m³,黏度为0.045 kg/(m·s);采用标准k-ε湍流模型模拟流体流动状态,取 $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$ 。

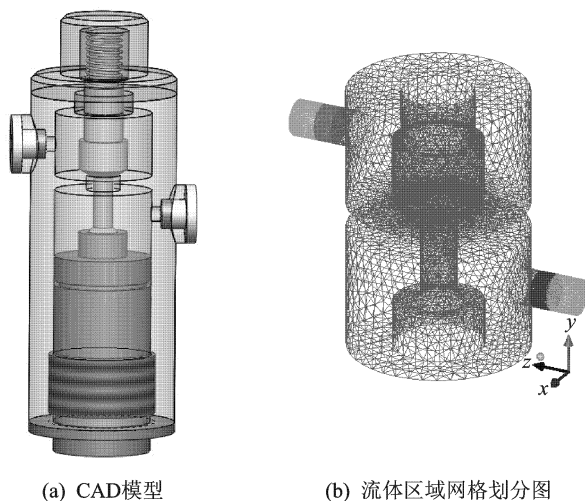


图2 阀的三维模型

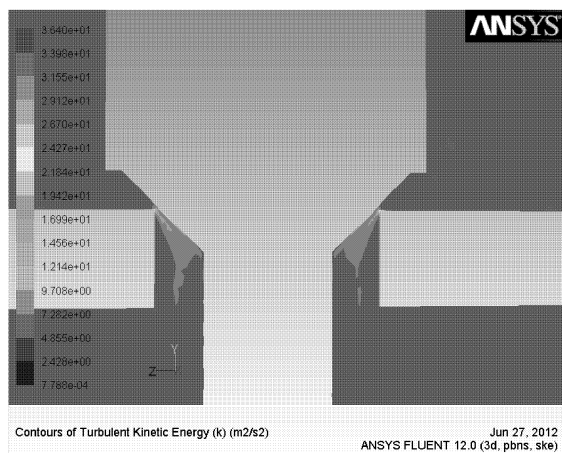
3 高压精密流量阀阀腔内部流场分析

利用金属橡胶的节流、减压特性,在研究的流量阀的进、出口处都安装了金属橡胶环,使阀的进、出口同时节流,构成了串联复合式节流调速的工作方式。阀腔内流体流动的平稳性对阀的工作性能和寿命有直接的影响。

为了便于分析阀腔内部的流场特性,选取阀腔的对称面作为参考面,进、出口压差为10 MPa。金属橡胶环孔隙度对阀腔内部流体湍动能分布特性的影响规律如图3所示。可以看出,在阀的性能参数和几

何参数不变的条件下,当阀进、出口处未安装金属橡胶环时,阀腔内阀芯开口处流体的湍动能最大值达到 $36.4 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。安装金属橡胶环后,当孔隙度 $\phi=0.9$ 时,阀腔内流体最大湍动能值为 $27.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$;孔隙度 $\phi=0.8$ 时,阀腔内流体最大湍动能为 $22.82 \text{ m}^2/\text{s}^2$;孔隙度 $\phi=0.7$ 时,阀腔内流体最大湍动能值为 $16 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。可见,在阀中安装金属橡胶环后,阀腔内

流场的湍动能值变小,并且随着孔隙度的减小,湍动能也减小,流场的平稳性更好。这表明在阀的进、出口处安装金属橡胶环可使阀芯在开闭过程中对阀体的冲击力减小,使阀开闭更平稳,提高了阀的使用寿命和关闭可靠性。另外,通过改变金属橡胶环的孔隙度参数可以根据需要在一定范围内调节阀腔内流体的湍动能大小。



(a) 未安装金属橡胶环

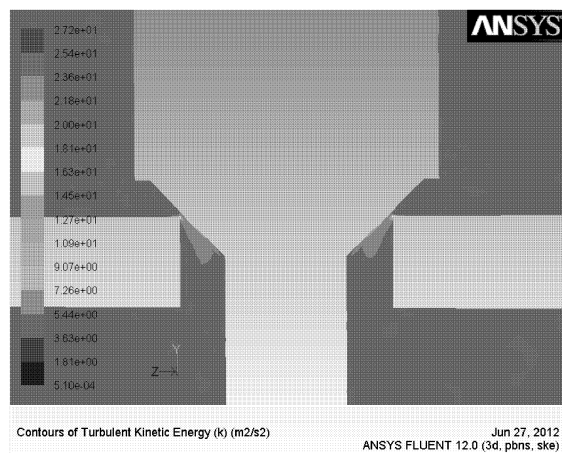
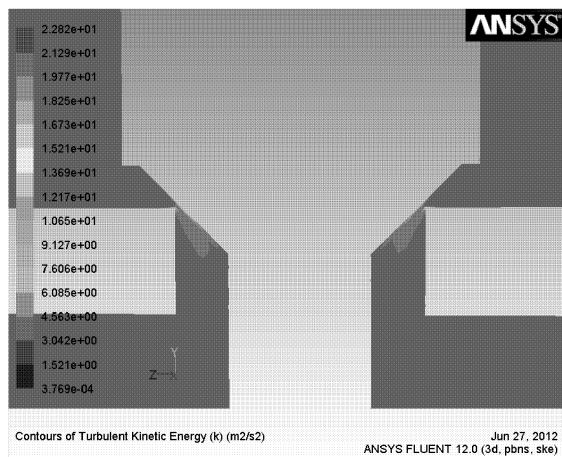
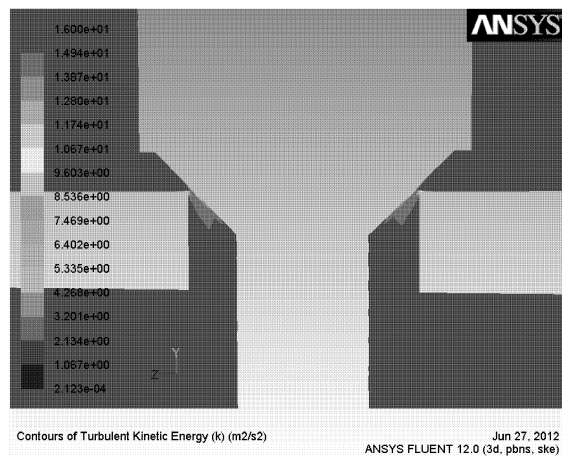
(b) 孔隙度 $\phi=0.9$ (c) 孔隙度 $\phi=0.8$ (d) 孔隙度 $\phi=0.7$

图3 阀腔对称面上湍动能分布云图

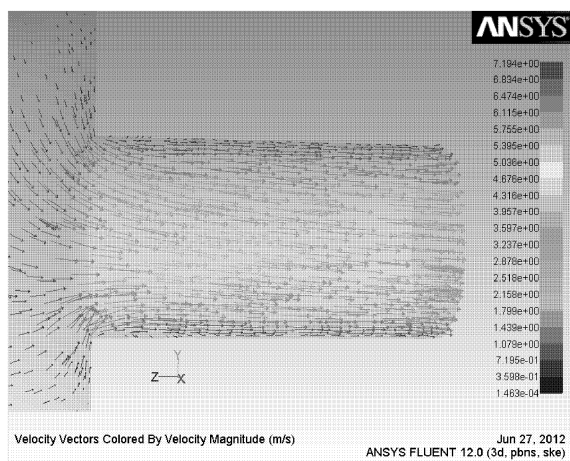
4 高压精密流量阀出口处的流场分析

利用金属橡胶材料内部的多孔网状结构吸收一部分因压力升降波动所产生的动能、势能,并将其转化为热能而耗损,从而在一定范围内实现平纹波处理的功能。图4为阀出口处流体速度矢量图。图4(a)为阀出口处未安装金属橡胶环时的速度矢量图,图4(b)为安装金属橡胶环后,阀出口处流体的速度矢量图。可以看出,在阀出口处安装金属橡胶环后,阀出口处的流体流动更平缓、方向更趋于一致。这说

明金属橡胶环能对出口处流体进行平纹波处理,使阀出口处流体的流动更为平稳,一定程度上确保了阀输出流量和压力的稳定性。

5 结束语

在阀进、出口处分别安装金属橡胶环后,阀腔内流体湍动能明显减小,阀腔内的流场更趋于平稳,并且随着孔隙度的减小,湍动能也减小,流场的平稳性更好,流体对阀芯和阀体的冲击力变小,使阀的开闭更平稳,从而提高阀的使用寿命和关闭可靠性。



(a) 未安装金属橡胶环

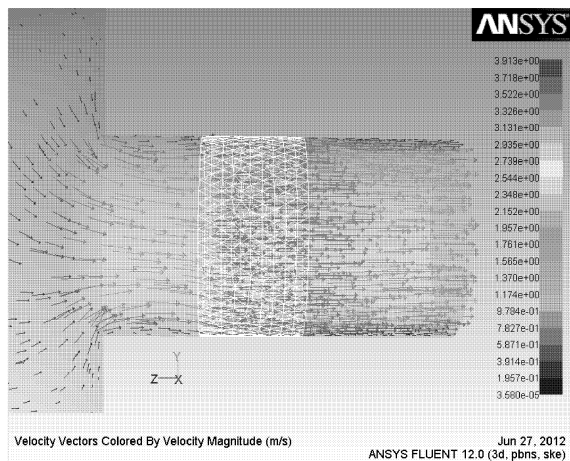
(b) 安装金属橡胶环($\phi=0.7$)

图4 阀出口处的速度矢量图

在阀出口处安装金属橡胶环后,阀输出流体的流动更趋于平稳,一定程度上保障了阀输出流量和压力的稳定性。

参 考 文 献

- [1] Yang E H, Lee C, Mueller J. Leak-tight piezoelectric microvalve for high-pressure gas micropropulsion[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2004, 13(5):799-807.
- [2] 潘旭东,王广林,胡洋,等. 高压大流量电液换向阀动态特性测试系统[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(4): 522-526.
- Pan Xudong, Wang Guanglin, Hu Yang, et al. Dynamic characteristic test system for high pressure and flow electro-hydraulic directional control valve [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(4):522-526. (in Chinese)
- [3] 鄂世举,高春甫,徐现荣,等. 基于生物金属纤维的微小

流量气动阀[J]. 农业机械学报, 2010, 41(5):218-221, 217.

E Shiju, Gao Chunfu, Xu Xianrong, et al. BMF based micro-flux pneumatic servo valve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5):218-221, 217. (in Chinese)

- [4] 王淑云, 阚君武, 马继杰, 等. 腔高对压电液驱动器性能的影响[J]. 纳米技术与精密工程, 2011, 9(6):515-520.

Wang Shuyun, Kan Junwu, Ma Jijie, et al. Influence of pump-chamber height on performance of piezohydraulic actuator [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2011, 9(6):515-520. (in Chinese)

- [5] 陈海初,王宣银,张蕊华,等. 压电陶瓷驱动精密流量阀的设计与建模[J]. 浙江大学学报:工学版, 2008, 42(11):1937-1945.

Chen Haichu, Wang Xuanyin, Zhang Ruihua, et al. Design and modeling of precise flux valve driven by piezoelectric ceramics[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2008, 25(11):1937-1945. (in Chinese)

- [6] 李宇燕,黄协清. 金属橡胶材料阻尼性能的影响参数[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(1):23-26.

Li Yuyan, Huang Xieqing. Influencing factors of damping characteristic for metal rubber[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(1):23-26. (in Chinese)

- [7] 周元春,杨曙东,罗博,等. 基于Fluent的大口径滑阀压力流量特性研究[J]. 机床与液压, 2011, 39(19):103-105.

Zhou Yuanchun, Yang Shudong, Luo Bo, et al. Research on the pressure-flow performance of a large-diameter spool valve based on fluent[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2011, 39(19):103-105. (in Chinese)

- [8] 国亚东,闫辉,夏宇宏,等. 金属橡胶滤材过滤精度研究[J]. 功能材料, 2010, 41(8):1387-1389.

Guo Yadong, Yan Hui, Xia Yuhong, et al. Study on the filtration rating of metal rubber filter material[J]. Journal of Functional Materials, 2010, 41(8):1387-1389. (in Chinese)



第一作者简介:张蕊华,女,1970年4月生,副教授。主要研究方向为压电驱动技术。曾发表《用于精密微装配的全方位微小机器人》(《浙江大学学报》2007年第41卷第8期)等论文。

E-mail: zhangrh_hit@sina.com