

文章编号:0253-9993(2008)02-0214-04

液压阀冲蚀磨损特性分析与结构探讨

张 宏^{1,2}, 熊诗波¹, 梁义维¹, 熊晓燕¹

(1. 太原理工大学 机械电子工程研究所, 山西 太原 030024; 2. 煤炭科学研究总院 太原分院, 山西 太原 030006)

摘 要: 以传统正顶杆结构的高水基平面先导阀为研究对象, 将计算流体动力学理论(CFD)与冲蚀理论相结合, 建立高水基液压阀流体湍流和冲蚀的数学模型. 通过可视化模拟, 分析了煤粒对高水基平面阀不同部位的冲蚀磨损分布. 结果表明, 平面阀的阀芯冲蚀磨损发生在节流口附近. 此外, 液压阀在开启过程中, 由于阀芯的惯性使阀芯和顶杆间产生微动磨损. 磨损的叠加, 加剧了阀芯的磨损率, 影响液压阀使用寿命. 为此, 提出了一种将正顶杆结构修改为侧顶杆结构可以减轻阀芯磨损的新方法.

关键词: 液压阀; 冲蚀磨损; 数值模拟; 结构修改

中图分类号: TH137.52 **文献标识码:** A

Analyses of erosion wear characteristic and structure research on hydraulic valve

ZHANG Hong^{1,2}, XIONG Shi-bo¹, LIANG Yi-wei¹, XIONG Xiao-yan¹

(1. Institute of Mechano-electronic Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Taiyuan Branch, China Coal Research Institute, Taiyuan 030006, China)

Abstract: This study was concerned with the conventional center pole structure of high water-based pilot plain valve. Mathematic model of turbulent and erosion wear for high water-based hydraulic valve were established based on the combined technologies of computational fluid dynamics and erosion theory. By visual simulation, the erosion wear distribution that coal particles erode plain valve were predicted. The results show that the erosion wears of plain valve occur at the valve seat orifice near. Moreover, hydraulic valve in work, inertia causes fretting wear between valve core and pole. Wear rates of valve core were pricked up, owing to wear superposition. Finally, a novel means of reduce the valve core wear was suggested to sidepiece pole structure instead of center pole structure.

Key words: hydraulic valve; erosion wear; mathematical simulation; structure perfection

液压阀结构较为复杂, 常常会遇到突扩、突缩、弯曲流道等. 流体流经这些复杂流道处会产生漩涡、回流、脱壁和重新附壁等流动现象. 若设计不当, 会加剧阀的腐蚀、振动与噪声, 降低使用寿命与工作性能, 从而直接影响整个系统的工作性能. 液压阀中的密封副是其关键部分, 由于其结构的特殊性, 它很容易遭受流体介质的冲蚀磨损. 因此有必要研究该类流动体系的壁面磨损行为. 减轻壁面磨损可采用2种方法^[1,2]: ① 提高壁面材料的抗磨性, 如使用耐磨材料或在壁面上镀覆耐磨材料或对壁面进行改性处理等; ② 根据冲蚀理论, 通过改变壁面形状来改变近壁流场的条件, 从而影响固粒的速度和轨迹, 最终减轻固粒对壁面的磨损. 本文利用CFD方法, 将低 Re 数 $k-\varepsilon$ 湍流模型与冲蚀理论相结合, 对液压阀典型结构的壁面冲蚀损耗进行了计算, 找出固粒对壁面的冲蚀位置, 并提出一种新的高水基液压阀结构.

收稿日期: 2007-06-05 责任编辑: 许书阁

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50335030, 50405043)

作者简介: 张 宏(1970—), 男, 山西太原人, 高级工程师, 博士研究生. Tel: 0351-7685483, E-mail: hexie007@163.com

1 典型液压阀的结构

液压支架高水基液阀工作介质为 5% 的乳化油与 95% 的水形成水包油型 (O/W 型) 乳化液, 黏度低, 工作压力高, 通常在 32 MPa 左右; 并且要求在关闭位置时没有任何漏损. 高水基液阀的密封副由阀座和阀芯组成, 按密封副的结构不同, 高水基液阀分为平面阀、球阀和锥阀. 本文重点研究平面阀流动状态. 液阀在非工作状态时, 阀芯与阀座处于常闭状态; 正常工作时, 利用阀芯相对阀座孔的移动来改变液流通路开口的大小, 以实现液流压力、流量及方向的控制. 传统设计中, 顶杆的布置通常设在阀座中心, 即顶杆结构. 图 1 为平面密封阀的正顶杆结构简图. 图 2 为平面先导阀的流场计算区域, 其中入口直径 $D = 8 \text{ mm}$, $d = 7 \text{ mm}$, 出口直径 $D_0 = 0.6 \text{ mm}$, 阀口开度为 0.2 mm .

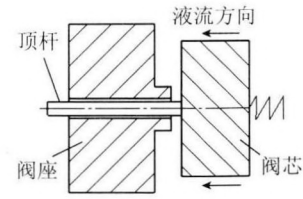


图 1 平面阀正顶杆结构
Fig. 1 The center pole structure scheme of plain valve

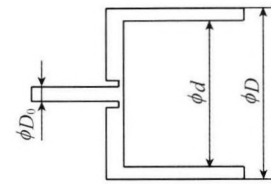


图 2 平面阀流场计算区域
Fig. 2 Computed area of plain valve flow field

2 冲蚀数学模型的选择

2.1 流场数学计算模型

流体的流动是一个非常复杂的多相流动过程. 整个流动过程可以用连续性方程、动量守恒方程、湍动能 k 及湍动能耗散率 ε 的 $k - \varepsilon$ 输运方程来描述. 对于定常流动, 流体运动的连续性方程和动量守恒方程^[3]分别为 $\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0$, $\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i$, 其中 ρ 为液体密度, kg/m^3 ; u_i 为速度矢量在 x_i 方向的分量, m/s ; p 为流体微元体上的压力, Pa ; τ_{ij} 为应力张量, $\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \delta_{ij}$; ρg_i 和 F_i 分别为 i 方向的重力体积力和外部体积力; μ 为液体动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; δ_{ij} 为脉冲函数.

目前广泛使用的湍流模型有 lauder 和 spalding^[4] 提出的标准 $k - \varepsilon$ 湍流模型, Yakhot 和 Orzag^[5] 提出的 RNG $k - \varepsilon$ 模型, 文献 [6] 提出的 Realizable $k - \varepsilon$ 湍流模型. 这 3 种 $k - \varepsilon$ 湍流模型均对充分发展的湍流才有效, 这些模型均是高 Re 数的湍流模型. 它们只能用于求解处于湍流核心区的流动. 而在壁面区, 流动情况变化很大, 特别是在黏性底层, 流动几乎是层流, 湍流应力几乎不起作用. 因此, 不能用上述 $k - \varepsilon$ 模型来求解这个区域内的流动. 解决这一问题的途径^[7]: ① 壁面函数法; ② 低 Re 数 $k - \varepsilon$ 模型. 本文采用 Jones 和 Launder 提出的低 Re 数 $k - \varepsilon$ 模型^[8]. 湍动能 k , 湍动能耗散率 ε 的输运方程分别为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon - \left| 2\mu \left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial n} \right)^2 \right|,$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k \left| f_1 \right| - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \left| f_2 \right| + \left| 2 \frac{\mu \mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial n^2} \right)^2 \right|,$$

其中, $\mu_t = \rho C_\mu \left| f_\mu \right| \frac{k^2}{\varepsilon}$, $G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$, $Re_1 = \rho k^2 / (\eta \varepsilon)$, $f_1 \approx 1.0$, $f_2 = 1.0 - 0.3 \exp(-Re_1^2)$, $f_\mu = \exp[-2.5 / (1 + Re_1/50)]$; η 为液体运动黏度, m^2/s ; G_k 为由平均速度梯度引起的湍流动能 k 的产生项; μ_t 为所求湍动黏度, 它是空间坐标的函数, 取决于流动状态, 而不是物性参数; σ_ε , σ_k 分别为与湍流能 k 和耗散率 ε 对应的 Prandtl 数, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$; n 为壁面法向坐标, u 为与壁面平行的流速, 在实际计算时, 方向 n 可近似取为 x , y 和 z 中最满足条件的一个, 速度 u 也做类似处理; 经验常数 $C_\mu = 0.09$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$; Re_1 为湍流雷诺数; 系数 f_1 , f_2 和 f_μ 的引入, 实际上等于对标准 $k - \varepsilon$ 模型中的系数 $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ 和 C_μ 进行了修正, 当 Re_1 很大时, f_1 , f_2 和 f_μ 均趋近于 1.

2.2 固体粒子运动方程

固体粒子在流场中受到多种力的作用而运动, 其运动方程由牛顿第二定律描述为 $mdv/dt = F_D + F_g + F_x$, 其中 F_D 为质量颗粒所受的曳力; F_g 为重力; F_x 为附加力, 包括虚拟质量力、Magnus 效应、热涌力、布朗力、Saffman 升力. 本文流场中 F_D , F_g 较大, 所以计算时仅考虑这些力, 而忽略其它力.

固体粒子碰到壁面将反弹回流场, 颗粒的反弹速度和角度公式^[9]为: $v_2/v_1 = 0.997\ 27 + 0.306\ 2\theta_1 - 4.252\ 71\theta_1^2 + 5.381\ 8\theta_1^3 - 1.989\ 6\theta_1^4$, $\theta_2/\theta_1 = 0.998\ 66 - 2.829\ 02\theta_1 + 4.650\ 83\theta_1^2 - 2.319\theta_1^3 + 0.274\ 04\theta_1^4$, 其中 v_1 , v_2 分别为颗粒的入射速度和反弹速度; θ_1 , θ_2 为颗粒的入射角和反弹角. $v_2/v_1 = 1$, $\theta_2/\theta_1 = 1$ 时, 粒子碰撞壁面后仍保留粒子的动量; $v_2/v_1 = 0$, $\theta_2/\theta_1 = 0$ 时则不保留.

2.3 冲蚀模型

I. Finnie^[10]讨论了刚性粒子对塑性金属的冲蚀, 提出了微切削理论, 这是第 1 个定量描述的完整理论. Menguturk^[11]等利用粉煤灰冲击 A3 钢实验研究了冲蚀磨损规律; Edwards^[12]等人对砂粒与碳钢和铝表面的侵蚀进行研究. 本文采用 Edwards 等人利用砂粒冲击碳钢和铝表面实验得到冲蚀磨损公式为 $R_{erosion} = \sum_{p=1}^N \frac{m_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{face}}$, 其中 $R_{erosion}$ 为冲蚀磨损率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; p 为颗粒数; m_p 为颗粒质量流率, kg/s ; $C(d_p)$ 为颗粒直径的函数; d_p 为颗粒的直径; $f(\alpha)$ 为冲击角的函数; α 为颗粒轨迹与壁面的冲击角; v 为颗粒相对运动速度; $b(v)$ 为颗粒相对运动速度的函数, 通常情况下, $b(v)$ 取 0.2~0.4; A_{face} 为颗粒冲击壁面的单元面积.

3 液阀冲蚀的数值模拟

3.1 模型的建立及边界条件设置

取平面阀的二维模型进行流场冲蚀仿真. 为捕捉近壁面、突扩、突缩、弯曲处的物理参数的剧烈变化, 在这些地方对网格进行加密. 采用 Fluent6. 2. 16 软件进行仿真. 模拟采用离散相湍流模型, 流体介质为乳化液, 密度为 $998\ \text{kg}/\text{m}^3$, 动力黏度为 $1.057 \times 10^{-3}\ \text{Pa} \cdot \text{s}$. 假定乳化液为黏性牛顿流体, 计算中在阀道内部无热传导现象. 开口量为 $0.2\ \text{mm}$, 入口压力为 $32\ \text{MPa}$, 出口压力 $23\ \text{MPa}$, 边界区域采用标准壁面函数来计算近壁面网格上的各物理量. 非金属颗粒取为煤粒, 其密度为 $1\ 400\ \text{kg}/\text{m}^3$. 把它们简化为球状颗粒, 取其平均直径为 $0.005\ \text{mm}$, 粒子质量流率为 $0.001\ 7\ \text{kg}/\text{s}$. 液流携带固体粒子流动时, 粒子与水流的相对速度可能只有几十毫米每秒, 即粒子基本上随流, 因此可以通过计算估计出粒子速度.

3.2 仿真结果分析

图 3(a) 为平面阀受煤粒冲击后, 密封副节流口的冲蚀率分布. 流体在流入节流口过流面积突变处和直角孔处引起较大的能量损失, 流动方向正对的阀座直角两个面和阀芯正对细长孔的近壁冲蚀磨损比较严重. 对于阀座, 由于采用不锈钢材料, 其抗冲蚀性高于非金属材料, 而阀芯采用聚甲醛, 其冲蚀率严重时会影响液压阀的密封效果. 为了更准确地捕捉阀芯冲蚀最严重的区域, 对阀芯与阀座正对的表面区域, 至上而下作出长度对磨损率的分布曲线(图 3(b)). 可以看出, 在远离节流口处, 冲蚀磨损较小, 流体到达环形密封附近, 冲蚀率到达最大值, 流到细长孔汇流处, 冲蚀磨损稍有下降.

平面阀的阀芯冲蚀磨损发生在节流口附近, 主要原因是由于

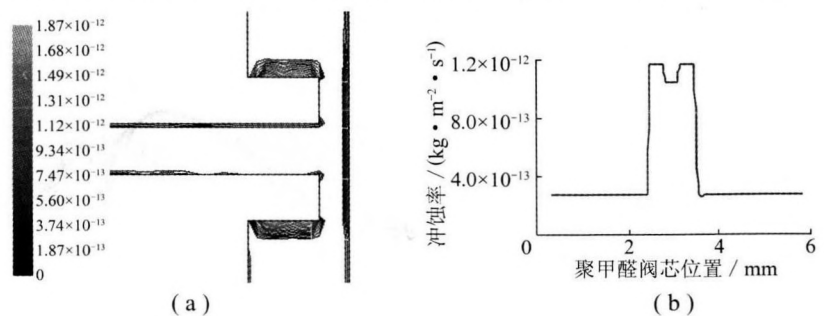


图 3 平面阀冲蚀磨损仿真

Fig. 3 Simulation of erosion wears on plain valve
(a) 平面阀节流口的冲蚀磨损率; (b) 阀芯冲蚀率分布

平面阀独特的结构, 使煤粒对聚甲醛的冲蚀角度近似为零, 只在节流口处流速较大时, 携带煤粒对阀芯产生磨料侵蚀。

4 高水基液压阀结构探讨

高水基液压阀的工作原理: 外力推动顶杆运动, 然后顶杆与阀芯碰撞一起运动, 使阀芯与阀座组成的密封副脱离密封状态, 打开液流通道, 实现液压阀的通道切换。这种正顶杆结构由于阀芯惯性、复位弹簧及液流的作用, 使顶杆顶端和阀芯接触面上出现周期性小振幅振动, 造成阀芯表面损伤。微动使材料损失, 表面形貌变化。由于冲蚀和微动同时存在, 两者交互产生的破坏率远高于粒子的冲蚀破坏率与微动破坏率的简单相互叠加。导致阀芯表面加快损伤, 进而产生微裂纹。当损伤表面与阀座配对密封时, 必然产生渗漏, 使液压阀失效。可见, 正顶杆结构会加速阀芯的磨损, 对高水基液压阀的密封产生消极影响。为此, 本文提出了侧顶杆结构(图4), 顶杆由中心布置改在侧面布置, 增加了细长孔的通流面积, 避开冲蚀率较严重的节流口附近, 从而使顶杆与阀芯接触产生的微动磨损不会与冲蚀磨损叠加, 提高了液压阀密封面的使用寿命。

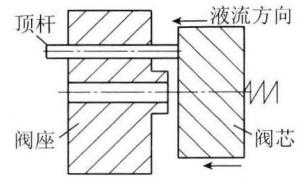


图4 平面阀侧顶杆结构

Fig. 4 Sidepiece pole structure of plain valve

5 结 论

(1) 冲蚀磨损受材质、冲蚀速度、攻角、质量流率、冲蚀时间等因素综合影响。将计算流体力学和冲蚀理论相结合, 可预测液压阀流道各部位冲蚀率分布的可视化, 对优化流道和结构设计具有指导意义。

(2) 当流动介质含有颗粒时, 会对平面阀密封副产生冲蚀磨损, 且阀芯冲蚀磨损发生在节流口附近。由于阀芯惯性等的作用, 还会造成阀芯表面的微动磨损。

(3) 冲蚀磨损和微动磨损的双重作用, 使正顶杆结构的阀芯磨损率加剧。采用侧顶杆结构可以避免磨损的叠加, 减轻磨损, 提高液压阀密封副的使用寿命。

参考文献:

- [1] 梁工英, 杨琛, 苏俊义. 激光表面处理对球墨铸铁冲蚀性能的影响 [J]. 摩擦学学报, 2000, 20 (2): 115 ~ 118.
- [2] 林建忠, 吴法理, 余钊圣. 一种减轻固粒对壁面冲蚀磨损的新方法 [J]. 摩擦学学报, 2003, 23 (3): 231 ~ 235.
- [3] 盛敬超. 液压流体力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1980. 81 ~ 85.
- [4] Launder B E, Spalding D B. Lectures in mathematical models of turbulence [M]. London: Academic Press, 1972.
- [5] Yakhot V, Orzag S A. Renormalization group analysis of turbulence: basic theory [J]. J. Scient Comput., 1986(1): 3 ~ 11.
- [6] Moin P. Large eddy simulation of multi-phase turbulent flows in realistic combustors [J]. Progress in Computational Fluid Dynamics, 2004, 4 (3 ~ 5): 237 ~ 240.
- [7] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 1 ~ 26, 121 ~ 123.
- [8] Jones W P, Launder B E. The calculation of low-reynolds-number phenomena with a two-equation model of turbulence [J]. International Journal Heat Mass Transfer, 1973, 16: 1 119 ~ 1 130
- [9] Tabakoff W. Particulate flow and blade erosion [J]. Von Karman Inst Fluid Dynamics, Lect Ser, 1988, 2: 2 ~ 25.
- [10] Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles [J]. Wear, 1960, 3: 87 ~ 103.
- [11] Menguturk M, Sverdrup E F. Calculated tolerance of a large electric utility gas turbine to erosion damage by coal gas ash particles [A]. ASTM Spec Tech Pub 664 [C]. Philadelphia: ASTM, 1979. 193 ~ 224.
- [12] Edwards J K, McLaury B S, Shirazi S A. Evaluation of alternative pipe bend fittings in erosive service [A]. Proceedings of ASME FEDSM00: ASME 2000 Fluids Engineering Division Summer Meeting [C]. Boston: ASME, 2000. 959 ~ 966.