

doi:10.13436/j.mkjx.201911030

# 煤矿水液压支架安全阀复合织构阀芯润滑性能分析\*

陈国瑜<sup>1</sup>, 何 涛<sup>1,2,3</sup>, 张敬敏<sup>1</sup>, 陈明亮<sup>1</sup>, 王传礼<sup>1,2,3</sup>

(1. 安徽理工大学 机械工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 流体动力与机电系统国家重点实验室, 杭州 310027; 3. 江苏省矿山机电装备重点实验室(中国矿业大学), 江苏 徐州, 221116)

**摘 要:** 针对煤矿水液压支架安全阀阀芯的润滑问题, 建立复合织构几何模型, 通过 FLUENT 进行仿真计算, 分析不同排列顺序、不同深度、不同面积率的复合织构对动压润滑承载力的影响, 研究复合织构对阀芯润滑特性的影响规律。

**关键词:** 煤矿水液压; 液压支架安全阀; 复合织构; 润滑性能; 结构优化

中图分类号: TH137.52 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 0794(2019)11 - 0087 - 04

## Analysis of Lubrication Performance of Composite Texture Valve Core of Coal Mine Water Hydraulic Support Safety Valve

Chen Guoyu<sup>1</sup>, He Tao<sup>1,2,3</sup>, Zhang Jingmin<sup>1</sup>, Chen Mingliang<sup>1</sup>, Wang Chuanli<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Hangzhou 310027, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Mine Mechanical and Electrical Equipment (China University of Mining and Technology), Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Aiming at the lubrication problem of the safety valve core of the coal mine water hydraulic support, a composite texture geometric model was established. Through FLUENT, the simulation calculation was carried out to analyze the influence of the composite texture with different arrangement order, different depth and different area rate on the bearing capacity of dynamic pressure lubrication, and to study the influence rule of the composite texture on the lubrication characteristics of the valve core.

**Key words:** coal mine water hydraulic; hydraulic support safety valve; composite texture; lubrication performance; structural optimization

### 0 引言

液压支架对煤矿的安全开采起着至关重要的作用。本文针对以纯水为介质的煤矿水液压支架安全阀进行研究。水相对于其他介质来说,其来源较为广泛、成本相对较低,同时其具有环保这一优点,但水具有黏度低这一物理特性,导致其润滑性能较差,使用纯水作为传动过程中的介质必然会使磨损量加剧,从而降低该类设备的使用性能和寿命。

将仿生表面织构技术运用于滑动副表面,可以减少滑动副之间产生的磨损。微织构具有储存润滑剂、二次润滑、减少微细磨粒磨损、微流体动压润滑及微孔端面密封等多种功能。将有一定规则分布的微型凹坑加工在滑动副的表面,可以制造良好的动压润滑效果,使得滑动副之间的干摩擦情况得到改善。

通过学者们大量的研究结果证明,具有微造型的摩擦副表面压力分布曲线可以拟合为一条正弦曲

线,且正压区与负压区的面积近似,但研究多数是在摩擦副表面开凿某一种形貌的织构来研究其对动压润滑产生的影响,对于不同形貌的复合织构表面动压润滑特性研究较少,本文对 4 种排布顺序的复合织构对润滑效果的影响进行仿真分析,并对不同织构参数条件下产生的效果进行了分析计算,并筛选出最优结构参数。

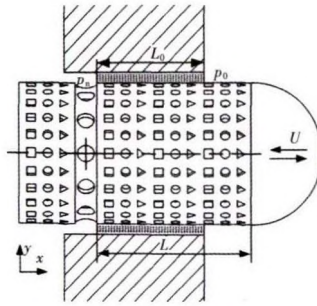
### 1 几何模型

安全阀阀芯复合织构如图 1 所示。复合织构的尺寸相对于阀芯的表面尺寸很小,且在阀芯周向及轴向上,复合织构具有周期性,同时在其轴向上多组相同复合织构连续排布,故将其简化为  $l_1 \times l_2$  的微织构单元进行分析,简化过程如图 1(b) 所示。复合织构单元三维模型如图 2 所示,复合织构单元中心截面形貌如图 3 所示。

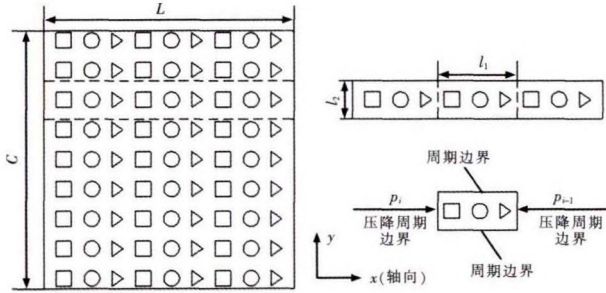
### 2 数学模型

条件假设: 阀芯为富油润滑, 阀芯与阀套具有很高的同轴度, 不计体积力以及介质的压缩, 认为复合织构区外的壁面均光滑, 且温度对其没有影响。

\* 国家自然科学基金面上项目(51675003); 流体动力与机电系统国家重点实验室开放基金(GZKF-201715); 安徽省高校自然科学基金研究项目(KJ2018A0078); 江苏省矿山机电装备重点实验室开放基金(JSKF-MMEE-2018-4)



(a) 阀芯复合织构



(b) 模型简化

图1 阀芯复合织构模型

$p_0$  进液口处的压力  $p_n$  阀腔内的压力  $U$  阀芯轴向速度  $L_0$  摩擦副轴向长度  $L$  轴向长度  $C$  周向长度  $l_1$  复合织构单元轴向长度  $l_2$  复合织构单元宽度

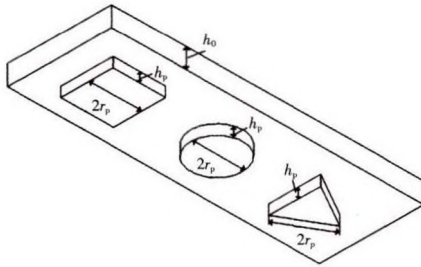


图2 复合织构单元三维模型

$h_p$  微织构深度  $h_0$  光滑区滑动副间隙  $r_p$  微织构等效半径

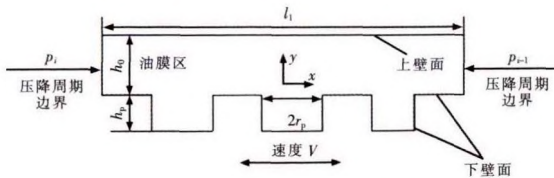


图3 复合织构单元的截面形貌

(1) 摩擦副膜厚方程

$$h(x, z) = \begin{cases} h_0 & (x, z) \notin \Omega \\ h_0 + h_p & (x, z) \in \Omega \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\Omega$ ——加工微织构的区域。

(2) 流场的 N-S 方程

采用 N-S 方程计算水压阀阀芯微造型流场, 将 N-S 方程进行简化:

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \eta(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}) \quad (2)$$

$$\rho(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \eta(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}) \quad (3)$$

$$\rho(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \eta(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}) \quad (4)$$

流体连续性方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

式中  $u, v, w$ ——沿  $x, y, z$  方向液体流动的速度;

$\rho$ ——纯水的密度;

$\eta$ ——纯水的动力黏度;

$p$ ——纯水形成的油膜压力。

(3) 边界条件

如图3所示, 设摩擦副  $y$  方向上、下壁面无滑移, 微织构单元  $z$  方向上的壁面设置为压降周期边界, 复合织构单元  $x$  方向设置周期边界, 周期边界的压力梯度

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{p_n - p_0}{nl_1} = \frac{p_n - p_0}{L_0} \quad (6)$$

式中  $n$ ——密封区域内轴向复合织构的单元个数。

(4) 承载力方程

介质在阀芯表面  $y$  轴方向上承载力方程

$$F_y = \iint p dx dz \quad (7)$$

3 参数设置

根据安全阀的工作条件, 选取纯水为润滑介质, 设定阀芯与阀套之间间隙  $h_0 = 5 \mu\text{m}$ , 复合织构加工深度  $h_p$  分别为  $3 \mu\text{m}, 4 \mu\text{m}, 5 \mu\text{m}, 6 \mu\text{m}, 7 \mu\text{m}$ , 复合织构单元的轴向长  $l_1 = 300 \mu\text{m}$ , 宽  $l_2 = 100 \mu\text{m}$ , 阀芯轴向长  $L = 12 \text{mm}$ , 阀芯叠合量  $L_0 = 6 \text{mm}$ , 速度  $U = 2.5 \text{m/s}$ , 此外安全阀的初始压力设定为  $25 \text{MPa}$ 。

复合织构具有不同形貌及排列顺序, 引入织构面积率  $S$  作为参考, 面积率

$$S = (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) r_p^2 / (l_1 l_2) \quad (8)$$

式中  $\lambda_1$ ——正方形面积系数,  $\lambda_1 = 4$ ;

$\lambda_2$ ——圆形面积系数,  $\lambda_2 = \pi$ ;

$\lambda_3$ ——三角形面积系数,  $\lambda_3 = \sqrt{3}$ 。

其相对照的等效半径  $r_p$  值如表1所示。

表1 复合织构形貌及参数取值

复合织构形貌		复合织构		等效半径 $r_p / \mu\text{m}$		
命名	排列方式	面积率 $S/\%$	复合织构	单一织构		
				正方形	圆形	三角形
序列1		10	18.3	15.8	17.8	24.0
序列2		20	26.0	22.4	25.2	34.0
序列3		30	31.8	27.4	30.9	41.6
序列4		40	36.8	31.6	35.7	48.1

4 计算结果分析

(1) 阀芯复合织构动压润滑特性分析

单一织构单元的阀芯中心截面压力分布曲线图如图4所示, 从图4中可以看出, 单一织构的压力曲线成周期分布, 虽然存在正负压, 有动压润滑效应,

但是正方形和圆形的正压力区域面积明显小于负压力区域面积,其产生的动压承载力远不如复合织构。而三角形的正压力区域面积与负压力区域面积近似相等,将面积率  $S=30\%$ 、深度  $h_p=6\ \mu\text{m}$  的三角形单一织构的阀芯表面压力分布与复合织构压力分布相比较,结果如图5所示。复合织构正压力区域面积明显大于三角形正压力区域面积,且负压为区域面积小于三角形负压力区域面积。由此可见,复合织构具有较好的动压润滑效果。

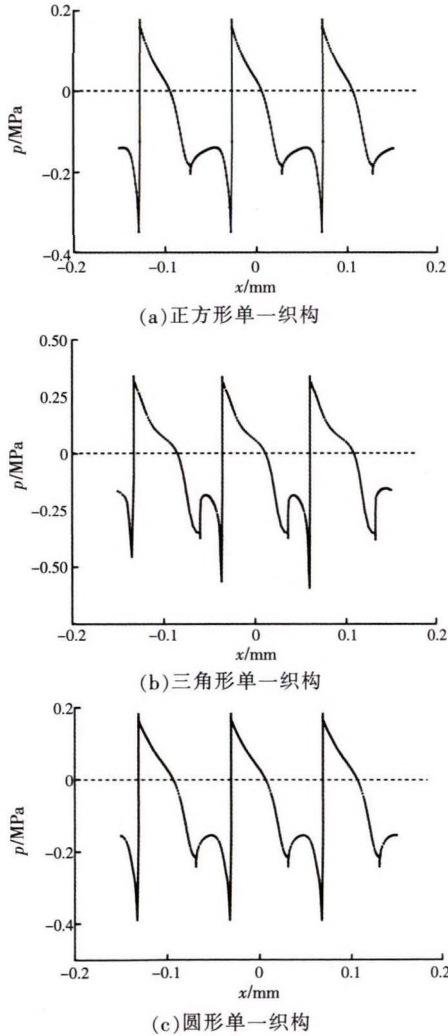


图4 单一织构单元的阀芯中心截面压力分布曲线

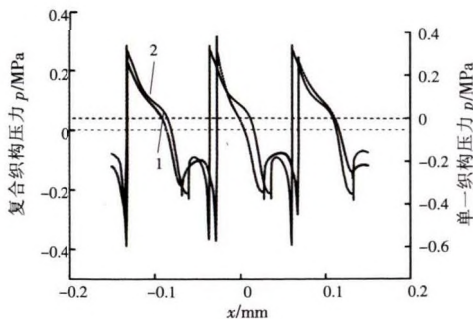


图5 复合织构与单一织构(三角形结构)压力分布对比

(2)复合织构不同参数对阀芯动压润滑性能的影响

排列顺序为序列1时各参数对复合织构表面承载力的影响曲线如图6所示,由图6可知,各参数条件下复合织构的承载力都大于0,可以产生动压润滑效果,当复合织构排序为序列1时,在一定范围内织构深度和面积率逐步增长的过程中,动压承载力的数值先增后减,且当深度  $h_p=6\ \mu\text{m}$ 、面积率为30%时产生的表面承载力最大,最大值为  $3.3 \times 10^{-3}\ \text{N}$ 。

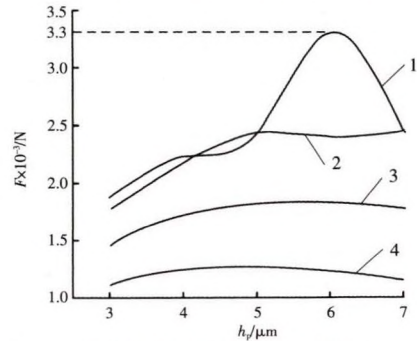


图6 复合织构表面承载力(序列1)  
1. 30% 2. 40% 3. 20% 4. 10%

排列顺序为序列2时各参数对复合织构表面承载力的影响曲线如图7所示,由图7可知,各参数条件下复合织构的承载力都大于0,可以产生动压润滑效果,当复合织构排序为序列2且  $h_p < 5\ \mu\text{m}$  时,随面积率的增大,动压承载力先减后增,织构加工深度在  $5\ \mu\text{m}$  以上时,面积率为30%和40%的复合织构随深度的增大呈现急速的增长而后下降的趋势,且当深度  $h_p=6\ \mu\text{m}$ 、面积率为30%时产生的表面承载力最大。

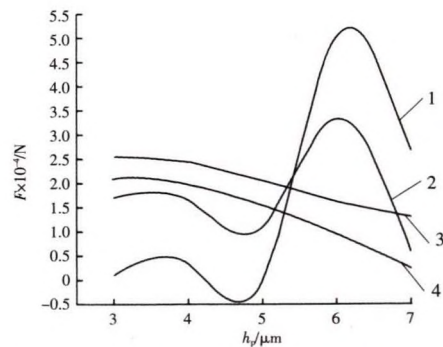


图7 复合织构表面承载力(序列2)  
1. 30% 2. 40% 3. 10% 4. 20%

排列顺序为序列3时各参数对复合织构表面承载力的影响曲线如图8所示,由图8可知,当复合织构排序为序列3时,复合织构表面承载力随织构深度的增加呈先增大后减小的趋势,同时,复合织构表面承载力大小随织构面积率的增加整体呈逐渐增大的趋势。当深度  $h_p=6\ \mu\text{m}$ 、面积率为30%时产生的表面承载力最大,最大值为  $3.4 \times 10^{-3}\ \text{N}$ 。

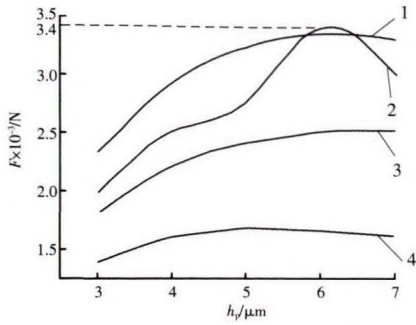


图8 复合织构表面承载力(序列3)

1. 40% 2. 30% 3. 20% 4. 10%

排列顺序为序列4时各参数对复合织构表面承载力的影响曲线如图9所示,由图9可知,当复合织构排序为序列4时,复合织构表面承载力随织构深度的增加整体呈先增大后减小的趋势,且当深度 $h_p=6\ \mu\text{m}$ 、面积率为30%的复合织构随深度的增大呈现急速的增长而后下降的趋势,产生的表面承载力最大。

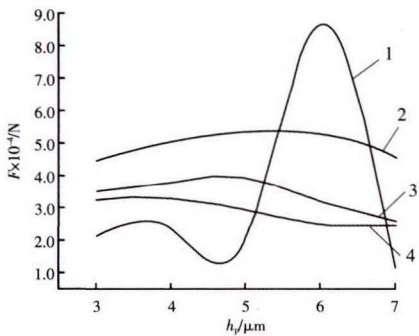


图9 复合织构表面承载力(序列4)

1. 30% 2. 40% 3. 20% 4. 10%

由以上4组数据分析可知,当复合织构排列顺

序为序列3,且深度 $h_p=6\ \mu\text{m}$ 、面积率为30%时,复合织构产生的承载力最大,其动压润滑特性最好。

## 5 结语

(1)微织构能够产生良好的动压润滑效果,且相对于单一织构,复合织构表面上的正压力区域面积高于负压力区域面积,其产生的动压承载力相对单一织构更大。因此,在安全阀阀芯上开设复合织构,可以很好地改善阀芯的磨损情况,从而使其工作时长得以增加;

(2)在不同参数条件下,复合织构产生的动压润滑效果也不同,排列顺序为圆形、三角形和正方形的复合织构在深度为 $6\ \mu\text{m}$ 、面积率为30%的情况下,产生的表面承载力为 $3.4\times 10^{-3}\ \text{N}$ ,动压润滑效果最好。

## 参考文献:

- [1]于海武,邓海顺,黄巍,等. 微凹坑相对位置变化对表面减摩性能的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(6):943-948.
- [2]何涛,王传礼,黄绍服,等. 形貌特征对微造型阀芯润滑及泄漏特性的影响[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2016, 43(1):110-116.
- [3]符永宏,张宗涛,张彦虎,等. 基于CFD活塞环表面凹腔微造型动压润滑性能研究[J]. 润滑与密封, 2010, 35(12):25-27+57.
- [4]王洪涛,朱华. 圆柱形微凹坑排布形式对织构表面摩擦性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(4):414-419.
- [5]许亚峰,何涛,魏本柱. 微造型对水压阀阀芯动压润滑性能的研究[J]. 煤矿机械, 2015, 36(4):110-111.

作者简介:陈国瑜(1996-),安徽淮南人,硕士研究生,研究方向:流体传动与控制,电子信箱:m18855468061@163.com;通讯作者:何涛,电子信箱:taoheast@163.com.

责任编辑:张欣 收稿日期:2019-05-20