

文章编号: 1001-1986(2016)06-0064-05

# 煤层气井有杆排采泵筒煤粉流动特征

刘春花<sup>1</sup>, 刘新福<sup>2</sup>, 梁耀光<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东 青岛 266580;  
2. 青岛理工大学机械工程学院, 山东 青岛 266520)

**摘要:** 煤层气井煤粉颗粒在有杆排采泵筒内固液两相流中的流动特征是埋泵、卡泵和凡尔漏现象的重要因素。基于泵筒中液体携煤粉的运动学和动力学分析, 建立了泵筒中液体流动和煤粉转移的计算模型, 并依据仿真分析得到不同排液量和煤粉粒径时, 煤粉在泵筒内的转移特征。结果表明, 泵筒中的煤粉转移与液体流动特征相近, 煤粉转移速度正负的分界点随排液量的增大而逐渐扩大, 煤粉排出量也随之不断提升。泵筒中液体携煤粉在泵筒入口附近发生湍流, 并在固定阀孔两侧由于涡流而发生煤粉沉淀, 而在泵筒内部固液两相流动则变为层流运动。两相流进泵速度较低或煤粉粒径较大时, 泵入口附近开始出现煤粉沉淀, 煤粉转移速度损失较小。该研究首次系统分析煤层气井泵筒内煤粉流动特征, 为防煤粉有杆泵的设计及其排采作业方法提供了重要依据。

**关键词:** 煤层气井; 有杆泵; 煤粉转移; 液体流动; 固液两相流

**中图分类号:** P618.11   **文献标识码:** A   **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2016.06.012

## Study on the characteristics of coal moving in sucker rod pump for CBM wells

LIU Chunhua<sup>1</sup>, LIU Xinfu<sup>2</sup>, QI Yaoguang<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;  
2. College of Mechanical Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

**Abstract:** The characteristics of coal moving in two-phase (solid+liquid) flow of sucker rod pump is related to analyze the problem of buried and card pumps and its valve leak. Based on the kinematic and dynamic analysis of coal moving with well liquid, the mathematical model of coal moving and well liquid flow was developed. The coal moving characteristics in pump was obtained on simulation analysis for different flow rate and coal diameter. The results show that the characteristics of coal moving is similar to that of well liquid flow. The positive and negative demarcation point of coal moving velocity enhances with the increase of flow rate, which will improve the coal production. The turbulence occurs at the entrance of pump, and coal is deposited in both sides of fixed valve hole due to the eddy. But two-phase (solid+liquid) flow is changed into laminar flow in the pump. The coal is deposited in the entrance of pump while the flow velocity is low or the coal diameter is large, and it results to low speed loss of coal moving. The systematic analysis of coal moving in pump of coalbed methane (CBM) wells is completed for the first time, which will provide the reasonable basis for designing sucker rod pump and operating system.

**Keywords:** CBM well; sucker rod pump; coal moving; fluid flow; two-phase (solid+liquid) flow

研究煤粉颗粒在井下泵筒固液两相流中的流动特征是解决埋泵、卡泵和凡尔漏现象的重要因素。我国煤层气资源埋深差别大、非均质性强、煤体结构变化大, 这就决定了含煤盆地各主要区块煤层气

储层不均一性强、渗透率普遍偏低、一些井产煤粉严重的特点<sup>[1-3]</sup>。目前煤层气井所用的防煤粉有杆泵主要是移植油气井的防砂泵<sup>[4]</sup>, 如长柱塞式防砂泵、射流泵等。

收稿日期: 2015-08-11

基金项目: 国家科技重大专项项目(2011ZX05038)

Foundation item : National Science and Technology Major Project(2011ZX05038)

第一作者简介: 刘春花(1983—), 女, 山东菏泽人, 硕士, 工程师, 从事油气田开发及工艺技术研究. E-mail : xliu83@126.com

引用格式: 刘春花, 刘新福, 梁耀光. 煤层气井有杆排采泵筒煤粉流动特征[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(6) : 64-68.

LIU Chunhua, LIU Xinfu, QI Yaoguang. Study on the characteristics of coal moving in sucker rod pump for CBM wells[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(6) : 64-68.

由于多数煤层气井底一般仅在生产储层下方数十米处，泵的沉没度较低，现场调研鄂尔多斯盆地韩城地区的沉没度仅为数米至数十米；稳定生产阶段较低的产液量使得进泵和出泵的井筒内液体流速较低<sup>[5-6]</sup>，煤粉颗粒容易在柱塞上和泵腔内发生沉淀，造成卡泵等故障；同时低排液量的情况下，杆管环空中的煤粉容易发生沉淀而进入柱塞和泵筒的间隙，加剧二者的磨损。由此，由于煤层气排采的特有性质<sup>[7-9]</sup>，目前所采用的防砂泵等设备往往达不到防煤粉的预期效果，有必要研究煤层气实际开采中井下有杆泵泵筒内煤粉流动特征。

本文通过建立泵筒中液体流动和煤粉运移的计算模型，并依据仿真分析得到不同排液量和煤粉粒径情况下，煤粉在泵筒内的运移特性，由此为防煤粉有杆泵的设计及其排采作业方法提供依据，以便提高泵的使用寿命，延长检泵周期。

## 1 泵筒中液体运动数学模型

泵筒内流动的液体中存在内摩擦力或黏性力，从流动的井液中取一微小六面体来分析其平衡状况（图1）。假设：实际液体不可压缩，六面体平行于坐标轴各边的长度分别为 $dx$ 、 $dy$ 和 $dz$ ，其质量 $m = \rho_w dx dy dz$ ， $\rho_w$ 为液体密度。

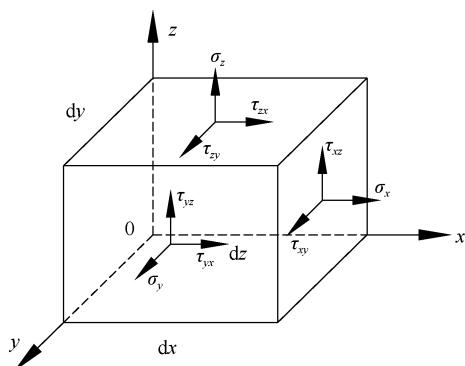


图1 泵筒中液体的微元体及其受力状况

Fig. 1 The stress analysis of micro-unit in well fluid

六面体各表面承受与受压面垂直的法向应力 $\sigma$ 及平行于作用面坐标轴的切向应力 $\tau$ ，计入质量力 $(X_m, Y_m$ 和 $Z_m$ )，依据牛顿第二定律 $\Sigma F_k = m \cdot a_x$ ，得到沿 $x$ 轴的动平衡方程式：

$$\rho_w dx dy dz X_m - \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx dy dz + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dx dy dz + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dx dy dz = \rho_w dx dy dz \frac{dv_x}{dt} \quad (1)$$

上式两端除以 $\rho_w dx dy dz$ ，可以得到单位质量力的总和等于沿 $x$ 轴加速度的平衡式。同理，可以得到 $y$ 轴和 $z$ 轴的平衡方程式，如式(2)。

$$\begin{cases} X_m + \frac{1}{\rho_w} \left( -\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) = \frac{dv_x}{dt} \\ Y_m + \frac{1}{\rho_w} \left( \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) = \frac{dv_y}{dt} \\ Z_m + \frac{1}{\rho_w} \left( \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} - \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \right) = \frac{dv_z}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

按照牛顿流体内摩擦定律<sup>[10-11]</sup>，层间内摩擦应力与流速梯度成正比，且流速梯度等于流体变形角速度。由于流体质点本身并不发生旋转，为此对整个六面体来说，其切向应力的计算式为：

$$\begin{cases} \tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu_w (\partial v_y / \partial x + \partial v_x / \partial y) \\ \tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu_w (\partial v_z / \partial y + \partial v_y / \partial z) \\ \tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu_w (\partial v_x / \partial z + \partial v_z / \partial x) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\mu_w$ 为泵筒中井液黏度。实际井液中，微元六面体趋于点0，应力 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 和 $\sigma_z$ 就成为该点各坐标轴向的压应力，其轴向压应力的计算式为式(4)。

$$\begin{cases} \sigma_x = \sigma - 2\mu_w \partial v_x / \partial x \\ \sigma_y = \sigma - 2\mu_w \partial v_y / \partial y \\ \sigma_z = \sigma - 2\mu_w \partial v_z / \partial z \end{cases} \quad (4)$$

将式(3)和式(4)以及液体连续性方程代入式(2)，得到泵筒中实际液体运动的微分方程，即：

$$\begin{cases} X_m - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial \sigma}{\partial x} + \frac{\mu_w}{\rho_w} \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) = \frac{dv_x}{dt} \\ Y_m - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial \sigma}{\partial y} + \frac{\mu_w}{\rho_w} \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) = \frac{dv_y}{dt} \\ Z_m - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial \sigma}{\partial z} + \frac{\mu_w}{\rho_w} \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) = \frac{dv_z}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

## 2 泵筒中液体携煤粉运移数学模型

有杆泵排采的上冲程中，固定阀在泵外沉没压力作用下开启，地层中产出液体进入井筒并携煤粉进入泵腔；下冲程中，游动阀在泵筒内压力大于柱塞上部压力后打开，泵筒内的液体携煤粉举升到地面<sup>[12-13]</sup>。

模型假设：液相和煤粉颗粒固相均为连续介质；液相作定产量流动；柱塞的运动采用动边界；忽略气体对泵工作的影响。由此，将稳定生产阶段泵筒中液体流动的物理模型简化成液体在等截面垂直圆管中作层流运动<sup>[14]</sup>，垂直圆管流场取为柱坐标系( $r$ ， $\theta$ ， $z$ )（图2），其中， $r_h$ 为泵筒内半径。

泵筒中液体各质点只沿着轴向流动，而无径向运动，则有 $v_x = v_y = 0$ 和 $v_z = v$ ，则不可压缩液体在

杆管环空中的稳定流动，得到式(6)。

$$\frac{dv_z}{dt} = \mu_w \frac{\partial v_z}{\partial x} + \mu_w \frac{\partial v_z}{\partial y} + \mu_w \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

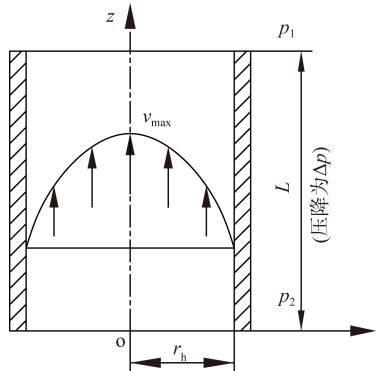


图 2 有杆排采泵筒中液体的流体场

Fig. 2 The field of water flow in sucker rod pump

由液体流动连续性方程知： $\partial v_x / \partial x = \partial v_y / \partial y = 0$ ， $\partial v_z / \partial z = \partial v / \partial z = 0$ ，又因  $X_m = Y_m = Z_m = 0$ ，同时液体各质点的压力  $\sigma$  记为  $p$ ，则井液运动的微分方程为

$$\mu_w \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{p_1 - p_2}{L} = -\frac{\Delta p}{L} \quad (7)$$

式中  $\Delta p$  为泵筒长度为  $L$  的上下压强差。

泵筒中液体对称流动，由此柱坐标中液体流速  $v$  对半径  $r$  的偏导数可以写成全导数，则式(7)变为

$$2\mu_w \frac{d^2 v}{dr^2} = -\frac{\Delta p}{L} \quad (8)$$

边界条件  $r = 0$ ， $dv / dr = 0$ ； $r = r_h$ ， $v = 0$ ，对半径  $r$  积分上式并整理后可得：

$$v = -\frac{1}{\mu_w} \frac{\Delta p}{L} \frac{r^2}{4} + \frac{\Delta p}{4\mu_w L} r_h^2 \quad (9)$$

取泵筒半径  $r$  处厚度为  $dr$  的微小圆环面积，环截面上积分后得到泵筒中液体的流量  $Q$  为

$$Q = \frac{\pi \Delta p}{2\mu_w L} \int_0^{r_h} (r_h^2 - r^2) r dr = \frac{\pi \Delta p}{8\mu_w L} r_h^4 \quad (10)$$

煤粉颗粒在泵筒井液中的运移速度应等于液体实际流速  $v$  与煤粉实际沉降末速  $v_f$  的矢量和，即：

$$v_c = v + v_f = v + v_{fe}' - 0.55v' \quad (11)$$

式中  $v'$  为泵筒中液体的平均流速，m/s； $v_{fe}'$  为静止液体中煤粒的沉降末速，m/s。

### 3 实例计算与分析

利用鄂尔多斯盆地三交区块 SJP01-2 井的调研结果，分析泵筒中煤粉运移速度分布规律。排采参数取值为：泵挂深度 655 m，冲程 1.50 m，排采管管径 73.02 mm，泵径 38 mm，杆柱直径 19 mm，泵效 70%，体积比含煤粉量 1.0%，液体黏度 0.88 mPa·s，井液密度 1 010 kg/m<sup>3</sup>，管套环空井液密度 856 kg/m<sup>3</sup>，煤粒

密度 1 490 kg/m<sup>3</sup>，井底压力 1.892 MPa。依据泵筒中液体流动和煤粉运移计算模型，得到不同排液量时，粒径 40 目煤粉在泵筒截面上运移速度的分布情况(图 3)。

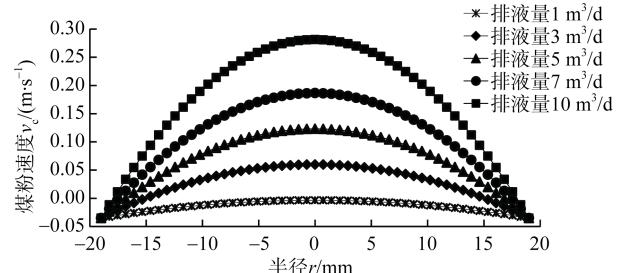


图 3 泵筒截面上煤粉颗粒运移速度分布情况

Fig. 3 The velocity distribution of coal particle in pump

由图 3 可以看出，泵筒中煤粉颗粒伴随液体流动进行运移，二者的运动特征相近。给定泵径后，煤层气井的排液量低于某一临界值，图中 1 m<sup>3</sup>/d 时，煤粉颗粒在泵筒任一截面上各点上的运移速度均小于零，表明此时煤粉颗粒在泵筒中完全沉降而无法排出。煤粉运移速度在泵筒截面的中间部位为正，该部分煤粉可以被液体携带出泵，而泵筒壁附近的煤粉运移速度为负。煤粉颗粒运移速度正负的分界点随排液量的增大而逐渐扩大，由此使得排出泵筒的煤粉量不断提升，图中排液量分别为 5 m<sup>3</sup>/d、7 m<sup>3</sup>/d 和 10 m<sup>3</sup>/d 时，泵筒截面上煤粉运移速度正负分界点依次为 ±16.5 mm、±17.3 mm 和 ±17.8 mm，被液体携带出泵的煤粉量则由 77.4% 增大到 83.8% 和 88.7%，这为煤粉顺利排出泵筒所需的排液量和泵筒截面尺寸等参数设计提供了重要依据。

### 4 泵筒中液体携煤粉运移仿真分析

采用边界条件来代替泵阀的开启并且用动边界代替柱塞的运动，从而将有杆泵采泵筒中固液两相流动物理模型简化成二维矩形垂直圆管两相流动。边界条件为：泵入口处，两相流初速度和煤粉颗粒相体积分数在轴向均匀分布；筒壁处，采用固定的壁面模型与动边界条件；出口处，仿真前出口压力和速度未知，采用自由出口边界条件。

利用 SJP01-2 井现场参数和两相管流模型进行仿真分析，得到两相流初始速度为 0.40 m/s、煤粒粒径为 120 目和煤粉体积分数为 5.0% 时，上冲程中泵筒内液体携煤粉的运移速度云图(图 4)。

图 4 的仿真分析结果表明，有杆泵入口附近煤粉颗粒运移速度分布不均匀，发生明显的湍流现象。固定阀孔两侧的煤粉颗粒轴向速度为负值，说明煤粉在此处发生沉淀，这种情况与阀孔两侧的涡流

现象有关。另外, 泵筒上部煤粉颗粒的运移速度相对较小, 可认为泵筒中固液两相流动为层流运动。

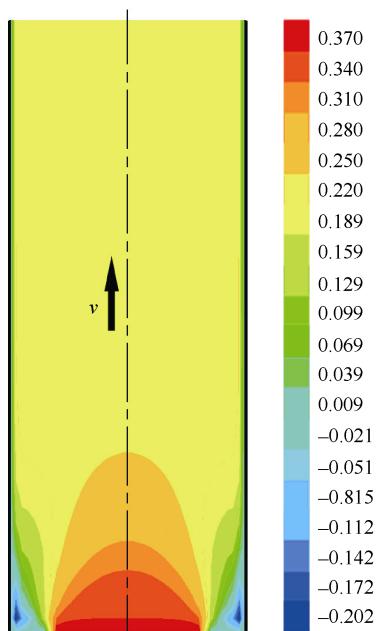
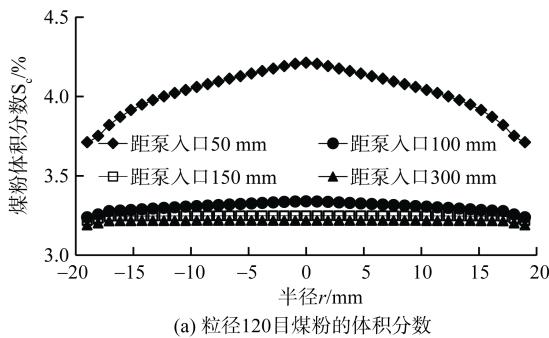


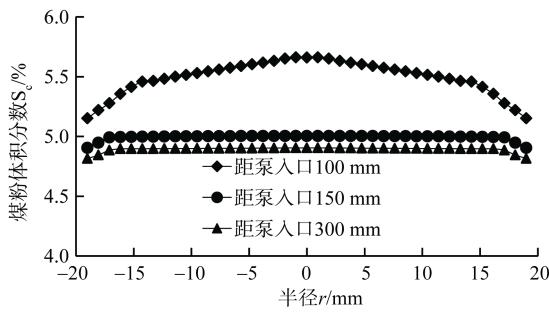
图4 泵筒中煤粉颗粒轴向运移速度云图

Fig. 4 The migration velocity for coal particle in pump

图5为不同两相流进泵速度时, 泵筒各截面上120目煤粉的体积分数曲线。由图中可以看出, 两相流速度对煤粉颗粒沉淀的影响较大, 随着两相流进泵初始速度的减小, 泵入口附近开始出现煤粉沉淀, 进泵速度减小到一定程度时煤粉多被沉淀。图



(a) 粒径120目煤粉的体积分数

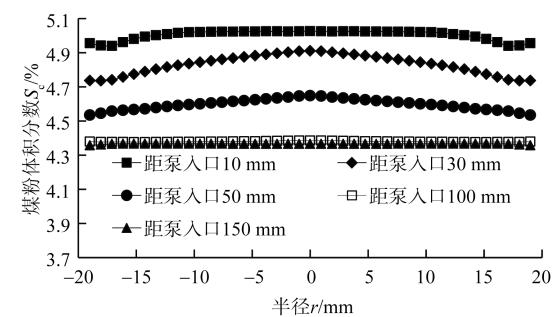


(a) 粒径120目煤粉的体积分数

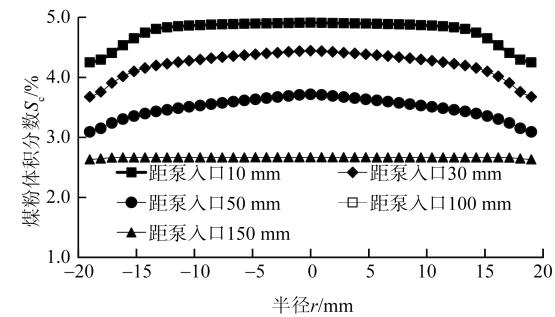
图5 不同泵筒中液体流速时煤粉体积分数分布情况  
Fig.5 The distribution of coal concentration for different well liquid velocity

5a中两相流进泵速度为0.15 m/s时, 泵筒中的体积比含煤粉量最高达5.05%, 开始有少量的煤粉发生沉淀, 在距离泵入口10 mm、30 mm和50 mm处泵筒截面上的平均体积比含煤粉量依次为5.01%、4.83%和4.60%, 而图5b中当进泵速度调整为0.30 m/s后, 含煤粉量分别为4.76%、4.22%和3.49%。

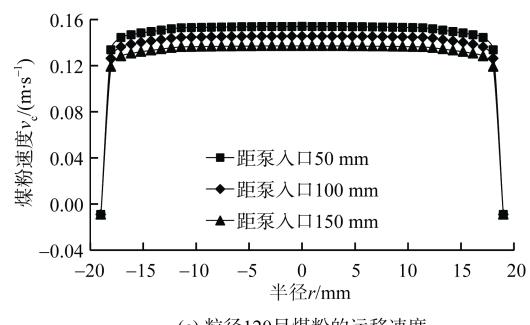
图6为两相流进泵速度为0.20 m/s时, 泵筒各截面上不同粒径煤粉的体积分数和轴向运移速度



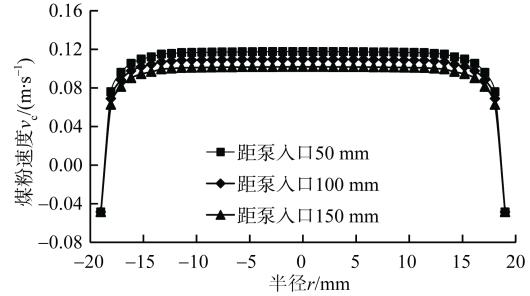
(a) 两相流初速度0.15 m/s时煤粉体积分数



(b) 粒径30目煤粉的体积分数



(c) 粒径120目煤粉的运移速度



(d) 粒径30目煤粉的运移速度

图6 不同粒径煤粉的体积分数和运移速度分布情况  
Fig.6 The distribution of coal concentration and velocity for different coal diameter

特征曲线。由图中可以看出,煤粉粒径大小对颗粒沉淀的影响也较大,液体进泵速度稳定时,随着煤粉粒径的增大,泵入口附近的煤粉逐渐发生沉淀,大煤粉颗粒不能有效地随液体排出,为此需要采用防煤粉筛管等必要措施,防止大颗粒煤粉进泵。图 6a 中,煤粉粒径为 120 目时,距离泵入口 100 mm、150 mm 和 300 mm 处泵筒截面上煤粉平均体积分数依次为 3.30%、3.24% 和 3.21%,比阀孔处减小了 34.0%、35.2% 和 35.8%,没有煤粉发生沉淀;而图 6b 中,当煤粉粒径增大为 30 目后,平均含煤粉体积分数依次为 5.50%、5.01% 和 4.89%,为阀孔处体积分数的 1.1、1.01 和 0.98 倍,出现煤粉沉淀现象。

另外,煤粉颗粒的筒壁面滑移速度为负,随煤粉粒径的增大,固液两相流中煤粉运移速度损失加大,图 6c 中,煤粉粒径为 120 目时,距离泵入口 50 mm、100 mm 和 150 mm 处泵筒截面上煤粒平均运移速度分别为 0.143 m/s、0.135 m/s 和 0.127 m/s;而图 6d 中,粒径为 30 目时,各截面上的平均速度则为 0.105 m/s、0.097 m/s 和 0.090 m/s。

## 5 结 论

a. 泵筒中煤粉运移与液体流动特征相近,煤粉运移速度正负的分界点随排液量的增大而逐渐扩大,泵筒煤粉排出量也不断增多。

b. 泵筒中液体携煤粉在泵入口附近运移速度分布不均匀,发生明显的湍流现象,而在固定阀阀孔两侧由于涡流因素使得煤粉在此处发生沉淀。

c. 两相流进泵速度较低或煤粉粒径较大时,泵入口附近开始出现煤粉沉淀,煤粉运移速度损失较小,且进泵速度减小到一定程度后煤粉多被沉淀。

## 参考文献

- [1] 杨陆武,孙茂远,胡爱梅,等.适合中国煤层气藏特点的开发技术[J].石油学报,2002,23(4):46~50.
- [2] YANG Luwu ,SUN Maoyuan ,HU Aimei ,et al. New technology series favorable to develop coal bed methane reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica , 2002 , 23(4) : 46~50.
- [3] ZENG F , ZHAO G , XU X. Transient pressure behavior under non-Darcy flow ,formation damage and their combined effect for dual porosity reservoirs[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology , 2009 , 48(7) : 54~65.
- [4] VICKI A H , PAUL S S. A guide to coalbed methane operations[M]. Alabama , Birmingham : Gas Research Institute , 2002 : 601~612.
- [5] 刘新福,綦耀光,胡爱梅,等.煤层气有杆泵设备泵阀运动规律和开启条件[J].煤炭学报,2012,37(6):755~761.
- [6] LIU Xinfu , QI Yaoguang , HU Aimei , et al. The kinetic characteristic and opening condition of fixed valve for sucker rod pump in CBM wells[J]. Journal of China Coal Society , 2012 , 37(6) : 755~761.
- [7] LIU Xinfu. Prediction of flowing bottomhole pressures for two-phase coalbed methane wells[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition) , 2013 , 87(5) : 1412~1420.
- [8] 魏迎春,曹代勇,袁远,等.韩城区块煤层气井产出煤粉特征及主控因素[J].煤炭学报,2013,38(8):1424~1429.
- [9] WEI Yingchun , CAO Daiyong , YUAN Yuan , et al. Characteristics and controlling factors of pulverized coal during coalbed methane drainage in Hancheng area[J]. Journal of China Coal Society , 2013 , 38(8) : 1424~1429.
- [10] 李小彦,司胜利.我国煤储层煤层气解吸特征[J].煤田地质与勘探,2004,32(3):27~30.
- [11] LI Xiaoyan ,SI Shengli. Coalbed gas desorption characteristics of coal reservoir in China[J]. Coal Geology & Exploration , 2004 , 32(3) : 27~30.
- [12] 陈振宏,贾承造,宋岩,等.高煤阶与低煤阶煤层气藏物性差异及其成因[J].石油学报,2008,29(2):179~183.
- [13] CHEN Zhenhong ,JIA Chengzao ,SONG Yan ,et al. Differences and origin of physical properties of low-rank and high-rank coal-bed methanes[J]. Acta Petrolei Sinica , 2008 , 29(2) : 179~183.
- [14] 庞占喜,程林松,刘慧卿.多孔介质中稳定泡沫的流动计算及实验研究[J].力学学报,2008,40(5):599~604.
- [15] PANG Zhanxi , CHENG Linsong , LIU Huiqing. Numerical simulation and experimental investigation on steady flow foam in porous media[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics , 2008 , 40(5) : 599~604.
- [16] 李丹琼,张士诚,张遂安.煤层气井牛顿流体压裂压力损失预测模型[J].煤田地质与勘探,2013,41(4):22~26.
- [17] LI Danqiong , ZHANG Shicheng , ZHANG Suian. Pressure loss prediction model of Newtonian fluid hydraulic fracturing in coalbed methane well[J]. Coal Geology & Exploration , 2013 , 41(4) : 22~26.
- [18] 刘新福,綦耀光,吴建军,等.煤层气井气体对有杆泵排采的影响分析[J].中国石油大学学报,2011,35(6):33~38.
- [19] LIU Xinfu , QI Yaoguang , WU Jianjun , et al. Effect of gas on sucker rod pump for coalbed methane well[J]. Journal of China University of Petroleum , 2011 , 35(6) : 33~38.
- [20] FIRU L S , CHELU T , PETRE C M. A modern approach to the optimum design of sucker-rod pumping system[R]. SPE 84139 , 2003 : 825~833.
- [21] 刘新福.煤层气井有杆排采井筒煤粉运移规律和防煤粉关键技术研究[D].东营:中国石油大学(华东),2012.