

# 多相介质诱发柱塞泵内部磨损

张强<sup>1,2,3</sup>, 付云飞<sup>1</sup>, 袁智<sup>3</sup>, 宋振铎<sup>3</sup>

1. 辽宁工程技术大学机械工程学院, 辽宁阜新 123000
2. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁大连 116023
3. 中国煤矿机械装备有限责任公司, 北京 100011

**摘要** 为了突破油水煤浆作为替代燃料发展的瓶颈, 解决油水煤浆替代柴油应用于柴油机和固体煤颗粒的存在加剧柱塞泵磨损问题, 通过数值模拟和实验测试方法找出多相介质下诱发柱塞泵内部磨损的机制。采用 VOF 多相流动模型, 对颗粒运动轨迹、颗粒与过流表面的相互碰撞过程、固液(煤、油)磨损进行了数值模拟, 并试验测试分析。研究表明: 离散相颗粒的性质(密度、粒径)、混合比例及柱塞运动速度对颗粒运动轨迹及壁面碰撞过程有重要的影响; 大粒径、大密度的颗粒运动轨迹向柱塞泵壳体内侧偏移, 与其撞击并反弹, 易发生多次撞击, 对柱塞泵壳体内侧磨损程度大; 小颗粒易与柱塞偶件发生撞击, 因柱塞偶件表面油膜颗粒一般与其发生一次撞击, 冲蚀磨损相对弱些; 凸轮速度直接影响柱塞运动速度, 速度加剧内部磨损; 混合燃料中固体颗粒的体积比增大, 对柱塞偶件的磨损加剧, 模拟结果与试验结果吻合。

**关键词** 柱塞泵; VOF 多相流模型; 油水煤浆; 磨损

**中图分类号** TH114

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.06.006

## Multi-medium Running Induced Piston Pump Erosion

ZHANG Qiang<sup>1,2,3</sup>, FU Yunfei<sup>1</sup>, YUAN Zhi<sup>3</sup>, SONG Zhenduo<sup>3</sup>

1. Mechanical Engineering College, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning Province, China
2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, Liaoning Province, China
3. China National Coal Mining Equipment Co. Ltd., Beijing 100011, China

**Abstract** In order to break through the bottleneck in the development for the oil-coal-water slurry to serve as the alternative fuels, this paper studies the problem of substituting the oil-coal-water slurry for the diesel fuel to be used on diesel engines where solid coal particles would exacerbate the piston pump wear, and carries out a multi-phase numerical simulation to identify the media-induced piston wear mechanism. Based on the VOF multi-medium model, the Reynolds stress model and the discrete phase model for the continuous phase and the dispersed phase, the multi-medium erosion, the motion trajectory of the solid particle and the impact process between the solid particle and the machine surface are simulated. The volume content of the solid phase in the multi-medium flow is lower than 10% in this simulation model. The simulation result shows that, the related parameters of the solid particles, such as the density and the diameter, the mix proportion and the plunger speed of the impeller, would greatly influence the motion trajectory and the impaction of the solid particles with the machine surface. The solid particles with a large mass are apt to move toward the working surface and impact the inside of the piston shell. On the other hand, the small particles are liable to impact the plunger barrel assembly. The higher the plunger speed, the more plunger barrel assembly erosion will be resulted; the plunger barrel assembly wears more severely with the increase of the solid mix proportion. Simulation results agree with experimental results.

**Keywords** piston pump; VOF multi-medium flow model; oil-coal-water slurry; erosion

## 0 引言

在冶金、矿山、化工、能源电力及农业等工程领域存在固

液冲蚀磨损问题, 其是造成的工作部件破坏、机械效率下降、寿命缩短的主要原因, 本文主要研究小型农用柴油机燃油油

收稿日期: 2011-11-16; 修回日期: 2012-02-01

基金项目: 工业装备结构分析国家重点实验室开放基金项目(GZ1107); 辽宁省教育厅科研项目(L2011050)

作者简介: 张强, 副教授, 研究方向为机械动态设计及监测技术, 电子信箱: lgdjx042@126.com

水煤浆燃料致使柱塞存在磨损问题,采用 FULENT 软件模拟固液流场中的颗粒运动轨迹、颗粒与过流表面的相互碰撞过程、固液(煤、油)磨损<sup>[1-2]</sup>,试图找出影响柱塞严重磨损的主要原因。

国内对固液两相流理论的研究始于 20 世纪 90 年代,以清华大学水利水电系、浙江大学、华中理工大学为代表的专家首先将其应用在流体机械中,进入 21 世纪后,随着 CFD 分析软件的应用,围绕固液两相流的研究相当活跃,并逐渐向颗粒运动规律、两相流流场分析等软件分析和实验研究发展。1998 年吴玉林等<sup>[3]</sup>利用两相流动的多流体模型和  $k-\epsilon-A_p$  两相流湍流模型计算了水煤浆泵叶轮内的二维固液两相湍流,并与实验结果进行了对比;2006—2008 年刘娟等<sup>[4-6]</sup>利用粒子成像测速技术对离心泵流道中固体颗粒速度场进行了研究,取得了粒径和形状是影响运动速度的关键。2009 年刘树红等<sup>[7]</sup>利用两相介质理论对轴流转桨式水轮机压力进行预测,得到水轮机压力脉动特性。但针对固体颗粒运动轨迹、颗粒与部件表面的瞬间撞击过程的研究较少,特别是多相流体数值对过流机械内部磨损的研究未见报道。为了探讨油-水-煤颗粒多相介质对高压泵体的内部磨损问题,本文应用 VOF 多相流模型,通过固体颗粒的轨迹追踪,对柱塞泵内油水煤浆流场中的固体的运动轨迹碰撞、磨损进行数值模拟,为直线运动机械过流部件磨损过程及机制研究提供新的研究方法。

由于油水煤浆具有多相介质,特别是煤颗粒的高压运行,使得柱塞面磨损严重,为了减少柱塞磨损,研制出一种带辅助油路的柱塞泵,张强等<sup>[8-9]</sup>对改进设计的新型油水煤浆柱塞泵进行数值建模,设计结构如下图 1 所示,并对其内部进行磨损分析。

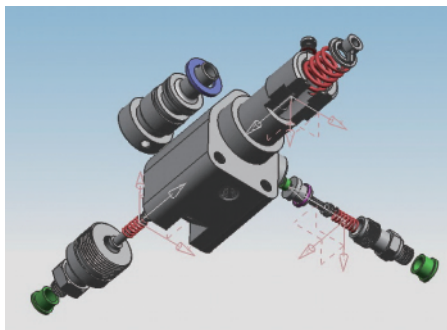


图 1 油水煤浆柱塞泵的三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of oil-coal-water slurry plunger pump

### 1 固液多相流控制方程

对油水煤浆泵进行数值模拟时,应采用混合模型(mixture model)进行计算。

混合模型的连续方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = \dot{m} \quad (1)$$

其中,  $\rho$  为流体密度;  $m$  为流体质量;  $\dot{m}$  描述由于气穴或自定义的质量源的质量传递;  $\mathbf{v}_m$  为质量平均速度

$$\mathbf{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_k}{\rho_m} \quad (2)$$

$\rho_m$  为混合密度

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (3)$$

其中,  $n$  为相数;  $\alpha_k$  是第  $k$  相的体积分数;  $\rho_k$  是第  $k$  相的流体密度。

混合模型的动量方程可以通过对所有相各自的动量方程求和获得,表示为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \mathbf{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T)] + \rho_m \mathbf{g} + \mathbf{F} + \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_{dr,k} \mathbf{v}_{dr,k} \right) \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{F}$  为体积力;  $\mu_m$  为混合黏度

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (5)$$

其中,  $\mu_k$  为第  $k$  相的混合黏度。  $\mathbf{v}_{dr,k}$  为第  $k$  相的漂移速度

$$\mathbf{v}_{dr,k} = \mathbf{v}_k - \mathbf{v}_m \quad (6)$$

混合模型的能量方程采用如下形式:

$$\frac{\partial}{\partial t} = \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k (\rho_k E_k + \mathbf{p}) \right) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (7)$$

其中,  $k_{eff}$  为有效热传导率; 方程(7)右边的  $\nabla \cdot (k_{eff} \nabla T)$  代表了由于传导造成的能量传递;  $S_E$  包含了所有的体积热源; 对于可压缩相,  $E_k = h_k - p \rho_k + \frac{v_k^2}{2}$ , 对不可压缩相,  $E_k = h_k$ ,  $h_k$  为第  $k$  相的焓。

### 2 柱塞泵过流建模及网格划分

将喷油水煤浆柱塞泵三维模型导入 gambit 中,确定流体流过区域模型,进行柱塞泵三维网格划分。图 2 为柱塞泵的流体流过区域三维模型,应用网格划分工具进行网格划分,结果如图 3 所示,该柱塞泵流体区域网格单元为 116261 个。



图 2 柱塞泵流体区域三维模型

Fig. 2 Pump's three-dimensional fluid model

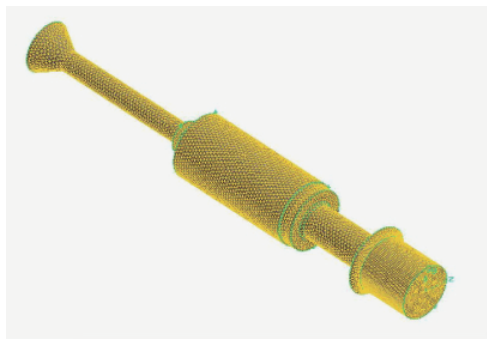


图 3 柱塞泵流体区域三维网格划分

Fig. 3 Pump fluid regional three-dimensional mesh

### 3 边界条件

在柱塞处用 UDF 动网格处理。根据柱塞泵柱塞运动特点,由质量守恒定律、进口边界条件、固液多相流控制方程可以给出速度、进口压力或者进口流量等,在数值模拟过程中,

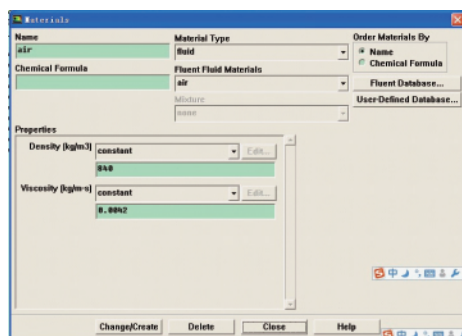


图 4 材料的参数设置图

Fig. 4 Material parameter setting diagram

柱塞泵为活塞式压缩工作过程,在工作过程中进口给定为壁面,出口边界条件可以给出出口压力或者设定边界条件为质量出口,文中进行数值模拟的边界条件采用压力出口,边界条件的具体数值的如下图 4、图 5 所示。

### 4 模拟及结果分析

为了分析固体颗粒对于油水煤浆泵的影响,采用两种煤质(不同密度、粒径)制备相同体积比例的油水煤浆;采用同种煤质(新疆煤)制备不同体积比例的油水煤浆(油比例不变,改变水煤比例)。分别进行动态压力、三维速度、平面煤颗粒的模拟。

(1) 新疆煤制油水煤浆特性分析(油:煤:水=10:1:3)。

新疆煤颗粒的密度 0.903g/mL。粒径为 32 $\mu$ m,油水煤浆体积比油:煤:水=74.53%:6.84%:18.63%。建立等值面( $x=0, y=0$ ),得到油水煤浆多相流流场数值模拟结果如图 6—图 8 所示。

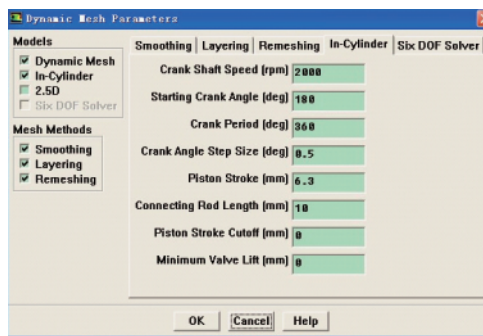


图 5 动力学参数设置图

Fig. 5 Setting kinetic parameters

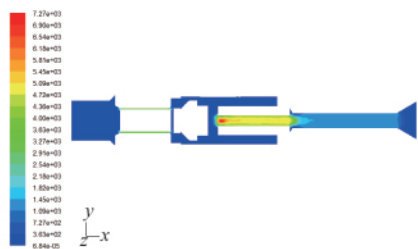


图 6 平面压力分布图 ( $x=0, y=0$ )  
Fig. 6 Plane pressure distribution ( $x=0, y=0$ )

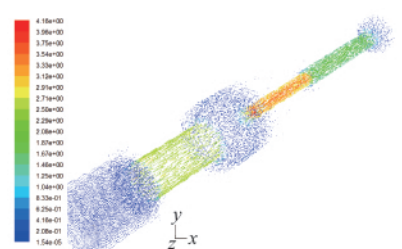


图 7 三维速度矢量图  
Fig. 7 Three-dimensional velocity vector

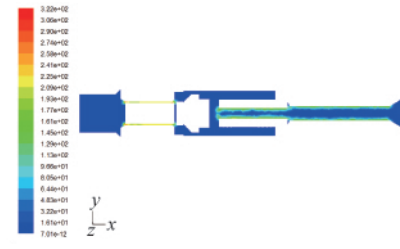


图 8 平面煤颗粒压力图 ( $x=0, y=0$ )  
Fig. 8 The coal particle pressure ( $x=0, y=0$ )

(2) 阜新煤制油水煤浆特性分析(油:煤:水=10:1:3)。

阜新煤颗粒的密度 0.92g/mL。粒径为 54 $\mu$ m,油水煤浆体积比油:煤:水=74.53%:6.84%:18.63%。建立等值面( $x=0, y=0$ ),得到油水煤浆多相流流场数值模拟结果如图 9—图 11 所示。

(3) 新疆煤制油水煤浆特性分析(油:煤:水=8:1:2)。

新疆煤颗粒的密度 0.903g/mL。粒径为 32 $\mu$ m,油水煤浆体积比油:煤:水=74.53%:8.84%:16.63%。建立等值面( $x=0, y=$

0),得到油水煤浆多相流流场数值模拟结果如图 12—图 14 所示。

由油水煤浆模拟图 6 至图 14 可知:大粒径、大密度的阜新煤颗粒运动轨迹向柱塞泵壳体内侧偏移,与柱塞泵内腔表面撞击并反弹,造成对柱塞泵壳体内侧磨损严重,同时煤颗粒反弹与柱塞偶件也易发生撞击,造成柱塞偶件的一定磨损;小颗粒易与柱塞偶件发生撞击,因柱塞偶件表面油膜存

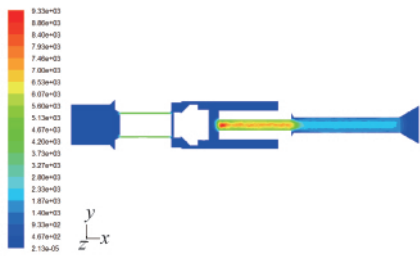


图9 平面压力分布图( $x=0, y=0$ )  
Fig. 9 Plane pressure distribution ( $x=0, y=0$ )

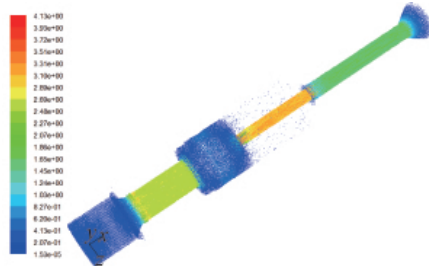


图10 三维速度矢量图  
Fig. 10 Three-dimensional velocity vector

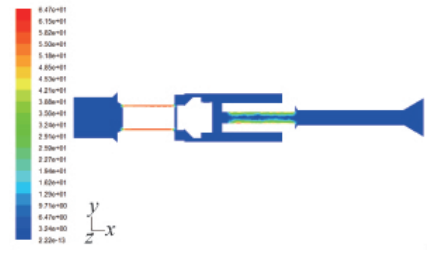


图11 平面煤颗粒压力图( $x=0, y=0$ )  
Fig. 11 The coal particle pressure ( $x=0, y=0$ )

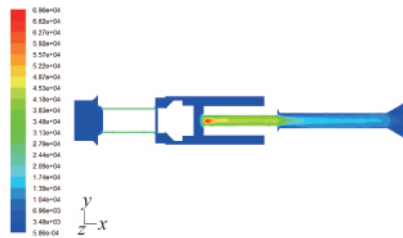


图12 平面压力分布图( $x=0, y=0$ )  
Fig. 12 Plane pressure distribution ( $x=0, y=0$ )

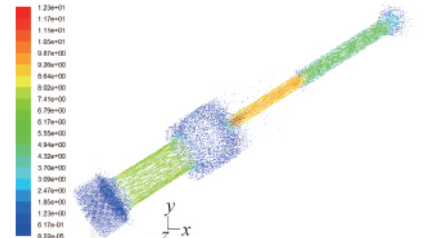


图13 三维速度矢量图  
Fig. 13 Three-dimensional velocity vector

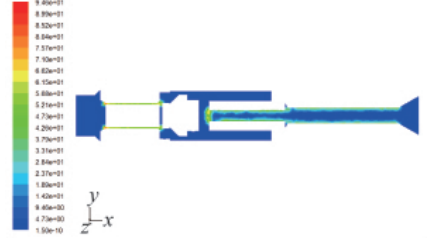


图14 平面煤颗粒压力图( $x=0, y=0$ )  
Fig. 14 The coal particle pressure ( $x=0, y=0$ )

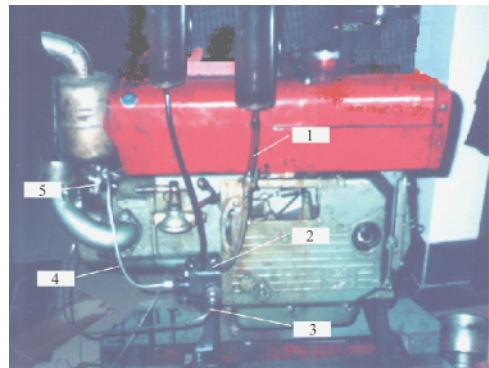
在,颗粒一般与柱塞偶件只发生一次撞击,造成冲蚀磨损,但磨损相对弱些。新疆煤比阜新煤的密度小,三维速度相对于阜新煤有所增强,速度增加致使柱塞泵内部磨损增加,但在制备油水煤浆燃料(油:煤:水=10:1:3)时,新疆煤粒径小于阜新煤,粒径大小对于柱塞泵磨损起决定作用,因此,虽然新疆煤的运动速度增大,但磨损相对阜新煤较弱。

混合燃料中固体颗粒的体积比增大,对柱塞偶件的磨损加剧,同一种煤质,不同煤比例,三维速度和煤颗粒是造成磨损的主要原因。

### 5 试验研究

为了分析固体颗粒对于柱塞泵的影响,采用两种煤质(不同密度、粒径)制备相同体积比的油水煤浆;采用同种煤质(新疆煤)制备不同体积比的油水煤浆(油比例不变,改变水煤比例)。在每次试验前,更换柱塞泵,并称取柱塞泵质量,每次采用不同油水煤浆进行燃烧试验1h,燃烧后称取柱塞泵质量,比较柱塞泵磨损量的变化,试验测试在改装后的柴油发动机上进行,试验系统如图15所示。

如表1所示,同一种煤质,含煤颗粒体积比增大,使得柱塞偶件的磨损加剧,第3种燃料配比比第1种燃料配比多磨损0.8mg;同一燃料混合比例下,煤密度及粒径大,加剧柱塞偶件磨损,第2种燃料配比比第1种燃料配比多磨损1.1mg,可见固相密度及粒径比浓度变化对柱塞泵磨损影响大。



1—润滑油进口;2—柱塞泵;3—柱塞泵高压油出口;4—柱塞泵高压煤浆出口;5—喷浆器

图15 柴油机上柱塞泵多介质燃料试验

Fig. 15 Diesel piston pump multi-medium fuel test

### 6 结论

在柱塞泵工作过程中,由于存在煤颗粒的原因,对泵的整体寿命产生较大影响。出油阀与出油阀座、针阀与针阀体精密偶件容易产生严重磨损。本文为了探讨影响柱塞泵的磨损的机理,对不同固体颗粒、同种混合比例的燃料及同种颗粒、不同比例的燃料进行数值模拟,并利用试验方法验证,结果表明,离散相颗粒的性质(密度、粒径)、混合比例、柱塞运动速度对颗粒运动轨迹、壁面碰撞过程有重要的影响;大粒径、大密度的颗粒运动轨迹向柱塞泵壳体内侧偏移,与其撞

表 1 柱塞泵试验结果

Table 1 Piston pump test results

序号	多介质类型	柱塞泵试验前 质量与试验后 质量差值/mg
1	煤密度 0.903g/mL, 粒径为 32 $\mu$ m, 油水煤浆体积比油:煤:水=74.53%:6.84%:18.63%	4.5
2	煤密度 0.92g/mL, 粒径为 54 $\mu$ m, 油水煤浆体积比油:煤:水=74.53%:6.84%:18.63%	5.6
3	密度 0.903g/mL, 粒径为 32 $\mu$ m, 油水煤浆体积比油:煤:水=74.53%:8.84%:16.63%	5.3

击并反弹,易与发生多次撞击,对柱塞泵壳体内侧磨损程度大;小颗粒易与柱塞偶件发生撞击,因柱塞偶件表面油膜颗粒一般与其发生一次撞击,冲蚀磨损相对弱些;凸轮速度直接影响柱塞运动速度,速度加剧内部磨损;混合燃料中固体颗粒的体积百分比增大,对柱塞偶件的磨损加剧,模拟结果与试验结果吻合。

参考文献 (References)

[1] 车得福,李会雄.多相流及其应用[M].西安:西安交通大学出版社,2007.  
Che Defu, Li Huixiong. Multiphase flow and application[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007.  
[2] 吴玉林.水力机械空化和固液两相流动力学[M].北京:中国水利水电

出版社,2007.  
Wu Yulin. Hydraulic machinery space and solid-liquid two-phase flow dynamics[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007.  
[3] 吴玉林,曹树良,葛亮,等.渣浆泵叶轮中固液两相湍流的计算和实验[J].清华大学学报:自然科学版,1998,38(1):71-74.  
Wu Yulin, Cao Shuliang, Ge Liang, et al. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1998, 38(1): 71-74.  
[4] 刘娟,许洪元,唐澍.离心泵内固体颗粒运动规律与磨损的数值模拟[J].农业机械学报,2008,39(6):54-59.  
Liu Juan, Xu Hongyuan, Tang Shu. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 54-59.  
[5] 刘娟,许洪元,唐澍,等.离心泵内固体颗粒运动规律的实验研究[J].水力发电学报,2008,27(6):168-172.  
Liu Juan, Xu Hongyuan, Tang Shu, et al. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(6): 168-172.  
[6] 刘娟,许洪元,罗先武.固液冲蚀材料表面冲击波纹的形成机理[J].清华大学学报:自然科学版,2006,46(8):1426-1429.  
Liu Juan, Xu Hongyuan, Luo Xianwu. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2006, 46(8):1426-1429  
[7] 刘树红,邵杰,吴培峰.轴流转桨式水轮机压力脉动数值预测[J].中国科学E辑:技术科学,2009,39(4):626-634.  
Liu Shuhong, Shao Jie, Wu Shangfeng. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 39(4): 626-634.  
[8] 张强,毛君,田莹,等.喷油煤浆泵柱塞弹簧抗疲劳断裂研究[J].矿业研究与开发,2007,27(4):44-46.  
Zhang Qiang, Mao Jun, Tian Ying, et al. Mining Research and Development, 2007, 27(4): 44-46.  
[9] 张强,毛君,段鹏文,等.柴油机燃用柴油/水煤浆混合燃料性能与排放研究[J].内燃机工程,2007,28(3):76-81.  
Zhang Qiang, Mao Jun, Duan Pengwen, et al. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2007, 28(3): 76-81.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·

## “第三届中国兽医临床大会”征文



由中国畜牧兽医学会主办的“第三届中国兽医临床大会”拟于2012年8月17—20日在兰州召开。

征文范围:兽医内科学、兽医外科学、兽医产科学、中兽医学、兽医影像学、兽医寄生虫学、动物传染病与人畜共患病、兽医临床检验新技术、兽医诊断新技术、动物毒物学、小动物疾病、兽医病理学、兽医药理学等。

全文截稿日期:2012年6月20日

联系电话:0931-7631236, 13893126652

电子信箱:zhychy@yeah.net

大会网站: <http://caav-ccvc.acmis.com.cn/>