

文章编号:0253-9993(2013)S1-0231-05

螺旋钻采煤机承压输送数学模型及仿真研究

张 强^{1,2,3}, 聂国强¹, 李守巨²

(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:通过对螺旋钻采煤机煤颗粒运动及受力分析, 利用 CFD 软件建立螺旋钻采煤机承压输送数学模型, 并研究承压输送机压差、介质流变参数、几何结构参数对输送效率的影响规律。研究结果表明: 进出口压差决定煤颗粒的驱动方式, 输送效率随进出口压差增加而增加; 不同进出口压差下输送效率随螺距与内径之比增加而增加, 扭矩随螺距与内径之比增加而减少。

关键词:螺旋钻采煤机; 输送效率; 介质流变参数; 几何结构参数

中图分类号:TD421.6 **文献标志码:**A

Study on mathematical model of confined transportation of coal auger and simulation

ZHANG Qiang^{1,2,3}, NIE Guo-qiang¹, LI Shou-ju²

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

Abstract: Through the analysis of the motion and the stress of coal particles of the coal auger, the mathematical model of the confined transportation of the coal auger was established by using CFD software. The influence law of the pressure difference, medium rheological parameters, and geometrical structure parameters on the conveying efficiency was studied. The results indicate that the differential pressure between entry and exit determines the driving mode of coal particles; the conveying efficiency raises with the increase of the differential pressure between entry and exit; the differential pressure between entry and exit raises with the increase of the ratio between the pitch and the internal classic, and the torque decreases with the increase of the ratio between the pitch and the internal classic.

Key words: coal auger; conveying efficiency; medium rheological parameters; geometrical structure parameters

螺旋钻采煤在采煤过程中, 其运动是由钻进速度和钻头旋转速度合成^[1-5]。螺旋钻采煤机的工作效率除了与开机钻孔时间有关外, 还同钻孔深度有关。由于螺旋钻采煤机实际使用环境的特殊性, 如岩石、煤层等介质的特性复杂, 在钻进过程中经常出现输送堵煤、钻杆弯曲严重、掉钻杆的现象。为了满足不同使用环境和工作性质要求, 在设计过程中, 针对输送机理的研究显得尤为重要^[6-7]。

1 螺旋钻采煤机的煤颗粒运动及受力分析

螺旋钻输送原理是利用螺旋叶片, 将煤块推移式

前进输送, 煤块的自身重力、煤块之间的黏滞力以及煤块与叶片和煤壁之间的摩擦力, 阻止了随螺旋叶片一起旋转, 从而实现煤块在叶片推动下挤压式直线前进^[8-12]。螺旋钻采煤机由标准等螺距 S 、等直径 D 、螺旋面升角 α 的多螺旋组成, 以距离螺旋轴线 r 处的煤颗粒 M 作为研究对象, 进行运动及受力分析如图 1 所示。

设旋转螺旋面作用在煤颗粒 M 上的力为 P , 由于煤与叶片的摩擦关系, P 方向与螺旋面的法线方向偏离了 β 角。 β 角的大小由煤对螺旋面的摩擦角 ρ 及螺旋面的表面粗糙程度 K 决定, 对于一般可忽略

收稿日期: 2012-06-04 责任编辑: 许书阁

基金项目: 工业装备结构分析国家重点实验室开放基金资助项目(GZ1107); 辽宁省教育厅科研项目计划资助项目(L2011050); 北京科技新星支持计划资助项目(2013)

作者简介: 张 强(1980—), 男, 辽宁岫岩人, 副教授, 博士后。E-mail: lgdix042@126.com

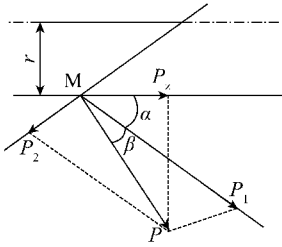


图 1 作用在煤颗粒上的力

Fig. 1 The force in coal particles

其表面粗糙程度 K 对 β 角的影响, 可认为 $\beta \approx \rho$ 。 P 可分解为法向分力 P_1 和径向分力 P_2 , 则得到速度为

$$v = \frac{S n \cos^2 \alpha}{60} (1 - \mu \tan \alpha)$$

式中, n 为螺旋输送机转速; S 为螺距; μ 为煤与叶片间的摩擦因数。

2 螺旋钻采煤机输送模型建立

2.1 基本假设

(1) 煤在螺旋通道内整体做柱塞运动, 忽略内部流动和密度变化; (2) 煤与最大煤壁及叶片间的剪切应力沿着螺旋轴线方向恒定; (3) 煤固体柱塞与螺旋底面、两个侧面同时紧密接触; (4) 长距离输送过程中螺旋钻杆刚度不变。

2.2 数学模型建立

为了便于分析输送效率, 给出煤岩体单元及坐标系如图 2 所示, 叶片直径处、螺杆直径处和叶片平均直径处的螺旋升角为 φ_f, φ_s 和 φ_a , 则

$$\tan \varphi_f = \frac{S}{\pi D_f}, \tan \varphi_s = \frac{S}{\pi D_s}, \tan \varphi_a = \frac{S}{\pi D_a}$$

式中, D_f, D_s 和 D_a 分别为叶片最大直径、螺杆直径和叶片平均直径。

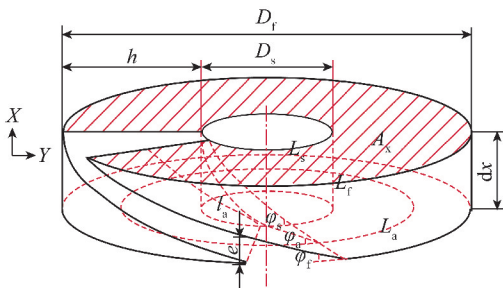


图 2 煤体单元及坐标系

Fig. 2 Screw conveyor geometry and axes systems

随着螺旋转动, 叶片边缘相对于筒壁的速度矢量 n_{fc} 的幅值为

$$n_{fc} = \pi D_f n$$

煤微元沿螺旋轴向速度矢量 n_{sx} 的幅值为

$$n_{sx} = n_{fc} \frac{\tan \varphi_f \tan \theta}{\tan \theta + \tan \varphi_f}$$

式中, φ_f 为 n_{fs} 与 n_{fc} 之间夹角; θ 为 n_{sc} 与 n_{fc} 之间夹角。

螺旋输送实际流量 Q 可由螺旋通道截面积 A_s 乘以轴向速度矢量的幅值 V_{sx} 得到

$$Q = \frac{\pi}{4} (D_f^2 - D_s^2) \frac{S - e}{S} \pi D_f n \frac{\tan \varphi_f \tan \theta}{\tan \theta + \tan \varphi_f}$$

式中, e 为叶片壁厚。

螺旋通道的体积流量定义为螺旋输送理论流量 Q_T 为

$$Q_T = \frac{\pi}{4} (D_f^2 - D_s^2) n (S - e)$$

螺旋输送效率 η 定义为实际流量 Q 与理论流量 Q_T 的比值为

$$\eta = \frac{Q}{Q_T} = \frac{\tan \theta}{\tan \theta + \tan \varphi_f}$$

3 承压输送数值仿真分析

3.1 平衡状态下螺旋输送机内压力分布规律

螺旋输送的平衡状态是当采掘参数(推进速度和螺旋输送机转速)不变时, 螺旋输送机内部流场(压力场和速度场)所处的一种稳定状态。为了分析螺旋输送机内土压力分布规律, 提取螺旋输送机沿程煤压力结果, 采样周期的 1 s。螺旋输送机沿程 4 个监测点(分别用 4 种颜色表示)压力随时间变化的仿真结果如图 3 所示。螺旋输送机沿程煤压力监测点压力随时间呈现周期性变化, 周期为 10.5 s 与螺旋叶片转动周期相同, 压力波动幅值 20 ~ 30 kPa, 其主要原因在于随着叶片的转动对煤产生推动作用, 当叶片接近压力监测点时压力达到最大值, 当叶片转过压力监测点后压力快速下降。这一现象也体现出螺旋输送机起到主动推煤的作用。

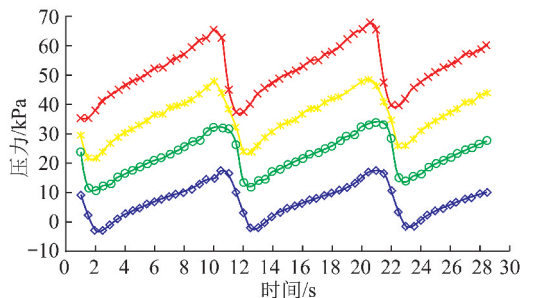


图 3 螺旋输送机沿程监测点压力随时间变化仿真

Fig. 3 Simulation results of monitoring pressures along screw conveyor change with time

螺旋输送机沿程监测煤压力随着螺旋叶片的转动呈现周期性波动这一特点, 取一个周期内的压力均

值为依据,考查螺旋输送机沿程的压力分布规律,得到螺旋输送机沿程煤压力分布如图 4 所示,可见螺旋输送机沿程煤压力分布近似为一条直线。

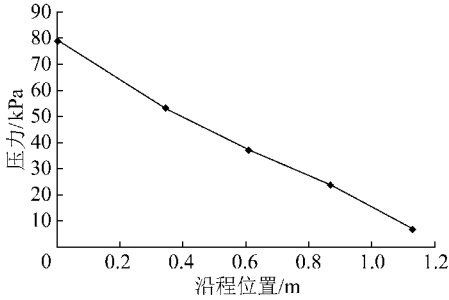


图 4 螺旋输送机沿程煤压力分布

Fig. 4 Pressure dissipations along screw conveyor

3.2 平衡状态下进出口压力差对螺旋钻采煤机输送的影响

螺旋输送机输送煤主要受到螺旋旋转引起轴向力及进出口压差产生切向力驱动共同作用。为了进一步分析螺旋输送机机理,将煤介质流动特性和螺旋输送机转速定义不变,改变进出口压差大小,模拟螺旋输送机横截面上的轴向和切向速度分布规律,模拟结果如图 5,6 所示。

煤在螺旋输送机筒体内壁与螺旋所围成的通道内流动,将流动沿着螺旋输送机轴向和切向分解,沿着径向分别提取剖面云图中相对轴向速度及相对切向速度。形成相对轴向速度和相对切向速度沿着径向的分布规律,如图 7,8 所示。

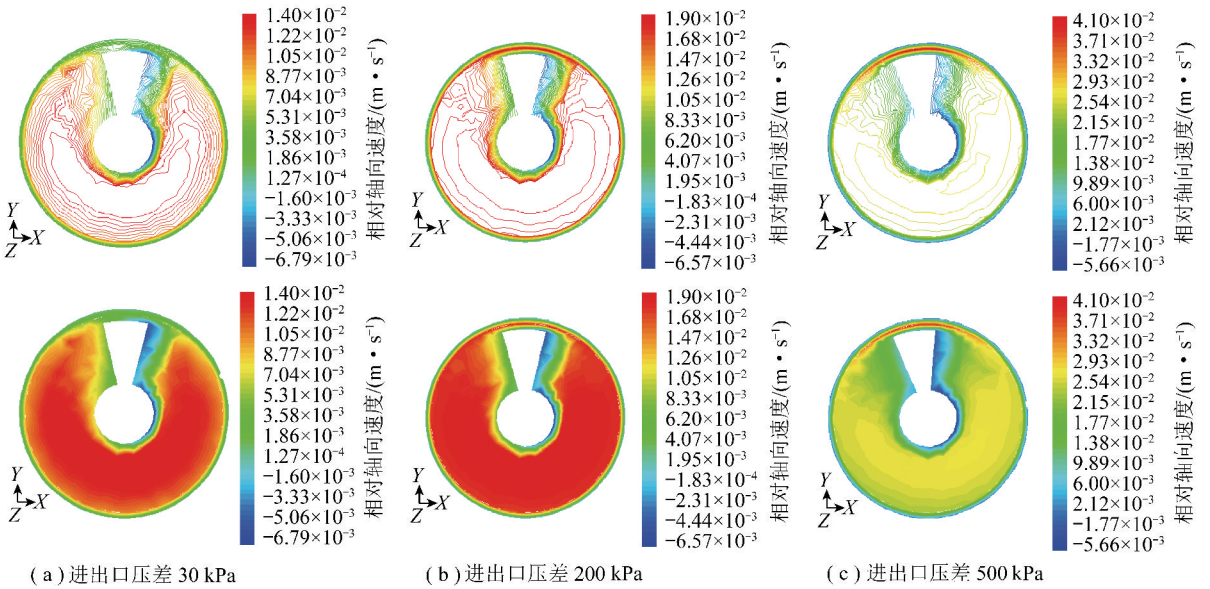


图 5 相对轴向速度云图

Fig. 5 Relative axial velocity profile across the screw channel width

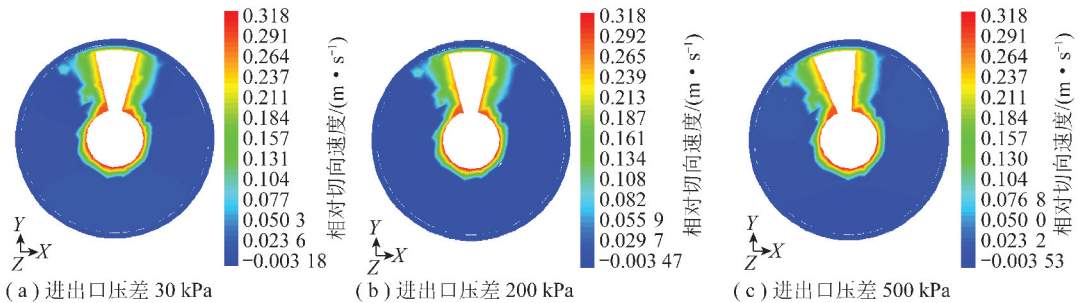


图 6 相对切向速度云图

Fig. 6 Relative tangential velocity profile across the screw channel width

由图 7 可知:根据相对轴向速度的大小,可将流场分为塑性流动区域和刚性柱塞流区域,两个流场区域的交界面即为失效面或屈服面。这一特性也符合 Bingham 流体的特性。更大的进出口压差对应更快的轴向流动速度,这也与实际情况相符合。由图 8 可

知:当进出口压差较低时,进出口压差为 30 kPa 这条曲线,其煤切线流动速度慢于叶片旋转速度,表明煤是被螺旋轴向力带出而非被进出口压差推出;当进出口压差较高时,进出口压差为 500 kPa 这条曲线,流动速度比叶片旋转速度快,此时煤流动的主要驱动作

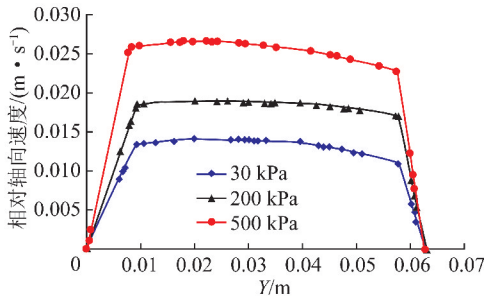


图7 相对轴向速度沿径向变化

Fig. 7 Relative axial velocity profile across the screw channel width

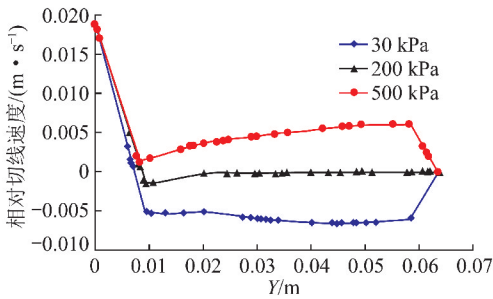


图8 相对切向速度沿径向变化

Fig. 8 Relative tangential velocity profile across the screw channel width

用为进出口压差;进出口压差为 200 kPa 这条曲线是切线速度剖面,其切线速度基本为 0,说明煤基本没有旋转运动只做轴向运动。

3.3 煤介质流变参数对螺旋钻采煤机输送的影响

为了说明煤介质流变参数对螺旋输送机承压输送机理的影响,选取表 1 的 6 组典型介质流变模型参数进行仿真,得到平衡状态下输送效率随进出口压差变化的规律,如图 9 所示。

表 1 数值仿真中采用的黏度模型参数

Table 1 Material viscosity model parameters of numerical simulation

介质	剪切速度	剪切应力/Pa	动塑比	塑性黏度
S1	0.011	660		
S2	0.011	1 660		
S3	0.011	2 330		
S4	0.023	660	0.024	2 520
S5	0.023	1 660		
S6	0.023	2 330		

由图 9 可知:对于不同的改性介质流变模型参数,螺旋输送机效率均随着进出口压差的增加而增加;不同的改性介质流变模型参数,效率随进出口压差变化有两个拐点,第 1 个拐点的效率为 100% ~ 110%,第 2 个拐点所对应的排土效率为 130% ~

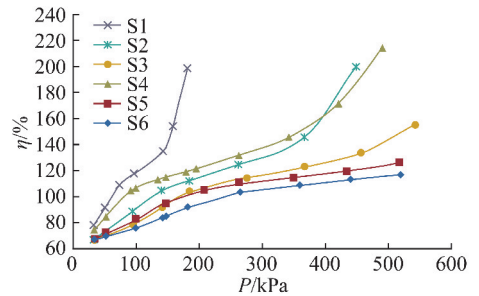


图9 不同流变特性与进出口压差的关系

Fig. 9 Relations between discharge efficiency and inlet pressure for various rheological behaviors

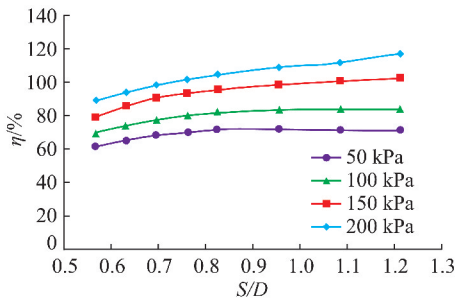
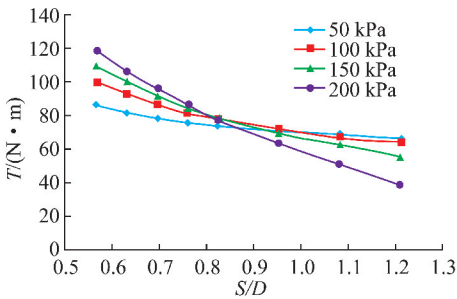
140%。以介质 S1 为例,效率随进出口压差变化的规律,曲线的两个拐点可将曲线大致分为 3 段,第 1 段效率小于 105%,第 2 段效率介于 105% ~ 135%,第 3 段效率大于 135%。在每个区段内效率与进出口压差近似呈线性关系。其中第 2 段曲线的斜率最小,特别地当效率大于 135% 时,随着进出口压差的增加效率快速增加,此时进出口压差较小地波动将导致较大流量变化。

改性介质流变模型参数的取值不同将导致极限承压压力发生变化,极限承压压力主要随剪切屈服应力的增加而增大。通常改性后介质的剪切屈服应力不会太小,因此在施工所处地层压力范围内排土效率通常都小于 100%,在这个范围内输送效率与压力间近似呈现线性关系。

3.4 螺旋输送机结构参数对螺旋输送机承压输送的影响

螺旋输送机效率除了受到改性介质流变特性和进出口压差的影响外,还与其主要结构参数如螺距 S 和形成最大煤筒体(以下简称筒体) D 的选取有关。为了研究螺旋输送机主要结构参数对输送效率的影响,采用不同的螺距 S 和筒径 D 建立螺旋输送系统数值仿真模型,仿真时采用相同的进出口压差、螺旋转速及改性介质流变参数。仿真结果表明:螺旋输送机的效率与螺旋输送机螺距与筒体内径的比值 S/D 有关(图 10)。

不同进出口压差(50, 100, 150 和 200 kPa)条件下,螺旋输送机效率随螺距与筒体内径之比 S/D 的变化规律,如图 11 所示。可以看出不同进出口压差下效率均随 S/D 增加而增加。当 S/D 大于 0.8 时,随着 S/D 增加排煤不再增加基本趋于常值。对于确定进出口压差,在可控范围内往往希望螺旋输送机具有较大的效率,这样可使相同排煤流量时,使用较低的螺旋输送机转速。因此,螺旋输送机设计时建议使 S/D 大于 0.8。

图 10 效率与 S/D 比值的关系Fig. 10 Relation between efficiency and S/D 图 11 扭矩与 S/D 比值的关系Fig. 11 Relation between torque and S/D

螺旋输送机在不同进出口压差下扭矩随螺距与螺旋输送机内径之比 S/D 的变化规律,如图 11 所示。不同进出口压差下螺旋输送机扭矩均随 S/D 增加而减少。当 S/D 的值介于 0.8~0.9 附近时,不同进出口压差下螺旋输送机扭矩趋于相等,此时进出口压差对扭矩的影响不敏感。

4 结 论

(1)通过分析螺旋钻采煤机煤颗粒的受力及运行分析,建立螺旋钻采煤机输送数学模型,并研究承压输送机进出口压差、介质流变参数、几何结构参数对输送效率的影响规律。

(2)进出口压差决定煤颗粒的驱动方式,输送效率随进出口压差增加而增加;当进出口压差为 30 kPa 时,煤是被螺旋轴向力带出而非被进出口压差推出;当进出口压差达到 500 kPa 煤流动主要驱动作用为进出口压差;当进出口压差为 200 kPa,煤基本没有旋转运动只做轴向运动。

(3)不同进出口压差下输送效率随螺距与内径之比增加而增加,扭矩随螺距与内径之比增加而减少,当 S/D 大于 0.8 时,随着 S/D 增加排煤不再增加基本趋于常值。

参考文献:

[1] 李晓豁,林其岳,仲丛海.螺旋钻采煤机钻头的运动参数研究[J].辽宁工程技术大学学报,2009,28(12):985-989.

- Li Xiaohuo, Lin Qiyue, Zhong Conghai. Study on motion parameters of coal auger bits[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2009, 28(12): 985-989.
- [2] 李建平,张永忠,杜长龙.螺旋钻采煤机钻杆的结构参数优化设计[J].煤炭科学技术,2006,34(8):8-11.
- Li Jianping, Zhang Yongzhong, Du Changlong. Auger drill shearer optimization of structural parameters[J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(8): 8-11.
- [3] Zhang Qiang, Mao Jun, Ding Fei. Optimization design of drilling string by screw coal miner based on ant colony algorithm[J]. Journal of Coal Science & Engineering (China), 2008, 14(4): 686-688.
- [4] 李晓豁,郭继文,王 丽,等.螺旋钻采煤机输送机构的振动频率[J].黑龙江科技学院学报,2011,21(3):198-202.
- Li Xiaohuo, Guo Jiwen, Wang Li, et al. Vibration frequency analysis of spiral conveying mechanism for coal auger[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science and Technology, 2011, 21(3): 198-202.
- [5] 李晓豁.基于人工鱼群算法的螺旋钻采煤机二次破碎率最低的参数优化设计[J].煤炭学报,2011,36(2):346-351.
- Li Xiaohuo. Parameter optimization of lowest secondary crushing rate for coal auger based on artificial fish school algorithm[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 346-351.
- [6] 李晓豁,林其岳,何 洋.基于 GAAA 算法的螺旋钻采煤机输送机构参数的优化[J].煤炭学报,2010,35(3):498-502.
- Li Xiaohuo, Lin Qiyue, He Yang. Parameter optimization of spiral conveyor for coal auger based on GAAA algorithm[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 498-502.
- [7] 宋相坤,杜长龙.螺旋钻采煤机钻头运动学研究[J].煤矿机电,2008(2):16-18.
- Song Xiangkun, Du Changlong. Kinematic study of coal auger bit[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2008(2): 16-18.
- [8] 徐余伟.螺旋输送机设计参数选择[J].科技纵横,2008(7):32-36.
- Xu Yuwei. The choice of design parameters for screw conveyor[J]. Science & Technology, 2008(7): 32-36.
- [9] 刘 伟,杜长龙,宋相坤,等.螺旋钻采煤机螺旋钻杆的模糊优化设计[J].矿山机械,2006(11):24-26.
- Liu Wei, Du Changlong, Song Xiangkun, et al. Coal auger fuzzy optimum design of spiral drill[J]. Mining & Processing Equipment, 2006(11): 24-26.
- [10] 李晓豁,高 健.采煤机运动参数对块煤产量的影响[J].煤炭学报,2009,34(9):1268-1270.
- Li Xiaohuo, Gao Jian. Effect of kinematics parameters of shearer on Lump coal production[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 1268-1270.
- [11] Zhang Qiang, Tian Dafeng, Liu Chang. Multi-optimization design of drilling string by screw coal miner based on ant colony algorithm [A]. CSMO-2009[C]. Dalian, 2009: 782-786.
- [12] 张 强,田大丰.螺旋钻采煤机螺旋钻杆失稳条件研究[J].世界科技研究与发展,2009,31(5):1877-1878.
- Zhang Qiang, Tian Dafeng. Research on the drilling string loses the steady condition of the screw coal miner[J]. World Sci-Tech R & D, 2009, 31(5): 1877-1878.