

基于遗传算法的掘进机外喷雾降尘效率最大的参数优化

沙永东, 李晓豁, 康晓敏, 侯静

辽宁工程技术大学机械工程学院, 辽宁阜新 123000

摘要 为了提高掘进机外喷雾降尘效率,降低煤矿掘进工作面生产时产生的大量粉尘,改善工作面工作环境及人体健康,提高掘进机截割头的使用寿命,抑制由于粉尘浓度达到一定程度后而发生粉尘爆炸情况造成的人身财产的重大损失;为了避免过多的雾滴落在截割机构上造成水的浪费,令喷雾截面圆与大端面圆近似相切,并保证喷雾覆盖区域相互重叠 1/4,捕集区的喷雾截面积近似为环形、雾流形状在有效的作用区内为圆锥形以及喷雾捕集区的粉尘分布是均匀的,建立了掘进机外喷雾降尘效率的数学模型,选择喷雾压力、喷雾有效作用区的长度、喷雾扩散角度以及喷嘴的直径为设计参数,以掘进机外喷雾降尘效率最大为优化目标,建立了相应的约束条件,并且将优化模型进行了无约束化处理,采用遗传算法对影响掘进机外喷雾降尘效率的主要参数进行了优化。优化结果表明,喷雾压力增大了 9.79%,喷雾作用区的长度降低了 8%,雾化角度减小了 11.15%,掘进机外喷雾的降尘效率增加了 15.19%。该研究为工程实践提供了理论基础,为掘进机外喷雾系统结构参数的整体优化,使其整体功能达到最佳状态提供了依据,并且对于掘进机内喷雾系统的建模及优化方法提供了重要参考,具有一定的指导意义。

关键词 外喷雾;降尘效率;设计参数;优化目标;遗传算法

中图分类号 TD421

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.26.004

The Parameter Optimization of the Maximum Efficiency of Reducing Dust for Roadheader External Spray Based on Genetic Algorithm

SHA Yongdong, LI Xiaohuo, KANG Xiaomin, HOU Jing

Mechanical Engineering College, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning Province, China

Abstract In order to improve the efficiency of reducing dust for roadheader external spray, reduce amounts of dust in coal heading face, better mining working face environment and human health, enhance cutting head service life of the roadheader, the mathematical models of the efficiency for reducing dust are established for roadheader external spray, the main influence parameters of efficiency of reducing dust for roadheader external spray are optimized by using genetic algorithm and by taking the spray pressure, spray effective length, spray diffusion angle, and nozzle diameter as design parameters, the maximum efficiency of reducing dust for roadheader external spray is chosen as optimal objective. Corresponding constraint conditions are established, and the optimization model is processed without constraints. Optimized results indicate while the spray pressure increases 9.79%, the spray effective length reduces 8%; the spray diffusion angle reduces 11.15%, and the efficiency of reducing dust increases 15.19% for roadheader external spray. The study provides a theory basis for engineering practice, offers the basis both for the entire optimization of the structural parameters of roadheader external spray system and for the entire functions reaching at their best, and furnishes important reference for modeling and optimizing methods of roadheader internal spray system with some guidance significances.

Keywords external spray; efficiency of reducing dust; design parameters; optimization goal; genetic algorithm

0 引言

煤矿掘进工作面生产时会产生大量粉尘,使工作面环境严重恶化,因此影响工人身体健康、降低掘进机使用寿命,而

且当粉尘浓度达到一定程度后极易发生粉尘爆炸,所以必须将粉尘有效沉降。目前普遍采用的是内外喷雾降尘方法,该方法既经济又简便,但实际应用情况并不理想。内喷雾使用

收稿日期: 2012-05-15;修回日期: 2012-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51104082)

作者简介: 沙永东, 讲师, 研究方向为现代机械设计理论与方法, 电子信箱: shayongdong@163.com

寿命短、喷嘴可靠性低;外喷雾在应用中由于相关的理论缺乏研究而存在盲目性,不但浪费了大量的水资源而且使用效果不理想,降尘能力差,没有达到期望的降尘效果^[1-2]。因此,本文建立了掘进机外喷雾降尘效率的数学模型,并对其进行研究与优化,为提高外喷雾的效果和质量提供了理论依据,也为改善掘进工作面的生产环境及安全奠定了基础。

1 数学模型的建立

1.1 外喷雾机构工作原理分析

掘进机外喷雾的喷嘴安装在喷雾架上,喷雾架安装在掘进机悬臂上,一般距离煤壁 1.3—1.4m,主要用来捕集掘进时产生的粉尘。喷雾时要求雾流能包络整个截割头,所以捕集区的喷雾截面近似为环形(见图 1 阴影部分)。依据喷雾的相关理论,单个喷嘴作用的雾化角度和理论覆盖范围(如图 2 所示)是根据喷雾夹角和喷雾终点到喷嘴口的距离计算得出,该值是在假设喷雾角度在整个作用过程中保持喷雾距离不变的前提下得到的。而在实际喷雾中,有效的喷雾角度因喷雾距离、液体的黏度、喷嘴流量和喷射压力而异。喷嘴的排列形式会影响到喷雾均匀分布的效果,对于压力型喷嘴来说,喷雾覆盖区域应相互重叠 1/3—1/4,才能保证喷雾的均匀^[3]。

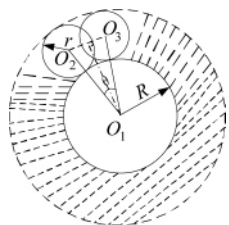


图 1 喷雾捕集区截面示意图

Fig. 1 Cross-section schema of spray capture area

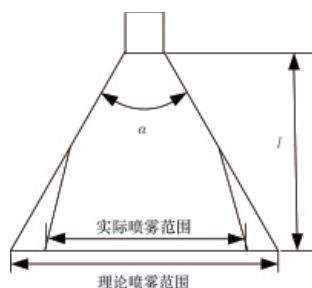


图 2 喷雾雾化角度和覆盖范围

Fig. 2 Spray angle and spray coverage

1.2 相关假设条件的建立

通过上述分析,要建立外喷雾的降尘效率的数学模型,应做以下假设^[4-5]:

- (1) 为了避免过多的雾滴落在截割机构上造成水的浪费,假设喷雾截面圆与大端面圆近似相切,并假设喷雾覆盖区域相互重叠 1/4;
- (2) 假设捕集区的喷雾截面近似为环形;
- (3) 为了模型的建立,喷雾范围按理论分析进行计算,假

设雾流形状在有效的作用区内为圆锥形;

- (4) 假设喷雾捕集区的粉尘分布是均匀的。

1.3 目标函数的建立

如图 1 和图 2 所示,假设雾化角度为 α ,喷雾距离为 l ,理论喷雾截面圆的半径 r ,面积为 A 。所需喷嘴的个数为 n ,截割头大端面半径为 R ^[6]。则由几何关系可知:

$$A = \pi[(R+r)^2 - R^2] \quad (1)$$

$$r = l \tan \frac{\alpha}{2} \quad (2)$$

$$n = \frac{2\pi}{\theta} = \frac{\pi}{\arcsin \frac{3r}{4(r+R)}} \quad (3)$$

当采用恒压喷雾时,雾粒的直径可由以下经验公式得出:

$$D = K(1.79d - 1)(dp)^{1.26} \quad (4)$$

式中, D 是雾粒的直径, μm ; K 是比例系数; d 是喷嘴出口直径, mm ; p 是喷嘴的供水压力, MPa 。

喷嘴的耗水量主要取决于喷嘴的供水压力和出口直径,当直径一定时,耗水量和供水压力的关系为

$$Q = \frac{10^{-3}}{60} k d^2 \sqrt{p} \quad (5)$$

式中, Q 是单个喷嘴的耗水量, m^3/s ; k 是流量系数,一般取 0.68—1.4。

雾流的有效作用区内雾粒速度近似为雾粒在喷嘴出口速度的一半,即

$$U_d = \frac{Q}{2A_0} = \frac{2 \times \frac{10^{-3}}{60} \cdot k d^2 \sqrt{p}}{\pi d^2 \times 10^{-6}} = \frac{100}{3\pi} k \sqrt{p} \quad (6)$$

其中 A_0 为喷嘴的作用面积, mm^2 。

已知粉尘沉降的影响因素主要有:粉尘浓度,雾粒和粉尘的相对速度,捕集区的截面积,孤立液滴的降尘效率,雾粒的截面积和空间体积的含水量。由此分析得出了喷雾降尘效率的数学公式:

$$\eta = 1 - \exp \left\{ \frac{-3Q_d l (U_d - U_g)}{2D_c A U_g U_d} \cdot B_0 \left[\frac{B d_p^2 \rho_p (U_d - U_g)}{B d_p^2 \rho_p (U_d - U_g) + 6.3 \mu_g D_c} \right]^2 \right\} \quad (7)$$

式中, Q_d 为单个喷嘴的耗水量, m^3/s ; l 为喷雾有效作用区的长度, mm ; D_c 为雾粒直径, μm ; A 为捕集区有效作用截面积, m^2 ; 当只考虑惯性碰撞时,取截留和扩散作用的实验常数 $B_0=1$,并且取坎宁汉滑动修正系数 $B=1$; ρ_p 为粉尘的密度取堆积密度, $600\text{kg}/\text{m}^3$; μ_g 为气体的动力黏度, $1.8 \times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$; d_p 为粉尘粒径;已知掘进工作面的最优风速为 0.4—0.7m/s,故粉尘随空气流动的速度近似取为 $U_g=0.5\text{m}/\text{s}$ 。将式(1)—(6)代入式(7)后整理成:

$$\eta = 1 - \exp \left\{ \frac{(21.2207k\sqrt{p} - 1)d^3 p^{1.26} l}{2357.3 \arcsin \frac{3l \tan \frac{\alpha}{2}}{4(l \tan \frac{\alpha}{2} + R)} \times (1.79d - 1) \left[(R + l \tan \frac{\alpha}{2})^2 - R^2 \right]} \right\}$$

$$\left[1 + \frac{6.9985 \times 10^{-10} (1.79d-1)}{d_p^3 (21.2207k\sqrt{p}-1) dp^{1.26}} \right]^{-2} \quad (8)$$

1.4 优化数学模型的建立

由于掘进机外喷雾的降尘能力直接决定工作面的作业环境,所以把降尘效率最大作为优化设计的目标函数。由式(8)可知降尘效率跟喷雾的压力、喷雾有效作用区的长度、喷雾扩散角度和喷嘴的直径有关,因此在做优化设计时将其作为设计变量^[7]。即:

$$X=[x_1, x_2, x_3, x_4]^T=[p, l, \alpha, d]^T \quad (9)$$

$$f(x) = \exp \left\{ \frac{(21.2207k\sqrt{x_1}-1)x_4^3 x_1^{1.26} x_2}{2357.3 \arcsin \frac{3x_2 \tan \frac{x_3}{2}}{4(x_2 \tan \frac{x_3}{2} + R)} (1.79x_4-1) \left[\left(R + x_2 \tan \frac{x_3}{2} \right)^2 - R^2 \right]} \right\} \cdot \left[1 + \frac{6.9985 \times 10^{-10} (1.79x_4-1)}{d_p^3 (21.2207k\sqrt{x_1}-1)x_4 x_1^{1.26}} \right]^{-2} \quad (10)$$

则优化目标函数为

$$\min [F(X)] = f(x)$$

2 约束条件的选择

本研究的约束条件选择^[8]如下。

2.1 喷雾压力约束

据 AQ 1024-2009 煤矿采掘工作面高压喷雾降尘技术规范,高压喷雾降尘的喷雾压力为

$$8 \leq p \leq 12.5 \quad (11)$$

2.2 喷雾有效作用区的长度约束

随着雾流喷射距离的增加,使雾滴的速度和数量逐渐减小,降尘效果较差。若距离太近,喷雾作用范围小,降尘不充分,通常掘进机外喷雾喷嘴到产尘点的距离为

$$1.2 \leq l \leq 1.7 \quad (12)$$

2.3 喷嘴雾化角度约束

喷嘴的雾化角度和喷雾覆盖的范围有着直接的关系,对于粉尘已经扩散的空间要求较大雾化角度,以便于增大雾粒的捕集范围使降尘更充分;对于尘源处则要求较小的雾化角度,以便在粉尘扩散之前由雾粒沉降。因此雾化角度应满足

$$\frac{\pi}{6} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} \quad (13)$$

2.4 喷嘴直径约束

喷嘴直径太小会因工作条件恶劣和水质较差等原因而极易发生堵塞,但是大直径的喷嘴耗水量也大,容易使工作面产生积水,所以喷嘴直径一般为

$$0.8 \leq d \leq 1.2 \quad (14)$$

2.5 喷嘴流量约束

根据 AQ 1024-2009 煤矿采掘工作面高压喷雾降尘技术

规范,高压喷雾降尘的喷雾流量为 20—30L/min,则有

$$20 \leq q \leq 30 \quad (15)$$

$$q = \frac{\pi k d^2 \sqrt{p}}{3l \tan \frac{\alpha}{2} \arcsin \frac{3l \tan \frac{\alpha}{2}}{4 \left(l \tan \frac{\alpha}{2} + R \right)}} \quad (16)$$

2.6 雾粒的存活时间约束

过小的雾粒极易气化,导致雾粒在空气中存在的时间缩短,严重影响降尘效率。雾粒的存活时间

$$t = \frac{D}{8K_0(P_0-P_1)} \quad (17)$$

式中, D 是雾粒直径, μm ; K_0 是比例系数,通常取 0.15—0.2; P_0 是雾粒的蒸汽压力, Pa, 20°C 时取 2690; P_1 是湿空气压力, Pa, 20°C 时取 2338。通常存活时间要求为

$$t \geq 7\text{s} \quad (18)$$

根据以上约束条件,给出掘进机外喷雾降尘效率的参数约束为

$$g_1(X) = x_1 - 12.5 \leq 0$$

$$g_2(X) = 8 - x_1 \leq 0$$

$$g_3(X) = x_2 - 1.7 \leq 0$$

$$g_4(X) = 1.2 - x_2 \leq 0$$

$$g_5(X) = x_3 - \frac{\pi}{2} \leq 0$$

$$g_6(X) = \frac{\pi}{6} - x_3 \leq 0$$

$$g_7(X) = x_4 - 1.2 \leq 0$$

$$g_8(X) = 0.8 - x_4 \leq 0$$

$$g_9(X) = \frac{\pi}{3x_2 \tan \frac{x_3}{2} \arcsin \frac{3x_2 \tan \frac{x_3}{2}}{4 \left(x_2 \tan \frac{x_3}{2} + R \right)}} k x_4^2 \sqrt{x_1} - 30 \leq 0$$

$$g_{10}(X) = 20 - \frac{\pi}{3x_2 \tan \frac{x_3}{2} \arcsin \frac{3x_2 \tan \frac{x_3}{2}}{4 \left(x_2 \tan \frac{x_3}{2} + R \right)}} k x_4^2 \sqrt{x_1} \leq 0$$

$$g_{11}(X) = 7 - \frac{34530(1.79x_4-1)}{8K_0(P_0-P_1)x_4(10.197162x_1)^{1.26}} \leq 0$$

3 优化方法的确定

遗传算法是指借鉴生物的自然选择和遗传进化机制的思想,进行全局优化自适应概率搜索最优解的算法。遗传算法对于大型非线性、多模型、多目标函数的求解较其他方法有更好的效果。它使用群体搜索技术,采用并行处理方式对群体(样本)施加选择、交叉、变异等一系列遗传操作,逐步使群体进化到包含或接近最优解的状态,从而避免单一搜索效率不高或者使搜索过程陷于局部最优解的错误状态,并且具有自组织、自适应、自学习性、简单易实现和使用灵活等诸多优点^[9]。算法流程如图 3 所示^[10]。

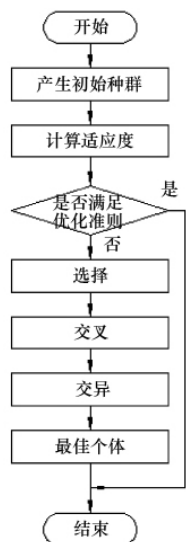


图3 遗传算法的计算流程图

Fig. 3 Calculation flowchart of genetic algorithm

为了使用 Matlab 中 GA 工具箱, 必须先将模型进行无约束化处理, 采用间接解法方法求解。该模型的约束为不等式约束, 内惩罚函数法是解这类问题的有效方法。其方法是将原目标函数和约束条件按一定原则构造成为一个新的函数——惩罚函数, 然后在可行域内求惩罚函数的极值点, 即为原函数的最优值。

目标函数为 $F(X)$, 约束条件为 $g_j(X) \leq 0 (j=1, 2, \dots, m)$ 的惩罚函数表达式为

$$\varphi(X, r^{(k)}) = F(X) - r^{(k)} \sum_{j=1}^m \frac{1}{g_j(X)} \quad (19)$$

式中, $r^{(k)}$ 为惩罚因子, 是正的递减序列, 通常 $r^{(k)}$ 取 1.0, 0.1, 0.01, 0.001, ...。

此外适应度函数的选取直接影响到遗传算法的收敛速度以及能否找到最优解, 本模型的适应度函数可根据目标函数直接转换而成, 即

$$\text{fitness}(\varphi(X, r^{(k)})) = \varphi(X, r^{(k)}) \quad (20)$$

4 优化实例及其结果分析

以某型悬臂式掘进机上的外喷雾作为优化对象, 其有关参数: $p=9.5\text{MPa}$, $l=1.5\text{m}$, $\alpha=65^\circ$, $d=1\text{mm}$, $R=0.45\text{m}$, $d_p=7\mu\text{m}$ 。仿真的硬件环境为 Core2 Duo CPU T6500, 软件环境为 Microsoft Windows XP SP3 和 Microsoft Visual C++ 6.0。优化前后的参数值见表 1。

表 1 优化前后参数比较

Table 1 Comparison of parameters before and after optimization

	p/MPa	l/m	$\alpha/^\circ$	d/mm	$\eta/\%$
优化前	9.5	1.5	65	1.0	80.53
优化后	10.43	1.38	57.75	1.001	92.76
变化量/%	+9.79	-8	-11.15	+0.1	+15.19

由表 1 可知, 经参数优化后, 掘进机外喷雾的降尘效率由 80.53% 提高到 92.76%; 喷雾压力由 9.5MPa 增加到 10.43MPa, 这样有利于雾粒速度和空间含水量的提高, 雾粒和尘粒的碰撞就越充分; 喷雾作用区的长度由 1.5m 缩短到 1.38m, 使得雾粒消耗的能量减少, 有充足的能量与更多的尘粒碰撞; 雾化角度由 65° 减小到 57.75° , 可以使雾粒更加集中, 在刚产生的粉尘扩散之前将其沉降; 喷嘴直径增加但幅度不大, 可以忽略。

5 结论

建立了掘进机外喷雾的降尘效率的数学模型, 利用 AFSA 对喷雾压力、喷雾作用区长度、雾化角度、喷嘴直径进行了优化设计。结果表明, 参数优化后, 喷雾压力增大了 9.79%, 喷雾作用区的长度降低了 8%, 雾化角度减小了 11.15%, 掘进机外喷雾的降尘效率增加了 15.19%。

参考文献 (References)

- 李晓豁. 截割粉尘成因与控制方法研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
Li Xiaohuo. Research on cutting dust mation cause and controlling method[M]. Xuzhou: China Mining University Press, 2003.
- 毛君, 毕长飞. 采煤机喷雾装置改进研究 [J]. 矿山机械, 2006, 34(9): 24-25.
Mao Jun, Bi Changfei. Mining Machinery, 2006, 34(9): 24-25.
- 李刚, 邹声华, 吴将有. 喷雾帷幕降尘机理分析及实验研究[J]. 矿冶工程, 2010, 30(2): 18-21.
Li Gang, Zou Shenghua, Wu Jianguo. Mining and Metallurgical Engineering, 2010, 30(2): 18-21.
- 刘碧雁, 胥奎. 提高采煤机外喷雾降尘效果的技术途径分析 [J]. 煤炭工程, 2008(11): 99-100.
Liu Biyan, Xu Kui. Coal Engineering, 2008(11): 99-100.
- 宋建国. 综采面高压外喷雾降尘技术及其应用研究 [J]. 煤炭工程, 2010(10):43-45.
Song Jianguo. Coal Engineering, 2010(10): 43-45.
- Zhang Q, Mao J, Ding F. Optimization design of drilling string by screw coal miner based on ant colony algorithm[J]. Journal of Coal Science and Engineering (China), 2008, 14(4): 686-688.
- 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. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 498-502.
- 张强. 基于遗传算法的刨煤机系统多目标模糊可靠性优化[J]. 科技导报, 2012, 30(1): 53-55.
Zhang Qiang. Science & Technology Review, 2012, 30(1): 53-55.
- 龚纯, 王正林. 精通 MATLAB 最优化计算[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
Gong Chun, Wang Zhenglin. Proficient in MATLAB optimization calculation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- 王小平, 曹立明. 遗传算法理论应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
Wang Xiaoping, Cao Liming. Genetic algorithms theory applications and software[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.

(责任编辑 马骁骁)