

基于 BP 神经网络的煤矿干式钻孔 产尘率预测模型

张慧, 罗文柯*, 凤雯, 张开

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 分析总结了干式钻孔孔口产尘率的 4 个主要影响因素: 煤体硬度、粉碎性能指标、固气比和含水率, 建立了一个预测干式钻孔孔口产尘率的 BP 神经网络模型. 根据在不同硬度和粉碎性能指标、不同含水率的煤体以及不同固气比条件下采集的数据, 对建立的 BP 神经网络模型进行训练、验证和误差分析. 结果表明, 网络训练所得预测值与孔口产尘量实测值之间的最大绝对误差为 4.200×10^{-3} , 相对误差的最大值为 3.06%. 由本文所建立的 BP 神经网络模型所得到的预测值与实测值吻合度很高, 故该模型为防尘设备参数的选择和防治职业危害危害提供了理论依据.

关键词: BP 神经网络; 干式钻孔; 产尘率; 误差值

中图分类号: TD714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2017)01-0034-06

On Prediction of Dry Drilling's Dust Production Rate Based on BP Neural Network

ZHANG Hui, LUO Wenken, FENG Wen, ZHANG Kai

(School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: This paper analyzes and summarizes the four significant factors i. e. the coefficient of coal hardness, the indicator of crushing performance, solids loading pneumatic, the moisture content and the drilling time that affect the dust capacity of dry hole orifice. In addition, a BP neural network model is built based on the properties of the coal dust capacity of dry hole orifice. The field measurement data under different conditions are used for building the training samples, and the accuracy of the model is tested. Differences between prediction and actual results are studied. Results show the maximum absolute error is 4.200×10^{-3} , and the maximum relative error is 3.06%. The results obtained by the BP neural network model have well matched with the measured data, and the BP neural network model of production rate of dust has provided a theoretical basis for the parameters of equipment and controlling occupational hazards.

Key words: BP neural network; dry drilling; production rate of dust; error

瓦斯抽采钻孔技术是减少瓦斯涌出量最有效的措施. 由于干式钻孔技术较湿式钻孔技术具有成孔率高、用水量省等优点, 故在煤矿抽采钻孔中, 干式钻孔技术应用较广泛. 然而干式钻孔过程中, 钻机内的煤粉被压缩空气排到煤巷内, 为煤矿安全问题埋下隐患. 干式钻孔孔口粉尘浓度高达 1 000 mg/kg, 高于《煤矿安全规程》的要求, 直接影响人的身心健康或间接发生爆炸事故等. 为预防此类潜在事故的发生, 研究煤层干式钻孔孔口产尘率具有较大科研意义.

粉尘一直是影响矿井生产安全问题的重要因素. 张发亮等^[1]通过现场布点测定干式钻孔孔口附近的

收稿日期: 2016-10-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51274100); 湖南省科技厅计划一般资助项目(2012FJ4268)

* 通信作者, E-mail: lwk-hnust@163.com

粉尘浓度及煤尘特性,得到全尘和呼吸性浓度分布规律及产尘率与煤层的硬度成反比.杨永良等^[2]进行煤层钻孔风力排渣模拟实验研究,揭示了固气比与压力损失、钻进速度等之间的内在规律.张英华^[3]通过实验,分析煤尘含水率与产及除尘率的关系.丁旭东^[4]从理论上分析了干式钻孔产尘机理,提出了煤层钻进产尘率的主要影响因素.姜健^[5]以截割掘进工作面为对象,运用 BP 神经网络进行截割粉尘浓度预测.由于影响钻进产尘具有多因素、复杂性、随机性及模糊性等特点,前人研究并未涉及到定性分析干式钻孔孔口产尘率这一问题.

一些学者将神经网络的应用到非线性、模糊的煤矿安全问题上^[6].神经网络是依据人类大脑的结构及思维方式构建的,具有高度非线性和泛化能力强的特点,故能够解决具有多因素、复杂性、随机性及模糊性的问题.BP 神经网络是神经网络中重要的一种预测方法,其依据样本可学得输出与输入之间的隐含映射关系.

笔者分析孔口产尘率与各个影响因素之间的关系,依据实地测量获得的数据,建立一个考虑煤层内在特性和钻机外在因素的煤层孔口产尘率研究的 BP 网络模型.

1 干式钻孔产尘率的影响因素

干式钻孔孔口产尘率的影响因素极其复杂,煤体的硬度、脆性、粉碎性、弹性、煤体所在的地质构造带、煤体含水量、瓦斯含量和压力、钻具结构及工况参数对钻进产尘率都有不同程度影响.随着煤体所在地质构造的坚硬性系数、粉碎性能指标、煤层含水率及钻进固气比的变化,直接会引起钻进过程中产生粉尘强度的变化.

钻孔一般处于水平或微倾角状态,在风力作用下将钻头钻下的煤渣排出,完成预抽采钻孔工作,所以风力排渣钻孔可以视为在水平状态下进行管内气体输送的过程.其中,固气比是气体输送过程中的重要指标之一.根据钻进破煤机理可知,煤体的硬度、综合性粉碎性能指标、煤层原始含水率对干式钻孔产尘率影响显著.因此,煤体硬度、综合性粉碎性能指标、煤层原始含水率及固气比是研究煤层干式钻孔产尘率研究重点.

1.1 煤体硬度

煤体的硬度大小对干式钻进产生煤粉强度有直接联系和显著影响.煤体硬度表征了煤的松软性或坚固性,用普氏系数 f 的大小定性描述了煤体的硬度,普氏系数 f 值越大,煤体的硬度越大,反之亦然.

煤体硬度越大,全尘率减少,而呼吸性等细小粉尘率较大.这是因为硬度大的煤体增加了钻进过程钻杆与煤体的破碎作用中摩擦力,增大产生细小煤粉的几率.所以煤尘中的呼吸性粉尘产率和比重将增大,煤体硬度的大小决定了呼吸性粉尘的量.实际工程中运用落锤法试验^[7]测定煤的硬度大小.

1.2 煤体粉碎性能指标

粉碎性能指标 m 是从物理学方面对煤岩的微观组成和结构特征进行表征,是煤体的固有性能,表征出产尘等级量的范围大小.相关参考文献^[8]给出了粉碎性能指标和粒径 $0.00 \sim 0.02 \text{ mm}$ 煤尘出量关系图(见图 1,纵坐标 i 为 m 取某一值时煤尘产出量与 $m = 1$ 时产出量的比值).图 1 表明, m 值越大,煤粉粉碎性能越弱,产尘率越强.

1.3 固气比

固气比 m_{sa} 是指钻屑质量流量与空气质量流量之比,其大小直接影响钻杆内粉尘的运动状态和漂浮量.由定义表达式(见式(1))可知,钻杆的钻进速度、钻杆直径、钻孔直径和煤层突出危险性程度系数与固气比都有关,固气比可表征出钻进工艺的参数特点.因此,固气比的大小也影响干式钻孔孔口产尘率的大小.

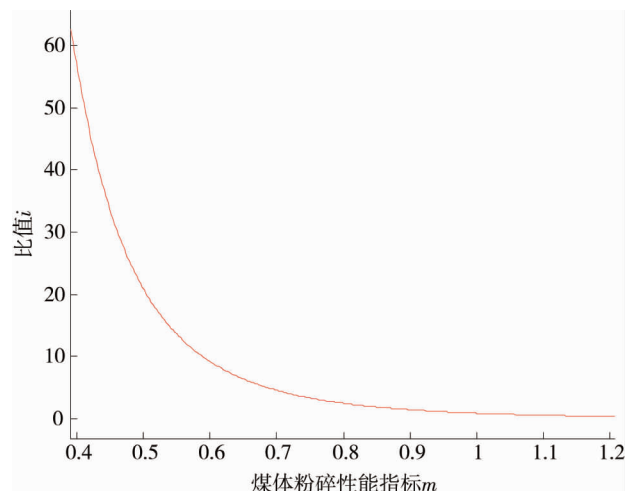


图 1 m 值与粒径 $0.00 \sim 0.02 \text{ mm}$ 煤尘出量关系图

$$m_{sa} = \frac{q_{ms}}{q_{ma}} \tag{1}$$

式中, q_{ms} : 钻屑质量流量, kg/s; q_{ma} : 空气质量流量, kg/s.

1) 当一定条件下, 固气比与钻进速度成正比. 当钻头钻进速度增大时, 钻头切割煤体的速度变大, 随之作用于煤体的单位时间的作用力增强, 切削的煤块变厚, 落煤量就会增多. 同时, 钻进速度大也会引起落煤块之间的碰撞几率, 引起钻杆内的煤体的二次破碎. 所以, 钻进速度增大时, 固气比也随之增大, 孔口产尘率较多.

2) 当一定条件时, 随着单位长度压损的增大, 固气比增大, 粉尘产生几率升高. 在排渣过程中, 空压机所提供的风压主要是克服从 2 方面的压力损失: 一是压力气体本身在钻杆内风孔中的摩擦力所产生的压损; 二是钻杆钻孔中, 为气体和钻下来的煤渣提供的能排出的速度、克服气体单相流体空气的摩擦力及加快钻屑固体速度. 根据杨永良等模拟煤层干式钻孔排渣实验结果可知, 风力排渣中压损最大的是在钻杆内发生的, 几乎占整个钻、排过程中的 70%. 其中排渣过程所需的压力不到 1%. 所以, 在一定条件下, 空气钻进所提供的压风风压越大, 松动的煤体被风流扰动跌落量越多, 并随其他碎屑一起随风流排出钻孔. 同时, 随着钻孔深度的增大, 压入的风压力也随之增大.

1.4 含水率

煤体的含水率越高, 煤体的原生质粉尘量少, 煤体的弹性和抗压强度^[9]也降低, 塑性增强; 同时, 含水率高的煤体破碎后, 煤颗粒的重量和粒径都比较大, 产生粉尘飘散几率较小. 因此, 含水率越高, 干式钻孔孔口产生的煤粉量越少. 煤体的含水率一般通过浸水法或滴定水发进行测定(微波干燥法).

2 BP 神经网络算法

BP 神经网络^[10]是一种信号前馈, 误差逆传播的拓扑结构神经网络, 包括输入层、隐含层和输出层 3 层, 各层之间依次用权值、阈值连接, 依据误差梯度下降修正权值和阈值的学习规则, 通过对样本的训练学习最终可实现输入与输出的高度非线性映射.

BP 神经网络的学习规则是 Delta 学习算法^[11], 即沿误差单调递减的方向来调整连接权值, 上一步输出的误差梯度作为下一步输入的连接权重 W 值再次加入到输出运算中(见图 2), 所以 BP 神经网络的最大特点: 误差的校正方向为从后向前的, 连接权重是不断变化的.

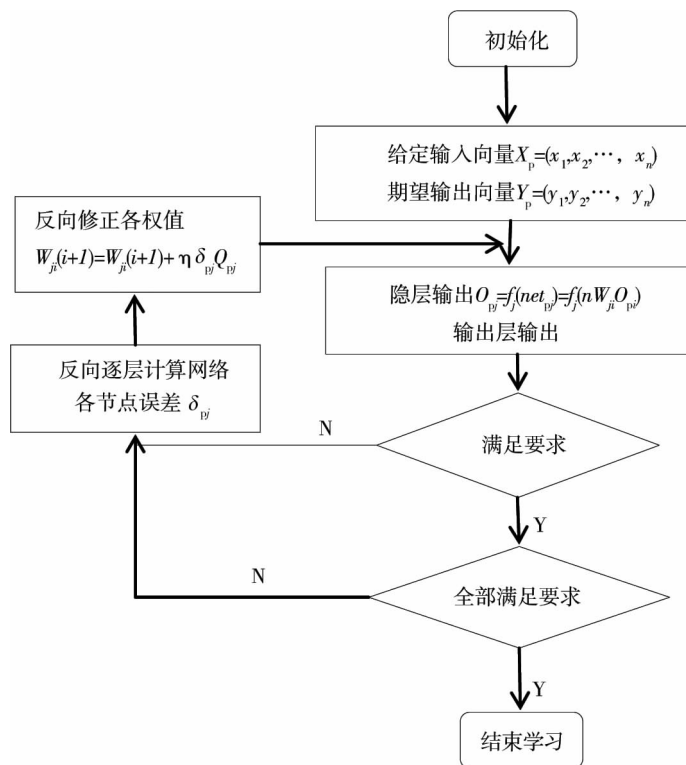


图 2 Delta 算法流程

3 孔口产尘率预测的 BP 神经网络模型

3.1 BP 网络的构造

由前文分析可知,干式钻孔孔口产尘率的主要影响因素包括煤的硬度、粉碎性能指标、固气比和含水率,本文建立一个 3 层 BP 神经网络来反映这 4 个影响因素与孔口产尘率之间的关系模型.输入层有 4 个神经元,分别是煤的硬度、粉碎性能指标等 4 个影响因素;输出层有 1 个神经元即产尘率.构建的模型如图 3 所示.隐含层神经元数的确定可以根据经验公式(2)得出^[12],其中 p 为隐含层神经元数, w 为输入层神经元数, u 为输出层神经元数, a 为 1~10 之间的整数.通过经验公式计算并通过反复训练对比,隐含层的神经元数目为 7.所以,该神经元模型结构为 4-7-1.

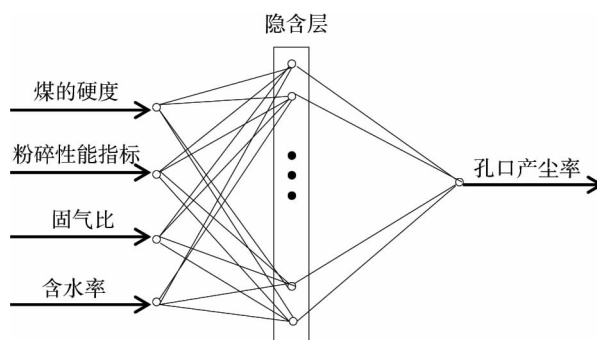


图 3 产尘量预测神经网络模型

$$p = \sqrt{w + u} + a. \tag{2}$$

3.2 样本数据

笔者分别对淮北祁南煤矿、淮北袁店一井等 10 个煤矿进行现场干式钻孔,在不同条件下测定孔口的产尘量,并得出相应的孔口产尘率.本文采用具有代表性的钻孔孔口产尘率的数据来建立学习样本(见表 1)进行训练学习,最后 2 个数据作为检验神经模型精度的样本,不加入学习.

3.3 样本训练及检验结果

本文中设置的最小均方差为 0.001,学习速率为 0.05,动量系数为 0.9,训练次数的最大值为 50 000 次.首先应对样本数据进行归一化,再进行神经网络的训练及检验.进行网络学习训练时,样本的训练顺序对训练结果无影响.达到训练要求精度时,训练结束的训练次数为 44 801 次.最后表 2 分析了预测值与实测值的误差.

表 1 孔口产尘率学习样本数据

序号	采样地点	煤体硬度	综合性指标	固气比	含水率/	产尘率
1	淮北祁南煤矿	0.16	0.30	15	0.112	0.814
2	淮北袁店一井	0.24	0.40	10	0.126	0.759
3	白山坪磨天煤矿	0.48	0.50	5	0.285	0.635
4	临涣煤矿	0.54	0.60	10	0.132	0.712
5	龙塘煤矿	0.78	0.70	5	0.321	0.511
6	白山坪煤矿	0.88	0.80	10	0.156	0.679
7	大岭煤矿	3.20	1.00	12	0.211	0.368
8	袁庄煤矿	3.90	1.20	10	0.152	0.482
9	涡北煤矿	0.32	0.41	9	0.121	0.694
10	杨庄煤矿	3.60	1.10	15	0.123	0.383
1 检测	朱庄煤矿	0.35	0.45	5	0.221	0.831
2 检测	百善煤矿	3.00	1.50	12	0.132	0.756

表 2 神经网络预测结果与实测值对比

序号	实测值	预测值	绝对误差	相对误差/%
1	0.814	0.816 5	0.002 5	0.003 1
2	0.759	0.753 0	-0.006 0	0.007 9
3	0.635	0.635 5	0.000 5	0.000 8
4	0.712	0.713 2	0.001 2	0.030 6
5	0.511	0.511 0	0.000 0	0.000 0
6	0.679	0.676 4	-0.002 6	0.003 8
7	0.368	0.367 9	-0.000 1	0.000 3
8	0.482	0.482 8	0.000 8	0.001 7
9	0.694	0.698 2	0.004 2	0.006 1
10	0.383	0.382 9	-0.000 1	0.000 3
1 检测	0.831	0.813 0	-0.018 0	0.021 7
2 检测	0.756	0.759 6	0.003 6	0.004 8

由表 3 可知,训练后的 BP 神经网络模型中预测结果最大绝对误差为 4.200×10^{-3} ,相对误差的最大值为 3.06%.由此可得出,针对干式钻孔孔口产尘率建立的 BP 模型能够准确的体现出孔口产尘率与各个因素之间的相关联系和规律.

在一定条件下,孔口产尘率与煤体硬度之间的关系曲线(如图 4 所示).干式钻孔孔口产尘率随着煤体硬度的增大而减少,在煤体硬度为 0.6 左右时,产尘率下降的速率在减缓.煤体硬度超过 0.6,即煤的坚硬性越大,煤体越坚硬,煤体与钻杆作用时,煤体破碎需要的能量越大,时间越长,所以一定条件下,煤体干式

钻孔时产生的粉尘率速率将减缓.从图4可以得到本文所建立的BP神经网络模型所得预测值与实测值较吻合.煤体的综合性粉碎性能指标与煤体硬度对孔口产生率的影响是一致的.

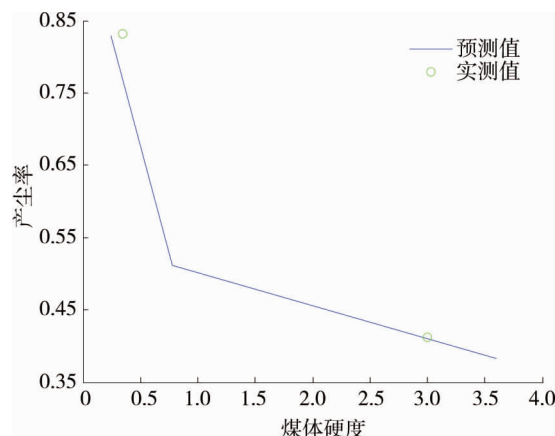


图4 煤体硬度-孔口产生率曲线

在一定条件下,产生率与固气比之间的关系曲线(如图5所示).由图可知,在干式钻孔过程中,钻机的固气比在一定范围内,产生的粉尘量随着固气比的增大而增大.当固气比大于10,产生率将随着固气比的增大而减少.这是由于固气比超过阈值后,克服钻杆内压力损失越大,到达钻杆与煤体的能量越少,扰动煤体的几率就会减少,产生的煤粉率随之减少.从图5也可得出,BP神经网络预测值与实际情况吻合.

在一定条件下,产生率与含水率之间的关系曲线(如图6所示).依据该图可知,随着煤层含水率的增大,孔口产生率而减少.当含水率超过12%时产生率趋于平缓.笔者认为存在一个临界含水率,在小于临界含水率范围内,煤层中的水增大了煤粉之间的连接力,但不易产生结团的小煤块,易于钻进的进行,同时弥散于工作巷道里的粉尘量就越少;当超过此临界值后,煤层中掉落下的煤粉因水量较大,在钻杆高速旋转下,水蒸发到压缩空气内,再次和煤层接触,致使将要掉落的煤层再次依附于煤层内,所以产生率就趋于平稳.从图6中还可以得到,预测值与实测值吻合较好.

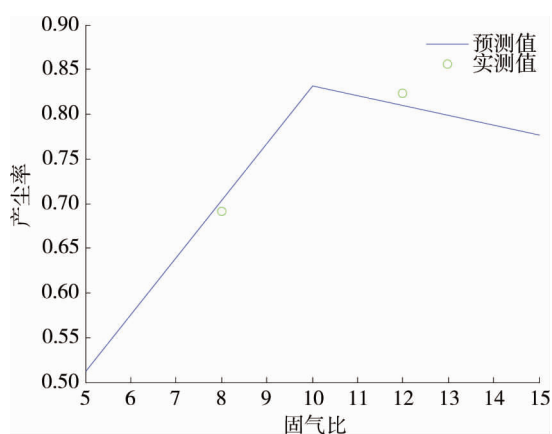


图5 固气比-孔口产生量的关系曲线

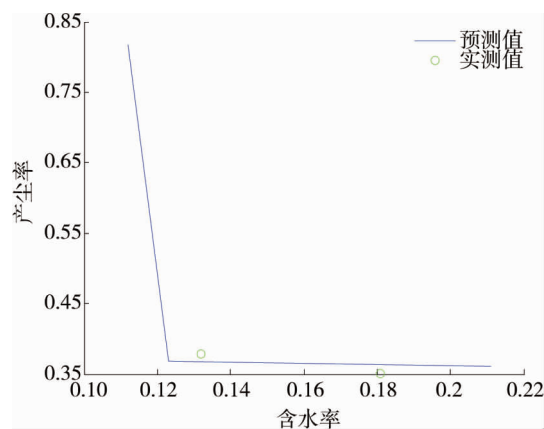


图6 含水率-孔口产生量的关系图

4 结论

1) 干式钻孔产生率有4个重要影响因素:煤体硬度、粉碎性能指标、固气比和含水率,以此为基础可以建立预测产生率的BP神经网络模型.

2) 根据实测数据为学习样本,对研究干式钻孔孔口产生率BP神经网络进行44801次训练达到模型要求精度后,网络训练的最大绝对误差为 4.200×10^{-3} ,相对误差的最大值为3.06%.

3)由建立的 BP 神经网络模型得到的预测值与实测值基本吻合,表明针对煤层干式钻孔产尘率预测研究模型能较好表征出孔口产尘率各因素之间的内在规律,该研究模型为防尘设备参数的选取和防治职业病危害提供了研究依据.

参考文献:

- [1] 张发亮,何启林,王佰顺.正令矿干式钻孔粉尘特性的测定与模拟[J].煤炭技术,2013,32(1):92-94.
- [2] 杨永良,李增华,高文举,等.煤层钻孔风力排渣模拟实验研究[J].采矿与安全工程学报,2006,23(4):415-418.
- [3] 张英华.测定煤体含水率与降尘关系的实验研究[J].煤矿安全,2000(2):44-46.
- [4] 丁旭东.干式钻进煤尘在巷道中运移及分布规律的研究[D].淮南:安徽理工大学,2012.
- [5] 姜健.掘进工作面截割粉尘及其影响因素的研究[D].阜新:辽宁工程技术大学 2000.
- [6] 尹光志,李铭辉,李文璞,等.基于改进 BP 神经网络的煤体瓦斯渗透率预测模型[J].煤炭学报,2013,38(7):1179-1184.
- [7] 吴代安.煤层干式打钻孔口除尘装置研究与设计[D].淮南:安徽理工大学,2010.
- [8] E 保晋.采煤机破煤机理[M].王庆康,译.北京:煤炭工业出版社,1992.
- [9] 邱吉龙.不同含水率煤体的物理力学性质试验研究[J].华北科技学院学报,2013,10(1):6-9.
- [10] 魏建平.基于构造复杂程度定量评价的瓦斯含量预测 BP 模型[J].煤炭学报,2009,34(8):1090-1094.
- [11] 王旭,王宏,王文辉.人工神经网络原理与应用[M].沈阳:东北大学出版社,2000:35-65.
- [12] 夏克文,李昌彪,沈钧毅.前向神经网络隐含层节点数的一种优化算法[J].计算机科学,2005,32(10):143-145.