

基于 ANN 的碳纤维楠竹锚杆锚固力预测研究¹⁾

李东波^{*,2)} 赵冬^{*} 华军^{*} 张奇[†]

^{*}(西安建筑科技大学理学院力学系, 西安 710055)

[†](西安建筑科技大学土木工程学院, 西安 710055)

摘要 为减小对文物本体的破坏, 本文基于新疆某土遗址加固保护中碳纤维楠竹锚杆锚固力原位测试试验, 考虑锚杆直径、长度、倾斜角以及灌浆体强度、孔径、碳纤维缠绕间距等锚固力影响因素, 利用人工神经网络 (artificial neural network, ANN) 的误差反向传播 (back propagation, BP) 算法及 MATLAB 人工神经网络工具箱, 建立了锚固力预测的智能模型; 并以原位测试所得的数据为学习样本和检验样本, 验证了该方法的适用性和可行性. 将训练好的网络模型进行扩展计算, 基于 $L_{25}(5^6)$ 正交表试验理论分析了锚固力对各影响因素的敏感性, 为同类加固工程的实际应用提供参考依据.

关键词 碳纤维楠竹锚杆, 锚固力, 人工神经网络, BP 模型, 正交试验设计, 敏感性

中图分类号: O39 文献标识码: A DOI: 10.6052/1000-0879-12-186

ANCHORAGE FORCE PREDICTION FOR THE CFRP-BAMBOO BOLT BASED ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORK¹⁾

LI Dongbo^{*,2)} ZHAO Dong^{*} HUA Jun^{*} ZHANG Qi[†]

^{*}(Department of Mechanics, School of Science, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

[†](School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract To protect against the destruction of cultural relics, the artificial neural network and the toolbox of MATLAB artificial neural network (ANN) are applied to set up an intelligent model of the anchoring force prediction with consideration of the bolt diameter, the bolt length, the angle of inclination, the grouting body intensity, the aperture and the carbon fiber wrapped spacing, based on the in-situ test of the anchorage force of the CFRP (carbon fibre reinforced plastics)-bamboo bolt used in the protection of a certain earth site in Xinjiang. And by learning the samples from the in-situ test, the applicability and the feasibility of the method are checked. Based on the calculation results, the sensitivity of influencing factors on the anchorage force of the CFRP-bamboo bolt is analyzed by using $L_{25}(5^6)$ orthogonal table, which may provide a reference for similar reinforcement engineering practical applications.

Key words CFRP-bamboo bolt, anchorage force, artificial neural network, BP model, orthogonal experiment design, sensitivity

为保证施工安全和锚固效果, 科学、快速、准确地确定锚杆的锚固力是锚固设计中的关键问题之一^[1]. 由于受工程因素和地质因素等的综合影响, 锚固力影响因素大都具有随机性、模糊性、可变性等不确定性特点, 使锚固系统成为一个具有复杂非线性关系的开放系统.

Farmer^[2] 在 1975 年建立并验证了锚杆轴力指数分布模型, 他认为, 粘锚力自拉拔自由面沿杆体轴向呈指数衰减趋势. Hawkes 等^[3] 和 Signer^[4] 也通过试验认为粘锚力的变化规律与施加载荷大小有关. Nitzsche 和 Haas^[5] 运用有限元法研究认为粘锚力自拉拔自由面沿杆体轴向是非线性衰减的. Ser-

2012-05-04 收到第 1 稿, 2012-08-16 收到修改稿.

1) 陕西省自然科学基金 (2011JQ1013), 西安建筑科技大学青年科技基金 (QN1239) 资助项目.

2) 李东波, 1982 年生, 男, 博士生, 从事结构与力学分析的研究. E-mail: ldb@xauat.edu.cn

bousek 等 [6] 也认为锚杆粘锚力呈非线性衰减趋势, 衰减速率与锚固剂和岩体的弹性模量有关. Radcliffe 和 Stateham [7] 通过现场试验认为锚杆粘锚力自拉拔自由面沿杆体轴向呈直线衰减趋势, Fabjanczyk 和 Tarrant [8] 也持同样观点. Lewis 等 [9] 也通过试验认为锚杆粘锚力自拉拔自由面沿杆体轴向呈直线下降趋势, 且衰减速率与拉拔力大小无关. 2009 年, 碳纤维楠竹锚杆被用于加固新疆干旱地区土遗址, 毛筱霏等 [10-11] 对其力学性能进行了系统研究, 通过原位测试实验讨论了锚杆直径、孔径、灌浆体强度等因素对锚固力的影响.

目前, 锚杆锚固力的确定方法主要有现场拉拔试验、规范经验法等 [1]. 现场拉拔试验耗资巨大、费时, 且须进行破坏性试验, 检测面小, 试验数据难有代表性. 规范经验法基于地方经验来估测, 缺乏科学依据, 普遍存在局限性. 因此, 利用人工神经网络的自组织、自学习、联想记忆能力和强容错性研究锚杆的锚固力具有较大的必要性、可行性和现实意义.

1 锚杆锚固力

锚杆锚固力即锚杆锚固部分与岩体的结合力. 是锚杆最重要的性能参数, 也是锚杆的最大承载能力. 根据灌浆体的受力状态, 锚杆分为拉力型锚杆 (灌浆体受拉) 和压力型锚杆 (灌浆体受压) (如图 1).

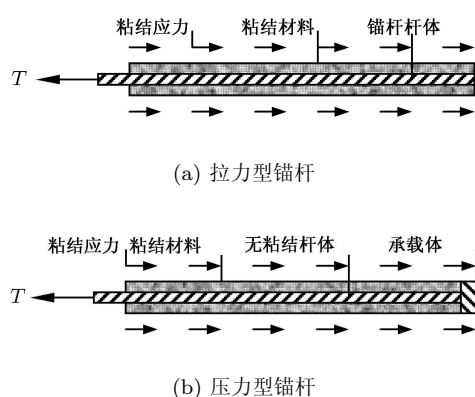


图 1 拉力型和压力型锚杆受力示意图

碳纤维楠竹锚杆 (如图 2, 以下简称“锚杆”) 属于土层锚杆, 因取材方便、力学性能优良、加固效果明显等优点, 近年来常用于土遗址的加固保护中, 但为保护文物本体, 无法用大面积的现场拉拔试验来测定其力学性能, 因此本文基于新疆高昌故城土遗址加固保护工程, 将人工神经网络的 BP (back propagation) 算法用于锚杆锚固力的预测分析, 旨在建

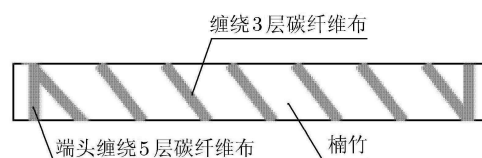


图 2 碳纤维楠竹锚杆示意图

立一种经济、快速、准确的锚固力预测模型.

2 锚杆锚固力的 BP 预测模型

2.1 预测的基本原理

本文所述方法的基本原理是: 通过原位测试试验分析在各种影响因素作用下锚杆的锚固力, 统计和选取部分试验数据作为学习样本, 建立神经网络模型, 通过网络的自组织、自学习获得足够的知识后, 输入待研究锚杆的参数就可对其锚固力做出预测. 网络的输入是锚杆锚固力的各影响因素, 输出是锚杆的锚固力预测值.

2.2 预测模型的构建

2.2.1 输入层和输出层参数的确定

本文的 BP 预测模型, 其输入层的神经元节点数由锚杆锚固力影响因素的个数而定, 根据锚杆的受力特点, 主要考虑锚杆长度、直径、倾斜角度以及灌浆体强度、孔径、碳纤维缠绕间距等 6 个影响因素. 输出层节点即为锚杆的锚固力预测值.

因此, 预测模型的输入层节点数 $n = 6$, 输出层节点数 $m = 1$.

2.2.2 隐含层参数的确定

根据 Kolmogorov 定理, 在有合理的结构和恰当的权值条件下, 3 层前馈网络可以逼近任意的连续函数. 因而一个 3 层的 BP 网络可以完成任意的 n 维到 m 维的映射.

因此, 本文的预测模型采用一个隐含层, 隐含层选用 $2n + 1 = 13$ 个节点.

2.2.3 预测模型

根据所确定的隐含层层数及输入层、隐含层、输出层节点数, 本文构建的预测模型为 6-13-1 的 BP 模型, 如图 3 所示.

2.2.4 激发函数

本模型采用有一定阈值特性的连续可微的 sigmoid 函数之一的非对称性 S 型函数作为神经元的激发函数. S 型函数为

$$f(x) = 1/(1 + e^{-x})$$

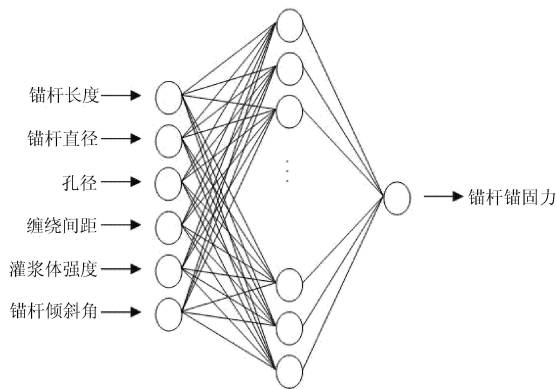


图3 碳纤维楠竹锚杆锚固力的BP预测模型

2.3 模型训练及检验

2.3.1 训练及检验样本的选择

本文利用 MATLAB 的神经网络工具箱编制了模型的计算程序. 选取新疆高昌故城土遗址加固保

护中原位测试所得的 10 组数据^[10]作为学习样本, 如表 1.

2.3.2 数据的归一化处理

网络学习前的数据处理对网络的学习速度、网络的精度等有重要影响^[12]. 此外, 由于系统是非线性的, 初始值对于学习是否达到全局最小, 或是否能收敛的影响很大, 因此希望初始权在输入累加时使每个神经元的状态值接近于 0, 从而保证一开始不落到平坦区上. 权一般取较小的随机数, 以此来保证每个神经元一开始都在它们转换函数变化最大的地方进行. 对于输入样本同样希望能够归一, 使那些比较大的输入仍落在神经元转换函数梯度大的地方. 表 2 为经过归一化后的数据, 介于 $[-1, 1]$ 之间, 能加速网络的收敛速度, 提高计算效率.

表 1 预测模型学习样本

序号	长度/mm	直径/mm	孔径/mm	灌浆体强度/MPa	碳纤维缠绕间距/mm	倾斜角度/(°)	锚固力/kN
1	800	33	85	1.92	75	0	12.05
2	1200	33	85	1.92	75	0	14.8
3	1500	33	85	1.92	75	0	21.86
4	2000	33	85	1.92	75	0	31.5
5	3000	33	85	1.92	75	0	46.4
6	1500	26	85	1.92	75	0	11.5
7	1500	55	85	1.92	75	0	21.35
8	1500	33	75	1.92	75	0	17.15
9	1500	33	110	1.92	75	0	24.9
10	1500	33	85	1.84	75	0	15.9

表 2 归一化后的学习样本

序号	长度/mm	直径/mm	孔径/mm	灌浆体强度/MPa	碳纤维缠绕间距/mm	倾斜角度/(°)	锚固力/kN
1	-1.0000	-0.5172	-0.4286	-0.9640	0.0000	-1.0000	-0.8796
2	-0.6364	-0.5172	-0.4286	-0.9640	0.0000	-1.0000	-0.7291
3	-0.3636	-0.5172	-0.4286	-0.9640	0.0000	-1.0000	-0.3428
4	0.0909	-0.5172	-0.4286	-0.9640	0.0000	-1.0000	0.1847
5	1.0000	-0.5172	-0.4286	-0.9640	0.0000	-1.0000	1.0000
6	-0.3636	-1.0000	-0.4286	-0.9640	0.0000	-1.0000	-0.9097
7	-0.3636	1.0000	-0.4286	-0.9640	0.0000	-1.0000	-0.3707
8	-0.3636	-0.5172	-1.0000	-0.9640	0.0000	-1.0000	-0.6005
9	-0.3636	-0.5172	1.0000	-0.9640	0.0000	-1.0000	-0.1765
10	-0.3636	-0.5172	-0.4286	-0.9640	0.0000	-1.0000	-0.6689

2.3.3 网络的训练及检验

根据 MATLAB 神经网络工具箱所提供的函数^[13], 利用归一化后的数据对构建的模型进行训练, 经过 14 步学习收敛, 精度达到 0.01, 误差随训练次数变化曲线如图 4 所示 (累计训练步数为 14 步时, 训练误差为 0.00723219, 目标精度为 0.01). 训

练结束后, 对原样本数据进行预测, 生成预测值. 并对预测值进行反归一化处理得到最终预测值.

2.3.4 预测结果及误差分析

本文构建的预测模型通过网络的自学习, 达到了指定的性能指标, 神经网络中存储了样本包含的内在非线性映射关系, 确定了各输入、输出层间的权

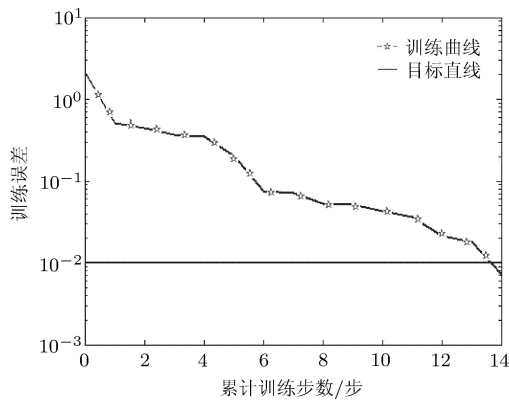


图 4 误差随训练次数变化曲线图

重和阈值。

现选取 5 组原位测试数据作为检验样本对训

练好的网络进行了检验，将网络预测值和原位测试数据进行比较分析 (表 3)，可知其平均相对误差为 1.72%，满足工程的需要，验证了该方法的可行性和适用性。

3 锚固力影响因素敏感性分析

3.1 正交表的选用

根据行业标准《工艺参数优化方法正交试验法 (JB/T 7510-1994)》，本文确定的因素位级数为 5，因素个数为 6，分别为影响锚杆锚固力的 6 个影响因素，如表 4，其中第 3 位级即为锚杆各影响因素的初始值。

则根据位级数和因素数选定 $L_{25}(5^6)$ 正交表。

表 3 预测结果及误差

序号	长度/ mm	直径/ mm	孔径/ mm	灌浆体 强度/ MPa	碳纤维缠 绕间距/ mm	倾斜角度/ (°)	锚固力 实测值/ kN	锚固力 预测值/ kN	绝对 误差	相对 误差	相对误差 平均值
1	1 500	33	85	6.28	75	0	17.2	17.3799	0.1799	1.04%	1.72%
2	1 500	33	85	1.92	0	0	9.85	10.2026	0.3526	3.58%	
3	1 500	33	85	1.92	150	0	13.5	13.8475	0.3475	2.57%	
4	1 500	33	85	1.92	75	10	16	15.8999	0.1001	0.63%	
5	1 500	33	85	1.92	75	15	14.7	14.8151	0.1151	0.78%	

表 4 因素位级表

因素位级	长度/mm	直径/mm	孔径/mm	灌浆体强度/ MPa	碳纤维缠绕 间距/mm	倾斜角度/(°)
1	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%	-20%
2	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-10%
3	0%	0%	0%	0%	0%	0%
4	10%	10%	10%	10%	10%	10%
5	20%	20%	20%	20%	20%	20%

3.2 锚固力影响因素灵敏性分析

通过对网络的训练和检验，说明可用训练后的网络对有关工程的同类问题进行预测。

问题描述：加固新疆干旱地区土遗址的锚杆的长度为 1 200 mm，直径为 30 mm，孔径为 80 mm，灌浆体强度为 1.92 MPa，碳纤维缠绕间距为 75 mm，

倾斜度为 10°。

根据选定的 $L_{25}(5^6)$ 正交表对表 5 中的位级变化并组合形成表 6 中的 25 个试验样本。

用训练好的网络模型对上述 5 个学习样本分别进行预测，如表 7。

将每个因素相同水平的 5 次实验结果求平均，

表 5 样本位级变化表

因素位级	长度/mm	直径/mm	孔径/mm	灌浆体强度/ MPa	碳纤维缠绕 间距/mm	倾斜角度/(°)
1	960	24	64	1.536	56	8
2	1 080	27	72	1.728	63	9
3	1 200	30	80	1.920	75	10
4	1 320	33	88	2.112	77	11
5	1 440	36	96	2.304	84	12

表6 组合样本表

因素试验号	长度/mm	直径/mm	孔径/mm	灌浆体强度/MPa	碳纤维缠绕间距/mm	锚杆角度/(°)
1	960	24	72	2.112	75	9
2	1080	24	96	2.304	84	12
3	1200	24	88	1.536	77	8
4	1320	24	64	1.920	56	10
5	1440	24	80	1.728	63	5
6	960	27	80	1.920	77	12
7	1080	27	72	1.728	56	8
8	1200	27	96	2.112	63	10
9	1320	27	88	2.304	75	5
10	1440	27	64	1.536	84	9
11	960	30	64	2.304	63	8
12	1080	30	80	1.536	75	10
13	1200	30	72	1.920	84	5
14	1320	30	96	1.728	77	9
15	1440	30	88	2.112	56	12
16	960	33	88	1.728	84	10
17	1080	33	64	2.112	77	5
18	1200	33	80	2.304	56	9
19	1320	33	72	1.536	63	12
20	1440	33	96	1.920	75	8
21	960	36	96	1.536	56	5
22	1080	36	88	1.920	63	9
23	1200	36	64	1.728	75	12
24	1320	36	80	2.112	84	8
25	1440	36	72	2.304	77	10

表7 预测结果表

试验号	预测结果	试验号	预测结果	试验号	预测结果	试验号	预测结果	试验号	预测结果
1	10.2956	6	11.7330	11	10.0382	16	14.2617	21	16.4879
2	11.0749	7	11.3783	12	9.9477	17	12.0605	22	19.0099
3	11.1526	8	11.0008	13	9.9748	18	11.7374	23	11.7244
4	13.7677	9	11.5170	14	10.0821	19	14.1691	24	11.9178
5	11.5347	10	12.4002	15	10.0837	20	23.2374	25	16.8842

得到各因素在不同水平情况下各指标的平均值,对同一因素不同水平的指标求最大与最小值之差,得到该因素变化所对应的极差,如表8.

由表8可知,锚杆锚固力的影响因素的灵敏性依次为锚杆直径、灌浆体强度、长度、孔径、倾斜角和碳纤维缠绕间距.

表8 正交试验结果表

位级	平均值	长度/mm	直径/mm	孔径/mm	灌浆体强度/MPa	碳纤维缠绕间距/mm	倾斜角度/(°)
第1位级	平均值	12.5633	11.5651	11.9982	2.8315	12.6910	13.5449
第2位级	平均值	12.6943	11.6059	12.5404	11.7962	13.1505	12.7050
第3位级	平均值	11.1180	10.0253	11.3741	15.5446	13.3444	13.1724
第4位级	平均值	12.2907	15.0932	13.2050	11.0717	12.3825	11.7570
第5位级	平均值	14.8280	15.2048	14.3766	12.2503	11.9259	12.3150
	极差	3.7100	5.1795	3.0025	4.4729	1.4185	1.7878
	极差顺序	3	1	4	2	6	5

4 结 论

(1) 人工神经网络具有良好的自适应性、自组织性及很强的学习、联想、容错和抗干扰能力等优点。将其引入锚固系统,可以更全面地考虑影响锚杆锚固力的诸多因素,实现锚固力预测的智能化。

(2) 本文运用人工神经网络建立了锚杆锚固力预测模型,使影响锚杆的各因素与其锚固力之间建立高度非线性映射,在较大程度上克服了传统的锚固力预测中的不足。

(3) 利用本文建立的预测模型,结合锚杆在加固高昌故城时的原位试验数据,验证了人工神经网络在该领域的适用性和可行性,为其他同类锚杆锚固力的预测提供了一种新的方法。

参 考 文 献

- 程良奎. 岩土锚固的现状与发展. 土木工程学报, 2001, 34(3): 7-8 (Cheng Liangkui. Present status and development of ground anchorages. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(3): 7-8 (in Chinese))
- Farmer IW. Stress distribution around resin grouted rock anchor. *International Journal of Rock Mechanics, Mining Science and Geomechanics Abstracts*, 1975, 12(11): 347-351
- Hawkes JM, Evans RH. Bond stresses in reinforced concrete columns and beams. *Journal of the Institute of Structural Engineers*, 1951, 24 (10): 323-327
- Signer SP. Field verification of load transfer mechanics of fully grouted roof bolts. Spokane, Department of the Interior, Bureau of Mines, RI9301, 1990
- Nitzche RN, Haas CJ. Installation induced stresses for roof bolts. *International Journal of Rock Mechanics, Mining Science and Geomechanics Abstracts*, 1976, 13(1): 17-24
- Serbousek MO, Signer SP. Linear Load-Transfer Mechanics of Fully Grouted Roof Bolts. Michigan: USA Dept of Interior, 1987
- Radcliffe DE, Stateham RE. Stress Distribution Around Resin Grouted Bolts. Michigan: USA Dept of Interior, 1980
- Fabjanczyk MW, Tarrant GC. Load transfer mechanisms in reinforcing tendons. In: Proceedings of the 11th International Conference on Ground Control in Mining, New South Wales, 1992
- Lewis M, Rimas P, Doug M. Determination of physical properties of cable bolts in cement grout pull tests using instrument King Wires. In: Canadian Institute of Mining Annual Conference, Vancouver, 2002
- 毛筱霏. 高昌故城遗址保护与锚杆加固应用技术研究. [博士论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009 (Mao Xiaofei. The protection of Gaochang site and research on consolidated technology of bolt. [PhD Thesis]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009 (in Chinese))
- 赵冬, 毛筱霏, 陈平. 土工长丝锚杆加固土建筑遗址研究. 工业建筑, 2008, 38(1): 114-116 (Zhao Dong, Mao Xiaofei, Chen Ping. Research on reinforcement of earthen architecture site with geo-filament anchor. *Industrial Construction*, 2008, 38(1): 114-116 (in Chinese))
- 焦李成. 神经网络计算. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995
- 周开利, 康耀红. 神经网络模型及其 MATLAB 仿真程序设计. 北京: 清华大学出版社, 2005
- 王涛, 岳丰田, 檀鲁新等. 白垩系地层冻结温度场实测与数值模拟分析. 煤炭技术, 2009, 28(3): 121-123 (Wang Tao, Yue Fengtian, Tan Luxin, et al. Analysis of actual measure and numerical for freeze temperature field in cretaceous stratum. *Coal Technology*, 2009, 28(3): 121-123 (in Chinese))
- 汪仁和, 李栋伟, 王秀喜. 井筒开挖下非线性冻结壁的应力场和温度场的计算. 上海交通大学学报, 2005, 39(11): 1862-1865 (Wang Renhe, Li Dongwei, Wang Xiuxi. Nonlinear model calculating frozen wall stress and displacement fields in shaft excavation. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2005, 39(11): 1682-1685 (in Chinese))
- 钟贵荣, 周国庆, 王建州等. 深厚表土层非均质冻结壁黏弹性分析. 煤炭学报, 2010, 35(3): 397-401 (Zhong Guirong, Zhou Guoqing, Wang Jianzhou, et al. Viscoelastic analysis of heterogeneous frozen wall in deep alluvium. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(3): 397-401 (in Chinese))
- 陈军浩, 汪仁和. 多圈管冻结下冻结壁温度场融化特性的实测研究. 中国煤炭, 2009, (12): 48-50 (Chen Junhao, Wang Renhe. A research on frozen wall temperature field thawing characters under multi-coil tube freezing. *China Coal*, 2009, (12): 48-50 (in Chinese))
- 陈远坤. 深厚冲积层井筒冻结压力实测及分析. 建井技术, 2006, 27(2): 19-21 (Chen Yuankun. Analysis on measurements of freezing pressure of shaft lining in deep thick alluvial strata. *Mine Construction Technology*, 2006, 27 (2): 19-21 (in Chinese))
- 李栋伟, 林斌. 深部冻结黏土蠕变损伤耦合本构模型及应用研究. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2011
- 李栋伟, 汪仁和, 胡璞. 多圈管冻结瞬态温度场有限元数值分析. 煤炭地质与勘探, 2007, 35(4): 38-41 (Li Dongwei, Wang Renhe, Hu Pu. FEM analysis of transient freezing temperature field of frozen multi-wall tube. *Coal Geology and Exploration*, 2007, 35(4): 38-41 (in Chinese))

(责任编辑: 胡 漫)

(上接第 49 页)

(责任编辑: 胡 漫)