

地表移动概率积分法计算参数的相关因素分析

李培现^{1,2}, 谭志祥^{1,2}, 邓喀中^{1,2}

(1. 中国矿业大学 国土环境与灾害监测国家测绘局重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学 江苏省资源环境信息工程重点实验室, 江苏 徐州 221116)

[摘要] 为建立地表移动的概率积分法计算参数与地质采矿条件之间的数学关系, 以我国主要矿区的大量地表移动观测站实测数据为原始数据, 采用逐步回归的方法建立了开采沉陷概率积分法参数与地质采矿条件之间的统计回归公式。采用中误差和威尔莫特一致性指数 (WIA, Willmott's Index of Agreement) 对回归公式的精度及预测能力进行评定, 计算结果表明所建立的回归公式误差较小, 各参数回归公式均具有较好的泛化性能。为进一步验证所建立的回归公式的正确性, 以4个测试样本数据进行计算, 计算结果与实测结果吻合。最后, 以淮北某矿地表移动实测数据为例, 计算结果表明采用统计规律所计算的概率积分法参数进行开采沉陷预计计算可以得到与实测相符的地表移动变形数据。研究成果为缺少实测资料矿区进行开采沉陷预测确定概率积分法参数提供了科学依据。

[关键词] 概率积分法; 回归分析; 统计规律; 地质采矿条件

[中图分类号] TD325.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-6225 (2011) 06-0014-05

Related Factors Analysis of Calculation Parameters of Probability Integral Method for Surface Movement

LI Pei-xian^{1,2}, TAN Zhi-xiang^{1,2}, DENG Ka-zhong^{1,2}

(1. State Survey Bureau Key Laboratory of Land Environment & Disaster Monitoring, China University of Mining & Technology,

Xuzhou 221116, China; 2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Resources Environment Information Engineering, China

University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to set up mathematical relationship of calculation parameters of probability method for surface movement and geological and mining condition, this paper set up a statistical regression relationship with gradual regression method based on amounts of surface movement data from Chinese main coal mining areas. Willmott's index of agreement was used to evaluate prediction effect. Results showed that the error of regression equation was small and every parameter regression formula took on better generalization. For fartherly verifying the regression equations, it calculated data of 4 testing samples and the calculation result was fit for actual observation data. Finally, taking surface movement data observed in a mine of Huaibei as an example, the paper applied probability integral parameters from statistical rules to predicting mining subsidence and results fit observation data well. This provided scientific reference for predicting mining subsidence in area where observation data was absent.

Key words: probability integral method; regression analysis; statistical rule; geological and mining condition

煤炭资源是我国的主要能源, 占一次性能源消耗的70%左右^[1]。矿山开采导致的覆岩及地表移动对矿山开采安全、环境与地面建筑物有很大的影响。据不完全统计: 我国煤炭开采现有沉陷土地约 $60 \times 10^4 \text{hm}^2$, 平均每采万吨煤塌陷土地 0.2hm^2 , 全国因煤炭开采每年新增塌陷地约 $5 \times 10^4 \text{hm}^2$, 煤矿开采沉陷造成了国民经济的巨大损失。因此, 对一个有计划的开采地表沉陷进行准确的定量计算对保护地表建筑物安全、保护环境、减小开采损害具有重要的意义^[2]。目前, 基于随机介质理论的概率积分法是我国开采沉陷预测的主要方法, 也是“规程”规定的开采沉陷预测方法之一^[1]。应用概

率积分法进行沉陷预测的关键是获得准确的开采沉陷预测参数。

目前, 获得概率积分法参数主要通过在工作面上方建立地表移动观测站, 采用观测站数据通过数据拟合的方法获得该工作面的概率积分法参数, 以指导邻近工作面或者相似地质采矿条件的开采沉陷预测^[3-4]。实测方法所获得的参数较为准确可靠, 但实测参数对指导所观测工作面的预测具有滞后性, 另外实测方法建立地表移动观测站需要耗费大量的人力、物力、财力, 一般观测时间较长, 无法满足矿山生产的需要^[5]。概率积分法参数受到开采深度、开采厚度、覆岩岩性、结构、煤层倾角、

[收稿日期] 2011-08-25

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (41071273); 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目 (CX10B_141Z)

[作者简介] 李培现 (1983-), 男, 山东巨野人, 博士研究生, 主要从事矿山开采沉陷、岩层控制及数字矿山方面的研究工作。

地质构造、地形地貌、开采方法、采动程度等诸多因素的影响,是地质采矿条件对开采沉陷影响的综合反应。本文在综合分析概率积分法参数的诸多影响因素的基础上,对国内主要矿区的实测数据进行统计回归计算,建立了采用地质采矿条件确定概率积分法参数的统计方法。研究成果对提高开采沉陷预测的准确性具有重要意义,对缺乏地表实测资料的矿区求取概率积分法参数具有重要的推广前景。

1 回归分析的模型及精度评价方法

1.1 回归分析模型

回归分析是研究一个随机变量与一个(或几个)可控变量之间的相关关系的统计方法,是处理变量之间相关关系的一种方法^[6-7]。

假设随机变量 y 与 G 个自变量 x_i ($i=1, 2, \dots, G$) 存在满足式(1)的相关关系。

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_Gx_G + \varepsilon, \text{ 其中 } \varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \quad (1)$$

当 x_1, x_2, \dots, x_G 取 m 个不同观测值 ($x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{Gi}$), $i=1, 2, \dots, m$, y 的样本 y_1, y_2, \dots, y_m 满足 $y_i = a_0 + a_1x_{1i} + a_2x_{2i} + \dots + a_Gx_{Gi} + \varepsilon_i$, 其中 $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$

根据最小二乘原理,求解以上的 G 个参数应使式(2)的条件满足最小。

$$\sum_{j=1}^m (y_j - \hat{y}_j)^2 = \sum_{i=1}^m [y_i - (a_0 + a_1x_{1i} + a_2x_{2i} + \dots + a_Gx_{Gi})]^2 \quad (2)$$

根据最小二乘原理建立并求解方程可以得到参数 a_0, a_1, \dots, a_G 的最大似然估计值。方程式(3)就称为 y 关于 x 的 G 元线性经验回归方程。

$$\hat{y} = \hat{a}_0 + \hat{a}_1x_1 + \hat{a}_2x_2 + \dots + \hat{a}_Gx_G \quad (3)$$

对于非线性回归问题,可以转换为线性回归分析问题后进行求解。

1.2 精度评价方法

为保证回归方程具有统计上的实际意义,必须对所建立的经验方程进行假设检验后才可以使使用。本文在显著性水平 $\alpha=0.01$ 的条件下,对所得到的经验方程进行回归显著性检验,保证所有回归经验公式符合显著性条件的基础上,采用建立的回归模型得到的概率积分法参数的中误差(MSE, Mean Square Error)对模型精度进行评价。中误差表示了所建立模型的拟合误差大小, MSE 可以采用式(4)进行计算。

$$m_b = \pm \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (4)$$

式中, m_b 为回归方程计算的中误差; y_i, \hat{y}_i 分别为

实测和预测地表移动概率积分法参数值; n 为参与回归分析的样本总个数。

预测模型的精度只表示所建立的函数模型对已知数据的拟合效果,但主要关注的应该是函数模型对未来值的实际预报效果。泛化性能是衡量所建立的函数模型预测能力的主要特征。良好的泛化性能是支持向量机的优点之一。本文采用威尔莫特一致性指数(WIA, Willmott's Index of Agreement)(式5)来评价所建立的回归经验模型的泛化性能。WIA 可对单个模型的外部预测能力是否达到统计所需精度给出度量,一般认为 WIA 大于 0.6 时模型才有实际预测价值^[8]。

$$WIA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{y}| + |\hat{y}_i - \bar{y}|)^2} \quad (5)$$

式中, y_i, \hat{y}_i 分别为实测和回归公式计算的地表移动概率积分法参数值, $\bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i/n$ 。

1.3 回归计算的步骤

采用回归分析的方法对矿山开采概率积分法参数进行计算,获得概率积分法参数与地质采矿条件之间的经验公式,主要由以下 5 步组成:

(1) 选择合适样本。充足的学习样本是进行数据回归拟合的前提与基础。我国各矿区在多年的开采沉陷研究中,积累了大量的观测站实测资料。文献[9]给出了 208 个典型观测站实测数据,部分观测站给出了地质采矿条件和实测概率积分法参数。因此,本文选择文献中所列典型数据作为数据回归分析的原始数据和测试数据。为测试所建立回归公式的计算结果,首先选择 4 组样本作为测试样本,不参与回归计算。

(2) 分析影响概率积分法的因素。采用单因素分析法计算概率积分法参数的各影响因素与地质采矿的相关系数,按照相关系数大小进行排序。

(3) 根据以上分析,建立多个模型进行回归计算。在显著性水平 $\alpha=0.01$ 的条件下对每一回归模型回归效果进行显著性检验。

(4) 对以上符合要求的模型采用逐步回归法选取最优的回归方程。

(5) 对回归经验公式的计算精度进行评价,以保证所得经验方程可满足矿山生产和工程需要。

2 概率积分法参数的影响因素及回归分析

大量的研究和实测资料表明,地表移动的概率

积分法参数与地质采矿条件之间存在紧密的关系。不同的地质采矿条件对概率积分法参数大小有很大的影响。

2.1 下沉系数 q

下沉系数 q 是在充分采动条件下，开采水平或近水平煤层时地表最大下沉值与采厚之比。大量研究表明下沉系数与覆岩岩性，开采深厚比、松散层厚度、采动程度、采动次数、采煤方法以及顶板控制方法有关^[10-11]。文献 [9] 中给出了下沉系数随着覆岩岩性的变化规律，随着覆岩平均坚固性系数 f 的增大，地表下沉系数减小。式 (6) 反应了覆岩岩性、采深、采厚对下沉系数的影响规律^[12]。

$$q = 0.991 - 0.238 \frac{E}{E_m} - 0.224 \frac{\rho H^2}{100E_m M} \quad (6)$$

式中， E 为岩体综合变形模量； E_m 为中硬岩体的变形模量，可取 $E_m = 3600\text{MPa}$ ； ρ 为岩体平均质量密度， g/cm^3 ； M 为开采厚度； H 为开采深度。

下沉系数还会受到重复采动的影响，使地表下沉值和下沉系数增大。由于受开采影响，松散层失水、土体固结沉降和压缩变形的影响会造成地表下沉量增加。采动程度也是影响下沉系数的重要因素，文献 [2] 指出对开采尺寸过小的工作面预计时应应对下沉系数进行修正。

根据以上分析和选择的样本数据，采用逐步回归法对单因素或多因素对下沉系数影响的显著性进行分析，经多次回归分析得出经验公式 (7)。

$$q = 0.13 \ln \frac{h}{H} - 0.02 \frac{D}{H} + 1.045 \pm 0.15 \quad (7)$$

式中， h 为松散层厚度， m ； D 为开采宽度， m 。

在 $\alpha = 0.01$ 的显著性水平下，采用式 (4)、(5) 对式 (7) 的结果进行评价，结果见表 1。

2.2 水平移动系数 b

水平移动系数 b 是在充分采动条件下，开采水平或近水平煤层时地表最大水平移动值与地表最大下沉值之比。水平移动系数受煤层倾角^[9]、采厚^[13]、开采宽度^[14]、松散层厚度^[15]、开采深度等的影响。首先，开采倾斜煤层时，指向上山的水平移动值增加，随着倾角的增大，水平移动系数增大。其次，松散层厚度对地表水平移动有很大影响，松散层的流变特性使松散层在随基岩移动的同时，本身以流动的形式充填基岩下沉的空间，使得水平移动系数随松散层厚度的增大而增大。松散层失水和变形压缩影响又使地表水平移动的程度和范围增大。另外，有研究表明水平移动系数随采厚的变化规律较为明显^[13]，有式 (8) 的统计特性。

$$b = 0.0063M + 0.27 \pm 0.12 \quad (8)$$

根据 152 组数据的统计结果，水平移动系数与岩性关系不大，随着岩性的改变，水平移动系数没有呈现明显的规律。因此，没有给出水平移动系数与岩性间的回归计算式。根据上述数据水平移动系数有如下的统计数据：处于 0.2 ~ 0.4 间的水平移动系数值占样本总量的 80.0%，样本平均水平移动系数为 0.296。这与我国水平煤层开采时水平移动观测值为 0.3^[10] 相吻合。因此，对我国大部分矿区水平煤层正常回采时水平移动系数取 0.3。

2.3 开采影响传播角 θ_0

开采影响传播角 θ_0 是在移动盆地倾向主断面上，按拐点偏移距求得的计算开采边界和地表下沉曲线拐点连线与水平线在下山方向的夹角。开采影响传播角是由煤层倾斜引起的，因此，主要受到煤层倾角的影响，有如式 (9) 的关系。

$$\theta_0 = 90^\circ - k\alpha \quad (9)$$

式中， k 的大小与覆岩岩性有关。覆岩越坚硬 k 值越大。一般坚硬岩层 k 取 0.7 ~ 0.8，中硬岩层取 0.6 ~ 0.7，软弱岩层取 0.5 ~ 0.6^[2]。

开采影响在厚松散层中是垂直上传播的，因此，开采影响传播角受到松散层厚度的影响，松散层厚度越大，开采影响传播角就越大^[15]。

根据以上分析和选择的样本数据，采用逐步回归法对单因素或多因素对开采影响传播角影响的显著性进行分析，经过多次回归分析得到式 (10) 的经验公式。

$$\theta_0 = 90^\circ - 0.587\alpha + 4.93207 \frac{h}{H} - \frac{2.84839}{f} \pm 4.3 \quad (10)$$

在 $\alpha = 0.01$ 的显著性水平下，采用式 (4)、式 (5) 对式 (10) 的结果进行评价，结果见表 1。

2.4 主要影响角正切 $\tan\beta$

主要影响角正切 $\tan\beta$ 是在走向主断面上走向边界采深与其主要影响半径之比。 $\tan\beta$ 大小受到覆岩岩性的影响。在开采深度相同的条件下，覆岩较软弱时开采主要影响半径较小， $\tan\beta$ 值较大。在岩性相同的条件下， $\tan\beta$ 大小随着采深的增大而增大^[10]。另外，重复采动会对主要影响半径的大小产生影响，重复采动工作面 $\tan\beta$ 值大于初次开采 $\tan\beta$ 的大小。

根据以上分析和选择的样本数据，采用逐步回归法对单因素或多因素对主要影响角正切影响的显著性进行分析，经过多次回归分析得到式 (11) 的经验公式。

$$\tan\beta = \ln(0.9296M - 0.1938\alpha + 0.2169 \frac{h}{H} +$$

$$1.3946 \frac{1000}{MD} + 3.16) \pm 0.5 \quad (11)$$

在 $\alpha = 0.01$ 的显著性水平下对公式进行检验, 检验结果见表 1。采用式 (4)、式 (5) 对式 (11) 的结果进行评价, 结果列于表 1。

2.5 拐点偏移距 S

自下沉曲线拐点按开采影响传播角作直线与煤层相交, 该交点与采空区边界沿煤层方向的距离即是拐点偏移距。拐点偏移距是由于顶板的悬臂作用引起的, 决定了地表下沉曲线的形状。拐点偏移距的大小与覆岩岩性、采动程度、采深、顶板控制方法、重复采动等因素有关^[16-17]。研究表明, 覆岩岩性和采深是影响拐点偏移距的主要因素。煤层顶板岩性越坚硬, 悬顶距越大, 拐点偏移距值就越大, 岩性软弱时 S 值小。拐点偏移距随着采深的增大而增大, 我国一般以 S/H 的值表示拐点偏移距大小^[29]。

根据以上分析和选择的样本数据, 采用逐步回归法对单因素或多因素对拐点偏移距影响的显著性进行分析, 经过多次回归分析得到式 (12) 的经验公式。

$$\frac{S}{H} = -0.0329 \ln M + 0.1229 \ln D + 0.0012 \frac{\ln D}{\ln M} + 0.023f - 0.6292 \pm 0.09 \quad (12)$$

在 $\alpha = 0.01$ 的显著性水平下对公式进行检验, 检验结果见表 1。采用式 (4)、式 (5) 对式 (12) 的结果进行评价, 结果列于表 1。

表 1 回归公式计算结果检验

	显著性检验	中误差	WTA	R
q	显著	0.15	0.80	0.70
θ_0	显著	4.30	0.88	0.92
$\tan\beta$	显著	0.50	0.77	0.70
S	显著	0.09	0.74	0.62

本文以覆岩平均坚固性系数 f 表示覆岩岩性对概率积分法参数的影响。覆岩坚固性系数可用式 (13) 计算求得。

$$f = \frac{\sum_{i=1}^n m_i Q_i}{10 \sum_{i=1}^n m_i} \quad (13)$$

式中, m_i 为覆岩 i 分层的法线厚度, m ; Q_i 为覆岩单向抗压强度, MPa。

2.6 计算结果分析

为测试回归公式计算结果的正确性, 选取 4 个典型观测站实测数据进行测试计算。测试样本的地质采矿条件见表 2。

采用本文回归公式计算结果与实测结果的比较见表 3。

表 2 样本地质采矿条件

观测站	采厚 /m	倾角 / (°)	平均采深 /m	工作面走向长 /m	工作面倾向长 /m	平均宽度 /m	松散层厚度 /m	平均单向抗压强度 /MPa
庞庄矿 502	2	16	98.5	205	82	143.5	64	35
兴隆庄矿 4314	8.2	4.3	325	1580	160	870	197	13
鲍店矿 1308	8.5	4	427.5	154	1270	712	194	22
马村矿 102 走向	6.6	8	122.5	198	90	144	18	40

表 3 经验公式计算结果与实测结果对比

参数类型		样本 1	样本 2	样本 3	样本 4
下沉系数	实测值 \ 预测值	0.92 \ 0.96	0.84 \ 0.93	0.83 \ 0.91	0.89 \ 0.77
	绝对误差	0.04	0.09	0.08	0.12
水平移动系数	实测值 \ 预测值	0.37 \ 0.3	0.23 \ 0.3	0.24 \ 0.3	0.33 \ 0.3
	绝对误差	0.07	0.07	0.06	0.03
开采影响传播角	实测值 \ 预测值	83 \ 83	85 \ 88	86 \ 89	87 \ 85
	绝对误差	0	3	3	2
主要影响角正切	实测值 \ 预测值	1.7 \ 1.3	2.3 \ 2.0	2.5 \ 2.0	2.5 \ 1.9
	绝对误差	0.4	0.3	0.5	0.6
拐点偏移距	实测值 \ 预测值	0.03 \ 0.04	0.06 \ 0.08	0.08 \ 0.07	-0.11 \ -0.08
	绝对误差	0.01	0.02	0.01	0.03

表 3 数据对比结果表明, 根据大量实测数据回归建立的经验公式可以建立开采概率积分法参数与地质采矿条件之间的关系, 所得结果误差较小, 可以满足工程需要, 该方法为缺乏实测数据的矿区确定概率积分法参数提供了可供参考的依据。

3 工程应用

3.1 工程概况

淮北某矿 7120 工作面上方地表地势平坦, 地面标高在 26.0m 左右, 地表为农田、村庄。7120

工作面开采 7₁ 煤，工作面标高为 -460 ~ -480m，平均采深 $H_0 = 496\text{m}$ 。工作面煤层结构简单，倾角平均为 10° ，煤层平均厚度 1.74m，实际回采厚度 2m。采用综合机械化采煤。7120 工作面走向长约为 1033m，倾向长平均约 156m。根据钻孔资料，该矿区属巨厚冲击层覆盖区域，松散层厚度约 345m，矿区岩层平均单向抗压强度可取 40MPa。

根据观测要求，7120 工作面观测站实际布设 1 条全倾向观测线和 1 条半走向观测线，观测站测点间距设计为 25m。

3.2 概率积分法参数的计算

根据观测站实测地表下沉和水平移动，依据最小误差平方和最小的原则采用模矢法^[18]求取地表移动的概率积分法参数实测值，计算结果见表 4。

为检验统计公式的计算准确性，采用本文所建立的统计公式计算 7120 工作面的概率积分法参数值，计算结果见表 4。

表 4 实测和统计公式所求概率积分法参数比较

	q	b	$\tan\beta$	θ_0	S/H
实测参数	0.96	0.35	1.75	87.5	0.03
统计参数	0.97	0.30	1.50	86.8	0.06
绝对误差	0.01	0.05	0.25	0.70	0.03

由表 4 统计数据可知，根据本文所建立的统计规律所求的概率积分法参数与实测参数绝对误差量不大，相对误差除拐点偏移距（与拐点偏移距 S/H 值过小有关）。采用实测概率积分法参数与统计参数分别进行开采沉陷预计，预计结果与实测结果比较如图 1 所示。

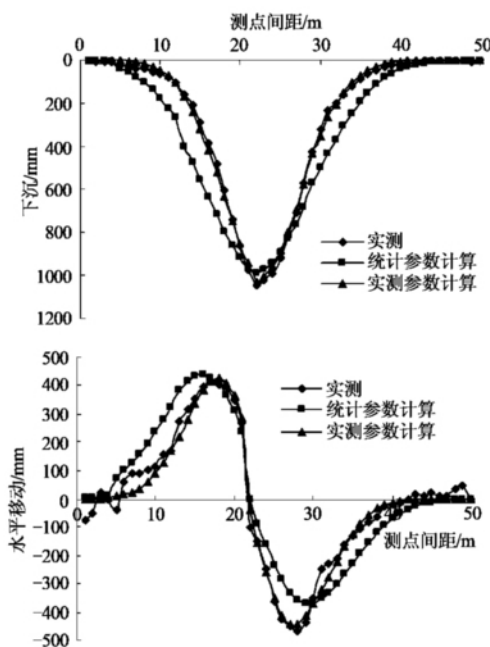


图 1 实测与预计结果比较

由图 1 的比较结果可知，采用统计规律的概率积分法参数与实测结果吻合。因此，综合表 4 和图 1 结果可知，采用统计规律所建立的经验公式可以用于求取概率积分法参数，计算结果可用于缺乏实测资料矿区的开采沉陷预计。

为进一步说明采用统计规律所计算的概率积分法参数进行开采沉陷预计的方法，采用表 4 中采用统计规律得到的概率积分法参数计算 7120 工作面开采后地表移动和变形值。7120 工作面地表下沉等值线如图 2 所示。同样方法可以得到 7120 工作面其他的移动和变形等值线。

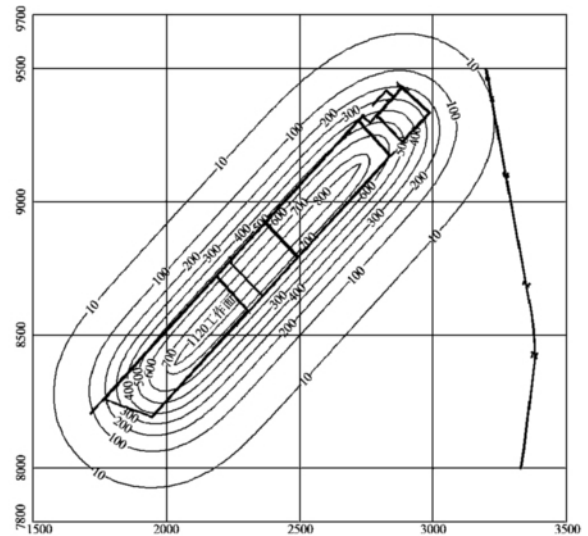


图 2 7120 工作面地表下沉等值线

4 结论

(1) 开采煤层上覆岩层的性质决定了开采沉陷预计参数。本文根据大量观测站数据，采用统计方法建立了根据地质采矿条件计算概率积分法参数的经验公式。根据中误差、相关系数及测试计算结果，表明采用覆岩地质采矿条件所建立的经验公式计算结果与实测概率积分法参数结果误差较小，可以作为估算概率积分法参数的依据。

(2) 以淮北某矿地表移动观测站实测数据进一步验证了采用统计公式计算概率积分法精度可以满足开采沉陷预计的要求，以工程实例说明了采用统计公式计算概率积分法参数及进行开采沉陷预测的方法。

[参考文献]

[1] 谭志祥, 邓喀中. 建筑物下采煤理论与实践 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009.

(下转 5 页)

