

# 采空区 CO 涌出量预测模型

齐庆杰<sup>1,2</sup>, 赵允信<sup>1,2</sup>, 李兴华<sup>2</sup>, 周新华<sup>1,2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:**为研究综放工作面 CO 涌出规律, 以指导工作面通风及解决采空区自燃防治问题, 以瑞安煤矿 1 煤层首采层 014N<sub>1</sub>-1 综放工作面为原型, 采用 COMSOL Multiphysics 5.0 建立采空区 CO 涌出量模型, 并开展正交试验设计及数值模拟计算。然后, 采用 SPSS 软件对模拟结果进行逐步回归, 建立了 CO 涌出量关于 CO 源项强度、CH<sub>4</sub> 源项强度、CO 反应速率、推进速度、风速等 5 个因素的回归模型, 并采用现场实测数据对其进行修正。结果表明: CO 涌出量与 5 个因素间均有极显著相关性, 修正后的 CO 涌出量预测结果与现场实测数据吻合度较高, 可以采用该模型进行采空区 CO 涌出预测, 有利于指导矿井通风、防灭火的现场实践工作。

**关键词:**采空区; CO 涌出量; 预测模型; 矿井通风

中图分类号: TD75

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2018)02-0182-05

## Prediction model of CO emission volume from goaf

QI Qingjie<sup>1,2</sup>, ZHAO Youxin<sup>1,2</sup>, LI Xinghua<sup>2</sup>, ZHOU Xinhua<sup>1,2</sup>

(1. School of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. MOE Key Lab of Mine Thermodynamic Disasters and Prevention, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** In order to study the CO emission law of the fully-mechanized coal mining face, to guide the ventilation of the coal mining face and to solve the spontaneous combustion prevention and control of the goaf, based on No. 014N<sub>1</sub>-1 fully-mechanized top coal caving mining face in the first mining seam-No. 1 seam of Rui'an Mine as a prototype, COMSOL Multiphysics 5.0 was applied to establish a CO numerical model of the goaf. And an orthogonal experimental design and a numerical simulation calculation were conducted. Then the SPSS software was applied to the stepwise regression of the simulation results. A regression model of the CO emission volume with five factors of the CO sources intensity, CH<sub>4</sub> source intensity, CO reaction velocity, pushing forward speed and air velocity and the site measured data were applied to correct the CO emission. The results showed that, there was an ultra obvious correlation between the CO emission volume and the five factors. The predicted results of the corrected CO emission volume could have a high fitting with the site measured data. The model could be applied to predict the CO emission from the goaf and favorable to guide the site practice work of the mine ventilation and the fire prevention and control.

**Key words:** goaf; CO emission volume; prediction model; mine ventilation

## 0 引 言

采煤工作面 CO 严重破坏了工作面生产环境, 危害井下工人的健康, 影响工作面正常生产。一些煤层本身赋存 CO, 加之采空区的 CO 涌出造成采煤工作面及巷道 CO 一定量蓄积, 这不仅会容易导致

自燃火灾预测预报的误报, 甚至直接威胁到井下工人的健康, 给正常的煤矿通风、安全生产工作带来重大影响<sup>[1-3]</sup>。

前苏联学者 И·В 卡连金及其研究团队在热平衡的基础上, 结合通风条件, 在绝热环境下提出了一个综合考虑煤堆水分、瓦斯以及反应过程中的吸附

收稿日期: 2017-09-26; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2018.02.025

基金项目: 中国博士后科学基金面上资助项目(2016M591451)

作者简介: 齐庆杰(1964—), 男, 辽宁朝阳人, 教授, 博士生导师。E-mail: 553663095@qq.com

引用格式: 齐庆杰, 赵允信, 李兴华, 等. 采空区 CO 涌出量预测模型[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(2): 182-186.

QI Qingjie, ZHAO Youxin, LI Xinghua, et al. Prediction model of CO emission volume from goaf[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(2): 182-186.

热和耗氧速率常数等因素的数学模型,为煤自然发火期的计算提供了依据。国内文献[4-5]在该模型的基础上以煤炭氧化过程中的放热和吸收热量升温的平衡为依据,建立了煤最短自然发火期解算模型及试验方法。文献[5-6]依据能量和质量守恒,构建了基于圆柱形煤柱试验平台的预测模型。通过相关理论研究和分析,提出煤体自然发火和比奥系数、导热系数、放热系数等有关<sup>[7-9]</sup>。刘剑等<sup>[10]</sup>采用多模型多级反应函数理论,处理和分析了热重试验所得相关数据,建立了最短自然发火期计算公式,根据此公式,结合煤的活化能等进行分析,可以确定其自然发火期。陆卫东等<sup>[11]</sup>在东北矿区大量样本数据及其训练数据处理的基础上建立了基于人工神经网络的最短发火期模型。目前关于采空区煤自燃模拟研究已经从一维发展到多维,从静态模拟发展到动态模拟,同时从单一物理场发展到多物理场耦合求解,笔者在前人的研究基础上,以瑞安煤矿 014N<sub>1</sub>-1 工作面为研究对象,采用 COMSOL Multiphysics 5.0 建立采空区 CO 涌出量预测数值模型,通过正交试验设计和逐步回归分析得到采空区 CO 涌出量预测模型,并结合现场实际开采情况对该模型进行修正,这对采空区 CO 涌出量预测具有重要意义。

## 1 采空区 CO 涌出量数值模拟

### 1.1 模型建立

2015 年 9 月 16 日至 2016 年 3 月 9 日,014N<sub>1</sub>-1 工作面共回采 558 m,其平均回采速度为 3.18 m/d;巷道平均风速为 1.4 m/s。煤层中 CO 含量最小为 0.000 24 m<sup>3</sup>/t,最大为 0.016 737 m<sup>3</sup>/t,采空区 CO 涌出量模型初始源项强度设置时取 CO 含量 0.01 m<sup>3</sup>/t,再对 CO 源项强度取值,分别为初始源项强度的 0.2、0.5、0.8、1.1、1.4、1.7 倍。根据煤层 CH<sub>4</sub> 含量为 0.25~2.33 m<sup>3</sup>/t,采空区 CH<sub>4</sub> 源项强度设置时取 CH<sub>4</sub> 含量 1.6 m<sup>3</sup>/t,然后再对 CH<sub>4</sub> 源项强度取值分别为初始源项强度的 0.3、0.6、0.9、1.2、1.5、2.0 倍。结合以上基本条件,对 5 个影响因素分别设置 6 个不同水平,具体参数取值见表 1。

### 1.2 正交试验设计

考察影响采空区 CO 涌出量的 5 个因素:CO 源项强度、CH<sub>4</sub> 源项强度、CO 反应速率、推进速度、风速(风量),每个因素设计考察 6 个水平,如果开

展全面模拟试验需要做  $6^5 = 7\,776$  组,为减少工作量并且保证试验的全面性、整体性和均匀性,采用 SPSS 22.0 对 5 因素 6 水平按照正交试验表 L<sub>49</sub>(6<sup>5</sup>)进行正交试验设计,见表 2。

表 1 参数取值范围

Table 1 Range of numerical value of parameters

水平	CO 源项 强度	CH <sub>4</sub> 源项 强度	CO 反应 速率	推进速度/ (m·d <sup>-1</sup> )	风速/ (m·s <sup>-1</sup> )
1	0.2	0.3	0.4	1	0.8
2	0.5	0.6	0.8	2	1.0
3	0.8	0.9	1.2	3	1.4
4	1.1	1.2	1.6	4	1.8
5	1.4	1.5	2.0	5	2.1
6	1.7	2.0	2.4	6	2.5

注:CO 源项强度,m<sup>3</sup>/t;CH<sub>4</sub> 源项强度,m<sup>3</sup>/t;CO 反应速率,m<sup>3</sup>/d。

## 2 采空区 CO 涌出量逐步回归计算

### 2.1 数据标准化

采用数据标准化转换方法对 49 组试验组( $i = 1, 2, 3, \dots, 49$ )的 CO 涌出量进行标准化,分别求解推进速度  $v_1$ 、CO 源项强度  $S_1$ 、CH<sub>4</sub> 源项强度  $S_2$ 、CO 反应速率  $R_1$ 、风速(风量)  $v_2$  等变量与采空区 CO 涌出量  $Y$  之间的函数关系。各计算参数均值如下:

$$\begin{aligned} \bar{v}_1 &= 3.142\,857\text{ m/d}, \bar{v}_2 = 1.485\,714\text{ m/s}, \bar{S}_1 = \\ &0.842\,857\text{ m}^3/\text{t}, \bar{S}_2 = 0.971\,428\text{ m/t}, \bar{R}_1 = 1.257\,142 \\ &\text{m}^3/\text{d}, \bar{Y} = 0.017\,447\text{ m}^3/\text{min}, \sigma_{v_1} = 1.807\,016, \sigma_{v_2} = \\ &0.619\,743, \sigma_{S_1} = 0.542\,104, \sigma_{S_2} = 0.589\,707, \sigma_{R_1} = \\ &0.722\,806, \sigma_Y = 0.009\,203. \end{aligned}$$

其中: $\sigma_{v_1}$ 、 $\sigma_{v_2}$ 、 $\sigma_{S_1}$ 、 $\sigma_{S_2}$ 、 $\sigma_{R_1}$ 、 $\sigma_Y$  为各变量的离差平方和的方根。标准化之后的变量分别记为  $Z_{v_1}$ 、 $Z_{v_2}$ 、 $Z_{S_1}$ 、 $Z_{S_2}$ 、 $Z_{R_1}$ 、 $Z_Y$ 。

$$\begin{aligned} Z_{v_1} &= \sum (v_{1i} - \bar{v}_1) / 49\sigma_{v_1}, Z_{v_2} = \sum (v_{2i} - \bar{v}_2) / 49\sigma_{v_2}, \\ Z_{S_1} &= \sum (S_{1i} - \bar{S}_1) / 49\sigma_{S_1}, Z_{S_2} = \sum (S_{2i} - \bar{S}_2) / 49\sigma_{S_2}, \\ Z_{R_1} &= \sum (R_{1i} - \bar{R}_1) / 49\sigma_{R_1}, Z_Y = (Y_i - \bar{Y}) / 49\sigma_Y \end{aligned}$$

对其开展非线性数据变换,生成  $Z_{v_1}^2$ 、 $Z_{v_2}^2$ 、 $Z_{S_1}^2$ 、 $Z_{S_2}^2$ 、 $Z_{R_1}^2$ 、 $Z_{v_1}Z_{S_1}$ 、 $Z_{v_1}Z_{S_2}$ 、 $Z_{v_1}Z_{R_1}$ 、 $Z_{S_1}Z_{S_2}$ 、 $Z_{v_2}Z_{S_1}$ 、 $Z_{v_2}Z_{S_2}$ 、 $Z_{S_2}Z_{R_1}$ 、 $Z_{S_1}Z_{S_2}$ 、 $Z_{S_1}Z_{R_1}$ 。因此,形成一组新的变量: $Z_{v_1}$ 、 $Z_{v_2}$ 、 $Z_{S_1}$ 、 $Z_{S_2}$ 、 $Z_{R_1}$ 、 $Z_Y$ 、 $Z_{v_1}^2$ 、 $Z_{v_2}^2$ 、 $Z_{S_1}^2$ 、 $Z_{S_2}^2$ 、 $Z_{R_1}^2$ 、 $Z_{v_1}Z_{S_1}$ 、 $Z_{v_1}Z_{S_2}$ 、 $Z_{v_1}Z_{R_1}$ 、 $Z_{S_1}Z_{S_2}$ 、 $Z_{v_2}Z_{S_1}$ 、 $Z_{v_2}Z_{S_2}$ 、

$Z_{v_2}Z_{R_1}, Z_{S_1}Z_{S_2}, Z_{S_1}Z_{R_1} \circ$

表2 采空区CO涌出量

Table 2 CO emission volume from goaf

编号	推进速度/ (m·d <sup>-1</sup> )	风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	CO源项强度/ (m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	CH <sub>4</sub> 源项强度/ (m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	CO反应速率/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	CO涌出量/ (m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )
1	3	1.8	0.2	1.2	2.0	0.009 301
2	2	1.8	1.4	0.6	1.6	0.023 418
3	1	1.0	1.7	0.9	1.6	0.030 657
4	1	1.4	1.1	1.5	0.4	0.014 952
5	4	1.4	1.7	1.2	1.2	0.026 639
6	3	2.5	1.1	0.3	1.6	0.020 504
7	2	0.8	1.1	0.9	0.8	0.021 027
8	3	1.4	0.8	0.6	0.8	0.013 838
9	6	2.1	0.2	1.5	1.6	0.007 268
10	1	1.4	0.2	0.9	2.4	0.011 879
11	5	0.8	0.2	0.3	0.8	0.009 745
12	6	2.5	1.7	0.3	0.4	0.025 994
13	5	0.8	1.7	0.6	2.0	0.040 074
14	1	0.8	1.4	2.0	0.4	0.021 858
15	1	1.8	1.7	1.5	0.8	0.023 871
16	1	2.1	1.1	0.3	2.0	0.020 387
17	5	1.0	1.1	1.2	0.4	0.016 621
18	5	2.5	0.8	1.5	2.4	0.017 348
19	5	1.4	0.5	2.0	1.6	0.012 503
20	1	1.0	0.8	0.3	1.2	0.017 529
21	3	1.0	1.4	0.3	2.4	0.035 578
22	4	1.8	1.1	2.0	2.4	0.021 538
23	4	0.8	1.4	1.5	0.4	0.022 977
24	1	2.5	0.5	0.6	0.4	0.008 173
25	4	2.5	0.2	0.9	2.0	0.008 113
26	1	0.8	0.2	0.3	0.4	0.005 713
27	3	0.8	0.5	0.9	0.4	0.010 105
28	2	1.0	0.5	1.5	2.0	0.017 225
30	3	2.1	1.7	2.0	0.4	0.023 909
31	2	1.4	0.2	0.3	0.4	0.004 382
32	4	1.0	0.2	0.6	0.4	0.005 352
33	1	0.8	0.8	2.0	2.0	0.022 329
34	1	2.1	0.2	0.6	2.4	0.009 162
35	5	1.8	0.2	0.3	0.4	0.004 206
36	6	1.8	0.8	0.9	0.4	0.011 767
37	1	1.8	0.5	0.3	1.2	0.010 337
38	3	0.8	0.2	1.5	1.2	0.010 816
39	1	0.8	0.2	1.2	1.6	0.012 792
40	5	2.1	1.4	0.9	1.2	0.022 512
41	1	2.5	1.4	1.2	0.8	0.021 998
42	4	0.8	0.8	0.3	1.6	0.025 427
43	2	2.1	0.8	1.2	0.4	0.011 780
44	4	2.1	0.5	0.3	0.8	0.009 535
45	6	1.4	1.4	0.3	2.0	0.028 383
46	6	0.8	0.5	1.2	2.4	0.024 340
47	6	0.8	1.1	0.6	1.2	0.025 565
48	2	0.8	1.7	0.3	2.4	0.043 214
49	6	1.0	0.2	2.0	0.8	0.006 909

2.2 模型的建立

采用 SPSS 22.0 对各变量进行逐步回归分析,见表3。随着步数的增加以及相应显著变量的引入,模型的 $R^2$ 逐渐增大,误差逐渐降低,最终经过10步计算建立了10步模型,其 $R^2=0.996$ ,符合工程及理论要求,说明所建模型合理。

表3 模型方差分析

Table 3 Model variance analysis

模型	$R^2$	调整 $R^2$	标准估计的误差	$R^2$ 更改	F值更改	Sig.
1	0.739	0.734	0.521 164 0	0.739	133.40	0
2	0.883	0.878	0.353 005 9	0.144	56.443	0
3	0.945	0.941	0.244 613 6	0.062	50.799	0
4	0.967	0.964	0.192 119 6	0.022	28.951	0
5	0.984	0.982	0.134 958 9	0.017	46.165	0
6	0.989	0.988	0.111 123 9	0.005	21.424	0
7	0.993	0.991	0.093 999 5	0.003	17.697	0
8	0.994	0.993	0.083 913 5	0.002	11.448	0
9	0.995	0.994	0.077 917 1	0.001	7.393	0
10	0.996	0.995	0.074 134 3	0.001	5.082	0.025

注:Sig.代表 $T$ 检验的显著值; $F$ 值用于检测变量是否显著,并根据 $F$ 值引入和剔除变量。

2.3 标准化残差分析

图1为标准化残差的直方图和正态概率图。根据图1,标准差为0.890,更加充分证明了模型的正确性。

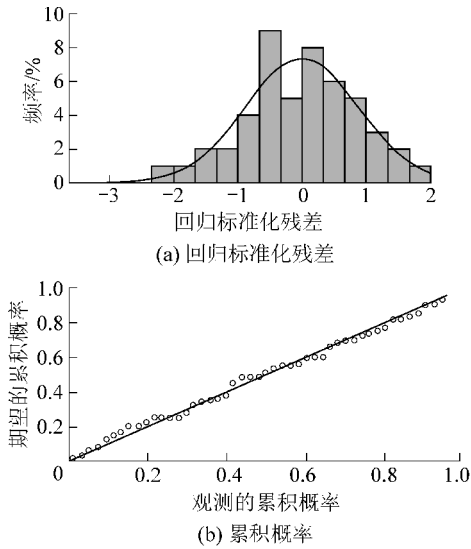


图1 模型标准化残差分析

Fig.1 Model standardized residual analysis diagram

以第10次逐步回归模型为代表模型,模型回归系数见表4。根据表4,建立如式(1)关于标准化之后的自变量的非线性方程,由于模型建立方程的 $R^2=0.996$ ,且所有变量包括常数项的Sig.均

为 0,所以该方程合理可靠,能从总体上反映工作面在推进过程中推进速度  $v_1$ 、CO 源项强度  $S_1$ 、CH<sub>4</sub> 源项强度  $S_2$ 、CO 反应速率  $R_1$ 、风速(风量)  $v_2$  及其相关影响因素的变化,进而确定采空区 CO 的绝对涌出量:

$$\begin{aligned} Z_{CO} = & -0.145 + 0.799Z_{S_1} + 0.376Z_{R_1} - \\ & 0.302Z_{v_2} - 0.155Z_{v_2}Z_{R_1} + 0.177Z_{v_2}^2 - 0.073Z_{S_2} \\ & + 0.07Z_{v_1} - 0.046Z_{S_2}Z_{R_1} + 0.025Z_{v_2}Z_{S_2} - 0.032Z_{v_1}^2 \end{aligned}$$

(1)

将式(1)中各变量还原成原始变量并调用 MATLAB 中的 simple(f) 函数最简化命令程序,得到最简化的函数,见式(2):

$$\begin{aligned} Y = & 44.3 + 10.48R_1 + 13.56S_1 - 0.826S_2 - \\ & 13.69v_2 + 0.923v_1 + 4.241v_2^2 - 0.993R_1S_2 - \\ & 3.184R_1v_2 + 0.63S_2v_2 - 0.09v_1^2 \end{aligned}$$

(2)

表 4 模型回归系数

项目	非标准化系数		标准化系数	T	Sig.
	系数 B	标准误差	系数 Beta		
常数项	-0.145	0.023	—	-6.350	0
$Z_{S_1}$	0.799	0.012	0.799	65.369	0
$Z_{R_1}$	0.376	0.011	0.376	35.312	0
$Z_{v_2}$	-0.302	0.012	-0.302	-25.930	0
$Z_{v_2}Z_{R_1}$	-0.155	0.011	-0.155	-13.738	0
$Z_{v_2}^2$	0.177	0.014	0.143	12.353	0
$Z_{S_2}$	-0.073	0.011	-0.073	-6.833	0
$Z_{v_1}$	0.070	0.011	0.070	6.209	0
$Z_{S_2}Z_{R_1}$	-0.046	0.012	-0.046	-3.810	0
$Z_{v_2}Z_{S_2}$	0.025	0.011	0.025	2.337	0.025
$Z_{v_1}^2$	-0.032	0.014	-0.032	-2.254	0.030

注: B 为第 10 步模型系数; Beta 代表回归系数,标准化的回归系数代表自变量也就是预测变量和因变量的相关,标准化使各个自变量以及因变量的单位统一,减少因为单位不同而造成的误差。T 值就是对回归系数的 T 检验的结果,绝对值越大, Sig. 就越小, Sig. 代表 T 检验的显著性,在统计学上, Sig. < 0.05 一般被认为是系数检验显著。

2.4 系数求解

表 4 中列出了逐步回归第 10 步的所有相关系数,根据表 4,引入模型 10 的所有变量和常数项的显著值几乎都为 0,说明各变量均与 CO 涌出量极显著相关,进一步证明了模型的合理性。

由拟合公式(2)可以看出,采空区 CO 涌出量受到 5 个因素的共同影响。工作面推进速度对 CO 涌出量的影响关系呈近似为“√”型,即推进速度由 0

增大到 5.1 m/d 时,采空区 CO 涌出量逐渐降低;当推进速度超过 5.1 m/d 后,随着推进速度的增大, CO 涌出量又逐渐增大, CO 涌出量随着风量的增加而减小,当风速为 5.6 m/s 时,对采空区 CO 涌出影响最小,但《煤矿安全规程》中规定工作面的最大风速不能超过 4 m/s,所以工作面只要提高风速,采空区 CO 涌出量就会有下降趋势。CO 涌出量与 CO 源项强度  $S_1$ 、CO 反应速率  $R_1$  成正比关系,与 CH<sub>4</sub> 源项强度  $S_2$  成反比。

2.5 预测模型准确性验证

采用采空区 CO 涌出量预测模型对 014N<sub>1</sub>-1 工作面 CO 涌出量进行计算,并根据 014N<sub>1</sub>-1 工作面监测系统实际测定和计算的 CO 含量进行对比验证。

监测地点 CH<sub>4</sub>、CO 含量测定地点选择在 014N<sub>1</sub>-1 综放工作面的运输巷和回风巷。在 014N<sub>1</sub>-1 综放工作面在运输巷外帮布置 2 个沿煤层倾向测试钻孔 N650、N670,其位置分别为距石门交叉点 650、670 m。在回风巷内帮 4 个沿煤层倾向测试钻孔 S520、S540、S560、S800、S820,其位置分别为距石门交叉点 520、540、560、800、820 m。在开切眼内布置 2 个测试钻孔 Q30、Q50,分别在距回风上隅角 30、50 m 处。监测数据为回风巷在该位置的 CO 浓度,根据当时回风巷的风速推算出实际 CO 涌出量,发现预测数据平均值约为实际数据平均值的 0.5 倍,因此需要对预测模型进行一定的修正,修正后,其平均 CO 涌出量为 0.024 275 m<sup>3</sup>/min,与实际涌出量 0.023 046 m<sup>3</sup>/min 非常吻合,符合工程和现场需要。根据预测数据、实际监测数据及修正数据绘制图 2,可以看出修正后的预测值与现场实际监测值走向基本一致,充分验证了模型的可靠性,可以采用该模型进行采空区 CO 涌出预测,以指导矿井通风、防灭火的现场实践工作,从而保障矿井安全生产。

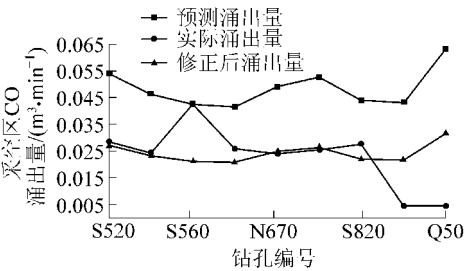


图 2 CO 涌出量数据对比曲线

Fig. 2 Data contrastive curves of CO volume



### 3 结 论

1) 将不同风速、CO 源项强度、CH<sub>4</sub> 源项强度、推进速度、CO 反应速率等 5 个因素各 6 个不同水平进行正交试验设计, 根据正交试验设计得到 49 组展开采空区 CO 数值模拟。根据 49 组不同影响因素下采空区 CO 涌出量数据, 结合 SPSS 软件中的逐步回归程序, 经过多步回归, 筛选出了显著性最强的变量。

2) 依据 49 组数据, 经过 10 步回归, 建立关于  $v_1$ 、 $v_2$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $R_1$  的回归模型, 通过模型分析和求解得出了常规回归和拟合方法得到的 5 个自变量同时存在的非线性回归方程, 经过与现场实际数据进行校正, 得到的校正后预测模型与现场实际数据吻合, 对量化指导矿井通风及防灭火设计与实施具有重要意义。

#### 参考文献 (References):

- [1] 王德明. 矿井火灾学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008.
- [2] 黄伯轩, 梁 冰. 采场通风理论研究与瓦斯、自然防治技术新发展[J]. 煤炭学报, 1997, 22(S1): 2-5.  
HUANG Boxuan, LIANG Bing. Theoretical research of stope ventilation and new development of prevention and control of gas and spontaneous combustion[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(S1): 2-5.
- [3] 李宗翔, 海国治, 秦书玉. 采空区风流移动规律的数值模拟与可视化显示[J]. 煤炭学报, 2001, 26(1): 76-80.  
LI Zongxiang, HAI Guozhi, QIN Shuyu. Numerical simulation and visual display of air flow pattern in goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(1): 76-80.
- [4] 余明高, 王清安, 范维澄, 等. 煤层自然发火期预测的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(4): 384-387.  
YU Minggao, WANG Qingan, FAN Weicheng, *et al.* Study on coal spontaneous forecast of combustion period [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001, 30(4): 384-387.
- [5] 余明高, 黄之聪, 岳超平. 煤最短自然发火期解算数学模型[J]. 煤炭学报, 2001, 26(5): 516-519.  
YU Minggao, HUANG Zhicong, YUE Chaoping. Mathematic model for calculating the shortest coal spontaneous combustion time[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(5): 516-519.
- [6] 邓 军. 煤自然发火预测理论及技术[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2001.
- [7] 徐精彩, 许满贵, 邓 军, 等. 基于煤氧复合过程分析的自然发火期预测技术研究[J]. 火灾科学, 2000, 9(3): 22-26.  
XU Jingcai, XU Mangui, DENG Jun, *et al.* The forecasting technique of natural ignition Time on the basis of the research of coal-oxygen reaction essence[J]. Fire Safety Science, 2000, 9(3): 22-26.
- [8] Btooks Kevin, Svanas Nicolaos, Glasser. Critical temperatures of some Turkish coals due to spontaneous combustion [J]. Journal of Mines, Metals & Fuels, 1988, 36(9): 434-436.
- [9] 邓 军, 张燕妮, 徐通模, 等. 煤自然发火期预测模型研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(5): 568-571.  
DENG Jun, ZHANG Yanni, XU Tongmo, *et al.* Study on prediction model of coal spontaneous combustion stage[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(5): 568-571.
- [10] 刘 剑, 陈文胜, 齐庆杰. 基于活化能指标的煤的自然发火期研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(2): 161-163.  
LIU Jian, CHEN Wensheng, QI Qingjie. Study on spontaneous combustion period of coal based on activation energy index[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2006, 25(2): 161-163.
- [11] 陆卫东, 王继仁, 单亚飞, 等. 基于 L-MBP 神经网络的煤自然发火期预测[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(6): 815-818.  
LU Weidong, WANG Jiren, SHAN Yafei, *et al.* Forecasting technique for spontaneous combustion stage on basis of L-MBP neural network[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2006, 25(6): 815-818.