

基于 PCA 的煤炭自然发火预测预报研究

王汉元¹, 贾宝山¹, 李守国^{1,2}, 金珂¹

(1. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 中国煤炭科工集团 沈阳研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110016)

摘要:为研究不同标志性气体对煤层自然发火可能性的准确预报,利用相关仪器对煤样进行程序升温氧化实验。以温度、CO、C₂H₄等10种原始数据为研究指标,通过多元统计学中的主成分分析法,对其进行主成分提取,并解释各主成分含义;命名第一主成分为“温度—CO因子”,第二主成分为“CO/CO₂—C₂H₄/C₂H₆因子”。从数据分析角度证明了温度、CO、CO/CO₂以及C₂H₄/C₂H₆对煤层自然倾向性的预报效果较好。在现场生产实践中,可以依据此估计煤层自然倾向性的程度。

关键词:煤层自燃; 指标气体; 主成分分析; 预测

中图分类号: P618.11; TD849 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2015)06-0119-04

Prediction of spontaneous combustion tendency of coal based on PCA

WANG Hanyuan¹, JIA Baoshan¹, LI Shouguo^{1,2}, JIN Ke¹

(1. College of Mining Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Shenyang Research Institute Co., Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Co., Ltd., Shenyang 110016, China)

Abstract: In order to study the accurate prediction of spontaneous combustion tendency of coal seam with different characteristics of gas, the temperature of coal sample was programmed using relevant instruments. Taking temperature, CO, C₂H₄ and other 10 kinds of raw data as research index, the principal of component extraction and explanation of each principal component were made by multivariate statistical principal component analysis method. The first and second principal components were named as Temperature -CO factor, CO/CO₂-C₂H₄/C₂H₆ factor respectively. The data analysis proved that the temperature, CO/CO₂, CO and C₂H₄/C₂H₆ had good effects on prediction of coal seam spontaneous combustion tendency.

Key words: coal seam spontaneous combustion; indicator gas; principal component analysis (PCA); prediction

0 引 言

煤自燃是威胁矿井安全生产的因素之一。为实现安全生产,相关学者对其做了大量研究。梁运涛^[1]进行了不同煤样的自燃试验,得出对于不同煤样在不同时间段会产生不同的指标气体,且在主要指标中至少包括自热加速阶段与激烈燃烧阶段。肖旻等^[2]使用各指标气体之间的比值,构建冀州矿地区煤自燃指标气体与温度的关系。何萍等^[3]指出对于不同阶段的煤应采用具有各自特点的指标气体进行研究。邵和等^[4]对收集各指标气体的检测系

统进行了研究。国外有用静态恒温法、可燃性法、非恒温动态法、计算机自动控制绝热量热法等对煤的自然倾向性进行预测^[5-7]。肖红飞等^[8]运用数学分析工具改进的BP算法对煤自燃进行危险性预测分析。蒋军成等^[9]在分析煤层样本的基础上,建立了预测煤层危险性的人工神经网络模型。胡文斌等^[10]对不同煤样采用程序升温热重分析法对煤的着火特性进行了研究。王继仁等^[11]对神东矿区的多个煤样进行热重分析,提出了采用着火活化能来预测煤自燃倾向性。为有效避免由于人为主观因素、地质条件等引起的误报,提高预测预报精确度。

收稿日期: 2015-07-30; 责任编辑: 孙淑君 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2015.06.028

基金项目: 基础研究重大项目前期研究专项(2011ZX05041-003)

作者简介: 王汉元(1990—),男,内蒙古商都人,硕士研究生,研究方向为矿井通风与安全。E-mail: hanyuanwang911@163.com

引用格式: 王汉元,贾宝山,李守国,等. 基于PCA的煤炭自然发火预测预报研究[J]. 洁净煤技术,2015,21(6):119-122.

WANG Hanyuan, JIA Baoshan, LI Shouguo, et al. Prediction of spontaneous combustion tendency of coal based on PCA[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(6): 119-122.

本文运用主成分分析法,通过对煤样的温度、CO 等数据的提取,分析得出煤自然发火可能性大小的主成分,对预测煤自燃提供了技术支持。

1 实验研究

1.1 煤样基本参数

实验选取煤田煤样 5 种,对其进行煤升温氧化

特性实验。煤田煤样基本参数见表 1。从表 1 中可以看出煤样的挥发分较高,含硫量较低;根据 GB/T 20104—2006《煤自燃倾向性色谱吸氧鉴定法》确定为 I 类——易自燃煤层。

1.2 煤样实验

现场采集煤样采用破碎机破碎至 1 mm 以下,使用振筛机和标准筛过筛制取粒径小于 0.15 mm

表 1 煤样基本参数

煤样	$M_{ad}/\%$	$A_{ad}/\%$	$V_{ad}/\%$	全硫含量/ $\%$	干煤吸氧/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	真相对密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
A	5.56	16.98	22.09	0.23	0.88	1.49
B	6.14	18.95	22.65	0.22	0.93	1.52
C	5.26	11.05	26.98	0.12	0.87	1.46
D	4.65	8.64	33.68	0.23	0.79	1.43
E	3.98	30.65	13.65	0.15	0.86	1.63

煤粉 1.0 g,将其置于磁盘中送到管式炉(图 1)中加热区域进行升温加热实验。实验期间,于炉一端通入合成空气其中 N_2 为 79%、 O_2 为 21%,供气流量为 $100 \text{ cm}^3/\text{min}$;于另一端排气,当温度加热到设定值时用气包进行收集。本次实验采用 GC-4085 型矿用气体多点参数色谱自动分析仪(图 2),随着温度的升高,对收集的气体进行分析检测。



图 1 管式炉



图 2 GC-4085 型色谱自动分析仪

过程中随着加热温度的不断升高,相继出现 CO 、 CO_2 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 与 C_2H_2 等标志性气体。在成煤过程中,由于煤质会不同程度的受到地质构造、火成岩侵入等影响,当煤层发生自燃时某些标志性气体会产生差异,预测煤层自燃会产生误报等不利后果。为了能够准确、快速、全面、有效的分析煤自燃问题,本位选取与煤自燃相关的 10 个指标作为研究对象,即:温度、 CO 、 CO_2 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 、 C_2H_2 、 CO/CO_2 、 $\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$ 与 $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ 各指标参数见表 2。

2.2 主成分分析

PCA(Principal component analysis)即:主成分分析,它是一种多指标统计方法,它可以将原来的多个变量转化为数目较少的综合指标,数学上分析属于降维处理^[12-13]。它可以在最大限度的保留原数据信息量的基础上,对多维变量进行综合度量简化维数,可以客观地对各指标的权重进行分析,避免了主观随意性。

表征煤层自燃倾向性的各数据统计见表 2。由表 2 中可以得到:对于同一煤样随着加热时间以及温度的变化,各指标呈现不同的变化趋势。将各数据整理得到一个 13×10 的矩阵,其中 13 行代表煤样对应的不同加热时刻,10 列代表煤样不同时刻的各指标值输入变量。这些数据构成了煤自燃倾向性判断的数据模型。利用科学统计学软件 SPSS20.0 对此数据进行主成分分析。通过计算得出相关性系数矩阵 R 。

2 煤自燃指标气体主成分分析

2.1 多元标志性气体指标选取

于实验室进行煤样程序升温氧化实验,实验

表 2 煤层自燃倾向性数据统计

温度/ ℃	$\varphi(\text{CO})/10^{-6}$	$\varphi(\text{CO}_2)/10^{-6}$	$\varphi(\text{CH}_4)/10^{-6}$	$\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/10^{-6}$	$\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)/10^{-6}$	$\varphi(\text{C}_2\text{H}_2)/10^{-6}$	$\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2)$	$\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)/\varphi(\text{CH}_4)$	$\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)/\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$
32	2.45	613.57	4.14	0	2.44	0	0.00399	0.58937	0
46	7.17	648.32	3.89	0	2.15	0	0.01106	0.55270	0
58	18.02	621.46	4.25	0	2.49	0	0.02896	0.58588	0
69	35.65	628.39	4.38	0	2.78	0	0.05673	0.63470	0
83	59.66	639.18	3.66	0	2.21	0	0.09334	0.60383	0
94	87.52	678.31	5.53	0	2.98	0	0.12903	0.53888	0
105	111.34	767.83	6.32	0.63	3.19	0	0.14501	0.50475	0.19749
126	139.63	854.59	7.24	1.55	4.32	0	0.16339	0.59669	0.35880
147	181.01	1087.63	9.11	3.55	5.79	0	0.16642	0.63557	0.61313
158	290.56	1198.31	10.68	5.77	7.35	0	0.24247	0.68727	0.78610
173	420.89	1639.34	11.96	7.55	9.77	0	0.25674	0.81689	0.77277
198	587.51	2472.18	13.27	9.21	14.13	0.34	0.23765	1.06481	0.65110
460	2971.13	163542.1	5438.52	342.37	788.08	2.03	0.01817	0.14491	0.43444

$$R = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.959 & 0.892 & 0.888 & 0.901 & 0.894 & 0.916 & 0.128 & -0.367 & 0.537 \\ 0.959 & 1.000 & 0.978 & 0.976 & 0.982 & 0.979 & 0.989 & -0.143 & -0.530 & 0.313 \\ 0.892 & 0.978 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 0.988 & -0.323 & -0.684 & 0.140 \\ 0.888 & 0.976 & 1.000 & 1.000 & 0.999 & 1.000 & 0.986 & -0.330 & -0.691 & 0.133 \\ 0.901 & 0.982 & 1.000 & 0.999 & 1.000 & 1.000 & 0.989 & -0.304 & -0.670 & 0.162 \\ 0.894 & 0.979 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 0.988 & -0.319 & -0.681 & 0.145 \\ 0.916 & 0.989 & 0.988 & 0.986 & 0.989 & 0.988 & 1.000 & -0.267 & -0.580 & 0.187 \\ 0.128 & -0.143 & -0.323 & -0.330 & -0.304 & -0.319 & -0.267 & 1.000 & 0.651 & 0.802 \\ -0.367 & -0.530 & -0.684 & -0.691 & -0.670 & -0.681 & -0.580 & 0.651 & 1.000 & 0.378 \\ 0.537 & 0.313 & 0.140 & 0.133 & 0.162 & 0.145 & 0.187 & 0.802 & 0.378 & 1.000 \end{bmatrix}$$

由相关矩阵 R 求出对应的特征根和标准特征向量以及各自的贡献率,见表 3。

表 3 主成分及方差贡献率

主成分	方差贡献率/%	累积贡献率/%
F_1	73.253	73.253
F_2	22.924	96.177

由表 3 可知前 2 项在总的方差中所占的权重分别为 73.253% 与 22.924%, 累计贡献率达到 96.177% (大于 85%)。即前 2 项指标能够反映煤自然发火性大小全部信息量的 96.177%, 因此可以提取前 2 项为主成分 F_1 、 F_2 。图 3 为特征值碎石图,从图中观测可以发现,第 2 个公因子之后的特征值变化趋势趋于缓和,故选取 2 个公因子较恰当。

前 2 个标准化成分得分系数矩阵见表 4。其中 $X_1 \sim X_{10}$ 为各自对应标准化样本数据变量。由此得

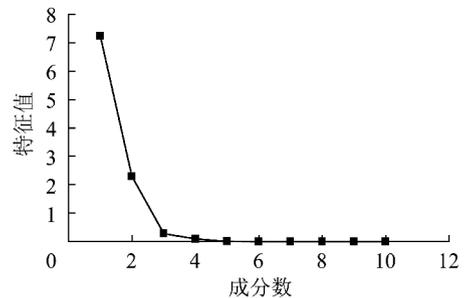


图 3 各项指标的特征值碎石图

到主成分表达式为:

$$F_1 = 0.144X_1 + 0.142X_2 + 0.134X_3 + 0.134X_4 + 0.135X_5 + 0.134X_6 + 0.136X_7 + 0.007X_8 - 0.062X_9 + 0.072X_{10}$$

$$F_2 = 0.167X_1 + 0.058X_2 - 0.028X_3 - 0.032X_4 - 0.018X_5 - 0.026X_6 + 0.004X_7 + 0.402X_8 + 0.262X_9 + 0.409X_{10}$$

表4 主成分得分系数矩阵

X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
0.144	0.142	0.134	0.134	0.135	0.134	0.136	0.007	-0.062	0.072
0.167	0.058	-0.028	-0.032	-0.018	-0.026	0.004	0.402	0.262	0.409

根据表达式可以看出,第一主成分 F_1 中 X_1 、 X_2 系数分别为 0.144、0.142 相比其他系数较大且为正值,命名第一主成分为“温度—CO 因子”,即反应了温度与 CO 这两个变量对煤自然发火的可能性起的作用较大;说明了温度越高,对煤自燃促进作用就会越大,相应产生的 CO 气体也就越多。

第二主成分 F_2 中 X_8 、 X_{10} 系数分别 0.402、0.409 相比较其他系数较大,第二主成分为“CO/CO₂—C₂H₄/C₂H₆ 因子”,说明 CO/CO₂ 与 C₂H₄/C₂H₆ 这 2 项指标对预测煤层自然发火起到主导性作用。这一结果与预测煤自燃很好吻合。这样就可以通过主成分表达式来判断煤层自然发火的可能性大小。对于现场生产实践而言,可以根据煤层温度、CO 以及 CO/CO₂、C₂H₄/C₂H₆ 对煤层自然发火可能性进行综合预报,结合主成分表达式对煤自燃的可能性以及危害程度进行估计,有利于及时采取降温等措施对煤自燃进行预防。

3 结 论

1) 结合主成分分析法,建立对于煤自然发火可能性大小的预测。通过对多元数据的降维处理,提取了 2 个主成分,简化了数据结构。根据主成分系数矩阵得出了主成分函数关系式,即可以通过较少的维数且互相正交的新变量来表征原始数据变量。

2) 从数据分析结果得出第一主成分为“温度—CO 因子”,第二主成分为“CO/CO₂—C₂H₄/C₂H₆ 因子”对预测煤层自燃倾向性预报效果较好。在现场生产实践中,可以依据此估计煤层自燃倾向性的程度,对煤层自燃防治及预报具有指导意义。

参考文献:

[1] 梁运涛. 煤炭自然发火预测预报的气体指标法[J]. 煤炭科学技术,2008,36(6):5-8.
 [2] 肖 旸,王振平,马 砾,等. 煤自燃指标气体与特征温度的对应关系研究[J]. 煤炭科学技术,2008,36(6):47-51.
 [3] 何 萍,王飞宇,唐修义,等. 煤氧化过程中气体的形成特征与

煤自燃指标气体选择[J]. 煤炭学报,1994,19(6):635-643.

- [4] 邵 和,周福宝,李金海,等. 矿井火灾束管监测系统存在问题分析及解决对策[J]. 煤炭工程,2010,42(3):80-82.
 [5] Feng K K. Spontaneous combustion of canadian coals[J]. CIM Bulletin,1985,78(5):71-75.
 [6] Btooks Kevin, Svanas Nicolaos, Glasser David. Critical temperatures of some turkish coals due to spontaneous combustion[J]. Journal of Mines, Metals and Fuels,1988,36(9):434-436.
 [7] Gouws M J, Gibbon G J, Wade L, et al. Adiabatic apparatus to establish the spontaneous combustion propensity of coal[J]. Mining Science and Technology,1991,13(3):417-422.
 [8] 肖红飞,刘黎明,王海桥,等. 改进 BP 算法在开采煤层自燃危险性预测中的应用[J]. 煤炭学报,2001,33(6):649-653.
 [9] 蒋军成,王省身. 开采煤层自燃危险性预测的人工神经网络方法[J]. 中国矿业大学学报,1997,26(1):19-22.
 [10] 胡文斌,杨海瑞,吕俊复,等. 煤着火特性的热重分析研究[J]. 电站系统工程,2005,21(2):8-9,12.
 [11] 王继仁,邓存宝,单亚飞,等. 煤的自燃倾向性新分类方法[J]. 煤炭学报,2008,33(1):47-50.
 [12] 张建民. 中国地下煤火研究与治理[M]. 北京:煤炭工业出版社,2008.
 [13] 张 渝,于明达,黄盼盼,等. 基于主成分分析法的煤层自燃影响因数研究——以乌达煤田为例[J]. 中国煤炭地质,2015,27(5):12-15.

(上接第 118 页)

- [14] 陈胜华,胡振琪,陈星彤,等. 煤矸石山酸化的内外因分析及防治措施[J]. 煤炭科学技术,2008,35(2):90-92.
 [15] Kucuk A, Kadoglu Y, Gulaboglu M S. A study of spontaneous combustion characteristics of a Turkish lignite: particle size, moisture of coal, humidity of air[J]. Combustion and Flame, 2003,133(3):255-261.
 [16] 刘 贝,黄文辉,敖卫华,等. 我国煤炭自燃影响因素分析[J]. 煤炭科学技术,2013,41(S2):218-221.
 [17] 曾凡宇,田云福,芦根玲,等. 西曲煤矿矸石山自燃火区探测及治理技术[J]. 煤炭科学技术,2012,40(6):41-43.
 [18] 王浩森,胡社荣,徐 方,等. 东胜矿区煤矸石堆自燃的控制因素及类型划分[J]. 中国矿业,2013,22(4):114-117.
 [19] Pan Rongkun, Yu Minggao, Lu Laixiang. Experimental study on explosive mechanism of spontaneous combustion gangue dump[J]. Journal of Coal Science and Engineering (China),2009,15(4):394-398.
 [20] 吴海军,曾凡宇,姚海飞,等. 矸石山自燃危险性评价及治理技术[J]. 煤炭科学技术,2013,41(4):119-123.