

# 多元逐步回归分析煤尘的凝并特性

杨 静<sup>1,2</sup>, 王英锋<sup>1</sup>, 吴亚敏<sup>1</sup>, 贾 杰<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学 化学与环境工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590)

**摘 要:**煤尘的凝并特性是影响喷雾降尘效率的重要因素。选取不同产地的煤为实验样品,进行工业分析和元素分析,对其结构参数、含氧官能团含量及其在溶液中的凝并性能进行测定;利用 SPSS19.0 软件,采用多元线性逐步回归分析法研究煤尘的上述参数对煤尘凝并特性的影响。研究表明:影响煤尘在水中凝并特性的主要因素是煤中水分( $M_{ad}$ )、挥发分( $V_{ad}$ )、煤表面酚羟基官能团含量(phenolic hydroxyl, PhOH)以及芳碳率( $F_A$ )。最优回归方程的复相关系数为 0.983,线性关系显著,拟合优度较高,煤尘凝并特性的研究对有针对性地开发矿井降尘剂具有重要指导作用。

**关键词:**煤尘;凝并特性;多元逐步回归

中图分类号:TD714

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2015)03-0085-06

## Multiple Stepwise Regression Analysis of Coal Dust's Coagulation

Yang Jing<sup>1,2</sup>, Wang Yingfeng<sup>1</sup>, Wu Yamin<sup>1</sup>, Jia Jie<sup>1</sup>

(1. College of Chemical and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology,

Qingdao, Shandong 266590, China; 2. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control

Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology,

Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** The coagulation characteristic of coal dust is one of the important factors affecting the efficiency of dust suppression by spraying. Based on coal samples selected from different regions, this research measured their structure parameters, their content of oxygen containing functional groups and their coagulation performance in solution through industrial analysis and element analysis. With the help of SPSS19.0 and multiple linear stepwise regression analysis, the parameters' effect on the coagulation of coal dust was studied. The research shows that the content of moisture ( $M_{ad}$ ), volatile matter ( $V_{ad}$ ), and the content of phenolic hydroxyl groups on the surface and aromatic carbon rate ( $F_A$ ) are the major factors affecting coal dust's coagulation in water. The complex correlation coefficient for optimal regression equation is 0.983, showing significant linear relationship and higher goodness-of-fit. The study of coal dust's coagulation plays an important guiding role in the development of dust suppressant in coal mines.

**Key words:** coal dust; coagulation characteristic; multiple stepwise regressions

煤炭生产过程中产生的大量煤尘,不仅严重危害矿工的身心健康,而且会降低设备使用寿命和精度,特别是具有爆炸性的煤尘,浓度过高时会发生煤尘爆炸,严重威胁矿井的安全生产<sup>[1]</sup>。为降低矿尘浓度,各种

收稿日期:2014-11-17

基金项目:国家自然科学基金—煤炭联合基金重点项目(U1261205);青岛市科技计划基础研究项目(13-1-4-149-jch);青岛经济技术开发区重点科技发展计划项目(2013-1-66);青岛市建设事业科技发展项目(JK2013-9);矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地开放基金项目(MDPC2013KF09)

作者简介:杨 静(1969—),女,山东泰安人,教授,博士,主要从事为煤尘基本特征及化学降尘技术的研究。

E-mail: kdyangjing@163.com

新的降尘手段不断产生。化学降尘技术(包括泡沫除尘、水中添加降尘剂、粘尘剂等)逐渐受到重视,成为研究热点<sup>[2-6]</sup>。

煤尘的凝并特性是影响化学降尘效率的重要因素<sup>[7]</sup>。例如在煤矿喷雾降尘过程中,降尘效率主要取决于细微尘粒被液滴捕获后的沉降效率,细颗粒物料的沉降主要取决于该颗粒体系的分散与凝并状态,因此尘粒的凝并特性是决定尘粒捕获效率的主要因素之一<sup>[8]</sup>。为研究煤尘的凝并机理及影响煤尘凝并特性的因素,有针对性地采取有效的降尘措施,本研究通过实验测定不同煤尘的元素分析、工业分析以及表面官能团含量,利用 SPSS19.0 软件,采用多元逐步回归分析法研究煤尘的元素分析、工业分析以及表面官能团含量等参数对煤尘在溶液中凝并特性的影响,建立煤尘的主要影响参数与凝并特性的最佳回归模型<sup>[9]</sup>。

## 1 实验部分

### 1.1 煤尘样品的制备

采用亭南、上湾、五沟、白庄、龙口、孙村、山西、回坡底、榆树湾、大柳塔等地的煤样共 10 种,用破碎机破碎后,用振动磨研磨至合适的粒径,作为实验煤尘。

### 1.2 煤尘的工业分析和元素分析

煤的工业分析也称煤的实用分析或技术分析<sup>[10]</sup>,其内容包括水分、灰分、挥发分和固定碳含量四项测定;实验严格参照国家标准 GB/T212—2001《煤的工业分析方法》对煤进行工业分析。

元素分析是煤质研究的主要内容,利用元素分析数据并配合其他工艺性质试验,可以了解煤的成因、类型及结构及性质。实验选用德国 Elementar 公司 VarioEL III 型元素分析仪,严格按照国家标准 GB/T476—2001《煤的元素分析方法》的 C、H、N、S 的分析方法对煤样进行元素分析,而“氧”的含量则是在测定了“碳、氢、氮、硫”后由“差减法”计算得到。10 种煤样的工业分析和元素分析数据见表 1。

表 1 煤尘工业分析数据和元素分析数据  
Tab. 1 Coal industrial analysis data and element analysis data

编号	产地	工业分析				元素分析				
		$M_{ad}/\%$	$A_{ad}/\%$	$V_{ad}/\%$	$FC_{ad}/\%$	$C_{daf}/\%$	$H_{daf}/\%$	$N_{daf}/\%$	$S_{daf}/\%$	$O_{daf}/\%$
1#	白庄	1.54	5.60	30.56	62.29	53.20	39.43	0.95	0.14	6.28
2#	龙口	1.85	2.80	60.02	35.33	52.07	40.88	0.86	0.15	6.04
3#	大柳塔	9.33	5.24	52.25	33.18	48.11	39.30	0.53	0.06	12.00
4#	回坡底	1.30	32.47	20.02	46.21	49.37	31.50	0.57	0.10	18.46
5#	上湾	10.47	6.06	52.26	31.21	48.76	37.30	0.45	0.65	12.84
6#	五沟	1.86	7.59	50.80	39.75	48.67	41.00	0.80	0.13	9.40
7#	亭南	3.60	20.03	22.22	54.15	47.96	34.05	0.40	0.05	17.54
8#	榆树湾	5.49	2.95	34.12	57.44	48.80	41.46	0.59	0.07	9.08
9#	山西	1.00	14.25	12.36	72.39	63.22	34.38	0.76	0.79	0.85
10#	孙村	1.10	7.15	5.25	86.50	62.33	31.09	0.83	0.17	5.58

### 1.3 煤尘结构参数的表征

煤的结构非常复杂,其基本结构通常采用氢碳比、氧碳比、芳碳率( $F_A$ )、环缩合度指数  $I(I = 2(R - 1)/C)$  及缩合环数( $M$ )等参数描述<sup>[11]</sup>。 $F_A$  指煤的基本结构单元中,属于芳香族的碳原子数与总的碳原子数的比。 $I$  指结构单元中的环形缩合成环的程度, $R$  表示结构单元中缩合环的数目, $C$  表示结构单元中的碳原子数目。10 种煤样的结构参数表征见表 2。

表 2 煤尘结构参数表征

Tab. 2 The characterization of coal dust's structure parameters

编 号	$n$ (H/C)	$n$ (O/C)	$F_A$	$I$	$M$
1#	0.741 2	0.120 7	0.840 2	0.418 6	1.111 4
2#	0.785 1	0.119 0	0.484 0	0.730 9	1.190 3
3#	0.816 9	0.250 6	0.655 4	0.527 7	1.127 0
4#	0.638 0	0.376 0	1.217 6	0.144 4	1.035 6
5#	0.764 9	0.276 7	0.683 2	0.551 9	1.134 6
6#	0.842 4	0.195 9	0.646 5	0.511 2	1.124 4
7#	0.709 8	0.366 7	1.174 8	0.115 3	1.027 7
8#	0.849 6	0.187 3	0.853 2	0.297 2	1.072 5
9#	0.543 9	0.026 0	0.956 2	0.500 0	1.158 0
10#	0.498 7	0.092 3	1.088 7	0.412 6	1.128 6

### 1.4 煤尘含氧官能团含量测定

由于煤中氧含量及氧的存在形式对煤的性质影响很大,因此对煤样进行含氧官能团的分析尤为重要。实验采用化学分析法测定了煤尘样品中羧基与酚羟基的含量,10种煤样的测定结果见表3。

### 1.5 煤尘凝并性能的测试

前期实验研究<sup>[7]</sup>表明,浓度为0.04%的聚丙烯酰胺(polyacrylamide, PAM)对煤尘具有较好的凝并性能,因此本实验通过测定煤尘在0.04%PAM水溶液中的透过率来研究煤尘凝并特性。方法如下:称取0.05g煤粉于250mL烧杯中,加入100mL配制好的凝并剂溶液。然后在磁力搅拌器上搅拌5min,静置5min后用分光光度计测其透过率。10种煤样的透过率见表4。

## 2 煤尘凝并特性影响因素的多元逐步回归分析

### 2.1 回归模型的建立

多元逐步回归分析是通过实验寻找一个因变量和若干个自变量之间相关关系的一种统计分析方法。基本思路是首先建立因变量Y和自变量X的线性回归方程,其次对方程和各个自变量进行假设性检验,同时自变量之间也存在共线性问题,有较强的相关性。当某个自变量 $X_1$ 对Y影响不显著时,会把它从回归方程中剔除,重新建立不包含该自变量 $X_1$ 的多元线性回归方程,并筛选出有显著影响的自变量,以此来建立“最优”回归方程<sup>[12-14]</sup>。

煤尘的凝并特性,受煤自身组成和结构等各方面的影响。从化学观点来看,煤是由无机组分和有机组分组成的。因其影响着煤尘在水中的凝并特

表 3 煤尘含氧官能团含量

Tab. 3 The content of Coal dust's oxygen containing functional groups mmol · g

煤尘编号	总酸性基	总羧基	酚羟基
1#	0.30	0.10	0.20
2#	2.90	1.20	1.70
3#	2.50	1.80	0.70
4#	0.85	0.25	0.60
5#	1.25	0.80	0.45
6#	2.20	1.05	1.15
7#	2.40	1.10	1.30
8#	2.05	0.80	1.25
9#	1.00	0.40	0.60
10#	1.40	0.55	0.85

表 4 不同煤尘在水溶液中的透过率

Tab. 4 Different coal dust transmittance in aqueous solution

煤尘编号	透过率/%	煤尘编号	透过率/%
1#	90.90	6#	93.10
2#	91.50	7#	94.90
3#	94.20	8#	93.20
4#	91.50	9#	92.30
5#	95.50	10#	94.20

性,煤分子表面官能团结构的研究也一直是煤尘研究的重点。利用 SPSS19.0 软件,采用多元逐步回归分析法对不同煤尘在溶液中的凝并特性,与其对应固定碳、挥发分、灰分、水分、碳摩尔分数、氢摩尔分数、氧摩尔分数、氮摩尔分数、硫摩尔分数、碳氢比、碳氧比、芳碳率、平均缩环数、表面官能团(包括总酸性基、总羧基、酚羟基)等 17 种参数进行相关性分析,优选出最具影响的几个参数,并建立煤尘的主要影响参数与凝并特性的相关回归模型。

## 2.2 回归分析结果及讨论

利用 SPSS19.0 软件<sup>[15]</sup>,多元回归分析结果见表 5、表 6 和表 7。

从表 5 可以看出:用线性逐步回归分析,以  $F$  检验和  $t$  检验为剔除变量原则,经过四步线性选择,筛选出具有显著影响的自变量,即最后方程中保留的自变量为“水分”、“挥发分”、“酚羟基”和“芳碳率”。此时“最优”回归方程的复相关系数  $R=0.983$ ,样本决定系数  $R^2=0.965$ ,调整决定系数  $R'^2=0.938$ ,都非常接近于 1.0。说明用水分、挥发分、酚羟基和芳碳率 4 个因素与凝并性的拟合优度较高。

表 6 是回归分析的方差分析表,是在显著性水平  $\alpha=0.01$  的条件下,对所得的“最优”线性回归方程作  $F$  检验,从而检验总体回归方程是否显著。由表 7 可以看出,“最优”回归方程的统计量值  $F=34.961$ ,实际显著性水平即  $P$  值,  $P=0.001 < \alpha=0.01$ ,所以此回归方程线性关系显著。

表 5 统计结果

Tab. 5 The statistical results

模型	R	R <sup>2</sup>	R' <sup>2</sup>	标准估计的误差	更改统计量				
					R' <sup>2</sup> 更改	F 更改	df1	df2	P 值
1	0.759 <sup>a</sup>	0.576	0.523	1.080	0.576	10.856	1	8	0.011
2	0.875 <sup>b</sup>	0.765	0.698	0.858	0.190	5.662	1	7	0.049
3	0.947 <sup>c</sup>	0.896	0.844	0.616	0.131	7.569	1	6	0.033
4	0.983 <sup>d</sup>	0.965	0.938	0.389	0.069	10.022	1	5	0.025

注: a. 预测变量-(常量),水分; b. 预测变量-(常量),水分,  $F_A$ ; c. 预测变量-(常量),水分,  $F_A$ , 酚羟基; d. 预测变量-(常量),水分,  $F_A$ , 酚羟基, 挥发分; e. 因变量-透过率

表 6 方差分析表

Tab. 6 Analysis of variance table

模型		平方和	df(自变量个数)	均方	F	P 值
1	回归	12.678	1	12.678	10.856	0.011 <sup>a</sup>
	残差	9.343	8	1.168		
	总计	22.021	9			
2	回归	16.856	2	8.428	11.423	0.006 <sup>b</sup>
	残差	5.165	7	0.738		
	总计	22.021	9			
3	回归	19.737	3	6.579	17.285	0.002 <sup>c</sup>
	残差	2.284	6	0.381		
	总计	22.021	9			
4	回归	21.261	4	5.315	34.961	0.001 <sup>d</sup>
	残差	0.760	5	0.152		
	总计	22.021	9			

注: a. 预测变量-(常量),水分; b. 预测变量-(常量),水分,  $F_A$ ; c. 预测变量-(常量),水分,  $F_A$ , 酚羟基; d. 预测变量-(常量),水分,  $F_A$ , 酚羟基, 挥发分; e. 因变量-透过率

表 7 回归系数表  
Tab. 7 Regression coefficient table

模型		非标准化系数		标准系数		T	P 值
		B(各因素前的系数)	标准误差	试用版			
1	(常量)	90.403	0.895			100.964	0
	水分	1.115	0.338	0.759		3.295	0.011
2	(常量)	77.722	5.376			14.456	0
	水分	0.924	0.281	0.629		3.293	0.013
	$F_A$	14.895	6.260	0.455		2.380	0.049
	(常量)	72.398	4.319			16.762	0
3	水分	0.960	0.202	0.653		4.751	0.003
	$F_A$	19.498	4.797	0.595		4.065	0.007
	酚羟基	1.333	0.485	0.391		2.751	0.033
	(常量)	92.531	6.921			13.370	0
4	水分	1.315	0.170	0.895		7.736	0.001
	$F_A$	9.051	4.481	0.276		2.020	0.099
	酚羟基	2.100	0.390	0.616		5.378	0.003
	挥发分	-0.395	0.125	-0.522		-3.166	0.025

a. 因变量—透过率

由表 7 得出,煤尘凝并性的最优回归方程为:

$$T = 92.531 + 1.315 M_{ad} + 9.051F_A + 2.100 n(\text{PhOH}) - 0.395 V_{ad}。$$

即对煤尘的凝并性影响最显著的四个参数是水分、挥发分、酚羟基和芳碳率。显著性检验( $t$  检验)结果表明:水分、挥发分、酚羟基和芳碳率的实际显著性水平  $P$  值分别为 0.001,0.025,0.003,0.099,所以自变量水分、挥发分、酚羟基和芳碳率对透过率的线性作用显著,拟合优度较高,说明这 4 个参数为影响煤尘在溶液中凝并特性的主要因素。

由实验结果看出:①煤尘在水中的凝并特性与芳碳率  $F_A$  呈正相关。可能是因为  $F_A$  含量越高,即煤分子中芳香烃的含量越高,煤分子的疏水作用越强,在水中的溶剂化作用会越弱,从而导致煤尘更易被吸附或团聚,即煤分子易于通过凝并结合成较大的基团而发生沉降;②煤尘在水中的凝并特性与挥发分呈负相关。这是因为:煤的挥发分主要来自于煤分子上不稳定的脂肪侧链、含氧官能团断裂形成的小分子化合物以及煤的有机质高分子缩聚时生成的氢气等。随着挥发分的降低,煤分子上脂肪侧链和含氧官能团的下降,芳碳率提高,煤尘在水中越易发生凝并,从而使煤尘在水中的凝并特性与挥发分呈负相关;③煤尘在水中的凝并特性与水分和酚羟基成正相关,可能是因为:水分和酚羟基具有亲水作用,两者含量越高,煤尘亲水性越好,越易被水润湿,润湿后煤尘自身重量增加,易发生沉降而产生凝并。

### 3 结论

由多元逐步回归分析得到影响煤尘凝并特性的最优回归方程为

$$T = 92.531 + 1.315 M_{ad} + 9.051F_A + 2.100 n(\text{PhOH}) - 0.395 V_{ad}。$$

说明影响煤尘在水中凝并特性的主要因素是煤中水分、挥发分的含量、煤尘表面酚羟基官能团含量以及芳碳率。煤中水分含量、酚羟基官能团含量以及芳碳率的含量越高,透过率的数值越大,煤尘在水中的凝并特性就越好;煤中挥发分的含量越高,透过率的数值越小,煤尘在水中的凝并特性就越差。其他参数则与煤尘的透过率(即凝并特性)无显著相关性。

参考文献:

- [1] 乔玉霜,王静,王建英.城市大气可吸入颗粒物的研究进展[J].中国环境监测,2011,27(2):22-25.  
Qiao Yushuang,Wang Jing,Wang Jianying. Research progress of the inhalable particles in the urban air[J]. Environmental Monitoring in China,2011,27(2):22-25.
- [2] 杨静,刘丹丹,祝秀林,等.化学抑尘剂的研究进展[J].化学通报,2013,76(4):346-353.  
Yang Jing,Liu Dandan,Zhu Xiulin,et al. Progress of chemical dust suppressant[J]. Chemistry,2013,76(4):346-353.
- [3] Cheng W M,Nie W,Zhou G,et al. Research and practice on fluctuation water injection technology at low permeability coal seam [J]. Safety Science,2012,50(4):851-856.
- [4] Oleszczak P,Klmens R. Mathematical modeling of dust-air mixtures explosion suppression [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2006,19(6):187-193.
- [5] 孙兆朋,王元元,李心秋.薄煤层矿井开采综合防尘技术研究[J].山东科技大学学报:自然科学版,2014,33(2):67-74.  
Sun Zhaopeng,Wang Yuanyuan,Li Xinqiu. Comprehensive dust control technology in mining thin coal seam[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology:Nature Science,2014,33(2):67-74.
- [6] 彭小兰,吴超.化学抑尘剂新进展的研究[J].中国安全生产科学技术,2005,1(5):44-47.  
Peng Xiaolan,Wu Chao. Progress of chemical dust suppressants and their applications[J]. Journal of Safety Science and Technology,2005,1(5):44-47.
- [7] Yang J,Liu D D,Liu B J,et al. Research on mine dust fall agents based on the mechanism of wetting and coagulation[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials,2014,21(3):205-209.
- [8] 吴超.化学抑尘[M].长沙:中南大学出版社,2003:25-38.
- [9] 高建广,杨静.基于多元逐步回归的煤尘润湿性研究[J].煤矿安全,2012,43(1):126-129.  
Gao Jianguang,Yang Jing. Study of coal dust wettability based on multiple stepwise regression analysis[J]. Safety in Coal Mines,2012,43(1):126-129.
- [10] 解维伟.煤化学与煤质分析[M].北京:冶金工业出版社,2012:77-92.
- [11] 杨静.煤尘的润湿机理研究[D].青岛:山东科技大学,2008:54-62.
- [12] 夏天.浅谈在应用回归分析课程中运用多媒体教学[J].科教文汇,2013(248):41-43.  
Xia Tian. Introduction to the application of the multimedia in teaching in the course of applied regression analysis[J]. The Science Education Article Collects,2013(248):41-43.
- [13] 孙逸敏.利用SPSS软件分析变量间的相关性[J].新疆教育学院学报,2007,23(2):120-123.  
Sun Yimin. Using SPSS software to analyze the correlation between variables[J]. Journal of Xinjiang Education Institute, 2007,23(2):120-123.
- [14] 冯力.回归分析方法原理及SPSS实际操作[M].北京:中国金融出版社,2004:55-72.
- [15] 胡作维,黄思静,王冬焕,等.多元逐步回归分析在评价孔隙结构对低渗透砂岩储层质量影响中的应用[J].桂林理工大学学报,2013,33(1):21-25.  
Hu Zuowei,Huang Sijing,Wang Donghuan,et al. Application of multiple stepwise regressions to influential evaluation of pore-throat size on low-permeability sandstone reservoirs[J]. Journal of Guilin University of Technology,2013,33(1):21-25.

(责任编辑:吕海亮)