



推荐阅读:

[综采工作面上隅角瓦斯流动活跃区形成机理研究](#)

[高瓦斯突出煤层综采工作面注水降尘技术应用研究](#)

[超大直径钻孔采空区瓦斯抽采技术研究](#)

[风速对近距离煤层采空区漏风及煤自燃影响研究](#)

[深部高瓦斯矿井大采高工作面立体抽采瓦斯技术](#)

[水力冲孔压裂卸压增透抽采瓦斯技术研究](#)

[巷道火灾时期流场及瓦斯浓度变化规律数值模拟研究](#)

[高突低渗透煤层超高压水力割缝卸压增透研究](#)

[高瓦斯综采工作面定向高位钻孔瓦斯抽采技术研究](#)

[寺河井田煤层气产能分布特征及影响因素分析](#)

[我国煤矿覆岩采动裂隙带卸压瓦斯抽采技术研究进展](#)

[基于高位定向长钻孔的上隅角瓦斯治理研究](#)

[松软突出煤层瓦斯抽采钻孔施工技术及发展趋势](#)

[综采工作面煤层注水防尘优化及效果研究](#)

[我国煤层气钻井技术及装备现状与展望](#)

[高瓦斯矿井高抽巷合理布置及终巷位置确定研究](#)

[原生结构煤与构造煤孔隙结构与瓦斯扩散特性研究](#)

[不同孔间距抽采孔对深孔预裂爆破增透效果影响研究](#)

[顺层瓦斯抽采钻孔封隔一体化封孔工艺研究](#)

[煤层瓦斯赋存特征及其关键地质因素影响研究](#)

安全科学与工程



移动扫码阅读

王福生, 张志明, 武建国, 等. 煤体结构对自燃倾向性影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(5): 83–88. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.05.011

WANG Fusheng, ZHANG Zhiming, WU Jianguo, et al. Study on influence of coal structure on spontaneous combustion tendency[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(5): 83–88. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.05.011

煤体结构对自燃倾向性影响研究

王福生^{1,2}, 张志明¹, 武建国³, 董宪伟^{1,2}, 孙超¹

(1. 华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063210; 2. 河北省矿业开发与安全技术实验室,

河北 唐山 063009; 3. 开滦(集团)有限责任公司, 河北 唐山 063000)

摘要:为分析煤体结构对煤自燃倾向性的影响及各因素对自燃倾向性的“贡献程度”, 选取 5 种不同变质程度的代表性煤样, 分别运用程序升温-气相色谱联机装置进行氧化动力学试验测定煤的自燃倾向性综合判定指数; 运用扫描电子显微镜、比表面积及孔径分析仪分别进行 SEM 试验、低温氮气吸附试验对煤的宏观结构进行检测; 利用傅里叶红外光谱技术及 OMNIC 分峰软件进行煤的微观分子主要官能团分析; 利用灰色关联分析方法找出各因素与自燃倾向性的关联程度并进行等级划分, 并利用 SPSS 软件及多元统计学原理建立煤自燃倾向性多元回归分析模型并对模型进行检验、各系数分析及正态图分析。结果显示: 随着变质程度的增加, 主要官能团含量变化明显, 大孔及裂隙减少, 煤体结构变得紧致, 分子稳定性加强, 煤自燃倾向性减弱且微孔占比与煤自燃倾向性关联度最大。通过灰色关联分析及煤自燃倾向性的多元回归分析, 建立了可靠的煤自燃倾向性的多元回归分析模型, 找出了影响自燃倾向性的关键因素, 揭示了自燃倾向性与煤部分试验数据的线性关系。

关键词: 自燃倾向性; 多元统计; 红外光谱; 孔隙结构; 变质程度

中图分类号: TD75

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2020)05-0083-06

Study on influence of coal structure on spontaneous combustion tendency

WANG Fusheng^{1,2}, ZHANG Zhiming¹, WU Jianguo³, DONG Xianwei^{1,2}, SUN Chao¹

(1. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China; 2. Mining Development and Safety Technology Key Lab of Hebei Province, Tangshan 063009, China; 3. Kailuan (Group) Limited Liability Corporation, Tangshan 063000, China)

Abstract: This paper focuses on the analysis of the influence of coal structure on the spontaneous combustion propensity of coal and the contribution degree of each factor to the spontaneous combustion propensity. Five representative coal samples with different degrees of metamorphism were selected, and the oxidation kinetics was carried out by temperature programmed-gas chromatography. The test determines the comprehensive judgement index of spontaneous combustion propensity of coal. Scanning electron microscopy, specific surface area, and pore size analyzer were used to carry out SEM test and low temperature nitrogen adsorption test to detect the macro structure of coal. The main functional groups of coal microscopic molecules were analyzed by Fourier transform infrared spectroscopy and OMNIC peak separation software. The analysis used gray correlation analysis method to find out the correlation degree between each factor and the spontaneous combustion propensity and classified it. The SPSS software and the multivariate statistical principle were used to establish the multi-regression analysis model of coal spontaneous combustion propensity. The model was tested, the coefficients were analyzed, and the normal map was analyzed. The results show that with the increase of metamorphism, the content of main functional groups changes obviously, macro pores and fissures decrease, the structure of coal body becomes compact, the molecular stability increases, the propensity of spontaneous combustion of coal decreases, and the proportion of micro pores is most correlated with the spontaneous combustion propensity of coal. Through the grey correlation analysis and multiple regression analysis, a reliable multivariate regression analysis model of coal spontaneous combustion propensity was established, and the key factors affecting the spontaneous combustion propensity were found out, and the linear relationship between spontaneous combustion tendency and part test data of coal is revealed.

Key words: spontaneous combustion tendency; multivariate statistics; infrared spectrum; pore structure; degree of coal meta-morphism

收稿日期: 2019-11-25; 责任编辑: 王晓珍

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474086)

作者简介: 王福生(1973—), 男, 河北唐山人, 教授, 博士。E-mail: fswang3418@163.com

0 引 言

煤炭作为我国能源产业的支柱,支撑着各行业的发展^[1]。煤矿开采过程中的煤自燃现象影响恶劣,归结原因因于煤的自燃倾向性这一内部属性。对此,很多学者对于煤的自燃倾向性进行了研究:仲晓星等^[2]提出了煤自燃倾向性的氧化动力学测定方法;张玉涛等^[3]将突变理论与煤自燃过程相结合,表述了煤自燃到灾变的系列过程。陆新晓等^[4]通过对煤复燃阶段的特征官能团及红外光谱定量分析,确立了煤的复燃规律。余明高等^[5]利用热重试验分析了多种煤的低温氧化特性和活化能变化规律。

煤是一种复杂不均匀多孔介质,其孔隙结构特征是煤自燃倾向性产生差异的重要原因之一^[6-10]。但由于煤内部构造复杂多变、灰度较大,目前少有文献从煤的结构方向综合分析煤的自燃倾向性。因此,笔者分别从煤的宏观表面结构和微观分子结构出发,定性与定量分析相结合研究煤孔隙结构对自燃倾向性的影响规律,分析导致煤自燃倾向性差异的结构方面原因,对探究煤内在属性及自燃机理研究有重要意义。

1 自燃倾向性的判定

采用间隔采煤方法对不同变质程度的新鲜煤样进行采取与制备,编号如下:内蒙古多伦褐煤(1号)、新疆金川长焰煤(2号)、东坎坨气煤(3号)、唐山矿焦煤(4号)、阳泉无烟煤(5号)。采用低温氧化阶段的 70 ℃ 氧气浓度和加速升温阶段的交叉点温度为依据,利用公式(1)计算出综合判定指数 I 确

定煤的自燃倾向性^[2]。

$$I=\phi(\varphi_{O_2}\cdot I_{O_2}+\varphi_{PT}\cdot I_{PT})-300 \tag{1}$$

式中: I 为自燃倾向性综合判定指数; I_{O_2} 为煤样温度 70 ℃ 时煤样罐出气口氧气浓度指数; I_{PT} 为交叉点温度指数; φ_{O_2} 为低温氧化阶段权数,取 0.6; φ_{PT} 为快速氧化阶段权数,取 0.4; ϕ 为放大因子,取 40;300 为修正因子。

利用程序升温炉与矿用 KSS5690A 型气相色谱仪并严格遵守 AQ/T1068—2008《煤自燃倾向性的氧化动力学测定方法》进行试验,计算出各煤样自燃倾向性综合判定指数 I 见表 1。指数 I 的值越大,煤的自燃倾向性越低,煤越不易自燃。由表可知,随变质程度的提升, I 值增大,煤的自燃倾向性减小、越不易自燃。

表 1 煤样的自燃倾向性综合判定指数

Table 1 Comprehensive evaluation index of spontaneous combustion tendency of coal samples

煤样	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号
交叉点温度/℃	153.2	165.1	174.2	195.3	214.2
煤样 70 ℃ 时氧气 体积分数/%	19.48	20.36	20.40	20.68	20.74
I	456	728	838	1 123	1 348

2 煤体结构试验

2.1 宏观表面结构

利用扫描电子显微镜(SEM)能清晰直观看到煤样的表面形貌及孔隙情况。试验采用 S-4800 型扫描电子显微镜对煤样宏观表面结构进行 20 000 倍放大成像观测,如图 1 所示。

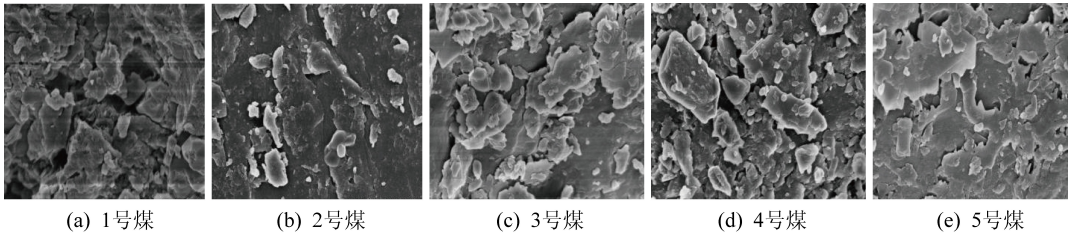


图 1 1—5 号煤 20 000 倍电镜成像

Fig.1 20 000 times electron microscope imaging of No.1—5 coal

由图 1 可清楚地看出:1 号褐煤表面裂缝、破碎结构和块状结构互层,大孔及裂隙结构发育发达。2 号长焰煤有较发达的微裂纹和裂纹,矿物结晶体明显。3 号气煤鳞片状结构及叠瓦状裂隙发育明显,内部孔隙趋于光滑。4 号焦煤明显观察到颗粒大小不均、形状不规则,絮状结构增加,具有发育较为充分的孔隙和裂隙。5 号无烟煤平面发育较为光滑,结构紧致,微孔发达。综上,随着变质程度的提升,

煤体内部结构致密化显著,裂隙及大孔逐渐减少,微小孔发育明显,煤质更加紧实。

2.2 微观孔隙结构

微观孔隙结构可分为孔隙结构和分子结构,通过对煤微观结构研究有助于探究煤自燃机理,笔者分别从孔隙及活性基团入手进行研究。

2.2.1 低温氮气吸附试验

低温氮气吸附试验采用 JW-BK112 型比表面

积及孔径分析仪,该仪器有效测量范围为 0.35 ~ 500.00 nm,试验样品粒径为 0.70~0.27 mm。煤样干燥 12 h,选用介孔一体化法对煤样进行试验并于结束后复核质量导出试验结果。

2.2.2 傅里叶红外光谱试验

试验采用岛津 FTIR-8400S 型傅里叶变换红外光谱仪。试验参数设置为:波数范围 400~4 000 cm^{-1} ,图像分辨率 4.0 cm^{-1} ,每个样品扫描 30 次。利用溴化钾压片法,对粒度小于 0.074 mm 的煤样进行试验分析,利用 Origin 绘图软件进行作图,如图 2 所示。

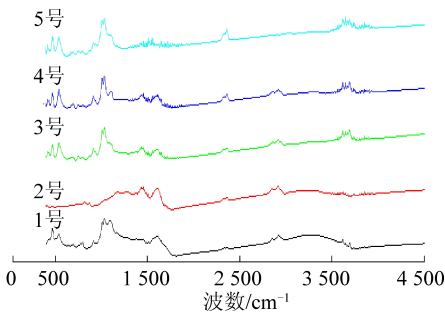


图 2 煤样红外光谱图
Fig.2 Infrared spectrum of coal sample

表 2 低温氮气吸附试验及红外光谱量化分析数据

Table 2 Data of low temperature nitrogen adsorption experiment and quantitative analysis of infrared spectra											
煤样	I	BET 多点	单点吸附	BJH 吸附	微孔	中孔	大孔	官能团含量			
		比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	总孔体积/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	平均孔径/ nm	占比/ %	占比/ %	占比/ %	—C=O—	—CH ₃ —	—CH ₂ —CH ₃ —	—CH=CH ₂ —
		$X_0(k)$	$X_1(k)$	$X_2(k)$	$X_3(k)$	$X_4(k)$	$X_5(k)$	$X_7(k)$	$X_8(k)$	$X_9(k)$	$X_{10}(k)$
1 号	456	4.462	0.014 49	12.467	31.28	43.53	25.19	2.976	0.221	4.516	13.242
2 号	728	0.344	0.001 55	14.729	48.79	29.37	21.84	0	0.841	7.308	12.382
3 号	838	2.514	0.005 38	7.910	48.71	30.27	21.02	0	2.154	3.662	12.465
4 号	1 123	2.341	0.004 83	7.256	53.05	32.84	14.11	0	5.596	4.283	6.324
5 号	1 348	3.005	0.005 98	7.140	50.53	35.62	13.86	0	0	4.286	4.395

注: * 为官能团位置, cm^{-1} 。

$$\begin{cases} \Delta_{\max} = \max_{k=1}^n |X'_0(k) - X'_i(k)| \\ \Delta_{\min} = \min_{k=1}^n |X'_0(k) - X'_i(k)| \end{cases} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{\Delta_{\min} + q \Delta_{\max}}{\Delta_i + q \Delta_{\max}} \quad (3)$$

式中: $X'_0(k)$ 、 $X'_i(k)$ 为运用均值法进行无量纲化处理的参考序列和比较序列; q 为分辨率系数,取值 0.5; Δ_i 为比较序列均值化后对应值。

3.2 煤自燃倾向性的多元线性回归分析

多元线性回归模型能解释各自变量与应变量函数方程,探究自燃倾向性与各试验参数的线性关系^[11-12]。根据灰色关联分析结果,选取微孔占比(X_1)、中孔占比(X_2)、—CH₂—CH₃含量(X_3)、BET

并利用 OMNIC 分析软件自动基准线校正下的峰高分析法对常温状态下煤中—C=O—、—CH₃—、—CH₂—CH₃—、—CH=CH₂四个主要基团峰面积进行半定量检测。

3 煤体结构对煤自燃影响的定量分析

3.1 关联度分析

灰色关联分析旨在通过灰色系统动态过程发展态势的量化比较得到各序列的关联程度,可作为各因素主次排序的量化依据。煤本身就属于典型的灰色系统,为探究煤的微观组成中各个因素对自燃倾向性的“贡献值”。进行各量化因素的关联程度分析:设定参考序列为综合判断指数 I ;比较序列为各煤样微观结构中各试验参数(表 2),其中孔径 > 10 nm 为小孔, 10 ≤ 孔径 < 50 nm 为中孔, 孔径 > 50 nm 为大孔。

采用均值化法进行无量纲化处理,求得绝对差值,将确定的两级最大差和最小差代入式(2),即可算出 γ 值。关联度 γ 为各因素与自燃倾向性判定指数间的关联程度,越接近 1 说明关联程度越高。按关联等级划分表(表 3)进行指标分级,结果见表 4。

多点比表面积(X_4)为自变量,为了使回归分析模型更具准确性,增添林南仓矿等地煤样(6—10 号)相应试验数据(表 5),进行如下回归分析。

表 3 关联程度等级划分

Table 3 Classification of correlation degree		
等级	关联度	等级
I	>0.9	高度关联
II	0.8~0.9	中度关联
III	<0.8	低度关联

3.2.1 多元线性回归模型的建立

回归模型一般式设置为:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \varepsilon \quad (4)$$

表 4 灰色关联分析结果

Table 4 Results of grey correlation analysis

指标	关联度	指标等级
微孔	0.936	I
中孔	0.901	I
—CH ₂ —CH ₃	0.852	II
比表面积	0.844	II
大孔	0.836	II
平均孔径	0.820	II
总孔体积	0.802	II
—CH=CH ₂	0.794	III
—CH ₃	0.765	III

表 5 多元回归分析参数

Table 5 Parameters of multivariate regression analysis

煤样编号	<i>I</i>	<i>X</i> ₁	<i>X</i> ₂	<i>X</i> ₃	<i>X</i> ₄
1 号	456	31.39	43.64	4.626	4.462
2 号	728	48.90	29.48	7.418	0.344
3 号	838	48.82	30.38	3.772	2.514
4 号	1 123	53.16	32.95	4.393	2.341
5 号	1 348	50.64	35.73	4.396	3.005
6 号	516	34.29	37.74	3.063	5.225
7 号	746	48.76	30.07	1.077	6.658
8 号	912	49.21	31.02	2.443	3.912
9 号	1 213	52.54	33.35	2.658	4.503
10 号	1 362	51.37	35.36	3.335	4.456

式中:*Y* 为被解释变量; β_0 为回归常数; $\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_4$ 为回归系数; X_1, X_2, \cdots, X_4 为解释变量; ε 为随机误差。式(4)的矩阵形式可表示为

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_{10} \end{bmatrix}, \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_4 \end{bmatrix},$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & X_{1-1} & \cdots & X_{1-4} \\ 1 & X_{2-1} & \cdots & X_{2-4} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & X_{10-1} & \cdots & X_{10-4} \end{bmatrix}, \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_5 \end{bmatrix}$$

通过最小二乘法计算参数的估计值(假设 *X* 矩阵满秩):

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y \tag{5}$$

将表 5 数据输入到 IBM SPSS Statistics 21 数据视图中并更改相应的变量视图,点击工具栏中“分析”→“回归”→“线性”,设置相应的线性回归设置框,构建煤自燃倾向性多元线性回归模型。分析计

算初步得到回归方程如下式:

$$Y = -3\,396.734 + 58.602X_1 + 20.762X_2 + 193.434X_3 + 76.674X_4 \tag{6}$$

3.2.2 多元线性回归模型的分析

表 6—表 9 为多元线性回归分析结果。其中,表 6 为进入或被剔除模型的变量情况,由表 6 可知,4 个变量都进入模型,认为各变量都是显著且对模型贡献值较高。表 7 为模型汇总,模型拟合度 *R* 为 0.972, *R*² 为 0.945,均处于较高值,说明此模型高度拟合。表 8 为方差分析表,模型的设定检验 *F* 统计量为 21.531>*F*_{0.95}(4,5)=5.19 且 Sig.=0.002<0.05,说明该模型是显著的。从正太概率 *P*—*P* 图(图 3)看,图中散点较密集地分布于斜线两侧,说明随机变量具有正态性,残差分布基本是正态的。

表 6 输入/移去的变量

Table 6 Input/removed variables

输入的变量	移去的变量	方法
乙基, 微孔占比, 中孔占比, 比表面积	无	输入

表 7 模型的拟合度分析

Table 7 Model fitting degree analysis

<i>R</i>	<i>R</i> ²	调整 <i>R</i> ²	标准估计的误差
0.972	0.945	0.901	102.527

表 8 模型的方差分析

Table 8 ANOVA of model

模型	平方和	自由度	均方	统计量	显著性
回归	905 311	4	226 327	21.531	0.002
残差	52 558	5	10 511	—	—
总计	957 869	9	—	—	—

通过上述分析,模型已经通过了设定检验,但可能存在参数间相关性较大,通过 *t* 检验表查询可知, *t*_{0.95}(5)=2.015。通过表 9 可知,只有 *X*₁ 的 *t* 值大于显著水平。方差膨胀因子超过 10 即存在较强的多重共线性,表中除 *X*₁ 外,方差膨胀因子均大于 10,因此可知模型中存在多重共线性,也更加佐证了 *t* 检验的结果。由于只有变量 *X*₁ 通过了显著性检验,剔除其余变量做自燃倾向性综合判定指数 *I* 与微孔占比 *X*₁ 的线性回归,得到方程(7)。

$$Y = -687.984 + 34.369X_1 \tag{7}$$

经分析,新模型通过了模型设定检验、系数通过显著性 *t* 检验。但模型检验中, *R*²=0.643,因此准确性比式(6)低。2 个公式均能在一定程度上预测煤的自燃倾向性,可依据矿井实际测试参数自行选取。

表 9 模型调整后的系数
Table 9 Adjusted coefficients of model

模型	非标准化系数		标准系数 试用版	统计量	显著性	共线性统计量	
	建模系数	标准误差				容差	膨胀因子
常量	-3 396.734	930.989	—	-3.649	0.015	—	—
微孔占比	58.602	7.605	1.367	7.706	0.001	0.349	2.866
中孔占比	20.762	43.032	0.278	0.482	0.650	0.033	30.148
比表面积	193.434	218.206	0.680	0.886	0.416	0.019	53.629
乙基	76.674	114.226	0.279	0.671	0.532	0.063	15.780

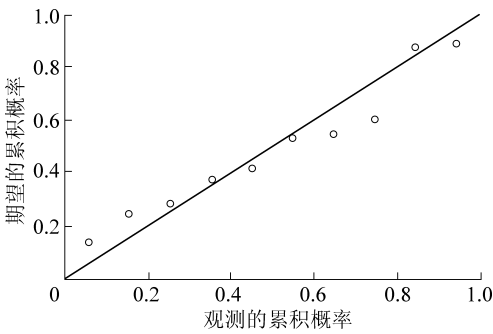


图 3 正太概率 P-P 图

Fig.3 Positive probability P-P diagram

4 基于煤体结构的自燃倾向性综合分析

孔隙结构影响气体吸附能力、供氧能力,进而影响煤的自然倾向性。通过 SEM 及低温氮气吸附试验研究发现:微中孔的占比与煤自燃倾向性关联度最大,因为微中孔孔径较小影响煤体内氧气的转移,使气体在煤孔中的紊流渗透更多地变成分子扩散甚至分子间作用,增大煤与氧气的接触面积^[13]。与之相反,大孔裂隙由于孔径较大气体流通阻力小,对煤体供氧及运转起促进作用;比表面积、单点吸附总孔体积、平均孔径同各孔占比意义趋同,均为煤孔隙结构的反映。

不同煤中活性基团的种类、数量、活性及放热量不同,通过化学反应影响煤自燃倾向性^[14-15]。煤自燃过程中各活性基团含量是动态变化的,不仅有各种基元反应的消耗,也伴随着类似 C=C、C≡C 等相关基团的氧化生成^[16]。根据王德明教授基元反应理论^[17],脂肪烃侧链、羟基、羧基、羧基醛上的氢原子被煤中羟基自由基(·OH)夺走形成多种自由基,经过自分解或吸氧反应产生—C=O—等。氧气与各活性基团发生氧化反应放热,热量集聚促进更大活化能的基团进行一系列连锁反应并释放 CO、CH₄、CO₂、乙烯等气体。综上,从 1 号褐煤到 5 号无烟煤,煤的主要活性基团的种类逐渐减少,直至消失,煤的分子结构越稳定,煤自燃倾向性越低。

通过综合分析煤的结构对自燃倾向性的影响,

发现:在低阶煤时,大孔多、微孔少,孔隙结构就非常发达,抑制煤与氧接触影响因素比较少,所以褐煤的自燃倾向性高,褐煤最易自燃。随着煤阶提高,煤的分子结构趋于稳定,虽然孔隙结构后期变得发达,但是活性基团活性变低,煤自燃倾向性也就开始变低,到无烟煤时,煤最不易自燃,煤的自燃倾向性最低。

5 结 论

1) 运用 SEM 试验、低温氮气吸附试验对煤的宏观结构进行检测,结果发现:随着变质程度的增加,煤体结构变得紧致,微孔和中孔变多,大孔逐渐减少,表面也开始变得光滑,整体性加强。

2) 通过红外光谱技术,测量煤的 4 种主要基团情况,结果发现:煤阶提高,煤主要基团含量变化明显,个别基团逐渐消失,煤的分子稳定性加强。

3) 煤的微观结构与分子结构均是自燃倾向性差异的关键指标。灰色关联分析结果显示,煤的微观结构和分子结构均与自燃倾向性关联程度较大,进一步证实从煤的结构角度研究煤自燃倾向性的正确性。

4) 利用多元统计学原理建立煤自燃倾向性的多元回归分析模型,定量揭示了自燃倾向性与煤体部分因素的线性关系,为煤自燃深入研究及测定提供依据。

参考文献 (References) :

[1] 王国法,刘 峰,孟祥军,等.煤矿智能化(初级阶段)研究与实践[J].煤炭科学技术,2019,47(8):1-36.
WANG Guofa, LIU Feng, MENG Xiangjun, et al. Research and practice on intelligent coal mine construction (primary stage)[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 1-36.

[2] 仲晓星,王德明,戚绪尧,等.煤自燃倾向性的氧化动力学测定方法研究[J].中国矿业大学学报,2009,38(6):789-793.
ZHONG Xiaoxing, WANG Deming, QI Xuyao, et al. Research on oxidation kinetics test methods concerning the spontaneous combustion of coal[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(6): 789-793.

- [3] 张玉涛,李亚清,邓 军,等.煤炭自燃灾变过程突变特性研究[J].中国安全科学学报,2015,25(1):78-84.
ZHANG Yutao, LI Yaqing, DENG Jun, *et al.* Study on catastrophe characteristics of coal spontaneous combustion[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(1): 78-84.
- [4] 陆新晓,赵鸿儒,朱红青,等.氧化煤复燃过程自燃倾向性特征规律[J].煤炭学报,2018,43(10):2809-2816.
LU Xinxia, ZHAO Hongru, ZHU Hongqing, *et al.* Characteristic rule of spontaneous combustion tendency of oxidized coal at recrudescence stage[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(10): 2809-2816.
- [5] 余明高,袁 壮,褚廷湘,等.不同自燃性煤氧化阶段的表征差异[J].重庆大学学报,2017,40(2):37-44.
YU Minggao, YUAN Zhuang, CHU Tingxiang, *et al.* Characterization difference of coals with different spontaneous combustion tendencies during oxidation stage[J]. Journal of Chongqing University, 2017, 40(2): 37-44.
- [6] 戚绪尧.煤中活性基团的氧化及自反应过程[J].煤炭学报,2011,36(12):2133-2134.
QI Xuyao. Oxidation and self-reaction of active groups in coal[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 2133-2134.
- [7] YANG F, HOU Y, NIU M. Catalytic oxidation of lignite to carboxylic acids by molecular oxygen in an aqueous FeCl₃ solution[J]. Fuel, 2017, 202(40): 129-134.
- [8] QI G, WANG D, CHEN Y, *et al.* The application of kinetics based simulation method in thermal risk prediction of coal[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 29(1): 22-29.
- [9] KALJUVEE T, KEELMAN M, TRIKKEL A, *et al.* TG-FTIR/MS analysis of thermal and kinetic characteristics of some coal samples[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2013, 113(3): 1063-1071.
- [10] 许延辉.煤自燃特性宏观表征参数及测试方法研究[D].西安:西安科技大学,2014.
- [11] 邓 军,邢 震,马 砺.多元回归分析在煤自燃预测中的应用[J].西安科技大学学报,2011,31(6):645-648.
DENG Jun, XING Zhen, MA Li. Application of multiple regression analysis in coalspontaneous combustion prediction[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2011, 31(6): 645-648.
- [12] 徐满贵,高帅帅,曹艳军,等.基于灰色理论-多元回归分析的瓦斯含量预测[J].煤矿安全,2018,49(9):211-214.
XU Mangui, GAO Shuaishuai, CAO Yanjun, *et al.* Characterization difference of coals with different spontaneous combustion tendencies during oxidation stage[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(9): 211-214.
- [13] 李希建,沈仲辉,刘 钰,等.黔西北构造煤与原生结构煤孔隙结构对吸解特性影响实验研究[J].采矿与安全工程学报,2017,34(1):170-176.
LI Xijian, SHEN Zhonghui, LIU Yu, *et al.* The experimental research on the impact of pore structure in tectonic coal and primary structure coal on gas adsorption-desorption characteristics in northwestern Guizhou [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(1): 170-176.
- [14] 仲晓星,王德明,徐永亮,等.煤氧化过程中的自由基变化特性[J].煤炭学报,2010,35(6):960-963.
ZHONG Xiaoxing, WANG Deming, XU Yongliang, *et al.* The variation characteristics of free radicals in coal oxidation[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 960-963.
- [15] LOPEZ, D. Reffect of low-temperature oxidation of coal on thdrogentransfer capability[J]. Fuel, 1998, 77(14): 1623-1628.
- [16] LI B, CHEN G, ZHANG H, *et al.* Development of non-isothermal TGA-DSC for kinetics analysis of low temperature coal oxidation prior to ignition[J]. Fuel, 2014, 118(35): 385-391.
- [17] 王德明,辛海会,戚绪尧,等.煤自燃中的各种基元反应及相互关系:煤氧化动力学理论及应用[J].煤炭学报,2014,39(8):1667-1674.
WANG Deming, XIN Haihui, QI Xuyao, *et al.* Mechanism and relationships of elementary reactions in spontaneous combustion of coal: The coal oxidation kinetics theory and application [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1667-1674.