

中文引用格式:叶正亮,郭曦蔓,尚博,等. 煤变质程度对微观结构与热解参数的影响及关联性分析[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(2):57-65.

英文引用格式:YE Zhengliang, GUO Ximan, SHANG Bo, et al. Influence of coal metamorphism on microstructure and pyrolysis parameters: a correlation analysis [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(2):57-65.

煤变质程度对微观结构与热解参数的影响及关联性分析*

叶正亮 正高级工程师, 郭曦蔓**, 尚博, 胡冕
(中煤能源研究院有限责任公司, 陕西 西安 710054)

中图分类号: X936

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.02.0698

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFF0615404); 国家自然科学基金联合重点项目资助(U23B2093)。

【摘要】 为揭示煤变质程度对煤自燃过程的影响, 结合试验与定量分析方法分析煤自燃过程中热解参数、微观结构的变化特征及二者之间关联性特征。首先, 利用傅立叶变换红外光谱(FTIR)试验分析煤样中主要活性官能团的含量变化; 然后, 通过热重分析(TGA)试验获取不同变质程度煤样的热解特征参数; 最后, 基于 Pearson 相关系数法量化煤自燃过程中微观结构与特征温度之间的关联性。结果表明: 随着煤样变质程度的提高, 芳香烃(Ar-CH)和脂肪烃含量增加, 含氧官能团(如C-O-C)显著减少; 低阶煤样中含氧官能团占比最高, 高阶煤样中芳香烃含量超过50%; 变质程度提高使失重曲线滞后并向高温区移动, 特征温度随之升高; 芳香烃与特征温度呈显著正相关关系, 而含氧官能团与特征温度呈负相关关系。煤样中芳香烃含量的增加和含氧官能团的减少, 是特征温度升高及自燃倾向性降低的主要微观结构因素。

【关键词】 变质程度; 微观结构; 热解参数; 关联性; 煤自燃; 官能团

Influence of coal metamorphism on microstructure and pyrolysis parameters: a correlation analysis

YE Zhengliang, GUO Ximan, SHANG Bo, HU Mian

(China Coal Energy Research Institute Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710054, China)

Abstract: To reveal the impact of coal metamorphism on the self-ignition process, experimental and quantitative analysis methods was combined to analyze the pyrolysis characteristics, microstructural changes, and their correlations during coal self-ignition. First, Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) was employed to determine changes in the content of active functional groups in coal samples. Then, thermogravimetric analysis (TGA) was conducted to obtain pyrolysis characteristic parameters for coal samples with varying degrees of metamorphism. Finally, Pearson correlation coefficient method was applied to quantify the relationship between microstructure and characteristic temperatures during coal self-ignition. The results indicate that as the degree of coal metamorphism increases, the content of aromatic and aliphatic hydrocarbons (Ar-CH) rises, while oxygen-containing functional groups (C-O-C)

* 文章编号: 1003-3033(2025)02-0057-09; 收稿日期: 2024-09-13; 修稿日期: 2024-11-22

** 通信作者: 郭曦蔓(1998—), 女, 甘肃兰州人, 硕士, 助理工程师, 主要从事煤矿火灾防控与治理方面的研究。E-mail: georgia_guo@foxmail.com。

significantly decrease. Low-rank coal samples exhibit the highest proportion of oxygen-containing functional groups, whereas high-rank coal samples contain more than 50% aromatic hydrocarbons. Increased metamorphism delays weight loss curves and shifts them to higher temperature regions, leading to an increase in characteristic temperatures. Ar-CH show a significant positive correlation with characteristic temperatures, while C-O-C exhibit a negative correlation. Overall, the increase in Ar-CH and the decrease in C-O-C in coal samples are identified as the primary microstructural factors responsible for the rise in characteristic temperatures and the reduction in self-ignition propensity.

Keywords: metamorphic degree; microstructure; pyrolysis parameters; correlation; spontaneous combustion of coal; functional groups

0 引言

鉴于我国多煤少油的能源结构,以及国家发展的综合需求,未来数十年,煤炭资源依旧是我国多能互补的现代化能源体系中不可或缺的主体资源^[1]。近年来,我国煤炭开采强度增加导致安全事故频发,其中超过90%的煤层具有自燃或容易自燃的特性,因此,矿井火灾成为制约矿井安全高效生产的主要因素^[2]。煤矿内因火灾具有产生机制复杂、发生地点隐蔽、传播速度迅速等特征,导致火灾防治和救援难度较大^[3-4]。据统计^[5],我国(不含港澳台地区)25个主要产煤区共约5 300处煤矿,有70%以上的煤矿存在煤自燃隐患,因此,探究煤自燃的演化过程,揭示其机制对预防事故发生至关重要。

煤自燃过程可根据其热失重的特征温度划分其自燃的反应阶段及反应特性,而煤自然发火的本质是煤分子中复杂的微观结构发生氧化反应并产生热量积聚的结果。文虎等^[6]利用程序升温试验,优选出高瓦斯矿井自燃早期预报指标。贾廷贵等^[7]利用联用试验,得出烟煤自燃过程中的热解参数,并建立了动力学方程,计算出煤样的热动力参数。ZHANG Duo等^[8]采用特征温度分析法,建立了唐家汇矿煤的6个特征温度及阈值,得出各阶段的预警标准和特征参数阈值,成功预测了煤自燃程度。朱建芳等^[9]采用热重(Thermogravimetry)/傅里叶变换红外光谱(Fourier Transform Infrared Spectroscopy, TFTIR)联用试验得出煤中硫含量会提高煤分子的化学活性,加速煤自燃进程。耿济世等^[10]自主研发了解热试验装置,测出富油煤原位热解工艺参数选择的关键数据。张玉涛等^[11]采用Arrhenius公式拟合得出煤质指标和煤自燃危险性的关联性,其中,挥发分和燃料比与临界温度前后的相关性最大。ZHAO Jinyu等^[12]采用贫氧环境下的试验分析方法研究煤自燃过程中煤微观结构的演变,得出氧浓度

对活性基团影响的规律。SHI Quanlin等^[13]采用试验分析探究预氧化温度对煤微观结构及自然特性的影响,得出当预氧化温度低于临界温度时,预氧化处理会增加煤自燃风险。李美芬等^[14]采用在线热解试验法,探究伊敏褐煤结构演化特征与热解行为的关系,得出低阶煤高效开发利用和煤石墨墨演化的关键数据。XIAO Yang等^[15]通过差示扫描量热(Differential Scanning Calorimetry, DSC)试验计算出碳化和氧化煤粉的自燃热解参数,得出碳化和氧化粉末的活化能等热动力参数,为煤质活性炭的制备提供了理论基础。综上所述,学者们对煤自燃过程的特征参数、热动力参数以及煤分子的微观结构分析做了大量研究,但大多以单一煤种为研究对象分析其宏观演化特征和微观机制,且二者间的关联性分析仍有不足。然而,煤的形成过程受多种因素影响,导致煤质成分存在差异,因此,不同变质程度的煤在自燃反应过程中特征参数和微观结构展现出一定不同,而煤样的微观结构从本质上影响自燃过程特征参数的变化。

鉴于此,笔者分别以陕西榆林方家畔煤业的褐煤、山东济宁兴隆庄煤矿的气煤(烟煤)和河北邯郸云驾岭矿的无烟煤等为研究对象,采用TG和FTIR试验,分析计算不同变质程度煤样的热解参数、官能团种类及含量、微观基团和特征温度的关联性,以期明确煤的变质程度对煤自燃过程在宏观和微观角度下的影响,为类似煤种矿区自然发火防控提供理论基础。

1 煤样工业测试及热解试验

根据《煤样的制备方法》^[16],将方家畔煤业褐煤、兴隆庄煤矿气煤和云驾岭矿无烟煤3种不同变质程度的煤样放置在75℃恒温干燥箱中干燥2 h,然后采用标准试验将煤样研磨至粒径为0.212~0.180 mm,制备完成后将其置于广口瓶中并确保密

封良好。工业分析测试结果见表1。由表1可知:煤样变质程度的增加使固定碳含量占比增大,反之水分和挥发分的比例降低。总体上褐煤中的水分和灰分含量较低,均未超过10%,挥发分含量较高,在高挥发分条件下自燃危险性较高。煤样组分随变质程度增加而变化,说明变质程度对其微观结构造成了一定影响,导致不同煤阶的煤种在煤自然发火过程中存在一定差异。

表1 工业分析测试结果

Table 1 Industrial analysis test results				%
煤种	水分	灰分	挥发分	固定碳含量
方家畔煤业褐煤	5.06	9.58	40.22	59.90
兴隆庄煤矿气煤	2.45	8.85	33.42	65.28
云驾岭矿无烟煤	1.88	16.56	2.35	97.12

试验采用 FTIR 仪测定官能团,采用专业型同

步热分析仪测定不同变质程度的煤样在升温热解过程中的质量变化,设置试验升温速率为 15 °C/min,升温范围为 30~800 °C。

2 煤变质程度对微观结构的影响

煤自燃的本质是煤大分子中的官能团与氧气发生化学反应导致热量积聚的结果,因此,研究不同变质程度煤种的主要活性官能团,可分析煤样变质程度对自燃过程影响的微观机制。煤样红外光谱如图1所示,图1中纵坐标为红外光谱中的 Kubelka-Munk 变换,是一种用于处理反射光谱数据的数学处理方法。Kubelka-Munk 变换的基本方程为 $F(R) = (1-R)^2/2R$,其中, $F(R)$ 为 Kubelka-Munk 函数, R 为样品的漫反射率(即1减去透射率)。通过变换,原本的漫反射率数据可以转换成一个类似于吸收系数的值,从而使得光谱图更易于解释和分析。

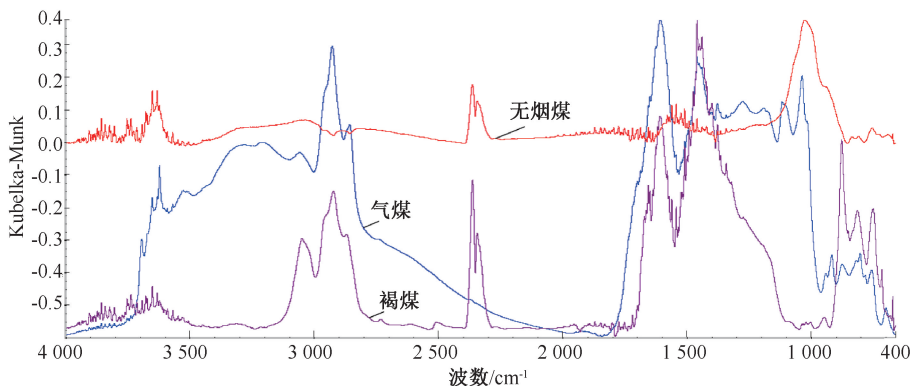


图1 煤样红外光谱

Fig. 1 Infrared spectrogram of coal sample

由图1可知:随煤样变质程度的增加,各煤样的吸收光谱也存在不同。根据文献[17]可得,组成煤低分子化合物的主要官能团分别有:羟基、脂肪烃、芳香烃(Ar-CH)和含氧官能团(C-O-C、-COOH、-C=O和-OH)。通过 Gaussian 公式^[18]分峰处理3种煤样的吸收光谱图,半定量表征各官能团的相对含量。Gaussian 公式如下:

$$y = y_0 + \frac{A_\theta \cdot \exp\left(\frac{-4\ln 2(x - x_c)^2}{w^2}\right)}{w \cdot \sqrt{\frac{\pi}{4\ln 2}}} \quad (1)$$

式中: y 为 Kubelka-Munk 变换; x 为波数, cm^{-1} ; y_0 为基线; A_θ 为峰面积; x_c 为峰中心位置; w 为半峰宽。

3种煤样各波段的分峰拟合如图2—图5所示,对应的红外吸收振动区峰面积见表2。由图2—

图5及表2可知:试验分析的3种煤样红外光谱中均含有常见的脂肪烃、芳香烃及含氧官能团。但随着煤阶的不同,官能团的种类及含量均有差别。煤的变质程度与煤分子中芳香烃结构有关,芳香烃含量越高,煤分子越稳定,越不易发生自燃^[19]。芳香烃类主要包括取代苯、-C=C-和 Ar-CH,不同变质程度煤样官能团相对含量及变化见表3和图6,由表3和图6可知:褐煤的芳香烃含量仅占13.74%,气煤占20.31%,而无烟煤56.66%,所以芳香烃的含量随着煤变质程度的增加而增加。含氧官能团主要分为 C-O-C、-COOH、-C=O 和 -OH,是煤中最活泼的官能团,无烟煤中含氧官能团含量为16.20%,是3种煤样中含量最低的,气煤和褐煤分别为40.37%和46.68%,因此,相较之下,无烟煤不易与氧气发生自燃反应。脂肪烃中-CH₃含量最高,其次是-CH₂,

2种官能团含量也随着变质程度的增加而增加。气煤和无烟煤中脂肪烃-CH₃、-CH₂-的变形振动和C-O伸缩振动的吸收强度与褐煤相比更弱,说明煤变质

程度的增加使煤中侧链和某些含氧官能团呈减少趋势。在低变质程度的褐煤中,其侧链和活性官能团较多,因此,在受热过程中容易发生氧化反应。

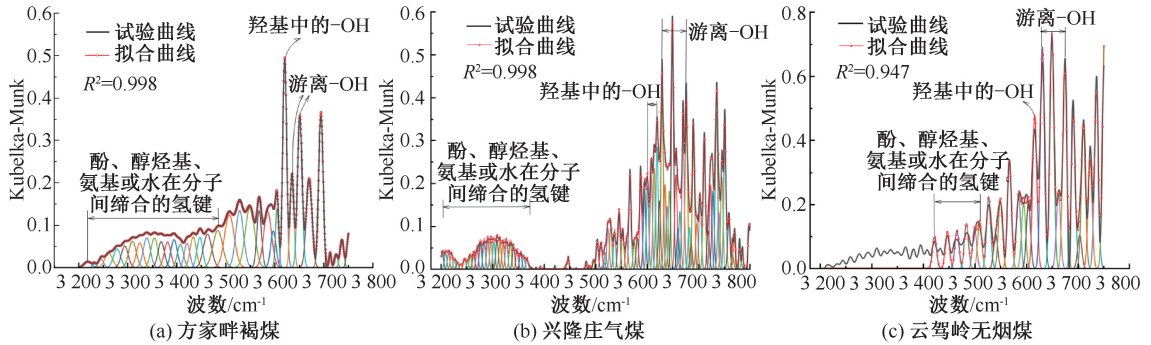


图2 3 750~3 200 cm⁻¹ 波段的分峰拟合曲线

Fig. 2 Peak fitting curve of 3 750-3 200 cm⁻¹ band

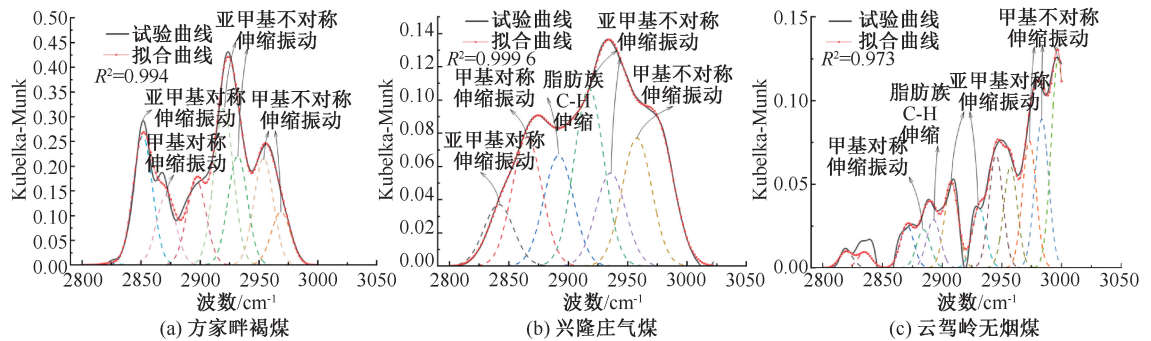


图3 3 000~2 800 cm⁻¹ 波段的分峰拟合曲线

Fig. 3 Peak fitting curve of 3 000-2 800 cm⁻¹ band

表2 3种煤样红外吸收振动区峰面积

Table 2 Peak area of infrared absorption vibration region of 3 coal samples

煤种	峰面积							
	羟基	脂肪烃	芳香烃			含氧官能团		
			Ar-CH	C=C	多种取代芳烃	-COOH	C=O	R-O-R'
方家畔煤业褐煤	107.735	75.85	14.12	21.088	15.664	5.189	8.445	61.085
兴隆庄煤矿气煤	2.376	15.295	4.585	10.915	21.388	—	3.841	6.705
云驾岭矿无烟煤	16.743	2.832	2.640	2.054	8.838	—	0.306	33.299

表3 不同变质程度官能团相对含量

Table 3 Relative content of functional groups with different metamorphic degrees %

煤种	羟基	脂肪烃	芳香烃	含氧官能团
褐煤	29.10	10.49	13.74	46.68
气煤	25.10	14.25	20.31	40.37
无烟煤	3.65	23.49	56.66	16.20

3 煤变质程度对热解参数的影响

特征温度是煤氧化过程中的关键热解参数,其变化

特征对研究煤自燃过程的宏观特征变化具有理论指导作用。不同煤样的TG/微分热重分析(Derivative Thermogravimetry, DTG)曲线如图7—图9所示,各煤样的特征温度点见表4。由图7—图9和表4可知:随着煤变质程度的增加,特征温度也会随之升高,表明煤样的燃烧温度升高,煤样的燃烧温度越高,煤样越不易自燃。根据煤热解失重曲线的变化可将煤的燃烧过程划分为^[20]:水分蒸发脱附、动态平衡、吸氧增重、受热分解、燃烧和燃尽6个不同阶段。

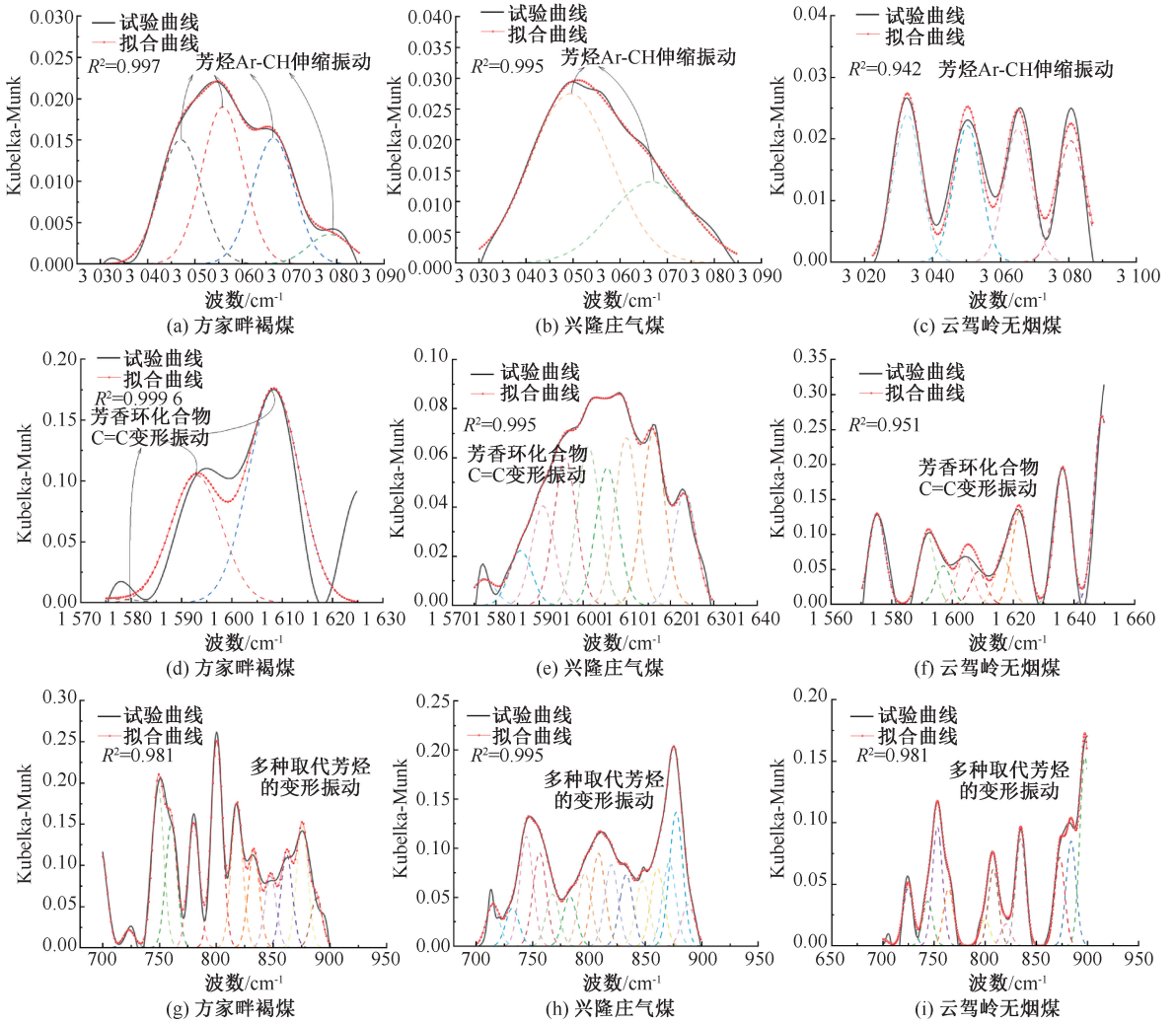


图 4 3 075~3 030、1 650~1 575、900~700 cm⁻¹ 波段的分峰拟合曲线

Fig. 4 Peak fitting curve of 3 075~3 030, 1 650~1 575, 900~700 cm⁻¹ band

表 4 煤样的特征温度点

Table 4 Characteristic temperature points of coal samples

℃

煤样	特征温度点						
	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7
	临界温度	干裂温度	活性温度	增速温度	着火温度	速率最大温度	燃尽温度
方家畔煤业褐煤	66.25	175.25	250.00	292.25	420.25	508.75	633.75
兴隆庄煤矿气煤	69.50	174.50	334.00	365.25	511.64	643.00	787.00
云驾岭矿无烟煤	72.5	261.25	341.75	405.25	615.42	690.25	788.00

3 种煤样的 TG/DTG 曲线如图 10 所示。由图 10 可知:随着煤变质程度的增加,其受热分解温度 t_4 和燃尽温度 t_7 均有所增加,使得 TG/DTG 曲线向右偏移,同时煤样最大失重速率对应温度也随之升高。煤的化学构造和组成成分因煤变质程度的不同而产生差异,通过第 2 节试验可得,煤化过程的加深导致芳香族化合物的比例上升、芳香层有序性提高,进而增强了煤样的热稳定性。临界温度 t_1 越低

意味煤氧复合加速过程越迅速,煤的自然倾向性就越高,因此,褐煤相较于无烟煤具有更高的自然倾向性;着火温度 t_5 是煤样起火的温度,随煤化程度的增加, t_5 逐渐增大,表明煤样越不容易燃烧。此外,兴隆庄煤矿气煤在 700 ℃ 后有一个小的失重峰,这可能由于煤中存在不稳定的矿物成份,此时发生热解。

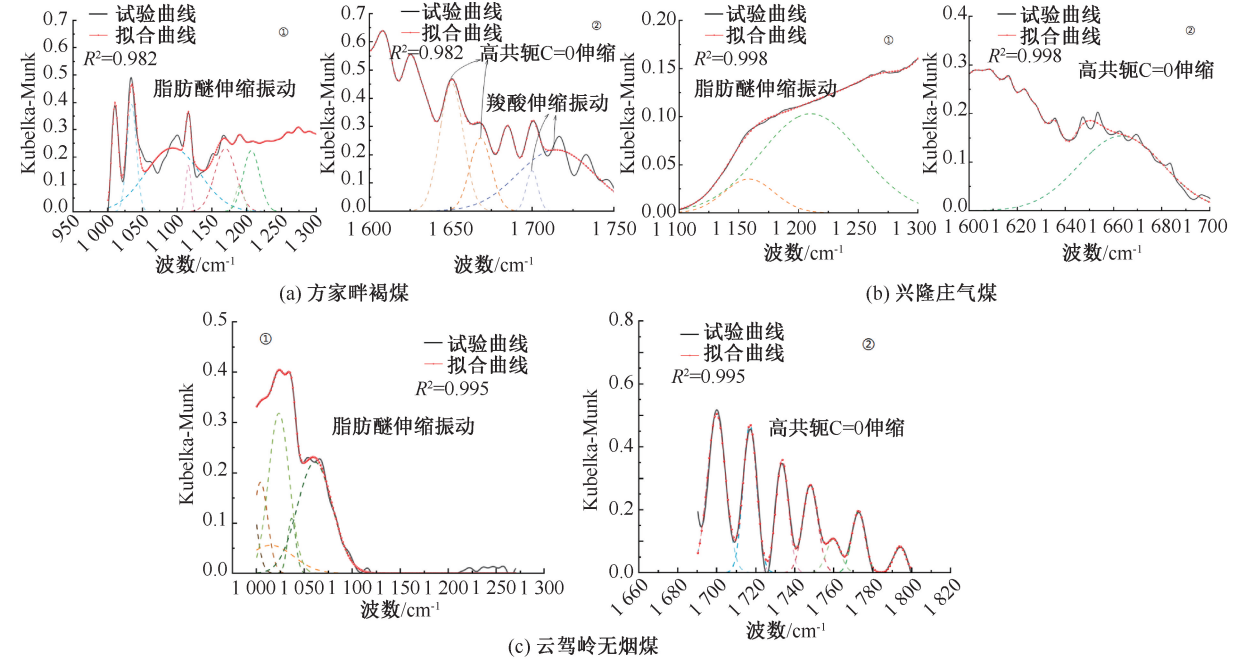


图5 1800~1000 cm⁻¹波段的分峰拟合曲线

Fig. 5 Peak fitting curve of 1800-1000 cm⁻¹ band

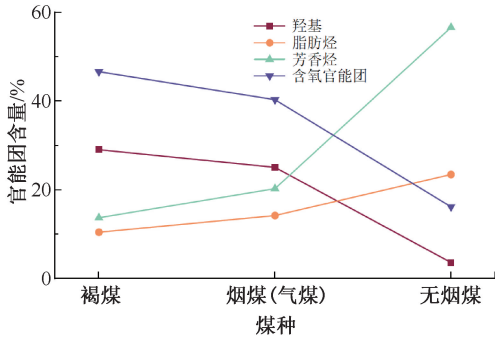


图6 不同变质程度煤样官能团相对含量变化

Fig. 6 Changes in relative content of functional groups of coal with different metamorphic degrees

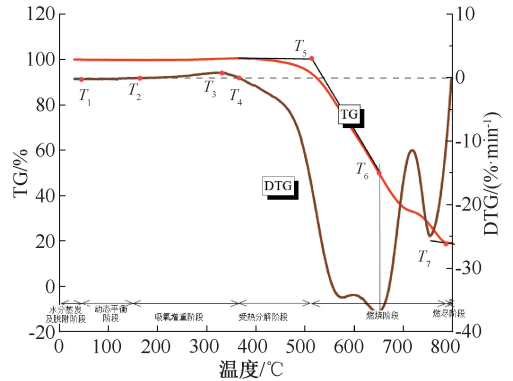


图8 气煤的TG/DTG曲线

Fig. 8 TG/DTG curve of gas coal

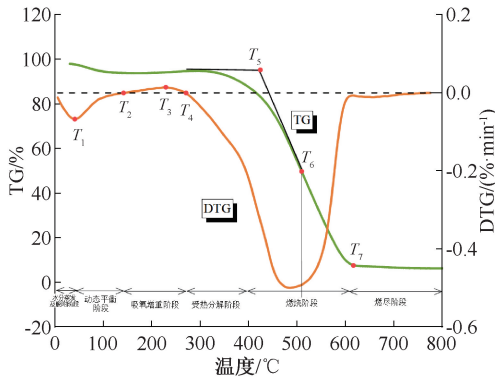


图7 褐煤的TG/DTG曲线

Fig. 7 TG/DTG curve of lignite

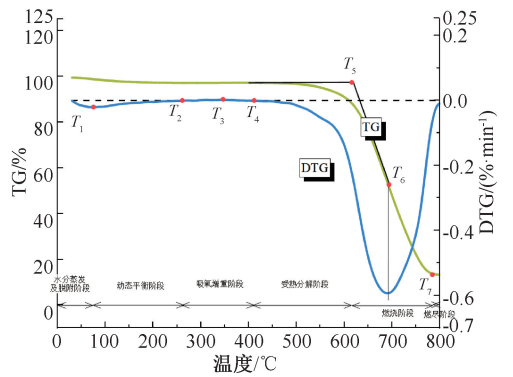


图9 无烟煤的TG/DTG曲线

Fig. 9 TG/DTG curve of anthracite

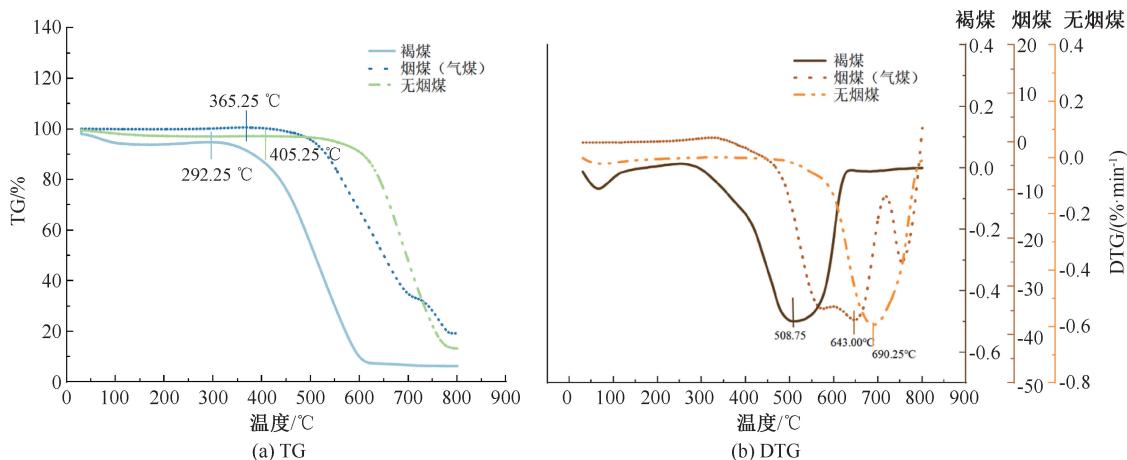


图 10 3 种煤样的 TG/DTG 曲线

Fig. 10 TG/DTG curves of three coal samples

4 微观结构与热解参数关联性分析

煤自燃特性与其微观结构密切相关,同时特征温度反映煤的自燃进程,因此,煤自燃过程中的特征温度与微观基团之间必定存在某种关联。采用 Pearson 相关系数法^[21]确定自燃过程中对特征温度影响最大的官能团,根据下式计算结果可准确反应出特征温度和微观基团之间的内在关系。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

式中: r 为相关系数; n 为样本量; x 和 y 为 2 个变量的观测值; x_i, y_i 为变量 x 和 y 的第 i 个观测值;计算结果越接近 1,表明该特征温度与某种官能团正相关性越强;越接近-1,则表明二者之间的负相关性越强。

微观基团与特征温度之间相关性如图 11 所示。

由图 11 可知:煤样在氧化升温至燃烧过程中,各官能团与特征温度之间的相互关联存在差异,表明煤样在不同特征温度点下所参与的化学发应不同。在低温氧化阶段,与特征温度关联性强的官能团分别是: $C-O-C$ 、 $Ar-CH$ 、 $-CH_3$ 和 $-CH_2-$ 、 $-OH$ 。其中, $t_1 \sim t_5$ 正相关性最强的官能团为芳香烃 $Ar-CH$,关联系数越大,意味着这一官能团对此阶段的煤自燃过程影响最大,这是因为芳香烃控制煤的结构紧密度,引起特征温度点滞后使得煤自燃难以发生,因此,芳香烃含量越高,煤自燃的特征温度越高; $t_1 \sim t_5$ 负相关性最强的官能团分别为: $C-O-C$ 、 $-CH_3$ 和 $-CH_2-$ 、 $-OH$,表明在低温氧化阶段含氧官能团和脂肪烃的含量对氧化反应影响大,尤其是 $C-O-C$ 越多,煤的特征温度越小,煤自燃倾向性越大。起火燃烧阶段 $t_6 \sim t_7$, $-OH$ 与特征温度的负关联性最大,表明在起火阶段,会消耗大量的 $-OH$ 、 $-OH$ 基团,该阶段的特征温度越低,起火危险性越大。

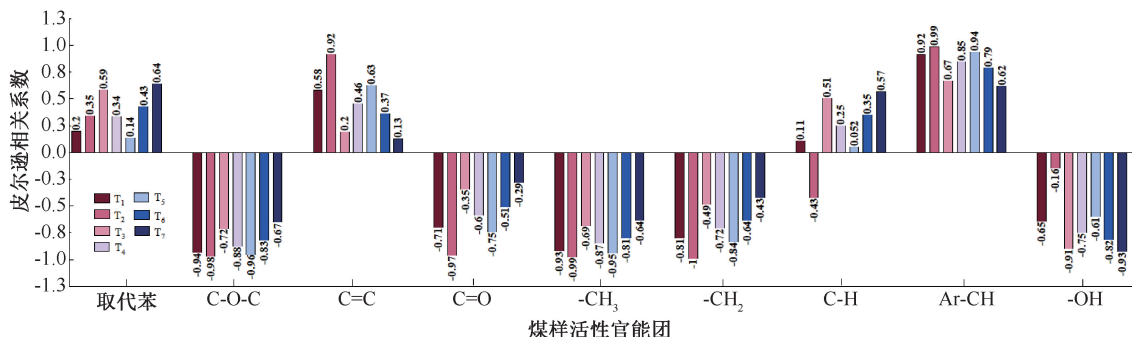


图 11 微观基团与特征温度之间相关性

Fig. 11 Correlation between microscopic groups and characteristic temperature

5 结论

1) 随着煤样变质程度的增加,羟基及含氧官能

团的占比逐渐降低,而脂肪烃和芳香烃的比例则不断上升。在低阶煤样中,含氧官能团的相对含量最多;在高阶煤样中,芳香族化合物的占比最大,超过

了50%。

2) 随着煤样变质程度的增加,3种煤样的特征温度逐渐升高,热解失重进程开始滞后,TG和DTG曲线逐渐向高温区移动。

3) 根据 Pearson 相关系数计算结果,煤样在低温氧化过程中,Ar-CH 与特征温度之间呈现最显著

的正相关性,C-O-C、-OH 与特征温度呈现最大的负相关性;在燃烧阶段,-OH 与特征温度的负关联性最大。

4) 煤自燃的难易程度受芳香烃和含氧官能团的影响,芳香族化合物含量越多、含氧官能团含量越少,煤自燃越难发生。

参 考 文 献

- [1] 葛世荣,樊静丽,刘淑琴,等. 低碳化现代煤基能源技术体系及开发战略[J]. 煤炭学报,2024,49(1):203-223.
GE Shirong, FAN Jingli, LIU Shuqin, et al. Low-carbon modern coal-based energy technology system and development strategy[J]. Journal of China Coal Society, 2024,49(1):203-223.
- [2] 陈晓坤,王晨熹,翟小伟. 基于热爆炸理论的煤燃点确定及动力学分析[J]. 中国安全科学学报,2022,32(2):59-65.
CHEN Xiaokun, WANG Chenxi, ZHAI Xiaowei. Determination of coal burning point and dynamic analysis based on thermal explosion theory[J]. China Safety Science Journal, 2022,32(2):59-65.
- [3] 张巨峰,施式亮,鲁义,等. 大数据下瓦斯与煤自燃共生灾害智能预警系统:数据特征、应用架构、关键技术[J]. 中国安全科学学报,2021,31(9):60-66.
ZHANG Jufeng, SHI Shiliang, LU Yi, et al. Study on prediction of spontaneous combustion danger zone in overlying goaf during mining of shallow buried close distance coal seam group[J]. China Safety Science Journal, 2021,31(9):60-66.
- [4] 邓军,李鑫,王凯,等. 矿井火灾智能监测预警技术近20年研究进展及展望[J]. 煤炭科学技术,2024,52(1):154-177.
DENG Jun, LI Xin, WANG Kai, et al. Research progress and prospect of intelligent monitoring and early warning technology of mine fire in recent 20 years[J]. Coal Science and Technology, 2024,52(1):154-177.
- [5] 袁亮. 我国煤矿安全发展战略研究[J]. 中国煤炭,2021,47(6):1-6.
YUAN Liang. Research on coal mine safety development strategy in China[J]. China Coal, 2021,47(6):1-6.
- [6] 文虎,郭曦蔓,张铎,等. 建北煤矿高瓦斯煤层自燃早期预报指标优选研究[J]. 矿业安全与环保,2022,49(3):1-8.
WEN Hu, GUO Ximan, ZHANG Duo, et al. Optimization of early prediction index for spontaneous combustion of gassy coal seam in Jianbei coal mine[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022,49(3):1-8.
- [7] 贾廷贵,张智超,郝长胜. 不同变质程度烟煤的自燃特性研究[J]. 煤矿安全,2024,55(2):87-98.
JIA Tinggui, ZHANG Zhichao, HAO Changsheng. Study on spontaneous combustion characteristics of bituminous coal with different metamorphic grade[J]. Safety in Coal Mines, 2024,55(2):87-98.
- [8] ZHANG Duo, CEN Xiaoxin, WANG Weifeng, et al. The graded warning method of coal spontaneous combustion in Tangjiahui Mine[J]. Fuel, 2021,288(3):DOI:10.1016/j.fuel.2020.119635.
- [9] 朱建芳,申嘉辉,宋富美,等. 煤自燃机制的TG-FTIR研究[J]. 中国安全科学学报,2019,29(12):46-52.
ZHU Jianfang, SHEN Jiahui, SONG Fumei, et al. TG-FTIR study on coal spontaneous combustion mechanism[J]. China Safety Science Journal, 2019,29(12):46-52.
- [10] 耿济世,王双明,孙强,等. 富油煤热解特性及其孔裂隙结构演化规律[J]. 煤田地质与勘探,2024,52(7):46-53.
GENG Jishi, WANG Shuangming, SUN Qiang, et al. Pyrolysis characteristics of oil-rich coal and evolution law of pore and fracture structure[J]. Coal Geology & Exploration, 2024,52(7):46-53.
- [11] 张玉涛,郭强,张园勃,等. 基于相关系数法的煤自燃危险性关联分析及预测[J]. 中国安全科学学报,2024,34(1):125-132.
ZHANG Yutao, GUO Qiang, ZHANG Yuanbo, et al. Correlation analysis and prediction of coal spontaneous combustion risk based on correlation coefficient method[J]. China Safety Science Journal, 2024,34(1):125-132.
- [12] ZHAO Jingyu, ZHANG Yongli, SONG Jiajia, et al. Microstructure of coal spontaneous combustion in low-oxygen atmospheres at characteristic temperatures[J]. Fuel, 2021,10:DOI:10.1016/j.fuel.2021.122132.

- [13] SHI Quanlin, JIANG Wenjie, QIN Botao, et al. Effects of oxidation temperature on microstructure and spontaneous combustion characteristics of coal: a case study of Shendong long-flame coal[J]. *Energy*, 2023, 8: DOI:10.1016/j.energy.2023.128631.
- [14] 李美芬,李晔熙,邵燕,等. 伊敏煤热解过程中化学结构演化特征的原位拉曼光谱[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(12): 4 313-4 322.
LI Meifen, LI Yexi, SHAO Yan, et al. In-situ Raman spectroscopy of chemical structure evolution during pyrolysis of Yimin coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(12): 4 313-4 322.
- [15] XIAO Yang, LIU Kunhua, PANG Pan, et al. Thermokinetics behaviour and parameters for spontaneous combustion of carbonised powders and oxidised powders from preparation of coal-based activated carbon[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2021; DOI:10.1007/s10973-020-10441-3.
- [16] GB/T 474—2008, 煤样的制备方法[S].
GB/T 474—2008, Method for preparation of coal sample[S].
- [17] 廖茂林,江丙友,张潇仪,等. 煤尘粒径对表面活性剂复配溶液润湿性的影响研究[J]. *中国安全科学学报*, 2023, 33(3):96-102.
LIAO Maolin, JIANG Bingyou, ZHANG Xiaoyi, et al. Study on the influence of coal dust particle size on the wettability of surfactant compound solution[J]. *China Safety Science Journal*, 2023, 33(3):96-102.
- [18] 张园勃,张玉涛,邓军,等. 贫氧作用下煤氧化放热关键基团演变特征及其热效应研究[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(10):4 336-4 350.
ZHANG Yuanbo, ZHANG Yutao, DENG Jun, et al. Study on the evolution characteristics and thermal effect of key groups of coal oxidation exothermic under the action of lean oxygene [J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(10): 4 336-4 350.
- [19] 邓军,周佳敏,白祖锦,等. 瓦斯对煤低温氧化过程微观结构及热反应性的影响研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1):304-312.
DENG Jun, ZHOU Jiamin, BAI Zujin, et al. Study on the influence of gas on the microstructure and thermal reactivity of coal in low temperature oxidation process[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1):304-312.
- [20] 王秋红,靳松灵,罗振敏,等. 煤变质程度对煤燃烧动力学参数的影响[J]. *安全与环境工程*, 2022, 29(3):62-70.
WANG Qihong, JIN Songling, LUO Zhenmin, et al. Effect of coal metamorphic grade on kinetic parameters of coal combustion[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2022, 29(3):62-70.
- [21] 潘荣锟,胡代民,贾海林,等. 深部开采高温热液侵蚀煤自燃特性研究[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(4):1 906-1 916.
PAN Rongkun, HU Daimin, JIA Hailin, et al. Study on spontaneous combustion characteristics of high temperature hydrothermal erosion coal in deep mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(4):1 906-1 916.

作者简介: 叶正亮 (1981—),男,江苏盐城人,硕士,正高级工程师,主要从事煤矿自燃火灾防治相关的基础理论、工艺技术和装备材料的研究。E-mail:18680846118@163.com。

