·数理应用·

文章编号：1003－1251(2024)06－0073－07

淮南矿区典型煤样自燃特性热重－红外联用实验研究

肖峻峰[1,2]，尹诗元[1,2]，陶 然[1,2]，郭仕鹏[1,2]，刘雨晨[1,2]

(1. 安徽建筑大学 安全工程系，合肥 230601；2. 建筑健康监测与灾害预防技术国家地方联合工程实验室，合肥 230601)

摘 要：为降低煤矿安全事故发生风险，针对煤自燃氧化出现紧急危险性等问题，研究淮南矿区典型煤样的自燃特性。以淮南张集煤矿6、8、11-2和13-1煤样为例，通过热重－红外(TG-FTIR)联用技术分析煤样在升温氧化过程中的质量变化和气相产物析出特性。实验结果表明：四种煤样的升温氧化过程均可分为5个阶段，包含6个特征温度点；燃烧阶段各煤样反应活化能按由大到小排序为6煤、8煤、11-2煤、13-1煤；主要气相产物吸收峰强度按由高到低排序为13-1煤、11-2煤、8煤、6煤；根据活化能大小和主要气相产物吸收峰强度判断各煤样自燃风险按由高到低排序为13-1煤、11-2煤、8煤、6煤。本文结果可为类似矿区矿井火灾防治提供基础理论支撑。

关 键 词：煤自燃；热重－红外联用；特征温度；活化能；气相产物分析

中图分类号：TD 75 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.1003－1251.2024.06.012

TG-FTIR Study on the Spontaneous Combustion Characteristics of Typical Coal Samples from Huainan Mining Area

XIAO Junfeng[1,2], YIN Shiyuan[1,2], TAO Ran[1,2], GUO Shipeng[1,2], LIU Yuchen[1,2]

(1. Department of Safety Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;
2. National-local Joint Engineering Laboratory of Building Health Monitoring and Disaster Prevention Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: In order to reduce the risk of coal mine accidents, the spontaneous combustion characteristics of typical coal samples in Huainan mining area are studied. With four coal samples of 6, 8, 11-2 and 13-1 from Huainan Zhangji Coal Mine as examples, the mass changes and the characteristics of gas-phase product precipitation of the coal samples are analyzed by thermogravimetric-infrared (TG-FTIR) coupling technology in the process of heating and oxidation. The experimental results show that the four coal samples can be divided into five stages, including six characteristic temperature points; and the activation energies of the coal samples during the combustion stage are 6, 8, 11-2 and 13-1 coal in descending order, and the intensities of absorption peaks of the main gas-phase products are 13-1, 11-2, 8 and 6 coal in descending order; and according to the activation energy and the intensity of the absorption peaks of the main gas phase products, the risk of spontaneous combustion of each coal sample was ranked from high to low as 13-1, 11-2, 8 and 6 coal. This paper can provide basic theoretical support for the prevention and control of mine fires in similar mining

收稿日期：2024－04－25

基金项目：国家自然科学基金项目(51974006)；安徽省课程思政教学团队项目(2020kcszjxtd17)；安徽省高校协同创新项目(GXXT－2019－029)

作者简介：肖峻峰(1978—)，男，教授，博士。

areas.

Key words: coal spontaneous combustion; TG-FTIR; characteristic temperature; activation energy; gas phase product analysis

煤炭广泛用于发电、供热、工业生产等领域。2022 年,我国煤炭总产量为 45.6 亿吨,占全球总产量的 51.8%[1-2],煤矿资源在我国能源供给中具有举足轻重的地位,而我国具有自燃风险的煤层占总可采煤层的 90% 以上[3],煤炭开采过程的安全问题至关重要。

目前对煤自燃特性的研究主要从两个方面进行:采用热分析法[4]研究煤升温氧化过程中表征燃烧特性的参数变化;采用红外光谱等微观表征方法研究煤自燃过程中原煤官能团的变化。肖旸等[5]利用热重分析法确定了煤自燃过程中的 7 个特征温度点;文虎等[6]通过热重实验结果得到,煤样煤阶越高,特征温度越高,越难发生氧化反应;邓军等[7]通过程序升温实验发现,煤的变质程度越高,煤低温氧化自燃过程产生的 CO 和 CO_2 气体释放量越少;郝宇[8]使用程序升温仪和热重分析仪对不同变质程度煤自燃产生的气态产物进行分析,发现低温氧化阶段产生 CO、CO_2 的初始温度随着变质程度的降低而显著升高。张嫱妮[9]通过傅里叶变换红外光谱仪测试发现,在煤氧化自燃初期,烷基脂肪族和含氧官能团具有较高的活性;许涛[10]通过原位傅里叶变换红外光谱实验发现,脂肪族官能团—CH_2—、—CH_3 及含氧官能团—OH、—COOH、C═O 是煤氧化过程中发生反应的主要官能团,煤中稳定芳香烃结构的含量越少,越易发生自燃。

上述对煤自燃的基础特性研究多采用单一方法进行,且选取煤样一般为单个采区。淮南矿区地质结构复杂,煤层赋存形式多样[11],本文以淮南张集煤矿四种主要可采层煤样为研究对象,采用热重 - 红外联用方法对不同煤层煤样的升温氧化过程及其气相产物进行系统研究,综合确定各煤样的自燃倾向,以期为矿井火灾防治提供一定指导。

1 实验部分

1.1 煤样采集与制备

煤样来源为淮南矿区张集煤矿,6 煤采自西二采区 14136 工作面,煤层标高 - 525.2 ~ - 595.7 m,8 煤采自西二 B 组煤下采区 14218 工作面,煤层标高 - 521.9 ~ - 561.5 m,11-2 煤采自东二、东三采区,煤层标高 - 719.9 ~ - 896.9 m,13-1 煤采自西一采区 1221(3)工作面,煤层标高 - 553.1 ~ - 586.0 m。

在工作面现场采集原始煤样,密封保存后运送至实验室,将煤样表层去除,取芯;将煤芯破碎研磨后,过 0.150 ~ 0.075 mm 筛;在真空干燥箱中将煤粉于 60 ℃下干燥 24 h,密封储存在棕色干燥皿中备用。

1.2 ATR 红外光谱实验

使用赛默飞 Nicolet iS50 型傅里叶变换红外光谱仪对煤样进行测试,配置衰减全反射(ATR)附件,选用目数尽可能大的煤样均匀覆盖在 ATR 附件上。设备分辨率为 4 cm^{-1},扫描次数为 32,光谱范围为 4 000 ~ 400 cm^{-1}。

1.3 TG-FTIR 实验

将塞塔拉姆 Labsys Evo 型热重分析仪与 Nicolet iS50 型傅里叶变换红外光谱仪联用,测试煤样在升温氧化过程中产生的气相产物通过恒温输送管输送到气体室中,引入红外光谱仪进行检测。输送管与气体室温度设置为 250 ℃,气体氛围为空气,温度范围为 30 ~ 950 ℃,升温速率为 10 ℃/min,气体流速为 20 cm^3/min;使用 Al_2O_3 坩埚承装煤样,每次承装(10 ± 1)mg;红外测试波数范围为 4 000 ~ 700 cm^{-1},背景及样品扫描次数为 32,设备分辨率为 8 cm^{-1}。

2 结果与分析

2.1 热重实验结果分析

图 1 为四种煤样的热重分析(TG-DTG)曲线。可见,四种煤样的升温氧化阶段质量变化趋势相似,随温度升高,煤样质量先缓慢下降,再缓慢上升,达到最高点后开始快速下降,最终趋于稳定。

将煤样升温氧化过程分为 5 个阶段:①失水失重阶段,该阶段煤样失水、气体脱附,导致质量略微下降;②吸氧增重阶段,此阶段由于水分蒸发和气体脱附,煤样孔隙增多,吸氧量增加,且因为温度升高,煤中活性基团和自由基增多,煤吸附氧气方式开始由物理吸附向化学吸附转变;③热解

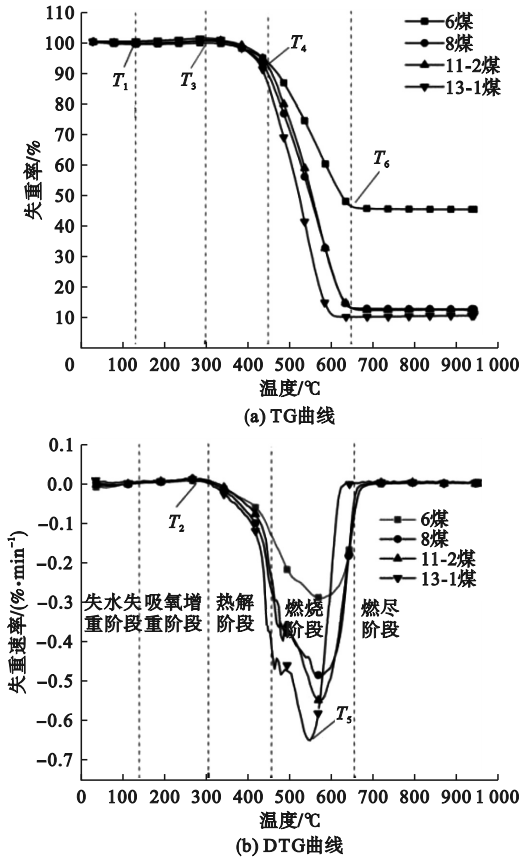


图 1　四种煤样的 TG-DTG 曲线

Fig. 1　TG-DTG curves of four types of coal samples

阶段,此阶段煤样质量达到最大,煤中挥发性物质开始受热分解,较稳定的芳环结构断裂,大量挥发性物质和热量释放,煤样质量快速下降;④燃烧阶段,煤样开始燃烧,质量开始迅速下降;⑤燃尽阶段,煤样氧化燃烧完全结束,质量不再发生变化。

根据 TG-DTG 曲线及煤升温氧化过程划分的 5 个阶段,得到最大热失重速率$(\mathrm{d}w/\mathrm{d}t)_{\max}$、平均质量损失速率$(\mathrm{d}w/\mathrm{d}t)_{\mathrm{mean}}$及 6 个特征温度点 T_1 ~ T_6[12],如表 1 所示。

T_1 为干裂温度,是失水失重阶段煤质量达到极小值时的温度,四种煤样的干裂温度按由高到低排序为 6 煤、8 煤、11-2 煤、13-1 煤;T_2 为增速温度,是吸氧增重阶段煤样 DTG 曲线上极大值对应的温度,四种煤样的增速温度按由高到低排序为 11-2 煤、8 煤、6 煤、13-1 煤;T_3 为最大质量温度,是煤质量达到最大值时的温度,四种煤样的最大质量温度按由高到低排序为 11-2 煤、8 煤、6 煤、13-1 煤;T_4 为燃烧温度,是煤样开始燃烧时的温度,四种煤样的燃烧温度按由高到低排序为 11-2 煤、6 煤、8 煤、13-1 煤;T_5 为最大热失重速率温度,是 DTG 曲线上最小值对应的温度,四种煤样的最大热失重速率温度按由高到低排序为 6 煤、8 煤、11-2 煤、13-1煤;T_6为燃尽温度,是煤样燃烧结束时的温度,四种煤样的燃尽温度按由高到低排序为 6 煤、8 煤、11-2 煤、13-1 煤。

表 1　各煤样特征温度点及燃烧特性参数

Table 1　Characteristic temperature points and combustion characteristics of each coal sample

煤样	T_1/℃	T_2/℃	T_3/℃	T_4/℃	T_5/℃	T_6/℃	$(\mathrm{d}w/\mathrm{d}t)_{\max}$/(%·min^{-1})	$(\mathrm{d}w/\mathrm{d}t)_{\mathrm{mean}}$/(%·min^{-1})	C/(%·min^{-1}·K^{-2})	S/(%·min^{-1}·K^{-3})
6	144.43	252.06	292.22	451.51	572.54	655.33	0.292	0.589	1.43×10^{-6}	1.28×10^{-9}
8	139.18	257.11	302.28	447.87	567.64	650.05	0.487	0.947	2.42×10^{-6}	3.53×10^{-9}
11-2	123.40	262.02	312.17	462.74	562.75	646.07	0.549	0.944	2.56×10^{-6}	3.74×10^{-9}
13-1	86.39	246.95	292.09	445.72	542.64	616.09	0.652	0.978	3.28×10^{-6}	5.21×10^{-9}

采用可燃性指数和综合燃烧指数评估煤样的可燃性和综合燃烧特性。可燃性指数越大,说明煤样的着火稳定性和燃烧性能越好;综合燃烧特性指数越大,说明煤样的综合燃烧性能越好[13-14]。

可燃性指数 C 的计算式为

$$C=\frac{(\mathrm{d}w/\mathrm{d}t)_{\max}}{T_{\mathrm{i}}^{2}} \tag{1}$$

式中 T_{i} 为燃烧温度。综合燃烧指数 S 的计算式为

$$S=\frac{(\mathrm{d}w/\mathrm{d}t)_{\max}}{T_{\mathrm{i}}^{2}}\times\frac{(\mathrm{d}w/\mathrm{d}t)_{\mathrm{mean}}}{T_{\mathrm{h}}} \tag{2}$$

式中 T_{h} 为燃尽温度。可燃性指数和综合燃烧指数的计算结果见表 1。

TG-DTG 曲线上主要表征煤样燃烧特性的参数为燃烧温度、燃尽温度、最大热失重速率,结合可燃性指数和综合燃烧指数分析四种煤样的燃烧特性。四种煤样的最大热失重速率、可燃性指数和综合燃烧指数按由大到小排序为 13-1 煤、11-2 煤、8 煤、6 煤,结合燃烧温度和燃尽温度的排序可知,四种煤样的可燃性和热稳定性按由高到低排序为 13-1 煤、11-2 煤、8 煤、6 煤。

采用 Coats-Redfern 法对燃烧阶段进行热动力学分析[15],该方法属于模型函数拟合法,适于单一扫描速率下的 TG 实验结果。Coats-Redfern 法的拟合公式为

$$\ln\left[\frac{G(\alpha)}{T^2}\right]=\ln\left(\frac{AR}{\beta E}\right)-\frac{E}{RT} \tag{3}$$

式中：$G(\alpha)$表示机理函数；α 为反应转化率；β 为升温速率；A 为指前因子；E 为反应活化能；T 为反应温度；R 为气体常数。

选择不同的机理函数，并根据 TG 曲线相关数据，以 $\ln[G(\alpha)/T^2]$ 对 $1/T$ 作图，进行线性拟合，拟合结果显示，最概然机理模型为边界反应的收缩圆柱体模型，反应级数 n 为 0.5。采用最概然机理函数所得拟合方程的斜率和截距计算反应活化能 E 和指前因子 A，拟合结果如表 2 所示，拟合方程中 y 表示 $\ln[G(\alpha)/T^2]$，x 表示 $1/T$。

表 2 Coats-Redfern 法拟合结果

Table 2 Fitting results of Coats-Redfern method

煤样	拟合方程	E/(kJ·mol^{-1})	A/min^{-1}	R^2
6	$y=-6\ 107x+10.87$	50.77	3.21×10^6	0.96
8	$y=-4\ 242x+6.918$	35.26	4.29×10^4	0.98
11-2	$y=-4\ 155x+6.17$	34.54	1.99×10^4	0.98
13-1	$y=-3\ 833x+6.413$	31.86	2.34×10^4	0.99

由表 2 可见，四种煤样燃烧的动力学方程拟合相关系数 R^2 均大于 0.96，说明拟合结果较为可靠。四种煤样燃烧阶段的反应活化能按由大到小排序为 6 煤、8 煤、11-2 煤、13-1 煤，煤样燃烧反应所需活化能越高，说明燃烧反应越难进行，故四种煤样的自燃倾向性按由高到低排序为 13-1 煤、11-2 煤、8 煤、6 煤。

2.2 ATR 实验结果分析

四种煤样的 ATR 红外光谱分析结果如图 2(a)所示，对煤样中主要官能团的吸收峰进行分峰拟合并计算峰面积[16-18]，结果见图 2(b)。

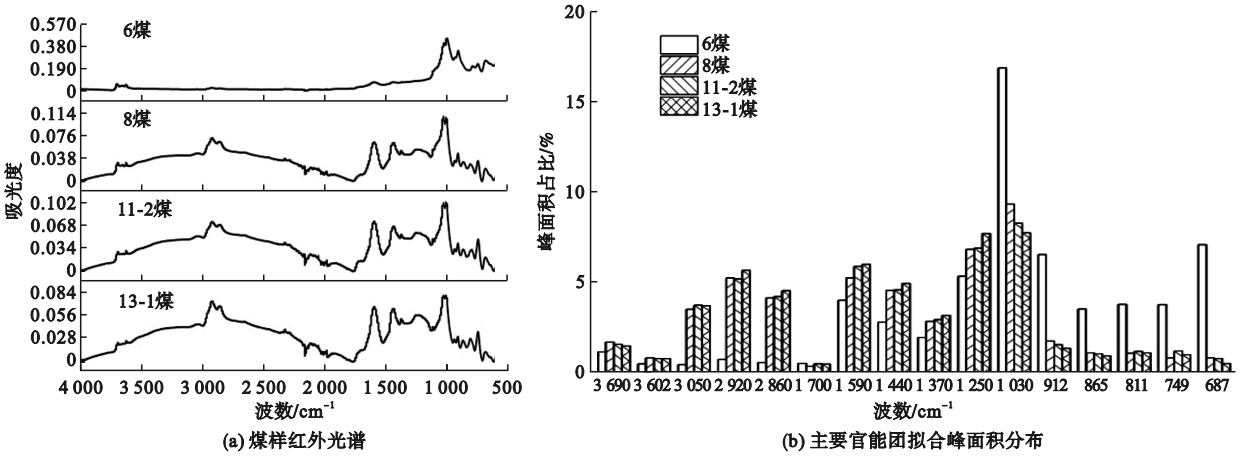


图 2 煤样 ATR 红外光谱及分峰拟合结果

Fig. 2 ATR infrared spectra of coal samples and split-peak fitting results

由图 2(a)可知：不同波数对应的含氧官能团吸收峰包括 3 700 ~ 3 200 cm^{-1}区间的羟基吸收峰、1 715 ~ 1 690 cm^{-1}区间的羧基吸收峰以及 1 250 cm^{-1}的芳香醚吸收峰和 1 010 cm^{-1}的烷基醚吸收峰；对应的脂肪族官能团吸收峰包括 2 975 ~2 915 cm^{-1}区间的甲基和亚甲基不对称吸收峰、2 875 ~2 858 cm^{-1}区间的甲基和亚甲基对称吸收峰、1 449 ~ 1 439 cm^{-1}区间的亚甲基剪切振动峰、1 379 ~ 1 373 cm^{-1}区间的甲基剪切振动峰；对应的芳香族官能团吸收峰有 3 050 ~ 3 030 cm^{-1}区间的芳烃 C—H 伸缩振动峰、1 599 ~ 1 064 cm^{-1}区间的芳香环中 C═C 伸缩振动峰、900 ~600 cm^{-1}区间的多种取代芳烃面外变形振动峰。

煤中官能团的数量决定煤的自燃特性，煤分子主体为芳香环，其结构较稳定，在低温阶段不易被氧化。由图 2(b)可知，四种煤样中芳香族官能团吸收峰面积按由大到小排序为 6 煤、8 煤、11-2 煤、13-1 煤，说明 6 煤在低温氧化阶段更稳定。煤中主要活性官能团为含氧官能团和脂肪族官能团(如—OH、C—H)，在低温阶段表现活跃，随温度升高不断消耗和产生，持续进行链式连锁反应。

四种煤样中羟基(—OH)吸收峰面积按由大到小排序为 8 煤、11-2 煤、13-1 煤、6 煤;脂肪族官能团吸收峰面积按由大到小排序为 13-1 煤、8 煤、11-2 煤、6 煤。8 煤与 11-2 煤的官能团含量接近,表现为燃烧阶段反应活化能接近,13-1 煤脂肪族官能团含量最高、芳香族官能团含量最低,表现为燃烧阶段活化能最低、自燃倾向性最高。

2.3　TG-FTIR 联用实验结果分析

通过 TG-FTIR 联用实验实时采集各煤样升温氧化过程中气相产物的红外光谱数据,结果如图 3 所示。

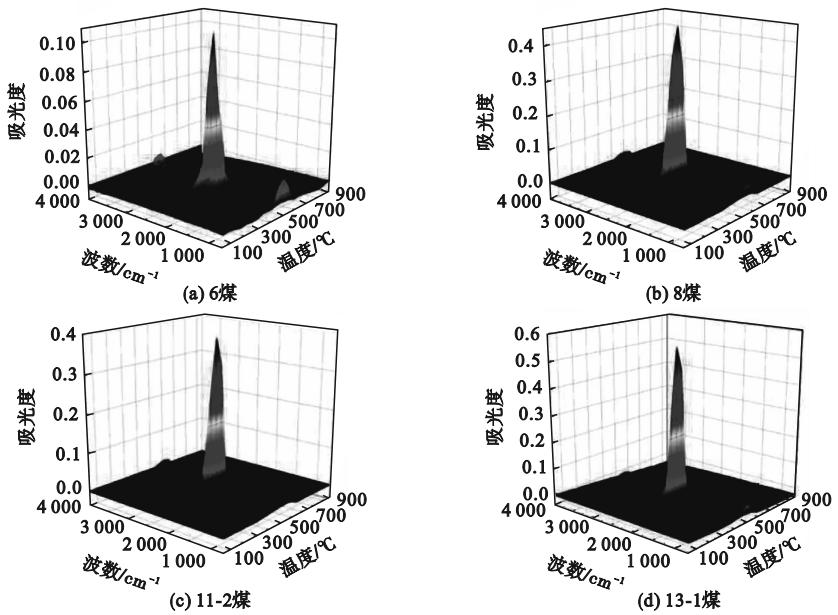


图 3　各煤样气相产物 TG-FTIR 的三维谱图

Fig. 3　3D spectra of TG-FTIR of the gas-phase products of each coal sample

由图 3 可见,各煤样的三维谱图中都有三个明显的吸收峰,其中最高峰为 CO_2 特征峰。不同煤层煤样的气相产物吸收峰强度随温度变化趋势相似:在 30 ~ 330 ℃温度区间时气相产物吸收峰强度较低;随着温度上升至热解阶段 330 ~ 450 ℃,气相产物吸收峰强度开始缓慢上升;当温度上升至燃烧阶段后,气相产物吸收峰强度开始快速上升,在最大热失重速率温度时达到峰值,随后快速下降至强度不再变化;总体变化趋势与 TG-DTG 曲线变化一致。

以 6 煤为例,其 280 ℃时气相产物红外光谱如图 4(a)所示,其 280、380、480、580、680 ℃时的红外光谱比较如图 4(b)所示。

由图 4(a)可知:波数在 3 800 ~ 3 500 cm^{-1}区间的O—H 伸缩振动谱带和 1 600 ~ 1 400 cm^{-1}区间的 H—O—H 弯曲振动谱带为气态水的两个特征峰;3 100 ~ 2 800 cm^{-1}区间的 C—H 键伸缩振动谱带和 1 470 ~ 1 300 cm^{-1}区间的 C—H 键弯曲振动谱带是 CH_4 等烷烃类气体的特征峰;2 400 ~ 2 250 cm^{-1}区间的 C ═ O 伸缩振动谱带、1 280 ~ 1 150 cm^{-1}区间的 C—O 弯曲振动谱带和 720 ~ 670 cm^{-1}区间的O—C—O弯曲振动谱带是CO_2

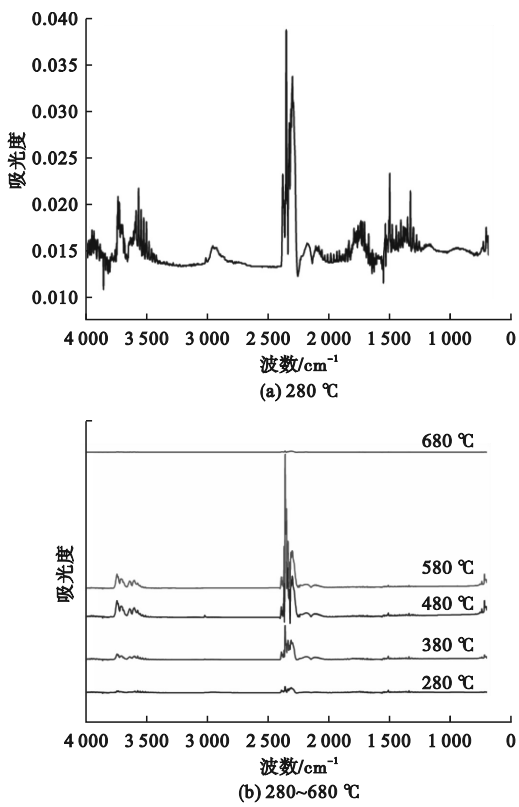


图 4　不同温度下气相产物的红外光谱图

Fig. 4　Infrared spectra of gas phase products at different temperatures

气体的特征峰;2 200 ~ 2 000 cm^{-1} 区间的谱带为 CO 气体特征峰。因此,在煤样未开始燃烧时,已经有气体产生,主要气相产物有 CO_2、CO、H_2O 和 CH_4。

由图 4(b)可知,在 280 ~ 480 ℃区间内,随温度上升,各气相产物的吸收峰强度增大,增长速率按由大到小排序为 CO_2、H_2O、CO、CH_4。在有氧环境下,大部分 C—H 基团与氧气反应生成 CO_2、CO、H_2O,但也会有 CH_4 气体产生。温度升至 580 ℃后,各气相产物的吸收峰强度开始减小,此时为燃烧后期至燃尽阶段。

不同煤层煤样主要气相产物吸收峰强度随时间的变化曲线如图 5 所示。可见,不同气相产物的吸收峰强度总体变化趋势一致,但不同煤样的不同气相产物峰值大小排序并不一致。CO_2 和 CO 气体峰值按由大到小排序为 13-1 煤、11-2 煤、8 煤、6 煤;H_2O 气体峰值按由大到小排序为 8 煤、11-2 煤、13-1 煤、6 煤;CH_4 气体峰值按由大到小排序为 8 煤、13-1 煤、11-2 煤、6 煤。CO_2 和 CO 气体吸收峰强度排序与煤样燃烧阶段的反应活化能排序一致,说明通过测试 CO_2 和 CO 气体吸收峰强度可在一定程度上反映煤的自燃倾向性;H_2O 气体吸收峰强度排序与羟基吸收峰峰面积一致,故其强度可能受羟基含量影响;由于在有氧环境下燃烧,CH_4 吸收峰强度可能受多种因素影响。CO_2 吸收峰强度远大于其他气相产物,以 CO_2 吸收峰强度为基准,四种煤样的气相产物吸收峰强度按由大到小排序为 13-1 煤、11-2 煤、8 煤、6 煤。

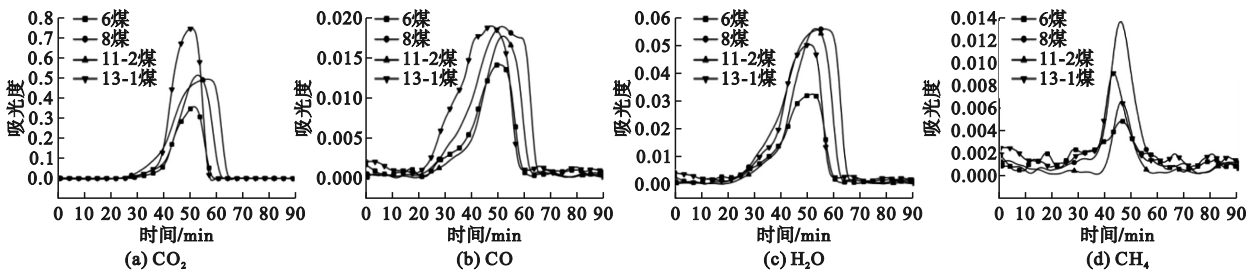


图 5 不同煤样气相产物的吸收峰强度随时间变化曲线

Fig. 5 Absorption peak intensity – time curves of gas-phase products of different coal samples

3 结论

1)根据 TG-DTG 曲线,不同煤层煤样升温氧化过程分为 5 个阶段,包含 6 个特征温度点,其中燃烧温度、燃尽温度按由高到低排序为 6 煤、8 煤、11-2 煤、13-1 煤;采用 Coats-Redfern 法进行燃烧阶段反应动力学计算得到各煤样燃烧阶段的活化能,按由大到小排序为 6 煤、8 煤、11-2 煤、13-1 煤;四种煤样的自燃倾向性按由高到低排序为 13-1 煤、11-2 煤、8 煤、6 煤。

2)采用 ATR 红外光谱对煤样进行表征,对主要官能团的吸收峰进行分峰拟合并计算峰面积,结果表明:各煤样芳香族官能团峰面积按由大到小排序为 6 煤、8 煤、11-2 煤、13-1 煤;脂肪族官能团峰面积按由大到小排序为 13-1 煤、8 煤、11-2 煤、6 煤;羟基官能团峰面积按由大到小排序为 8 煤、13-1 煤、11-2 煤、6 煤。

3)通过 TG-FTIR 联用实验对煤样升温氧化过程产生的气相产物进行实时红外光谱测试,结果表明煤燃烧的主要气相产物为 CO、CO_2、H_2O、CH_4。各煤样 CO_2、CO 吸收峰强度按由大到小排序为 13-1 煤、11-2 煤、8 煤、6 煤;H_2O 吸收峰强度按由大到小排序为 8 煤、13-1 煤、11-2 煤、6 煤。综合判断淮南矿区典型煤样自燃风险按由高到低排序为 13-1 煤、11-2 煤、8 煤、6 煤。

参考文献(References):

[1] 李敏,林志军,王德明,等. 我国煤矿重特大火灾事故统计分析[J]. 中国安全科学学报,2023,33(1):115 – 121.
LI M,LIN Z J,WANG D M,et al. Statistical analysis of major coal mine fire accidents in China[J]. China Safety Science Journal,2023,33(1):115 – 121. (in Chinese)

[2] 中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国 2022 年国民经济和社会发展统计公报[R/OL]. (2023 – 02 – 28)[2024 – 04 – 21]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230228_1919011.html.

[3] 史全林,杨红旗,李洪彪. 成膜型胶体泡沫的制备及灭火降温特性研究[J]. 中国安全科学学报,2022,32(10):121 – 126.
SHI Q L,YANG H Q,LI H B. Research on preparation of film-forming colloidal foam and its fire extinguishing and cooling characteristics[J]. China Safety Science Journal,2022,32(10):121 – 126. (in Chinese)

[4] LI Q W,XIAO Y,ZHONG K Q,et al. Overview of commonly used materials for coal spontaneous combustion prevention[J]. Fuel,2020,275:117981.

[5] 肖旸,马砺,王振平,等. 采用热重分析法研究煤自燃过程

的特征温度[J]. 煤炭科学技术,2007,35(5):73 - 76.
XIAO Y,MA L,WANG Z P,et al. Research on characteristic temperature in coal spontaneous combustion with thermal gravity analysis method[J]. Coal Science and Technology,2007,35(5):73 - 76. (in Chinese)
[6] 文虎,陆彦博,刘文永. 利用热重法研究不同氧浓度对煤自燃特性的影响[J]. 矿业安全与环保,2021,48(1):1 - 5,10.
WEN H,LU Y B,LIU W Y. Study on the effects of different oxygen concentrations on spontaneous combustion characteristics of coal with thermogravimetric method[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2021,48(1):1 - 5,10. (in Chinese)
[7] 邓军,张敏,雷昌奎,等. 不同变质程度煤自燃特性及低温氧化动力学分析[J]. 安全与环境学报,2021,21(1):94 - 100.
DENG J,ZHANG M,LEI C K,et al. Kinetic analysis of the low temperature spontaneous oxidation combustion of the coal seams due to the different metamorphism extents[J]. Journal of Safety and Environment,2021,21(1):94 - 100. (in Chinese)
[8] 郝宇. 不同煤阶煤自燃特性的实验研究[J]. 煤矿安全,2020,51(6):55 - 59.
HAO Y. Experimental study on spontaneous combustion characteristics of different rank coals[J]. Safety in Coal Mines,2020,51(6):55 - 59. (in Chinese)
[9] 张嫱妮. 煤氧化自燃微观特征及其宏观表征研究[D]. 西安:西安科技大学,2012.
[10] 许涛. 煤自燃过程分段特性及机理的实验研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2012.
[11] 袁亮. 淮南矿区现代采矿关键技术[J]. 煤炭学报,2007,32(1):8 - 12.
YUAN L. Key technology for modern mining in Huainan coal area[J]. Journal of China Coal Society,2007,32(1):8 - 12. (in Chinese)
[12] YANG Y,FEI J B,LUO Z M. et al. Experimental study on characteristic temperature of coal spontaneous combustion [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,2023,148(19):10011 - 10019.
[13] WANG Q H,LU X Y,MA C,et al. Comparative study of the kinetic characteristics of coal spontaneous combustion [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,2023,148(10):4463 - 4476.
[14] LI Z B,WEN H,SHU C M,et al. Thermokinetic behavior and microcharacterization of low-rank bitumiteoxidization [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,2019,137(5):1693 - 1705.
[15] PENG P P,XIAO J F,CHEN Z J,et al. Combustion kinetic analysis of group A coal from Huainan mining area based on TG experiment [J]. Combustion Science and Technology,2024,196(3):336 - 351.
[16] LI J L,LU W,CAO Y J,et al. Method of pre-oxidation treatment for spontaneous combustion inhibition and its application [J]. Process Safety and Environmental Protection,2019,131:169 - 177.
[17] TAHMASEBI A,YU J L,BHATTACHARYA S. Chemical structure changes accompanying fluidized-bed drying of Victorian brown coals in superheated steam,nitrogen,and hot air [J]. Energy & Fuels,2013,27(1):154 - 166.
[18] ZHANG C H,SHEN J H,LI J,et al. Inhibition discrimination of different chloride salts on coal functional groups[J]. Fuel,2022,314:122776.

(责任编辑:宋颖韬)

(上接第 72 页)

[2] 张金,赵亮,王鑫,等. 火炮身管内膛损伤机理分析[J]. 火力与指挥控制,2020,45(5):8 - 14.
ZHANG J,ZHAO L,WANG X,et al. Mechanism analysis of internal defects in barrels[J]. Fire Control & Command Control,2020,45(5):8 - 14. (in Chinese)
[3] 李洪,高岳,郭阳,等. 身管内膛流动镀铬新工艺[J]. 电镀与涂饰,2022,41(3):172 - 175.
LI H,GAO Y,GUO Y,et al. Novel process for chromium plating on barrel bore under flowing condition[J]. Electroplating & Finishing,2022,41(3):172 - 175. (in Chinese)
[4] 张凡凡,张利峰,李欧,等. 身管内膛镀铬性能检测研究[J]. 装备环境工程,2022,19(7):18 - 25.
ZHANG F F,ZHANG L F,LI O,et al. Performance test of chromium plating in body bore[J]. Equipment Environmental Engineering,2022,19(7):18 - 25. (in Chinese)
[5] 周科,娄霞,李智,等. 无裂纹电镀铬出现裂纹的原因分析[J]. 电镀与涂饰,2020,39(14):901 - 904.
ZHOU K,LOU X,LI Z,et al. Analysis on formation of cracks in electroplated crack-free chromium coating[J]. Electroplating & Finishing,2020,39(14):901 - 904. (in Chinese)
[6] SHAN L,WANG Y X,LI J L,et al. Structure and mechanical properties of thick r/Cr_2N/CrN multilayer coating deposited by multi-arc ion plating[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2015,25(4):1135 - 1143.
[7] 胡明. 不同制备方法的火炮身管材料 Cr 涂层性能研究[D]. 太原:中北大学,2019.
[8] 张向东,蔡习军,蔡飞,等. 钛合金表面不同多层结构 Cr/CrAlN 涂层的制备及磨损性能[J]. 材料导报,2022,36(15):127 - 132.
ZHANG X D,CAI X J,CAI F,et al. Preparation and wear properties of Cr/CrAlN coatings with different multilayer structures on the titanium alloy surface[J]. Materials Reports,2022,36(15):127 - 132. (in Chinese)
[9] 蔡志海,底月兰,张平. 活塞环表面 Cr/CrN 纳米多层膜的微观结构与摩擦学性能[J]. 沈阳工业大学学报,2011,33(4):375 - 381.
CAI Z H,DI Y L,ZHANG P. Microstructure and tribological property of Cr/CrN nano-multilayer film deposited on piston ring[J]. Journal of Shenyang University of Technology,2011,33(4):375 - 381. (in Chinese)
[10] 张健,郭策安,张罡,等. $PCrNi_3MoVA$ 钢表面电弧离子镀 $Ti_{0.7}Al_{0.3}N$ 涂层的性能研究[J]. 兵工学报,2011,32(6):697 - 702.
ZHANG J,GUO C A,ZHANG G,et al. Performance of arc-ion plating $Ti_{0.7}Al_{0.3}N$ coatings on $PCrNi_3MoVA$ steel[J]. Acta Armamentarii,2011,32(6):697 - 702. (in Chinese)
[11] 严天宇,曹云东,付思. 触头旋转情况下真空电弧对阳极烧蚀的影响[J]. 电器与能效管理技术,2021(5):1 - 4,58.
YAN T Y,CAO Y D,FU S. Influence of vacuum arc on anode ablation with rotating contact [J]. Electrical & Energy Management Technology,2021(5):1 - 4,58. (in Chinese)
[12] 车德良. 多弧离子镀氮化物薄膜的性能及应用[D]. 大连:大连理工大学,2005.
[13] MEGHWAL A,ANUPAM A,LUZIN V,et al. Multiscale mechanical performance and corrosion behaviour of plasma sprayed AlCoCrFeNi high-entropy alloy coatings[J]. Journal of Alloys and Compounds,2021,854:157140.

(责任编辑:徐淑姣)