

# 不同升温速率下中变质煤热解特性研究

王会昊<sup>1</sup>, 王耀宗<sup>1,2</sup>, 邵振宝<sup>1</sup>, 关钰荣<sup>1</sup>, 刘剑<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸

<sup>2</sup>河北省地质矿产勘查开发局地质勘查技术中心, 河北 石家庄

收稿日期: 2023年12月4日; 录用日期: 2024年1月5日; 发布日期: 2024年1月12日

## 摘要

为了研究中变质煤不同升温速率下对于热解过程的影响, 通过使用同步热分析仪对于样品进行热解, 研究3种中变质煤在不同升温速率(10°C、20°C、30°C/min)的条件下升高至600°C的热解情况, 采用Coats-Redfern方法, 来分析热解最大反应速率时的热解过程, 并通过数学拟合得出热解动力学参数。结果表明: 中变质煤的活化能和频率因子会随着升温速率的增大而升高, 在热解过程中主要分为脱水脱气阶段、主要分解阶段以及二次脱气阶段, 并随着升温速率的提升, 热解失重率表现为降低的趋势。

## 关键词

煤热解, 热重分析, 非等温, 动力学参数

# Study on Pyrolysis Characteristics of Medium-Metamorphic Coal at Different Heating Rates

Huihao Wang<sup>1</sup>, Yaozong Wang<sup>1,2</sup>, Zhenbao Shao<sup>1</sup>, Yurong Guan<sup>1</sup>, Jian Liu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Earth Sciences and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

<sup>2</sup>Geological Exploration Technology Center, Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development, Shijiazhuang Hebei

Received: Dec. 4<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jan. 5<sup>th</sup>, 2024; published: Jan. 12<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In order to study the effects of different heating rates on the pyrolysis process of medium-meta-

\*通讯作者。

文章引用: 王会昊, 王耀宗, 邵振宝, 关钰荣, 刘剑. 不同升温速率下中变质煤热解特性研究[J]. 矿山工程, 2024, 12(1): 29-37. DOI: 10.12677/me.2024.121004

morphic coals, samples of three medium-metamorphic coals were pyrolyzed at different heating rates (10°C, 20°C, 30°C/min) to 600°C by using a synchronous thermal analyzer. The Coats-Redfern method was adopted. The pyrolysis process at the maximum reaction rate was analyzed, and the kinetic parameters of pyrolysis were obtained by mathematical fitting. The results show that the activation energy and frequency factor of medium-metamorphic coal increase with the increase of heating rate, and the pyrolysis process is mainly divided into dehydration degassing stage, main decomposition stage and secondary degassing stage. With the increase of heating rate, the pyrolysis weight loss rate shows a decreasing trend.

## Keywords

Raw Coal Pyrolysis, Thermo Gravimetric Analysis, Non-Isothermal, Dynamic Parameter

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近些年来,随着人口的不断增加和工业化的发展,人们在享受福利的同时,资源的储量也在不断地消耗。据统计,2022年原煤产量达到45.6亿吨,2023年第一季度原煤的产量持续增加,同比增长达到5.5% [1]。然而有80%的煤炭都被直接燃烧,这导致煤炭资源的严重浪费,并且也会带来一定的环境问题。因此如何解决煤炭的燃烧问题,实现煤炭的高效清洁利用是重中之重[2] [3]。煤炭的干馏是当前煤炭加工的最重要的工艺之一,表现为在隔绝氧气或者在惰性气体的气氛下加热到较高的温度,在热解的过程中发生一系列的变化。例如:煤炭的焦化、气化和液化。因此,对煤炭热解特性的研究对于实现煤炭的高效清洁利用具有一定的指导意义[4] [5]。

煤炭在热解的过程中可分为挥发性物质的析出以及半焦状残余物的形成,其中挥发性物质包括:水分、气体以及焦油的产生[6] [7] [8]。许多学者通过对升温过程中煤的失重来分析来研究煤炭的热解过程,将煤炭的整个热解过程分为几个阶段:煤的脱水、煤炭的解聚和分解以及热缩聚反应[9] [10]。其中影响煤热解的因素有,热解终止温度、热解升温速率、样品粒径等。其中热解升温速率对于其热解的影响较为显著[11] [12] [13]。通过采用非等温热重法研究不同升温速率的影响下,热解终止温度和热解速率对于热解产物的影响,以及活化能和频率因子在热解过程中的变化规律[14]。即样品的升温速率越快,煤中挥发分物质的析出越快,活化能在最大热解失重温度时表现为最大。常娜等[15]根据低变质神府煤在不同热解升温速率下的热解失重率进行分析发现:煤热解失重率会随着热解升温速率的提升而升高,但当升温速率达到20°C/min后,热解失重率会趋于平稳,整体失重变化较小。在不同热解升温速率下,李改改等[16]采用3种热解动力学模型对不同热解升温速率下的富油煤进行分析,发现活化能在热解升温速率的提升下其平均活化能也会随之增加,并不止单单局限于最大热解失重温度,随着热解升温速率的提升,其热解温度逐渐向高温区域移动。

基于以上研究现状,采用Coats-Redfern方法,对不同地区、不同煤层、不同煤种的3种煤炭(邯郸峰峰矿区2#肥煤、唐山开滦矿区9#气煤、唐山开滦矿区12#气煤)开展不同升温速率下的热解失重实验,分析其热解过程,探究热解过程中升温速率的改变对热解失重率的影响,进一步划分不同中等变质煤在不同升温速率下的热解失重率关系及最大失重率与升温速率的变化规律。通过热解失重率及失重速率曲线建立热解动力学模型,分析活化能及频率因子在不同升温速率下的变化规律。基于热解过程变化规律及

动力学模型参数归纳中等变质煤热解规律特性,为各地煤炭原位注热改性开采提供参考。

## 2. 样品与实验

### 2.1. 煤样分析

实验所选用的煤炭为邯峰矿区 2#肥煤、唐山开滦矿区 9#气煤、唐山开滦矿区 12#气煤。首先基于 GB/T212-2008、GB/T214-2007、GB/T476-2008、GB/T19227-2008 标准,将煤样使用研钵进行研磨,使煤样粒径  $< 0.2 \text{ mm}$ ,对于研磨后煤样进行工业分析以及元素分析,为后续不同升温速率下热重实验提供基础物质数据。工业分析与元素分析结果如表 1 所示,其煤质特点表现为低水分,挥发性高。

**Table 1.** Results of coal industry analysis and elemental analysis

**表 1.** 煤工业分析及元素分析结果

煤样	$M_{ad}$ (%)	$A_{ad}$ (%)	$V_{ad}$ (%)	$FC_{ad}$ (%)	$St_d$ (%)	$C_d$ (%)	$H_d$ (%)	$N_d$ (%)
峰峰矿区 2#肥煤	0.85	23.15	32.34	43.66	0.48	77.15	4.98	1.45
开滦矿区 9#气煤	2.10	33.18	30.93	33.79	0.53	71.59	4.80	1.29
开滦矿区 12#气煤	2.33	27.12	34.87	35.68	1.51	73.73	5.04	1.36

### 2.2. 不同升温速率下热重实验

不同升温速率下的热重实验使用德国耐驰公司 STA 449-F3 同步热分析仪。其中煤样所选粒径均  $< 0.2 \text{ mm}$ 。每组实验所选用样品数量为  $10 \pm 1 \text{ mg}$ 。在实验开始前,首先将煤样置于真空干燥箱中,在  $110^\circ\text{C}$  真空环境中干燥 12 小时。干燥后煤样在氮气流量为  $50 \text{ ml/min}$  的气氛下,分别以  $10^\circ\text{C}$ 、 $20^\circ\text{C}$ 、 $30^\circ\text{C/min}$  的升温速率升高至终止温度。通过以上条件对于三种煤样进行检测分析。

## 3. 实验结果

### 3.1. 不同煤热解特性

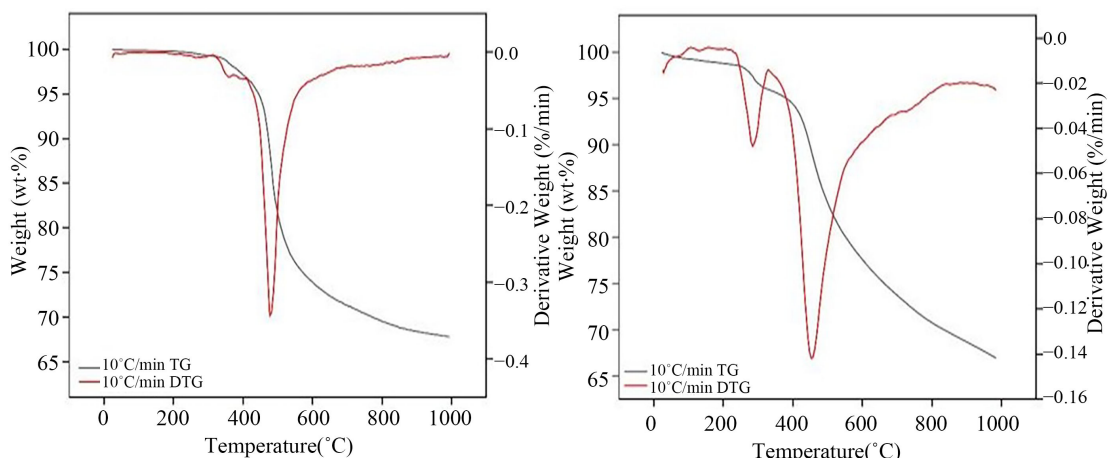
图 1 为不同煤在  $10^\circ\text{C/min}$  升温速率下重量随温度变化曲线(TG)以及其重量变化速率随温度的变化曲线(DTG)。通过 TG 和 DTG 曲线可知,不同煤样的热解过程主要可以分为以下 3 个阶段:当热解温度低于  $300^\circ\text{C}$ 时,煤的失重主要由于煤间结合水以及孔隙中吸附的甲烷,二氧化碳等少量气体。在此过程中峰峰矿区 2#肥煤失重率为 7.3%。随着热解温度的升高,煤的热解失重速率逐渐提升,当温度到达  $482^\circ\text{C}$  时,此时峰峰矿区 2#肥煤失重速率达到峰值,在这个阶段峰峰矿区 2#肥煤失重率为 14.23%。在  $300^\circ\text{C}\sim 600^\circ\text{C}$  区间,煤热解失重速率降低,峰峰矿区 2#肥煤失重率为 26.05%。而后伴随温度的升高,煤热解失重曲线逐渐趋于平稳。

**Table 2.** Weight loss of coal in different temperature ranges (%) at heating rate of  $10^\circ\text{C/min}$

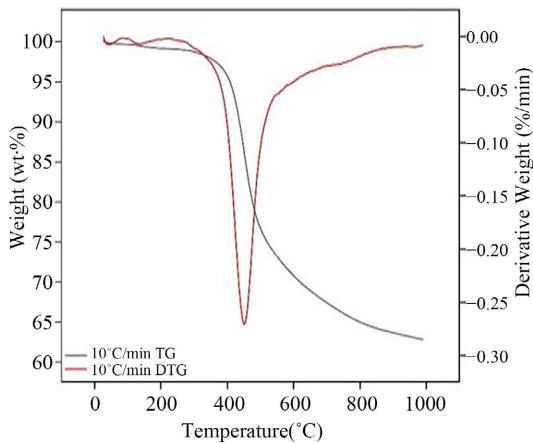
**表 2.**  $10^\circ\text{C/min}$  升温速率下不同温度区间煤热解失重率(%)

煤样	温度区间	失重率(%)
峰峰矿区 2#肥煤	$25^\circ\text{C}\sim 300^\circ\text{C}$	0.73
	$300^\circ\text{C}\sim 600^\circ\text{C}$	25.32
开滦矿区 9#气煤	$25^\circ\text{C}\sim 300^\circ\text{C}$	3.32
	$300^\circ\text{C}\sim 600^\circ\text{C}$	22.52
开滦矿区 12#气煤	$25^\circ\text{C}\sim 300^\circ\text{C}$	1.26
	$300^\circ\text{C}\sim 600^\circ\text{C}$	27.96

比较 3 种煤在 10°C/min 升温速率下, 在 25°C~600°C 温度区间内变化规律, 发现开滦矿区 9# 气煤在 235°C~320°C 温度区间内, 煤热解失重速率曲线(DTG)有一个小型峰值产生, 此过程可能由于煤中包括较多的水以及吸附气体。在这个阶段热解失重率为 2.6%, 根据热解失重曲线可知在 324°C~552°C 区间内煤热解速率变化最为剧烈, 热解速率最大值在 458°C, 而在整个温度区间内煤的总体失重率为 33.03%, 与峰峰矿区 2# 肥煤热解失重曲线较为相似。通过对比开滦矿区 9# 气煤与开滦矿区 12# 气煤热解失重曲线可知: 在 25°C~600°C 区间内开滦矿区 12# 气煤热解失重率高于开滦矿区 9# 气煤, 据(表 1)煤的工业分析与元素分析可知, 此过程的变化是由于开滦矿区 12# 气煤中硫元素含量高于 9 层煤, 在热解区间内挥发性物质受热分解所导致。再根据(表 2)所示, 不同煤样在 10°C/min 的升温速率下, 在到达 600°C 时, 比较峰峰矿区 2# 肥煤、开滦矿区 9# 气煤与开滦矿区 12# 气煤热解失重曲线与失重速率曲线可知: 其整体失重率较为相似。通过(图 1)可知 3 种煤最大热解反应速率区间均在 330°C~560°C。



(a) 10°C/min 峰峰矿区 2# 肥煤 TG-DTG 热解失重曲线 (b) 10°C/min 开滦矿区 9# 气煤 TG-DTG 热解失重曲线



(c) 10°C/min 开滦矿区 12# 气煤 TG-DTG 热解失重曲线

Figure 1. TG-DTG weight loss curves of different coal samples at 10°C/min

图 1. 10°C/min 不同煤样 TG-DTG 失重曲线

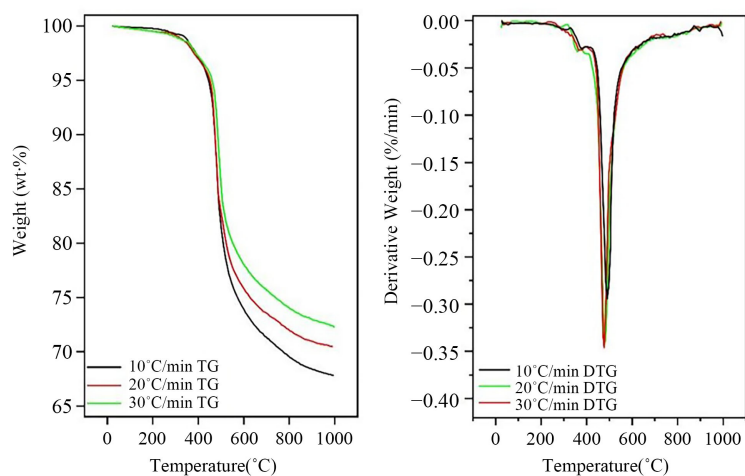
### 3.2. 不同升温速率对于煤热解特性影响

在煤的热解过程中, 升温速率是最重要的因素之一。在煤的整个热解的过程中, 可以将其分为 3 个阶段, 如(图 2)为 3 种煤在 10°C/min、20°C/min、30°C/min 热解速率下的 TG 曲线图, 从图中可以看出,

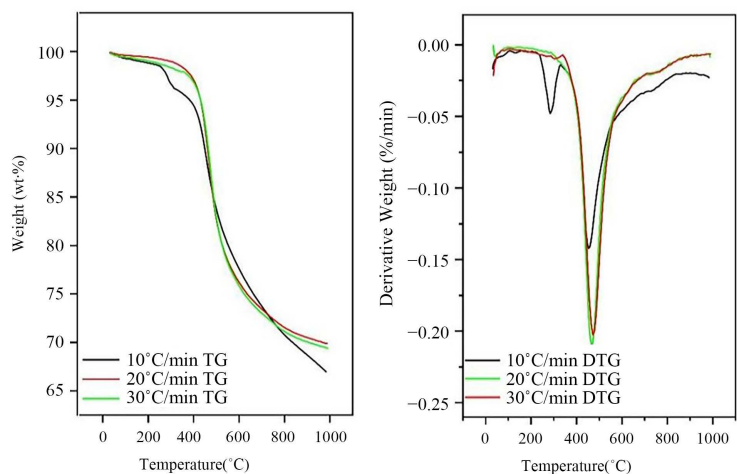
煤热解的失重会随着热解速率的提升而降低,在 30°C/min 升温速率下的失重率最低,在 10°C/min 升温速率下的失重率最高。在不同升温速率的影响下, TG 曲线形状基本一致,但随着升温速率的提升,其整体失重率也随之下降。也就是说在保证失重率相同时,所对应的热解温度也会提升,升温速率的提升不利用煤的充分热解。

煤热解特征参数的求取可以反应热解过程中不同阶段的性质,通过比较不同升温速率下中等变质煤的起始失重温度,可以直观地反映原煤在热解过程中分解特性,通过中等变质煤在反应过程中的最大失重温度来判断其大分子结构之间的稳定性。通过比较相同煤样的不同升温速率下最大失重温度来判断煤的热解反应特性,最大失重温度越高,即更加利于煤的热解,反之抑制。

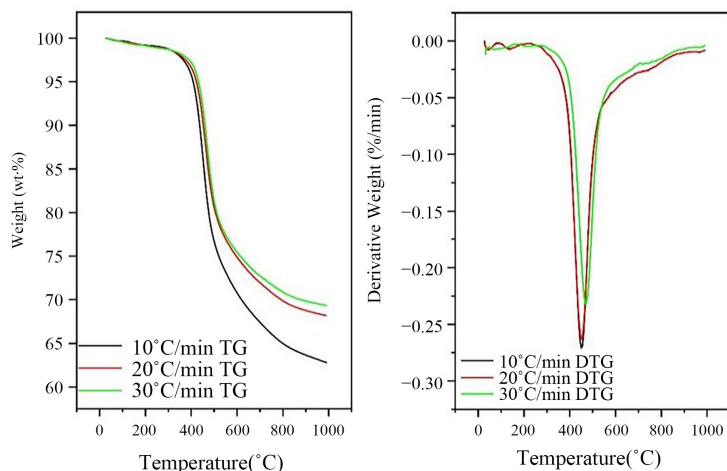
根据热重实验得出热解的 TG 与 DTG 曲线,从而分析热解过程中煤的特征参数,中等变质煤的特征参数定义如下: $T_s$ 为热解初始温度, $T_{max}$ 为热解过程中最大失重温度, $T_e$ 为剧烈热解温度,其值为 $T_e = 2T_{max} - T_s$ , $(dw/dt)_{max}$ 为最大热解失重速率,此点为 TG 曲线上反应最为剧烈的点,也就是热解反应速率曲线上的峰值。其具体数值如下表 3 所示,可以发现,随着升温速率的改变,其初始析出温度始终维持在一个稳定的范围内,受到升温速率的影响较小。而最大失重温度与剧烈热解温度均随着升温速率的提升,向后偏移,表明在热解过程中升温速率的提升不利于煤的充分热解。



(a) 峰峰矿区 2#肥煤不同升温速率下 TG-DTG 曲线



(b) 开滦矿区 9#气煤不同升温速率下 TG-DTG 曲线



(c) 开滦矿区 12#气煤不同升温速率下 TG-DTG 曲线

**Figure 2.** TG-DTG curves of different coal samples with different heating rates  
**图 2.** 不同煤样不同升温速率的 TG-DTG 曲线

**Table 3.** Pyrolysis characteristics of raw coal  
**表 3.** 原煤热解特征参数

样品	升温速率/°C·min	T <sub>g</sub> /°C	T <sub>max</sub> /°C	T <sub>e</sub> /°C	(dw/dt) <sub>max</sub> /%·s <sup>-1</sup>
峰峰矿区 2#肥煤	10	349	482	554	0.3997
	20	300	483	559	0.3959
	30	334	490	561	0.3322
开滦矿区 9#气煤	10	231	453	552	0.1464
	20	333	466	649	0.2168
	30	262	471	567	0.2155
开滦矿区 12#气煤	10	328	450	540	0.2807
	20	318	461	554	0.2436
	30	324	470	557	0.2502

### 3.3. 热解动力学参数及分析

研究煤的热解动力学对于了解热解机理，实现资源的清洁高效利用，具有深刻的意义。通过对于不同煤样在不同升温速率下的热重实验数据进行动力学分析，通过对比活化能、频率因子等动力学参数，来探究升温速率对于煤热解过程中的影响。求解热解动力学参数的方法主要有两种，分别为微分法和积分法，积分法更加侧重于整体数据的分析，不单单局限于微分法的局部数据分析，且积分法处理数据较为简单，对原始数据造成的误差较小，基于以上两点，本文采用 Coats-Redfern 算法来进行热解动力学参数的计算。

总反应速率方程[6]：

$$\frac{da}{dt} = Ae^{-E/RT} \cdot f(a) \tag{1}$$

$$a = \frac{w_0 - w}{w_0 - w_f} \tag{2}$$

其中： $a$  为煤在热解过程中的转化率，%； $t$  为煤热解反应过程时间，min； $A$  为频率因子， $\text{min}^{-1}$ ， $n$  为热解反应级数； $E$  为活化能，KJ/mol； $R$  为气体摩尔常数，数值为  $8.314 \text{ J (mol}\cdot\text{K)}$ ； $w_0$  为样品初始质量，g； $w$  为样品在热解过程中任意时刻的质量，g； $w_f$  为热解结束后样品的剩余质量，g。

在非等温热重试验中，升温速率为固定数值的情况下，热解温度  $T$  与时间  $t$  成线性关系，可以表示为： $T = T_0 + \beta t$ ， $\beta$  为升温速率，K/min。

若将  $T = T_0 + \beta t$  带入方程(1)，可得：

$$\frac{da}{dt} = \frac{A}{\beta} e^{-E/RT} f(a) \tag{3}$$

公式(3)中  $f(a)$  为机理函数，假设热解反应过程为  $n$  级反应，则  $f(a) = (1 - a)^n$ ，对公式(3)进行取对数变化得：

$$\ln\left(\frac{-\ln-\ln(1-a)}{T^2}\right) = \ln\frac{AR}{\beta E}\left(1-\frac{2RT}{E}\right) - \frac{E}{RT} (n=1) \tag{4}$$

$$\ln\left(\frac{1-(1-a)^{1-n}}{T^2(1-n)}\right) = \ln\frac{AR}{\beta E}\left(1-\frac{2RT}{E}\right) - \frac{E}{RT} (n \neq 1) \tag{5}$$

其中，公式(4)、(5)为 Coats-Redfern 方法的通用表达式，通常可以公式(4)右边第一项  $\ln AR/\beta E$  看作常数，因此  $\ln[-\ln-\ln(1-a)/T^2]$  可以对  $1/T$  做出一条直线，其斜率为  $-E/R$ ，截距为  $\ln(AR/\beta E)$ ，从而可以计算出原煤热解过程中的活化能  $E$  和指前因子  $A$  的大小。所选温度区间皆为最大失重温度周围，可以发现随着升温速率的提升，煤样的活化能都变现为上升的趋势，根据表 4、表 5 可知，峰峰矿区 2#肥煤平均活化能为 45.75 KJ/mol，开滦矿区 9#气煤的平均活化能为 47.06 KJ/mol，开滦矿区 12#气煤的平均活化能为 57.94 KJ/mol。

Table 4. 3 Dynamic parameters of different coal heating rates

表 4. 3 种煤不同升温速率下动力学参数

试样	升温速率 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$	温度区间 $^{\circ}\text{C}$	活化能 kcal/mol	频率因子 $\text{Min}^{-1}$	相关系数 $r$
峰峰矿区 2#肥煤	10	299~473	45.32	$7.5 \times 10^7$	-0.9824

Table 5. 3 Dynamic parameters of different coal heating rates (continued)

表 5. 3 种煤不同升温速率下动力学参数(续)

试样	升温速率 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$	温度区间 $^{\circ}\text{C}$	活化能 kcal/mol	频率因子 $\text{Min}^{-1}$	相关系数 $r$
	20	318~492	45.59	$1.3 \times 10^8$	-0.9339
	30	345~497	46.34	$2.0 \times 10^8$	-0.9388
	10	314~503	45.31	$3.0 \times 10^7$	-0.99861
开滦矿区 9#气煤	20	297~501	47.49	$7.9 \times 10^7$	-0.94953
	30	322~500	48.22	$9.6 \times 10^7$	-0.93168
	10	301~480	57.26	$5.5 \times 10^6$	-0.95564
开滦矿区 12#气煤	20	323~500	57.98	$1.3 \times 10^7$	-0.95983
	30	328~500	58.59	$2.1 \times 10^7$	-0.9451

基于 3 种中等变质煤不同升温速率下的动力学参数，可知不同煤样不同升温速率下的热解动力学方程如下表 6 所示：

**Table 6.** Kinetic equation of pyrolysis reaction  
**表 6.** 热解反应动力学方程

试样	升温速率 °C/min	温度 °C	热解力学方程
峰峰矿区 2#肥煤	10	299~473	$\frac{d\alpha}{dt} = 7.5 \times 10^7 \exp\left(\frac{-5.452 \times 10^3}{T}\right) \cdot (1-a)$
	20	318~492	$\frac{d\alpha}{dt} = 1.3 \times 10^8 \exp\left(\frac{-5.484 \times 10^3}{T}\right) \cdot (1-a)$
	30	345~497	$\frac{d\alpha}{dt} = 2.0 \times 10^8 \exp\left(\frac{-5.574 \times 10^3}{T}\right) \cdot (1-a)$
开滦矿区 9#气煤	10	314~503	$\frac{d\alpha}{dt} = 3.0 \times 10^7 \exp\left(\frac{-5.450 \times 10^3}{T}\right) \cdot (1-a)$
	20	297~501	$\frac{d\alpha}{dt} = 7.9 \times 10^7 \exp\left(\frac{-5.712 \times 10^3}{T}\right) \cdot (1-a)$
	30	322~500	$\frac{d\alpha}{dt} = 9.6 \times 10^7 \exp\left(\frac{-5.800 \times 10^3}{T}\right) \cdot (1-a)$
开滦矿区 12#气煤	10	301~480	$\frac{d\alpha}{dt} = 5.5 \times 10^6 \exp\left(\frac{-6.887 \times 10^3}{T}\right) \cdot (1-a)$
	20	323~500	$\frac{d\alpha}{dt} = 1.3 \times 10^7 \exp\left(\frac{-6.974 \times 10^3}{T}\right) \cdot (1-a)$
	30	328~500	$\frac{d\alpha}{dt} = 2.1 \times 10^7 \exp\left(\frac{-7.047 \times 10^3}{T}\right) \cdot (1-a)$

#### 4. 结论

1) 从 3 种中等变质煤在不同升温速率下的 TG、DTG 曲线可以得知, 不同升温速率下的中等变质煤在热解过程中所表现的热解特性不同, 大致可分为 3 个阶段: 脱气脱水阶段; 热解活跃阶段; 二次脱气阶段。且从 DTG 曲线可以得知, 峰峰矿区 2#肥煤最大热解速率集中在 480°C~490°C 之间, 开滦矿区 9#气煤、开滦矿区 12#气煤最大热解速率均集中于 450°C~475°C 之间。

2) 根据中等变质煤不同升温速率的 TG、DTG 对比可知, 随着热解升温速率的提升, 热解失重量以及热解失重速率峰值均向后移动, 即在热解失重量相同的情况下, 热解升温速率越高, 其所需的温度越高。

3) 热解动力学参数的计算采用 Coats-Redfern 算法来对中等变质煤热解最大速率阶段进行动力学分析, 得到不同煤样在不同热解升温速率下的最大热解速率阶段的动力学参数。由动力学参数可知: 在固定煤样的情况下, 随着热解升温速率的情况下, 中等变质煤的活化能和频率因子会随着热解升温速率的增大而升高。

#### 基金项目

河北省重点研发计划项目(21374104D); 河北省自然科学基金(E2019402361、E2020402075); 河北省教育厅科学研究项目(ZD2021309)。

#### 参考文献

- [1] 李军, 乔中鹏, 刘治中, 等. 煤炭资源开发管理现状分析及对策建议[J]. 中国煤炭, 2023, 49(9): 1-6.



- 
- [2] Wu, J.H., Liu, J.Z., Yual, S., *et al.* (2015) Sulfur Transformation during Hydrothermal Dewatering of Low Rank Coal. *Energy Fuel*, **29**, 6586-6592. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b01258>
- [3] Yan, R., Zhu, H., Zheng, C., *et al.* (2002) Emissions of Organic Hazardous Air Pollutants during Chinese Coal Combustion. *Energy*, **27**, 485-503. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(02\)00003-8](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(02)00003-8)
- [4] 龚志军, 王凯兴, 武兴斐. 基于热重红外联用技术的煤热解特性研究[J]. 内蒙古科技大学学报, 2016, 35(3): 247-251.
- [5] Ramukutty, S. and Ramachandran, E. (2014) Reaction Rate Models for the Thermal Decomposition of Ibuprofen Crystals. *Journal of Crystallization Process and Technology*, **4**, 71-78. <https://doi.org/10.4236/jcpt.2014.42010>
- [6] 林彬, 祁鑫鑫, 王厚旺, 吴磊, 王鹤寿. 不同升温速率对烟煤热解过程的影响及其动力学分析[J]. 煤矿现代化, 2022, 31(3): 54-57.
- [7] 王小华, 赵洪宇, 李玉环, 等. 基于 TG-MS 研究不同升温速率下褐煤热解气体产物析出特性及其动力学参数[J]. 煤炭工程, 2018, 50(3): 140-144.
- [8] 肖翠微. 中等挥发分烟煤燃烧特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(5): 135-138+25.
- [9] 严焯. 无烟煤分子结构特征及热解过程中官能团迁移特性研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [10] 易荣. 褐煤热解过程孔隙结构研究[J]. 内江科技, 2013, 34(5): 23+124.
- [11] 崔丽萍, 蔡会武. 粒度和升温速率对黄陵煤热解动力学的影响[J]. 应用化工, 2016, 45(S2): 201-204.
- [12] Du, M.L., Yang, Z.Y. and Fan, J.W. (2018) Study on the Inference Factors of Huangling Coking Coal Pyrolysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **108**, Article ID: 032084. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/108/3/032084>
- [13] 朱红青, 郭艾东, 屈丽娜. 煤热动力学参数、特征温度与挥发分关系的试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(3): 55-60.
- [14] 李爱蓉, 吴道洪, 王其成, 等. 非等温热重分析长焰煤热解过程与动力学特征[J]. 燃料与化工, 2013, 44(6): 7-11.
- [15] 常娜, 甘艳萍, 陈延信. 升温速率及热解温度对煤热解过程的影响[J]. 煤炭转化, 2012, 35(3): 1-5.
- [16] 李改改, 姜鹏飞, 黄佳齐, 等. 富油煤热解过程动力学参数变化规律研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(10): 52-56.