

# 石煤燃烧特性及其类属研究

刘建忠<sup>1</sup>, 张保生<sup>2</sup>, 周俊虎<sup>1</sup>, 冯展管<sup>1</sup>, 岑可法<sup>1</sup>

- (1. 能源洁净利用国家重点实验室(浙江大学), 浙江省 杭州市 3100272;
2. 中国矿业大学机电学院, 江苏省 徐州市 221116)

## Combustion Characteristics and Classify Attribute of Stone Coal

LIU Jian-zhong<sup>1</sup>, ZHANG Bao-sheng<sup>2</sup>, ZHOU Jun-hu<sup>1</sup>, FENG Zhan-guan<sup>1</sup>, CEN Ke-fa<sup>1</sup>

- (1. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization(Zhejiang University), Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu Province, China)

**ABSTRACT:** Thermogravimetry is applied to analyze the combustion characteristics and combustion kinetic mechanisms of three kinds of stone coal, and the classify attribute of stone coal is investigated. The results show that stone coal is with high ash, high sulfur and low heat value. The combustion characteristics of stone coal are similar to anthracite coal and worse than anthracite. The combustion kinetic mechanism of stone coal is investigated with Popescu method, and the conclusion indicates that the combustion of stone coal is controlled by the three-dimensional diffusion model and the anti Jander equation is the most probable kinetic function. The activation energies of the above three reaction stages are calculated by isoconversional method, and the values show that the energy barriers are always higher which confirms the combustion kinetic mechanism of stone coal. The classification system based on the volatile matter content in dry and ash free basis is not suitable to stone coal. From the coal rank and the combustion characteristics and kinetic analyzing results, the stone coal should be classed as a high rank and maggy anthracite coal.

**KEY WORDS:** stone coal; combustion characteristics; combustion kinetics; classify attribute; thermogravimetry

**摘要:** 采用热重分析方法对 3 种石煤的燃烧特性和燃烧动力学进行研究, 并对石煤的类属进行了探讨。结果表明: 石煤具有高灰、高硫和低热值的特点。石煤的燃烧特性与无烟煤相近, 但比无烟煤差。采用 Popescu 法对石煤的燃烧机理进行分析, 表明其燃烧过程主要受扩散控制, 三维扩散模型控制的反 Jander 方程是最佳机理函数。采用等转化率法对石煤不同燃烧阶段的活化能进行考察, 表明其在着火、燃烧和燃尽各阶段都需要很高的活化能, 进一步证明了石煤的燃烧过程是受扩散控制的。以干燥无灰基挥发分  $V_{\text{daf}}$  作为分类标准

来确定石煤的类属是不恰当的; 根据煤阶和燃烧特性及动力学分析判断, 石煤属于高变质的劣质无烟煤。

**关键词:** 石煤; 燃烧特性; 燃烧动力学; 类属; 热重法

## 0 引言

石煤是贮藏在古老岩层中的一种煤炭资源, 是 5 亿年前地质时期的藻类、菌类等浅海环境下形成的一种腐泥煤<sup>[1]</sup>。主要分布在长江中下游的湖北、湖南、安徽、江西、浙江等地, 预测总储量为 453.9 亿吨, 年开采量达 650 万吨, 其中煤炭资源短缺的浙江省的年开采量为 400 万吨<sup>[2]</sup>。

石煤大都具有高灰、高硫和低热值的特点, 其成分除含有机碳外, 还有氧化硅、氧化钙和少量的氧化铁、氧化铝和氧化镁等。石煤不仅作为动力锅炉和水泥窑炉的燃料<sup>[3-5]</sup>, 而且燃烧后的炉渣也可以作为水泥的原料<sup>[6]</sup>, 还可从石煤中提取钒、铀、钼、镍、铜、钴等金属元素<sup>[7-8]</sup>。

由于石煤的燃烧特性与其它动力用煤差异较大, 对其在煤炭分类体系中的位置也有争议, 因此本文采用热重分析法对石煤的燃烧特性和燃烧反应动力学做了详细的研究, 并对其类属进行了探讨。

## 1 实验部分

实验选取云石煤、江山煤和凤川煤 3 种石煤进行重点研究, 并用华亭烟煤和鸿基无烟煤作为参比煤样, 粒径均为 80 $\mu\text{m}$  左右, 煤质分析结果见表 1。

采用瑞士 Mettler-Toledo 公司生产的 TGA/SDTA 851 $^{\circ}$ /LF1 1600 型热分析仪, 可同时得到试样的热重(TG)曲线、热重微分(DTG)曲线和差热(DTA)

曲线。测温范围为 0~1600℃，升温速率最高达 100℃/min，气体流量最高为 100 mL/min。

实验方案：采用氧化铝质坩埚，取样品 6~8mg，空气气氛，流量为 50 mL/min，以 20、30、50、80℃/min 升温速率将煤样从 30℃ 加热到 1000℃，使得热分析曲线达到稳定状态。

表 1 实验用煤样的工业分析和元素分析

Tab.1 Proximate analysis and ultimate analysis of coal samples

煤样	工业分析 w/%					$Q_{\text{net,ad}}/(kJ/kg)$
	$M_{\text{ad}}$	$A_{\text{ad}}$	$V_{\text{ad}}$	$V_{\text{daf}}$	$FC_{\text{ad}}$	
云石煤	1.13	84.38	3.77	26.02	10.72	3574
江山煤	1.02	81.68	6.44	35.35	11.78	3611
风川煤	0.91	84.86	3.31	23.39	10.84	4063
华亭煤	3.43	20.73	26.72	35.23	49.12	22185
鸿基煤	0.89	27.02	6.72	9.32	65.37	24421

煤样	元素分析 w/%				
	$C_{\text{ad}}$	$H_{\text{ad}}$	$N_{\text{ad}}$	$S_{\text{t,ad}}$	$O_{\text{ad}}$
云石煤	10.78	0.38	0.29	2.25	0.79
江山煤	13.12	0.53	0.29	2.96	0.92
风川煤	10.67	0.26	0.22	1.10	1.98
华亭煤	57.43	3.88	0.76	0.73	13.04
鸿基煤	61.38	2.66	0.93	0.44	6.68

## 2 燃烧特性分析

各煤样在不同升温速率下的 TG-DTG 曲线如图 1~5 所示，其特征参数见表 2。

煤的着火温度和燃尽温度通过 TG-DTG 法来确定，即过 DTG 曲线上的峰值点作垂线与 TG 曲线相交，然后过此交点作 TG 曲线的切线，该切线与 TG 曲线前、后平台基线的交点对应的温度即为该煤样的着火温度  $T_i$  和燃尽温度  $T_h$  [9]。β 为升温速率。 $T_{\text{max}}$  为最大失重速率  $(dw/dT)_{\text{max}}$  所对应的温度 [10]。 $(dw/dT)_{\text{max}}/T_i^2$  为可燃性指数，表示反应前期达到着火温度后反应能力 [11]。 $R_w$  为着火稳燃特性指数，表达式为  $560/T_i + 650/T_{\text{max}} + 0.27(dw/dT)_{\text{max}}$ ，值越大着火稳燃性越好 [12]。 $f_1$  为初始燃尽率，即  $T_i$  所对应的

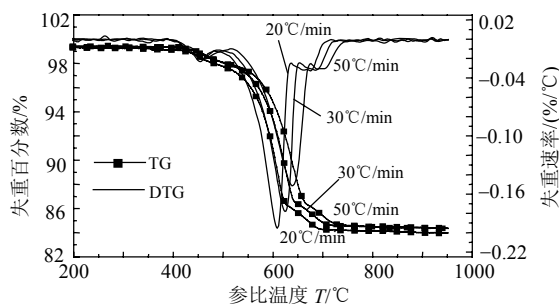


图 1 云石煤的失重质量分数和失重速率曲线  
Fig. 1 TG and DTG curve of Yunshi coal

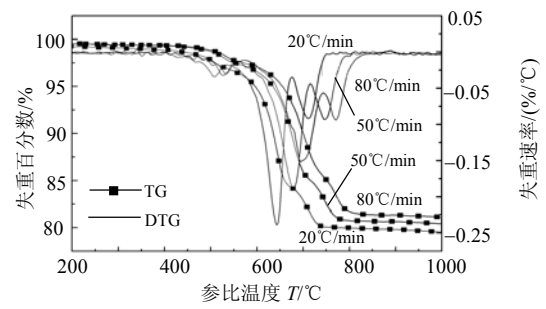


图 2 江山煤的失重质量分数和失重速率曲线  
Fig. 2 TG and DTG curve of Jiangshan coal

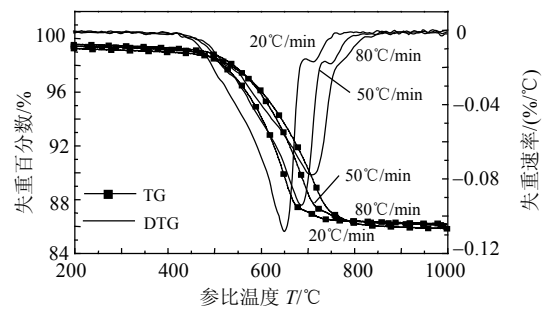


图 3 风川煤的失重质量分数和失重速率曲线  
Fig. 3 TG and DTG curve of Fengchuan coal

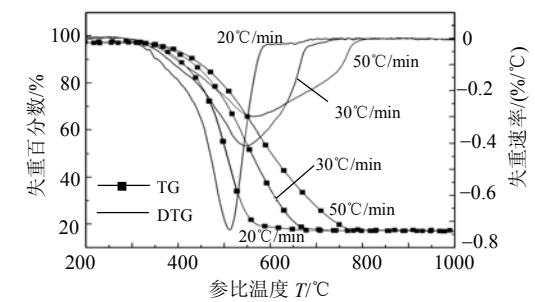


图 4 华亭煤的失重质量分数和失重速率曲线  
Fig. 4 TG and DTG curve of Huating coal

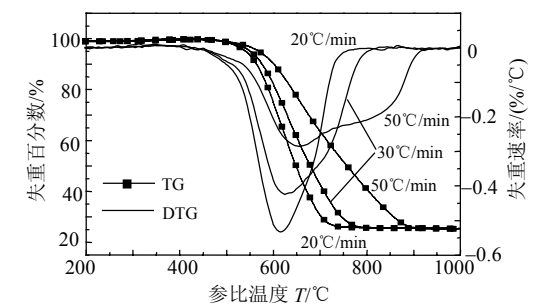


图 5 鸿基煤的失重质量分数和失重速率曲线  
Fig. 5 TG and DTG curve of Hongji coal

转化率，反映了煤的着火特性； $f_2$  为后期燃尽率，其表达式为  $0.98 - f_1$ ，反映了煤中碳的燃尽性能 [9]。

由 TG 曲线可知，云石石煤、江山石煤和风川石煤反应完成后的剩余质量为初始质量的 85%、81% 和 86%，而鸿基无烟煤和华亭烟煤分别为 25% 和 17%，与表 1 中各煤样的灰分(空气干燥基)基本

表 2 实验用煤样的燃烧特征参数  
Tab. 2 Characteristic parameters of coal samples combustion

煤样	$\beta$ /(°C/min)	$T_i$ /°C	$T_h$ /°C	$T_{max}$ /°C	$(dw/dT)_{max}/(\%/^{\circ}\text{C})$	$(dw/dT)_{max}/T_i^2 / (\%/^{\circ}\text{C}^3)$	$R_w$	$f_1/\%$	$f_2/\%$
云石煤	20	580	655	634	0.198	$5.89 \times 10^{-7}$	2.04	26.06	71.94
	30	594	675	654	0.178	$5.05 \times 10^{-7}$	1.98	25.78	72.21
	50	607	700	668	0.151	$4.12 \times 10^{-7}$	1.94	25.29	72.70
江山煤	20	600	675	646	0.246	$6.86 \times 10^{-7}$	2.01	25.58	72.41
	50	625	720	678	0.189	$4.84 \times 10^{-7}$	1.91	22.57	75.42
	80	641	755	691	0.155	$3.78 \times 10^{-7}$	1.86	22.23	75.76
风川煤	20	560	680	650	0.110	$3.52 \times 10^{-7}$	2.03	25.96	72.04
	50	585	723	683	0.095	$2.80 \times 10^{-7}$	1.93	25.14	72.85
	80	590	755	713	0.077	$2.24 \times 10^{-7}$	1.88	25.10	72.89
鸿基煤	20	550	690	618	0.534	$1.77 \times 10^{-6}$	2.21	8.76	89.23
	30	560	730	622	0.425	$1.36 \times 10^{-6}$	2.16	8.57	89.42
	50	574	830	653	0.286	$8.69 \times 10^{-7}$	2.05	7.35	90.64
华亭煤	20	440	550	512	0.738	$3.82 \times 10^{-6}$	2.74	22.05	75.94
	50	445	640	550	0.409	$2.07 \times 10^{-6}$	2.55	16.66	81.33
	80	448	710	563	0.300	$1.50 \times 10^{-6}$	2.49	14.52	83.47

上是一致的。由于石煤的灰分很高，相应的可燃成分(固定碳和挥发分)就比较低，所以石煤在燃烧过程中失重量很少。由表 2 可知，在相同的升温速率下，各石煤的着火温度 $T_i$ 平均高出烟煤约 150 °C，高出无烟煤约 30 °C； $T_{max}$ 平均高出烟煤 130 °C 左右，高出无烟煤 20 °C 左右。因此，与烟煤和无烟煤相比，石煤的燃烧峰偏向高温区，不易于着火。这主要是由于石煤的成煤年代比烟煤和无烟煤久远，结构致密，挥发分不易析出；同时挥发分很少，燃烧后的热量不利于点燃固定碳，使得着火困难。比较 $(dw/dT)_{max}$ 、 $(dw/dT)_{max}/T_i^2$ 和 $R_w$ 可知，烟煤的值最大，无烟煤次之，石煤最小。这是因为石煤的初始燃尽率 $f_1$ 的值平均高达 25%，烟煤为 17%，无烟煤为 8%，即着火时石煤的可燃成分就已经消耗了 1/4；而石煤的可燃成分(空气干燥基)平均仅为 15%，烟煤和无烟煤则高于 70%。因此，着火后石煤中含量很低的可燃成分很快就被燃烧掉，燃烧稳定性较差。

石煤的燃尽受 2 方面因素的影响：①较少的可燃成分及其着火时较高的转化率使得石煤很快燃尽；②石煤的灰分平均高达 83%，燃烧时使煤的表面形成灰分外壳，妨碍煤中可燃质和氧气接触，使煤不易燃尽。因此，由表 2 可知，在相同的升温速率下，石煤的燃尽温度 $T_h$ 比烟煤高，但比无烟煤低；后期燃尽率 $f_2$ 比烟煤和无烟煤小，说明石煤中碳的燃尽性能较差。

### 3 燃烧反应动力学分析

#### 3.1 燃烧反应机理的确定

采用 Popescu 法<sup>[13]</sup>确定石煤燃烧的反应机理函

数，需要对不同升温速率下所测得的多条热重曲线进行分析。

该方法直接对基本的反应动力学方程

$$d\alpha/dT = (1/\beta)k(T)f(\alpha) \quad (1)$$

进行移项，积分并作最简近似处理，得

$$G(\alpha) = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{1}{\beta} \int_{T_1}^{T_2} k(T)dT \quad (2)$$

式中： $\alpha$ 为转化率； $\beta$ 为升温速率； $k(T)$ 为速率常数； $f(\alpha)$ 为反应机理函数； $G(\alpha)$ 为 $f(\alpha)$ 的积分形式。

由式(2)知，对于一定的温度 $T$ ，积分项为常数， $G(\alpha)$ 对 $1/\beta$ 作图应该得到 1 条通过原点的直线。因此，只需测得不同升温速率下的 1 组热重曲线，得到相同温度下不同升温速率的热分析曲线所对应的 $\alpha$ 值，就可以根据 $G(\alpha)-1/\beta$ 图形来确定反应机理。

该方法的优点在于：没有引入 Arrhenius 公式，避免了此公式的适用性和补偿效应问题<sup>[14]</sup>；也不存在求解温度积分的问题，不用考虑近似处理所带来的误差<sup>[15]</sup>。该方法在几乎没有作任何假设的前提下确定反应机理函数，结果具有较强的可信性。

选取 3 种石煤在 650 °C 下，不同升温速率时的转化率进行分析，以确定反应机理函数。该温度位于 3 种石煤的着火温度和燃尽温度之间，所对应的参数可以最大程度的反映转化率与温度、升温速率的关系，从而减小反应温度的选择带来的误差。

对文献[16]中 41 种机理函数进行分析。其中，3 种扩散模型、3 种反应级数模型和 2 种收缩模型呈现出较好的线性，其积分形式和微分形式见表 3。

为了确定最优机理函数，对各煤样的机理函数曲线作过原点的线性回归拟合，结果见表 4。其中，

表 3 典型的动力学机理函数

Tab. 3 Typical kinetic mechanism functions

函数编号	函数名称	机理	积分形式 $G(\alpha)$	微分形式 $f(\alpha)$
1	Jander 方程	三维扩散, 球形对称	$[1 - (1-\alpha)^{1/3}]^2$	$3(1-\alpha)^{2/3}[1 - (1-\alpha)^{1/3}]^{-1/2}$
2	G-B 方程	三维扩散, 圆柱形对称	$1 - 2\alpha/3 - (1-\alpha)^{2/3}$	$3[(1-\alpha)^{-1/3} - 1]^{-1/2}$
3	反 Jander 方程	三维扩散	$[(1+\alpha)^{1/3} - 1]^2$	$3(1+\alpha)^{2/3}[(1+\alpha)^{1/3} - 1]^{-1/2}$
4		$n=1$	$-\ln(1-\alpha)$	$1-\alpha$
5	反应级数	$n=1/3$	$3[1 - (1-\alpha)^{1/3}]$	$(1-\alpha)^{2/3}$
6		$n=1/2$	$2[1 - (1-\alpha)^{1/2}]$	$(1-\alpha)^{1/2}$
7	收缩球体	相边界反应, 球对称	$1 - (1-\alpha)^{1/3}$	$3(1-\alpha)^{2/3}$
8	收缩圆柱体	相边界反应, 圆柱对称	$1 - (1-\alpha)^{1/2}$	$2(1-\alpha)^{1/2}$

表 4 动力学机理函数曲线的线性拟合结果

Tab. 4 Linear fitting results of kinetic mechanism functions

编号	云石煤		江山煤		凤川煤	
	$r$	$r_{SD}$	$r$	$r_{SD}$	$r$	$r_{SD}$
1	0.989 62	0.034 25	0.993 44	0.015 83	0.997 82	0.004 89
2	0.995 33	0.016 85	0.994 59	0.011 35	0.998 74	0.002 39
3	0.999 78	0.000 88	0.999 72	0.002 83	0.999 99	0.005 71
4	0.995 60	0.067 77	0.997 98	0.026 68	0.999 45	0.202 07
5	0.999 08	0.051 04	0.998 84	0.034 05	0.999 89	0.217 74
6	0.999 86	0.076 33	0.999 20	0.043 83	0.999 98	0.221 25
7	0.999 08	0.017 01	0.998 84	0.011 35	0.999 89	0.072 58
8	0.999 86	0.038 16	0.999 20	0.021 91	0.999 98	0.110 62

$r$ 为相关系数,  $r_{SD}$ 为标准差, 同时具有最佳 $r$ 和 $r_{SD}$ 的函数即为所要确定的机理函数。

由表 4 可知, 对于石煤的燃烧反应, 三维扩散模型控制的反Jander方程(函数 3)的拟合效果最好, 而通常采用的反应级数模型<sup>[17-18]</sup>不是最好的。这是因为煤的燃烧主要是碳和空气之间进行的异相化学反应, 首先是氧扩散到碳表面并吸附, 然后被吸附的氧与碳反应形成吸附在碳表面的燃烧产物, 最后燃烧产物从碳表面解吸并扩散离开。这些过程是连续的, 其中氧扩散到碳表面和氧在碳表面的反应这 2 个阶段是较慢的, 决定了煤燃烧反应速度。石煤灰分含量很高, 燃烧过程中会在碳表面形成灰分外壳而妨碍氧向碳表面的扩散, 使得这一阶段是最慢的。因此, 可以确定三维扩散模型控制的反Jander方程(函数 3)为石煤燃烧反应的最佳机理函数。

### 3.2 燃烧反应活化能的求解

由表 2 知, 煤样各燃烧参数随升温速率的变化较大, 为了消除升温速率的影响并考察石煤在着火、燃烧和燃尽阶段的反应情况, 采用等转化率法<sup>[19]</sup>分别求解其在 0.2、0.5 和 0.8 三种转化率下的活化能值, 如表 5 所示。

该方法是一种多重扫描速率法, 通过直接对动力学公式移项并进行对数运算, 可得:

$$\ln\left[\beta\left(\frac{d\alpha}{dT}\right)\right] = \ln[Af(\alpha)] - \frac{E}{RT} \quad (3)$$

其中,  $R$  为普适气体常量,  $f(\alpha)$ 只与 $\alpha$ 有关,  $\alpha$ 一定时,  $f(\alpha)$ 为常数。所以, 如果测得多条不同升温速率 $\beta$ 下的热分析曲线,  $\alpha$ 一定时, 等式左端项对  $1/T$  作图可以得到一条直线, 其斜率为 $-E/R$ 。这样, 不必假设反应机理函数就可以计算出活化能  $E$ ; 如果将确定的机理函数代入式(3), 可以得到频率因子  $A$ , 见表 5。同时, 通过选取不同的转化率也可以分析活化能随反应进程的变化情况。

由表 5 可见, 华亭烟煤的活化随着转化率的增加迅速减小, 说明烟煤着火后便不再需要很大的能量, 燃烧稳定。而 3 种石煤在不同转化率下的活化能都很大, 表示石煤在燃烧反应各阶段都需要很大的能量, 燃烧不易稳定。尽管燃烧反应开始后活化

表 5 实验用煤样的燃烧动力学参数

Tab. 5 Kinetic analyzing results of coal samples

煤样	转化率 $\alpha$	$E/(kJ/mol)$	$A/( \times 10^{-6}/min)$	$r$	$r_{SD}$
云石煤	0.2	198.64	4 822.94	0.999 8	0.010 6
	0.5	168.07	101.13	0.998 1	0.034 0
	0.8	137.95	1.36	0.999 6	0.013 0
江山煤	0.2	190.25	603.23	0.999 9	0.004 9
	0.5	121.57	0.16	0.991 5	0.092 4
	0.8	210.15	1 460.12	0.999 9	0.004 2
凤川煤	0.2	210.09	$1.13 \times 10^{-5}$	0.998 9	0.041 2
	0.5	180.54	321.19	0.997 5	0.064 1
	0.8	113.08	0.03	0.988 1	0.103 7
华亭煤	0.2	114.57	0.66	0.996 4	0.068 5
	0.5	41.59	$8.03 \times 10^{-6}$	0.988 9	0.065 6
	0.8	16.91	$0.18 \times 10^{-6}$	0.972 3	0.063 6

能有减小的趋势，但是由于石煤的高灰分而形成的灰分外壳增厚，燃烧过程是受扩散控制的，化学反应并不起主导作用，仍然需要很高的能量。

#### 4 石煤的类属

实验表明石煤的燃烧特性不同于其它动力用煤，而在中国煤炭分类体系中并没有对石煤的类属进行明确的说明，因此有必要根据燃烧特性对其在分类体系中的位置进行探讨。

根据《中国煤炭分类标准 GB5751-86》，对煤的类别是以干燥无灰基挥发分 $V_{daf}$ 来判断的：当 $V_{daf} < 10\%$ 时，为无烟煤；当 $V_{daf} > 10\%$ 时，为烟煤；当 $V_{daf} > 37\%$ 时，为褐煤。由表1可知，石煤的空气干燥基 $V_{ad}$ 虽然很低，但是由于灰分很多， $V_{daf}$ 的值都大于20%，因此按照中国煤炭分类标准石煤应该属于烟煤。但是从上文对石煤的燃烧特性和燃烧反应动力学的分析可知，这显然是不恰当的。

从煤阶来看，烟煤大约形成于1~2亿年前，无烟煤主要形成于2~3亿年前，而石煤成煤期大约在4~5亿年前<sup>[1]</sup>，因此石煤的煤阶要高于无烟煤，煤化程度较深，应该属于高变质的无烟煤。

从石煤的燃烧特性和燃烧反应动力学的分析来看，石煤的性质与无烟煤比较接近且比无烟煤差，应该划分为劣质无烟煤。

#### 5 结论

通过热重分析方法对3种石煤的燃烧特性和燃烧动力学进行研究，并对石煤的类属进行了探讨，得出以下结论：

(1) 石煤具有高灰、高硫和低发热量的特点。石煤的着火温度和反应最快时所对应的温度平均高出烟煤 $130^{\circ}\text{C}$ 以上，而高出无烟煤不超过 $30^{\circ}\text{C}$ ；其它着火、稳燃和燃尽指数与烟煤相比较差，比无烟煤稍差。因此，可知石煤的燃烧特性与无烟煤相近，且比无烟煤差。

(2) 采用Popescu法对石煤的燃烧机理进行分析，得出其燃烧过程主要受扩散控制，三维扩散模型控制的反Jander方程是最佳机理函数。采用等转化率法对石煤不同燃烧阶段的活化能进行考察，得出其在着火、燃烧和燃尽各阶段都需要很高的活化能，进一步证明了石煤的燃烧过程是受扩散控制的。

(3) 以干燥无灰基挥发分 $V_{daf}$ 作为分类标准来

确定石煤的类属是不恰当的。根据煤阶和燃烧特性及动力学分析结果进行判断，石煤属于高变质的劣质无烟煤。

#### 参考文献

- [1] 陈鹏. 中国煤炭性质、分类和利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [2] 叶际达, 孔玲莉, 李莹, 等. 五省放射性伴生石煤矿开发和利用对环境的影响研究[J]. 辐射防护, 2004, 24(1): 1-23.  
Ye Jida, Kong Lingli, Li Ying, et al. Study of radioactivity effect of mining and utilizing bone coal mine on environment[J]. Radiation Protection, 2004, 24(1): 1-23(in Chinese).
- [3] 施正伦, 骆仲决, 周劲松, 等. 石煤流化床燃烧重金属排放特性试验研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(2): 209-212.  
Shi Zhenglun, Luo Zhongyang, Zhou Jinsong, et al. Experimental research on heavy metals emission from fluidized bed with stone coal fired[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(2): 209-212(in Chinese).
- [4] 张志宝, 彭涛, 田书营. 石煤专烧型35 t/h内循环流化床锅炉结构特点和运行分析[J]. 电站系统工程, 2000, 16(1): 15-18.  
Zhang Zhibao, Peng Tao, Tian Shuying. Structure features and operation analysis of 35 t/h ICFB[J]. Power System Engineering, 2000, 16(1): 15-18(in Chinese).
- [5] 任强, 刘建忠, 周俊虎, 等. 石煤燃烧硫析出动态特性[J]. 煤炭学报, 2006, 31(1): 99-103.  
Ren Qiang, Liu Jianzhong, Zhou Junhu et al. Dynamic characteristic of sulfur release during stone coal combustion[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(1): 99-103(in Chinese).
- [6] 施正伦, 王文龙, 骆仲决, 等. 流化床炉渣综合利用研究及其在 $\text{CO}_2$ 减排上的意义[J]. 电站系统工程, 2001, 17(1): 59-61. Shi Zhenglun, Wang Wenlong, Luo Zhongyang, et al. Comprehensive utilization of FBC ashes and its effect on the reduction of  $\text{CO}_2$  emission[J]. Power System Engineering, 2001, 17(1): 59-61(in Chinese).
- [7] Pollock S M, Goodarzi F, Riediger C L. Mineralogical and elemental variation of coal from Alberta, Canada: an example from the No. 2 seam, Genesee Mine [J]. International Journal of Coal Geology, 2000, 43(1-4): 259-286.
- [8] 李大华, 唐跃刚, 陈坤, 等. 重庆煤中稀土元素的地球化学特征研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(3): 312-317.  
Li Dahua, Tang Yuegang, Chen Kun, et al. Research on geochemistry of rare earth elements in coals from Chongqing[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(3): 312-317(in Chinese).
- [9] 聂其红, 孙绍增, 李争起, 等. 煤混煤燃烧特性的热重分析法研究[J]. 燃烧科学与技术, 2001, 7(1): 72-76.  
Nie Qihong, Sun Shaozeng, Li Zhengqi, et al. Thermogravimetric analysis on the combustion characteristics of brown coal blends[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2001, 7(1): 72-76(in Chinese).
- [10] 姜秀民, 李巨斌, 邱建荣. 超细化煤粉燃烧特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 71-74.  
Jiang Xiumin, Li Jubin, Qiu Jianrong. Study on combustion characteristics of micro-pulverized coal[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 71-74(in Chinese).

- [11] 姜秀民, 刘德昌, 郑楚光, 等. 油页岩燃烧性能的热分析研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 55-59.  
Jiang Xiumin, Liu Dechang, Zheng Chuguang, et al. Study of oil shale combustion characteristics by thermal analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 55-59(in Chinese).
- [12] 孙学信. 燃煤锅炉燃烧试验技术与方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [13] Popescu. C. Integral method to analyze the kinetics of heterogeneous reactions under non- isothermal conditions: a variant on the Ozawa-Flynn-wall method[J]. Thermochim Acta, 1996, 285 (2): 309-323.
- [14] Vyazovkin S, Wight C A. Isothermal and non-isothermal kinetics of thermally stimulated reactions of solids[J]. International Reviews in Physical Chemistry, 1998, 17(3): 407-433.
- [15] Maciejewski M. Computational aspects of kinetic analysis: Part B: The ICTAC kinetics project — the decomposition kinetics of calcium carbonate revisited or some tips on survival in the kinetic minefield[J]. Thermochimica Acta, 2000, 355(1-2): 145-154.
- [16] 胡荣祖, 史启祯. 热分析动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [17] 刘彦, 周俊虎, 方磊, 等. O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>气氛煤粉燃烧及固硫特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 224-228.  
Liu Yan, Zhou Junhu, Fang Lei, et al. A study on coal combustion and desulfurization characteristics in atmosphere containing O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 224-228(in Chinese).
- [18] 姜秀民, 杨海平, 刘辉, 等. 煤粉颗粒粒度对燃烧特性影响热分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 142-145.  
Jiang Xiumin, Yang Haiping, Liu Hui, et al. Analysis of the effect of coal powder granularity on combustion characteristics by thermogravimetry[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 142-145(in Chinese).
- [19] Burnham A K. Computational aspects of kinetic analysis: Part D: The ICTAC kinetics project-multi-thermal-historymodel-fitting methods and their relation to isoconversional methods[J]. Thermochimica Acta, 2000, 355(1-2): 165-170.

收稿日期: 2007-01-11。

作者简介:

刘建忠(1965—), 男, 教授、博士生导师, 从事煤的洁净燃烧技术研究, jzliu@zju.edu.cn;

张保生(1978—), 男, 博士, 主要研究方向为煤的洁净燃烧。

(编辑 王庆霞)