

全氧煤粉低氧浓度燃烧动力学参数的热重实验

刘若晨, 安恩科, 刘泽庆

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 利用热重分析仪研究了四种煤粉在低氧惰性气氛(即 O_2/CO_2)下的着火特性、燃尽特性。实验在 O_2 体积分数为 7.5%~20%, 升温速率 $20\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下进行。通过对 Arrhenius 和 Coats-Redfern 方程进行最小二乘法的二元一次线性回归, 求得煤粉在不同低氧浓度下的动力学参数。结果表明: 随着 O_2 体积分数降低, 着火温度基本不变, 燃尽温度增大; 活化能、指前因子和反应级数都随着 O_2 体积分数降低而不同程度地减小; 活化能和指前因子之间存在补偿效应, 计算可得等动力学温度和反应速率常数; 当 O_2 体积分数小于 12.5%, 随 O_2 体积分数减小, 煤粉的反应速率常数随反应温度增大而增大的趋势越来越平缓。

关键词: 全氧煤粉燃烧; 低氧浓度; 动力学参数; 补偿效应; 热重分析

中图分类号: TK224

文献标志码: A

Kinetic Parameters of Oxy-coal Combustion in Low Oxygen Concentration with Thermogravimetry

LIU Ruochen, AN Enke, LIU Zeqing

(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Combustion characteristics and kinetic parameters of four regional coal samples in O_2/CO_2 atmosphere were investigated by thermogravimetry (TG). The experiments were performed on low O_2 volume fraction varying from 7.5% to 20% at a heating rate of $20\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. With Arrhenius and Coats-Redfern equations, the kinetic parameters under different O_2 volume fractions were calculated with the method of least squares linear regression. The results show that ignition temperature keeps constant and burn-out temperature rises in lower O_2 volume fraction. Activated energy, pre-exponential factor and reaction degree all decrease in varying extent with the lower O_2 volume fraction. There was compensation effect between activation energy and pre-exponential factor, besides, the isokinetic temperature and

reaction rate constant of four coal samples were obtained. When O_2 volume fraction is lower than 12.5%, with reduction of O_2 volume fraction, the reaction rate constant rises more and more mildly with the increasing of the temperature.

Key words: oxy-coal combustion; low oxygen concentration; kinetic parameters; compensate effects; thermogravimetry (TG) analysis

低氧温和燃烧(MILD)是一种正在快速发展的新型燃烧技术, 既能降低 NO_x 排放, 又能提高燃烧效率。全氧燃烧是二氧化碳捕集和封存技术中最有潜力的技术之一, 将两者有机结合, 开展煤粉在全氧-高浓度 CO_2 稀释条件下实现无焰燃烧对学科发展具有重要的理论意义^[1]。

煤粉的热分析方法包括热重(TG)法、差热分析(DTA)法和示差扫描量热(DSC)法, 普遍用于评估燃料的燃烧特性, 包括燃烧速率、转化率、特征温度和动力学参数等。在富氧燃烧方面的热重实验较多^[2-4]。文献[4]对两种褐煤在 21%~100% O_2 体积分数下进行热重实验, 发现 O_2 体积分数增大(小于 60%)可改善煤的燃烧特性, 且认为用等转化率法计算煤在 O_2/CO_2 和 O_2/N_2 气氛下的活化能仍有待商榷。陆泓羽等^[5]对微富氧条件下(即通过调节空气量将 CO_2 体积分数限制在 30%~40%)煤粉的燃烧特性进行了热重研究, 发现随着 O_2 体积分数增加, 煤粉的燃烧特性曲线向低温区移动, 综合燃烧特性指数 S 逐渐上升, 且煤粉的微富氧燃烧特性要优于富氧燃烧。王长安等^[6]研究了煤粉在 O_2/N_2 下的燃烧特性变化, O_2 体积分数在 3.3%~21.0%之间变化, 发现在低氧体积分数下着火温度基本不变, 燃尽温度提高, 燃烧速率下降, 且活化能和频率因子之间存

收稿日期: 2013-10-11

第一作者: 刘若晨(1989—), 女, 博士生, 主要研究方向为全氧煤粉无焰燃烧技术。E-mail: 2013lrchen@tongji.edu.cn

通讯作者: 安恩科(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为锅炉燃烧污染物控制及热力设备系统优化。

E-mail: axa@tongji.edu.cn

在补偿效应。

目前针对煤粉无焰燃烧的理论研究较少,只知其呈现无局部的高氧浓度区,炉膛温度分布较均匀,有利于炉内传热、减小结渣和提高炉壁的水动力安全性。在常规燃烧方式下,炉膛反应区 O_2 体积分数较高,而在 MILD 方式下,除了射流出口处 O_2 体积分数在 15%~18%,整个炉膛中的 O_2 体积分数分布更为均匀,一般在 5%~10%,甚至更低^[7]。本文通过热重实验来研究煤粉在低氧惰性气氛下的化学反应动力学变化规律。

1 实验条件

选取的四种煤样为大同煤、神府煤、平朔煤和大同混煤,其工业分析和元素分析如表 1 所示。实验在 WRT-3P 型高温微量热天平上进行,煤样质量取

(8.0 ± 0.1) mg, 平均升温速率 $20\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$, 初温为室温。通入的混和气体(O_2/CO_2)体积流量保持在 $80\text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 其中 O_2 体积分数为 7.5%, 10.0%, 12.5%, 15.0%, 17.5% 和 20.0%。 O_2 和 CO_2 的纯度为 99.9%。

2 实验结果和讨论

2.1 O_2/CO_2 气氛下 O_2 体积分数对煤粉燃烧特性的影响

由图 1 和 2 可以看出,随着 O_2 体积分数的降低,神府煤的 TG 和 DTA 曲线逐渐向高温区偏移,意味着煤粉燃尽需要更长的时间,同时在更高的温度下达到最大失重速率,且最大失重速率逐渐减小。这是由于当 O_2 体积分数降低时,煤粉燃烧速率也随之减慢的缘故。

表 1 煤样的工业分析和元素分析

Tab.1 Proximate and ultimate analysis of the tested coal samples

煤样	工业分析				元素分析					$Q_{\text{net},v}/$ ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
	$w_{M,ad}/\%$	$w_{A,ad}/\%$	$w_{V,ad}/\%$	$w_{FC,ad}/\%$	$w_{C,ad}/\%$	$w_{H,ad}/\%$	$w_{O,ad}/\%$	$w_{N,ad}/\%$	$w_{S,ad}/\%$	
大同煤	3.27	13.74	25.73	57.26	68.68	4.21	7.41	0.68	2.01	26.59
平朔煤	2.66	17.50	29.63	50.21	64.93	4.31	8.77	1.25	0.57	21.95
神府煤	9.55	7.63	31.75	51.07	65.10	4.10	12.10	0.94	0.59	27.10
大同混煤	2.90	16.18	39.55	41.37	68.33	3.46	7.36	0.87	0.32	23.83

注: M, A, V, FC 分别表示水分、灰分、挥发分和固定碳; 下标 ad 表示实验中所用煤样均为空气干燥基; $Q_{\text{net},v}$ 为低位发热量; w 为质量分数。

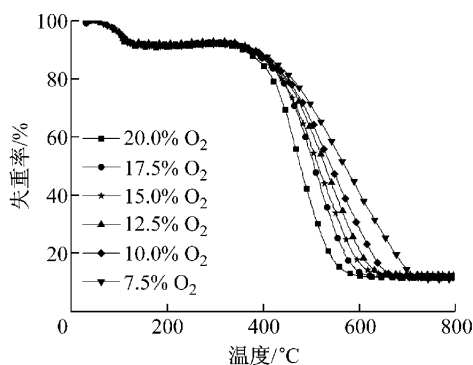


图 1 神府煤在不同低氧体积分数下的 TG 曲线
Fig.1 TG curves of Shenfu Coal in different O_2 volume fractions

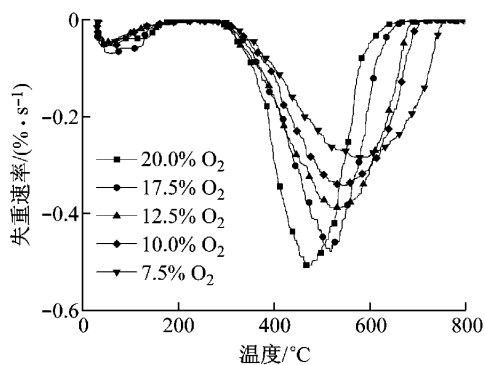


图 2 神府煤在不同低氧体积分数下的 DTA 曲线
Fig.2 DTA curves of Shenfu Coal in different O_2 volume fractions

煤样的着火温度 T_i 、燃尽温度 T_b 、峰值温度 T_{max} 和最大失重速率可通过 TG-DTA 切线法来定义,如图 3 所示。首先 DTA 曲线最低点 B 所对应的温度是峰值温度 T_{max} ,在 TG 曲线上过 B 点作切线,与上水平线交点 A 为着火温度 T_i ,与下水平线交点 C 为燃尽温度 T_b 。煤样的特征温度如表 2 所示,从表 2 看出煤样的燃烧特性随 O_2 体积分数变化的规律相类似。以大同煤为例,大同煤的燃烧特征值随 O_2

体积分数的变化如图 4 所示。可以看出,大同煤的着火温度 T_i 随 O_2 体积分数的变化幅度不超过 $20\text{ }^\circ\text{C}$,这是因为煤在着火阶段化学反应速率较小的缘故。随着 O_2 体积分数的降低,峰值温度 T_{max} 和燃尽温度 T_b 都增大,且 O_2 体积分数越低($<12.5\%$),燃尽温度 T_b 增加的幅度越大。

2.2 动力学参数分析

为了进一步研究煤粉在低氧惰性气氛下($O_2/$

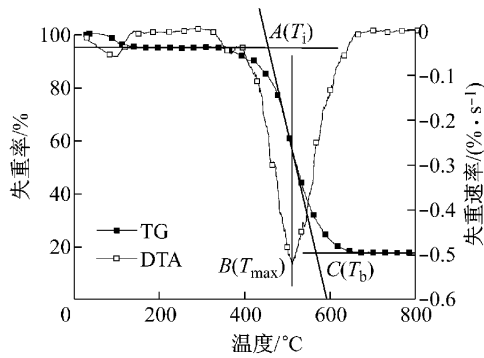


图3 TG-DTA切线法

Fig.3 Characterized temperatures defined by the TG-DTA tangent method

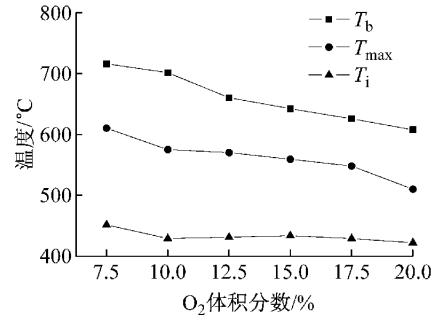


图4 大同煤的燃烧特征温度随O₂体积分数的变化曲线

Fig.4 The curves of characterized temperatures of Datong coal

表2 煤样在不同低氧体积分数下的燃烧特征温度

Tab.2 Combustion characterized parameters in different low-oxygen volume fractions										℃
体积分数/ %	平朔煤			神府煤			大同混煤			
	T _i	T _{max}	T _b	T _i	T _{max}	T _b	T _i	T _{max}	T _b	
7.5	419.74	567.29	660.07	427.85	600.21	700.04	423.69	549.86	669.16	
10.0	421.71	539.32	642.26	421.71	546.82	658.68	425.67	547.47	633.96	
12.5	419.54	513.95	590.84	421.71	520.62	625.85	425.67	516.03	598.94	
15.0	413.41	506.05	578.37	421.71	518.89	601.12	415.38	504.20	586.68	
17.5	409.25	483.32	565.91	427.85	504.19	582.53	409.25	485.40	574.22	
20.0	407.27	465.03	550.80	405.10	474.05	547.49	399.56	467.51	551.47	

CO₂)的化学反应机理,在第2.1节所述的煤粉燃烧特性的基础上,还需结合其动力学参数分析.煤热重反应的化学动力学关系式为

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{1}{\beta} k(T) f(\alpha) \quad (1)$$

式中: α 为质量变化率; β 为升温速率,℃·min⁻¹; $k(T)$ 为反应速率常数,min⁻¹; T 为反应温度,℃; $f(\alpha)$ 为反应机理函数.求解煤燃烧的动力学参数时,通常假设机理函数符合反应级数模型,即 $f(\alpha) = (1-\alpha)^n$, n 为反应级数.质量变化率 α 可表示为

$$\alpha = \frac{m_0 - m_T}{m_0 - m_\infty} \quad (2)$$

式中: m_0 为煤样初始质量,g; m_T 为温度 T 下的煤样质量,g; m_∞ 为煤样最终质量,g.根据Arrhenius动力学公式, $k(T)$ 可表示为

$$k(T) = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (3)$$

式中: A 为指前因子,min⁻¹; E 为活化能,kJ·mol⁻¹; R 为气体常数,8.314 J·(mol·K)⁻¹.式(1)可写成如下形式:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) (1-\alpha)^n \quad (4)$$

对式(4)两边取对数,可得

$$\ln \frac{d\alpha}{dT} = \ln \frac{A}{\beta} - \frac{E}{RT} + n \ln(1-\alpha) \quad (5)$$

Coats等^[8]提出了一种广泛应用于分析TG-DTA数据的模型,如下所示:

反应级数 $n \neq 1$

$$\ln \left| \frac{1 - (1-\alpha)^{(1-n)}}{T^2(1-n)} \right| = \ln \left[\frac{AR}{\beta E} \left(1 - \frac{2RT}{E} \right) \right] - \frac{E}{RT} \quad (6)$$

反应级数 $n = 1$

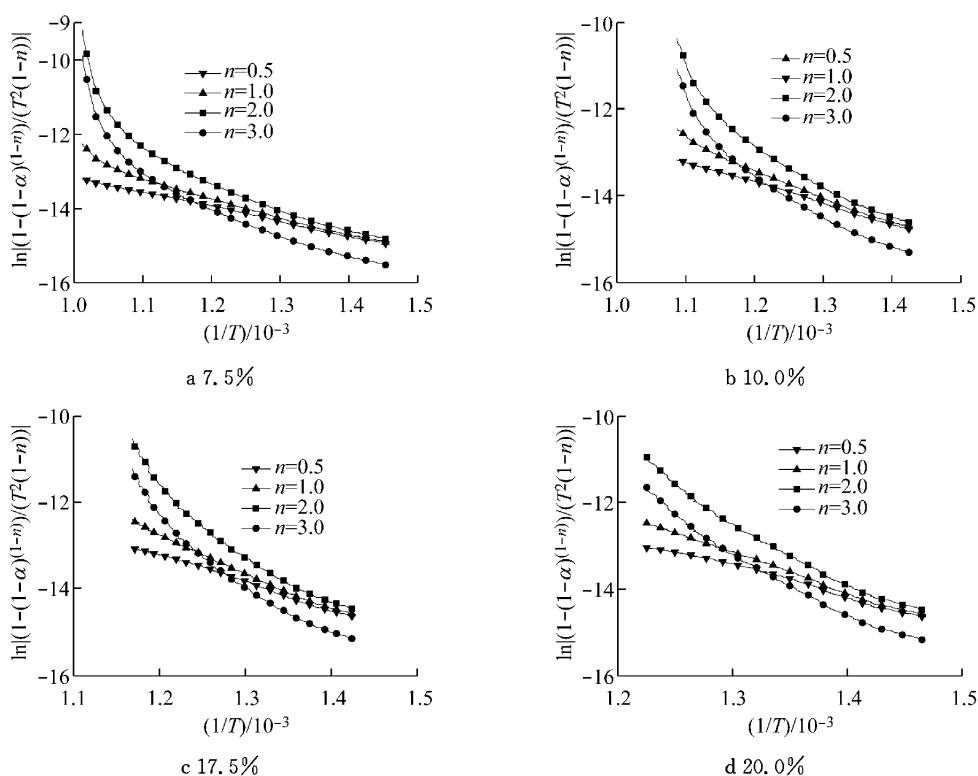
$$\ln \left| \frac{-\ln(1-\alpha)}{T^2} \right| = \ln \left[\frac{AR}{\beta E} \left(1 - \frac{2RT}{E} \right) \right] - \frac{E}{RT} \quad (7)$$

由于 $E/(RT) \geq 1$ 且 $(1 - 2RT/E) \approx 1$, 所以, $\ln[(1 - 2RT/E)AR/(\beta E)]$ 项在煤的反应温度区可近似认为常数.本文以神府煤为例,根据式(6)和(7)比较其不同O₂体积分数下,选择不同反应级数 n 时的动力学分析曲线,如图5所示.煤的燃烧反应机理对应的动力学曲线具有良好的线性关系,可以看出,神府煤的反应级数 n 在1附近.

不同煤样在不同低氧体积分数下,其反应级数 n 可能会有所变化,本文采用最小二乘法对式(5)进行二元一次线性回归^[3].式(5)可表示成如下线性方程:

$$y = c_0 + c_1 x_1 + c_2 x_2 \quad (8)$$

式中: $y = \ln \frac{d\alpha}{dT}$, $x_1 = -1/T$, $x_2 = \ln(1-\alpha)$, $c_0 = \ln(A/\beta)$, $c_1 = -E/R$, $c_2 = n$.

图 5 神府煤在不同 O₂ 体积分数和反应级数下的动力学参数分析曲线Fig.5 Analysis curves of kinetics of Shenfu Coal under different O₂ volume fractions and n

计算可得回归相关系数最大时反应区间内的活化能 E 、指前因子 A 和反应级数 n , 如表 3~6 所示。

由表 3~6 可知, 在低氧惰性气氛下, 各煤样的活化能 E 、指前因子 A 和反应级数 n 都随着 O₂ 体积分数降低而不同程度减小。活化能 E 的减小说明 O₂ 体积分数越低, 形成活化络合物需克服的能垒越大, 导致络合物不易形成; 指前因子 A 减小又说明不稳定活化络合物碰撞减少, 结合更加紧密^[9], 即活化能

E 和指前因子 A 之间存在补偿关系。O₂ 体积分数越低, 不同煤样的活化能 E 值越接近, 意味着低氧惰性燃烧环境下, 煤种对燃烧过程的影响并不大。平朔煤或神府煤的反应级数 n 在 O₂ 体积分数低于 15.0% 时都小于 1, 而大同煤或大同混煤的反应级数 n 在 O₂ 体积分数高于 10% 时已经大于 1。因此, 对于不同的煤样和不同的气氛, 仅选择单一的反应模型是不合理的, 尤其是在 O₂ 体积分数较高的气氛下, 反

表 3 大同煤动力学参数的线性回归方程、活化能、指前因子和反应级数

Tab.3 Equation of linear regression of Datong Coal corresponding to activation energy, pre-exponential factor and reaction degree

O ₂ 体积分数/%	线性回归方程	$E/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	A/min^{-1}	n
7.5	$y=2.2062-6.2478x_1+0.7977x_2$	51.9	181.60	0.7977
10.0	$y=4.1392-7.6162x_1+0.9572x_2$	63.3	1255.00	0.9572
12.5	$y=4.4375-7.6260x_1+1.0970x_2$	63.4	1691.30	1.0970
15.0	$y=10.1004-11.7450x_1+1.2025x_2$	97.6	4.87×10^5	1.2025
17.5	$y=10.2224-11.8110x_1+1.2235x_2$	98.2	5.50×10^5	1.2235

表 4 平朔煤动力学参数的线性回归方程、活化能、指前因子和反应级数

Tab.4 Equation of linear regression of Pingshuo Coal corresponding to activation energy, pre-exponential factor and reaction degree

O ₂ 体积分数/%	线性回归方程	$E/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	A/min^{-1}	n
7.5	$y=-0.2940-4.2071x_1+0.4272x_2$	35	14.90	0.4272
10.0	$y=2.7687-6.2859x_1+0.7039x_2$	52	318.80	0.7039
12.5	$y=6.6963-8.8448x_1+0.8423x_2$	74	1.62×10^4	0.8423
15.0	$y=7.6074-9.2472x_1+0.9908x_2$	77	4.03×10^4	0.9908
17.5	$y=13.0452-13.2210x_1+1.3639x_2$	110	9.26×10^6	1.3639

表5 神府煤动力学参数的线性回归方程、活化能、指前因子和反应级数

Tab.5 Equation of linear regression of Shenfu Coal corresponding to activation energy, pre-exponential factor and reaction degree

O ₂ 体积分数/%	线性回归方程	$E/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	A/min^{-1}	n
7.5	$y = -1.1485 - 3.6475x_1 + 0.4365x_2$	30.3	6.34	0.4635
10.0	$y = 1.2575 - 5.2193x_1 + 0.5485x_2$	43.4	70.30	0.5485
12.5	$y = 4.4108 - 7.675x_1 + 0.5754x_2$	63.8	1646.70	0.5754
15.0	$y = 4.7837 - 7.8549x_1 + 0.7694x_2$	65.3	2390.90	0.7694
17.5	$y = 6.5960 - 8.8355x_1 + 0.7925x_2$	73.5	1.46×10^4	0.7925
20.0	$y = 10.7450 - 11.1950x_1 + 1.2082x_2$	93.1	9.28×10^5	1.2082

表6 大同混煤动力学参数的线性回归方程、活化能、指前因子和反应级数

Tab.6 Equation of linear regression of Datong Mixed Coal corresponding to activation energy, pre-exponential factor and reaction degree

O ₂ 体积分数/%	线性回归方程	$E/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	A/min^{-1}	n
7.5	$y = 1.1652 - 5.1479x_1 + 0.7780x_2$	42.8	64.10	0.7780
10.0	$y = 5.0100 - 7.8368x_1 + 1.1271x_2$	65.2	2998.10	1.1271
12.5	$y = 12.9000 - 13.2970x_1 + 1.6770x_2$	110.6	8.00×10^6	1.6770
17.5	$y = 13.9000 - 13.5760x_1 + 1.7668x_2$	112.9	2.18×10^7	1.7668
20.0	$y = 20.9969 - 18.0930x_1 + 2.3582x_2$	150.4	2.63×10^{10}	2.3582

应级数 n 的增长幅度较大,活化能 E 值的偏差则会加大。

Essenhight 等^[10] 总结出煤和焦在各种反应中(如煤的燃烧、热解和气化反应等)存在的补偿效应,可用数学公式描述为

$$\ln A = aE + b \quad (9)$$

又根据 Arrhenius 公式可得

$$\ln A = \frac{E}{RT_{\text{iso}}} + \ln k_{\text{iso}} \quad (10)$$

则补偿系数的意义可表示为^[9]

$$a = \frac{1}{RT_{\text{iso}}}, \quad b = \ln k_{\text{iso}} \quad (11)$$

式中: a 是由反应中化学键断裂的能量决定; b 与反应的某些特性有关; T_{iso} 为等动力学温度, K; k_{iso} 为等动力学温度下的反应速率常数, min^{-1} 。

表7 不同煤样的补偿效应方程和补偿系数

Tab.7 Relationship between kinetic parameters of different coal samples

煤样	补偿效应方程	T_{iso}/K	$k_{\text{iso}}/\text{min}^{-1}$
大同煤	$\ln A = 0.166E - 3.086$	724.6	0.0457
平朔煤	$\ln A = 0.179E - 3.478$	675.1	0.0309
神府煤	$\ln A = 0.186E - 4.019$	646.6	0.0180
大同混煤	$\ln A = 0.189E - 4.465$	636.4	0.0115

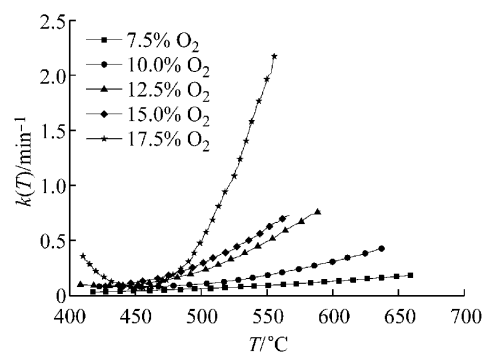
等动力学温度 T_{iso} 是不同 O_2 体积分数下,各反应速率常数 k_{iso} 相同时的特征温度。谢克昌^[9] 认为等动力学温度接近焦样的起始反应温度值,Essenhight 等^[10] 认为等动力学温度接近反应温度区间的中间温度,文献^[11] 则指出等动力学温度是气化反应从动力学控制变为扩散控制的转变温度。根据表7所示,

在本实验中,煤燃烧过程中的等动力学温度更接近于受热分解阶段挥发分的析出温度。

此外,煤样在不同低氧惰性气氛下的反应速率常数 $k(T)$ 与温度 T 的变化规律可由式(1)转化得

$$k(T) = \frac{d\alpha}{dT} \beta [f(\alpha)]^{-1} = \frac{d\alpha}{dT} \beta (1-\alpha)^{-n} \quad (12)$$

以平朔煤为例,其不同 O_2 体积分数下的 $k(T)-T$ 大致变化规律如图6所示。

图6 平朔煤在不同 O_2 体积分数下反应速率常数与反应温度之间的变化规律Fig.6 The relationship between $k(T)$ and T of Pingshuo Coal under different O_2 volume fractions

由图6可以看出,首先 O_2 体积分数降低延长了燃烧区间,其次平朔煤的反应速率常数 $k(T)$ 与反应温度 T 之间存在着类似指数函数的关系。在 O_2 体积分数达到 17.5% 时,曲线陡然上升,而随着 O_2 体积分数降低,曲线也逐渐平坦。这说明在低氧(体积分数 $< 12.5\%$) 气氛下,反应速率对反应温度的变化

不敏感,基本保持一致,且 $k(T)$ 值很小,也印证了煤粉在低氧惰性气氛下燃烧的一大特征,即化学反应速率低,燃烧主要发生在反应动力区。

3 结论

(1) 随着 O_2 体积分数的降低,四种煤样的TG和DTA曲线都向高温区偏移。燃尽温度 T_b 升高的幅度大于峰值温度 T_{max} 和着火温度 T_i , T_i 的波动范围不超过 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 。当 O_2 体积分数低于 12.5% 时,其对燃尽温度 T_b 的影响程度增大。

(2) 采用Arrhenius和Coats-Redfern积分法相结合分析动力学参数,通过最小二乘法线性回归得不同 O_2 体积分数下的活化能 E 、指前因子 A 和反应级数 n ,发现三者都随着 O_2 体积分数降低而不同程度地减小。在 O_2 体积分数较低的气氛下,单一煤样的反应级数 n 一般小于1,随着 O_2 体积分数升高, n 的增长幅度也加大。不同煤样活化能 E 值之间的差距随着 O_2 体积分数的降低而缩小,意味着在低氧惰性燃烧环境下,煤种对燃烧过程的影响并不大。

(3) 在低氧惰性气氛下,活化能 E 和指前因子 A 存在着一定的补偿效应,计算可得等动力学温度 T_{iso} 和该温度下的反应速率常数 k_{iso} 。煤燃烧过程中的等动力学温度 T_{iso} 更接近于受热分解阶段挥发分的析出温度。

(4) 煤样的反应速率常数 $k(T)$ 与反应温度 T 之间存在着类似指数函数的关系,随着 O_2 体积分数降低,曲线逐渐平坦。这说明在低氧惰性气氛下,反应速率对反应温度的变化不敏感,且 $k(T)$ 值很小,也印证了煤粉在低氧惰性气氛下燃烧的一大特征即化学反应速率低,燃烧主要发生在反应动力区。

参考文献:

- [1] 李鹏飞,米建春,Dally B B,等. MILD燃烧的最新进展和发展趋势[J]. 中国科学:技术科学,2011,41(2):135.
LI Pengfei, MI Jianchun, Dally B B, *et al.* The latest developments and trends of MILD combustion[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2011, 41(2): 135.
- [2] 刘国伟,董芑,韩亚芬,等. 富氧条件下煤燃烧特性的热重分析实验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011,43(1):104.
LIU Guowei, DONG Peng, HAN Yafen, *et al.* Experimental study on combustion characteristics of coals under enriched-oxygen condition by thermo-gravimetric analysis[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2011, 43(1):104.
- [3] 唐强,王丽朋,李建雄,等. O_2/CO_2 气氛下煤粉燃烧热重分析及动力学特性[J]. 重庆大学学报,2009,32(12):1440.
TANG Qiang, WANG Lipeng, LI Jianxiong, *et al.* Thermogravimetry analysis and kinetic characteristics of pulverized coal in O_2/CO_2 atmosphere [J]. *Journal of Chongqing University*, 2009, 32(12): 1440.
- [4] ZHOU Zhijun, XIN Hu, ZHOU You, *et al.* Oxy-fuel combustion characteristics and kinetic parameters of lignite coal from thermo-gravimetric data [J]. *Thermochimica Acta*, 2013, 553: 54.
- [5] 陆泓羽,王春波,雷鸣,等. 煤粉微富氧条件下燃烧特性的实验研究[J]. 电力科学与工程,2011,27(12):45.
LU Hongyu, WANG Chunbo, LEI Ming, *et al.* Investigation on the combustion characteristics of coal under air enrichment conditions[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2011, 27(12): 45.
- [6] 王长安,刘银河,车得福. 低氧浓度下煤燃烧特性的热重实验研究[J]. 工程热物理学报,2010,31(10):1785.
WANG Changan, LIU Yinhe, CHE Defu. Experimental investigation of combustion characteristics of coals in low oxygen concentration with thermogravimetry [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, 31(10):1785.
- [7] 涂垚杰,刘豪,赵然,等. 0.3 MW煤粉炉MILD燃烧的数值计算[J]. 燃烧科学与技术,2013,19(5):444.
TU Yaojie, LIU Hao, ZHAO Ran, *et al.* Numerical calculation of MILD combustion for pulverized coal on 0.3 MW furnace [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2013, 19(5):444.
- [8] Coats A W, Redfern J P. Kinetic parameters from thermogravimetric data[J]. *Nature*, 1964,201(149):68.
- [9] 谢克昌. 煤的结构和反应性[M]. 北京:科学出版社,2002.
XIE Kechang. Coal structure and its reactivity[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [10] Essenhigh R H, Misra M K. Autocorrelations of kinetic parameters in coal and char reactions[J]. *Energy and Fuels*, 1990,4(2):171.
- [11] 余润国,陈彦,林诚,等. 高变质无烟煤催化气化动力学及补偿效应[J]. 燃烧科学与技术,2012,18(1):85.
YU Runguo, CHEN Yan, LIN Cheng, *et al.* Catalytic gasification kinetics and compensation effect of high metamorphosed anthracite[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2012,18(1):85.