

石油焦与煤混烧特性及动力学

廖正祝, 田红

(广东石油化工学院 机电工程学院, 广东 茂名 525000)

摘要: 以石油焦与煤的混合燃料为研究对象, 采用 TG-DTG-DSC 联用实验技术对混合试样进行了燃烧热重实验。分析了混烧特性曲线, 计算了各个燃烧特性指数, 并采用差减微分法 Freeman-Carroll 计算了燃烧反应动力学参数。结果表明: 各混合试样均只出现一个位于高温区段的 DTG 曲线峰和方向向下的 DSC 曲线的热量释放峰, 混合试样的燃烧过程主要是高温阶段焦炭的着火燃烧过程; 混合试样 S2、S3 及 S5 热量释放相对较少且不集中, 燃烧时间长且不完全; 混合试样 S4 及 S6 的热量释放集中且时间短, 燃烧释放的热量相对较多; 烟煤含量最多的混合试样 S6 的着火特性、燃尽特性指数及综合燃烧特性参数均高于其它混合试样以及石油焦的各个相应值, 且试样 S6 的可燃特性指数也大于石油焦的可燃特性指数; 混合试样活化能均小于石油焦燃烧的活化能, 混合试样比石油焦更易着火燃烧; 只要石油焦与煤的混合比例适当, 石油焦掺烧烟煤后的燃烧特性优于石油焦单独燃烧特性, 此为了解决石油焦难以单独燃烧利用提供了方法。

关键词: 石油焦; 煤; 燃烧; 动力学; 热重试验

中图分类号: TE992; TD849

文献标识码: A

文章编号: 1006-6772(2013)06-0071-05

Co-combustion thermogravimetric experimental study of petroleum coke and coal

LIAO Zhengzhu, TIAN Hong

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China)

Abstract: Taking the mixed fuel of petroleum coke and coal as research object, do the thermogravimetric experiment using the TG-DTG-DSC (thermogravimetric-differential thermogravimetric-differential scanning calorimetry) thermal analysis technology, investigate the co-combustion characteristics curves and calculate the variety of combustion characteristics index. Compute the combustion kinetic parameters by using subtractive differential method Freeman-Carroll. The results indicate that the every mixed fuel has a single DTG curve of peaks and the downward DSC curve of exothermic peak at the high temperature. The mixed fuel combustion process is the ignition and combustion process of coke at the high temperature. The heat release of the mixed samples of S2, S3 and S5 are relatively small and not concentrated, and the time of combustion process is long and the combustion is incomplete. The heat release of the mixed samples of S4 and S6 are relatively larger and the heat released time is short. The ignition characteristics index, the burnout characteristics index and the synthetic combustion characteristics parameters of the mixed fuel S6 having the most bituminous coal content are higher than the corresponding values of the other mixed samples and petroleum coke, the combustible characteristics index of mixed sample S6 is larger than the corresponding value of petroleum coke. The activation energy of all the mixed fuels are less than that of petroleum coke, and the mixed samples are easier igniting combustion than petroleum coke. The proper mixing ratio of petroleum coke and coal leads to great mixed fuels co-combustion characteristics, which is better than the pure combustion characteristics of petroleum coke. The study provides theoretical guidance for the combustion utilization of petroleum coke.

Key words: petroleum coke; coal; combustion; kinetics; thermogravimetric experiment

收稿日期: 2013-09-05 责任编辑: 宫在芹

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(S2012010010448); 广东省科技计划项目(2011B030900011); 广东石油化工学院博士启动项目(512119)

作者简介: 廖正祝(1970—), 女, 四川会理人, 工程师, 主要从事燃料的燃烧及循环流化床锅炉的研究。E-mail: lzz70810@126.com。

引用格式: 廖正祝, 田红. 石油焦与煤混烧特性及动力学[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(6): 71-75. 84.

石油焦是石油提炼的最终副产品,具有低灰分、低挥发分、高碳、高热值等特点。作为煤的一种补充或替代燃料用于锅炉燃烧发电、供热是石油焦利用的重要途径^[1]。石油焦单独燃烧存在以下问题:燃烧过程不稳定,呈现多阶段燃烧特点;燃烧特性介于烟煤和无烟煤之间;燃烧热解动力学参数受升温速率等实验条件影响较大。由于石油焦挥发分含量少,故燃点高,且焦炭难以燃尽,石油焦存在难以单独充分燃烧利用等问题^[2-6]。石油焦含有硫、氮和钒、镍等碱金属元素,这使石油焦燃烧时造成锅炉内腐蚀和污染,将石油焦与煤的混合燃料在循环流化床锅炉里燃烧是一种高效、清洁利用石油焦的有效方法^[7]。无烟煤中加入石油焦后,燃点降低,燃烧效率得到提高^[8]。随煤含量增多,煤与石油焦的混燃燃点和燃尽温度均逐渐降低,随石油焦含量增大,混烧活化能和频率因子均增大^[9]。

文献[10]对烟煤与无烟煤混烧进行动力学研究,文献[11-12]对型煤及动力煤燃烧特性进行研究,提出将煤与石油焦混烧是煤及石油焦的一

种很好的利用方式,但目前对石油焦与煤混烧过程的研究还不充分。本文采用非等温热重法,利用TG-DTG-DSC联用技术对石油焦与烟煤按照不同质量比进行混烧热重实验,对混合燃料各个燃烧特性进行了计算,采用差减微分法Freeman-Carroll计算了燃烧反应动力学参数并进行分析,以期得出其混烧特性。

1 实验

1.1 实验样品

实验所用石油焦取自某炼油厂,烟煤取自某电厂。将各实验样品通过磨煤机研磨,再经过筛分分离,得到粒度小于0.074 mm的实验样品。将样品放在恒温干燥箱中,在378 K干燥2 h,取出放在干燥器皿中冷却后装入密封袋备用。表1为实验样品的工业分析及元素分析。S1、S7分别表示实验样品烟煤及石油焦;S2、S3、S4、S5及S6表示烟煤与石油焦的质量比分别为1:4、2:3、2:2、3:2及4:1的混合燃料样品。

表1 燃料的工业分析及元素分析

样品	工业分析/%				元素分析/%					$Q_{\text{net,ar}}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
	M_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	A_{ad}	$\omega(\text{C}_{\text{ad}})$	$\omega(\text{H}_{\text{ad}})$	$\omega(\text{O}_{\text{ad}})$	$\omega(\text{N}_{\text{ad}})$	$\omega(\text{S}_{\text{ad}})$	
烟煤	1.95	26.33	55.90	15.82	62.67	3.96	13.83	0.96	0.81	25.102
石油焦	2.78	11.65	84.83	0.74	88.37	2.35	2.26	2.07	1.43	31.541

1.2 实验设备及方法

实验采用NETZSCH公司的STA409PC热分析仪进行TG、DTG及DSC的同步热分析。燃烧实验采用空气气氛,气体流量为80 mL/min。采用非等温法进行加热,升温速率为20 K/min,从室温升温,终止温度为1173 K,实验样品质量约为10 mg。

2 结果与分析

2.1 燃烧TG、DTG及DSC曲线分析

图1表示S1~S7的燃烧特性曲线。由图1可以看出,所有试样挥发分析出着火与所生成焦炭的着火燃烧是一个连续过程,故所有试样均只出现了一个DTG峰且该峰值对应温度较高,烟煤DTG峰值对应温度为853 K,石油焦为886 K,各混合试样约为903 K,该峰位于较高温度区域,显示其燃烧反应过程主要位于高温段。同时,所有试样的燃点均较低,烟煤为696 K,石油焦为783 K,混合试样约为753 K。因此,所有试样的主要燃烧阶段均属于高温阶段焦炭的着火燃烧。烟煤、石油焦及其混合试样

的含碳量及热值均很高,各试样挥发分析出着火燃烧及焦炭的着火燃烧的热量释放是一个连续过程,故各个试样燃烧的DSC曲线均出现一个向下的热量释放峰。

由于各个试样的挥发分含碳量及热值不同,因此,各DSC曲线包围面积各不相同。由图1可知,烟煤S1的DSC包围面积小即表明其单独燃烧释放热量少,这是因为烟煤热值低于混合试样及石油焦热值,同时烟煤在其高温段的激烈燃烧后还有较多热量释放,故烟煤DSC曲线显示其热量释放峰值位于DTG曲线峰值之后,烟煤的TG曲线后期出现水平表明其质量几乎不再变化,可知其燃烧充分且燃烧十分完全,热量释放集中且速度快,燃尽时间快。由图1g)可知,石油焦S7燃烧的DTG曲线峰值面积较小,且TG曲线在高温段后期没有出现水平段,表明石油焦在高温段还在继续燃烧,一时难以燃尽,燃烧时间较长,导致热量释放不集中。DSC曲线包围面积相对较小,表明其热量释放相对较少。

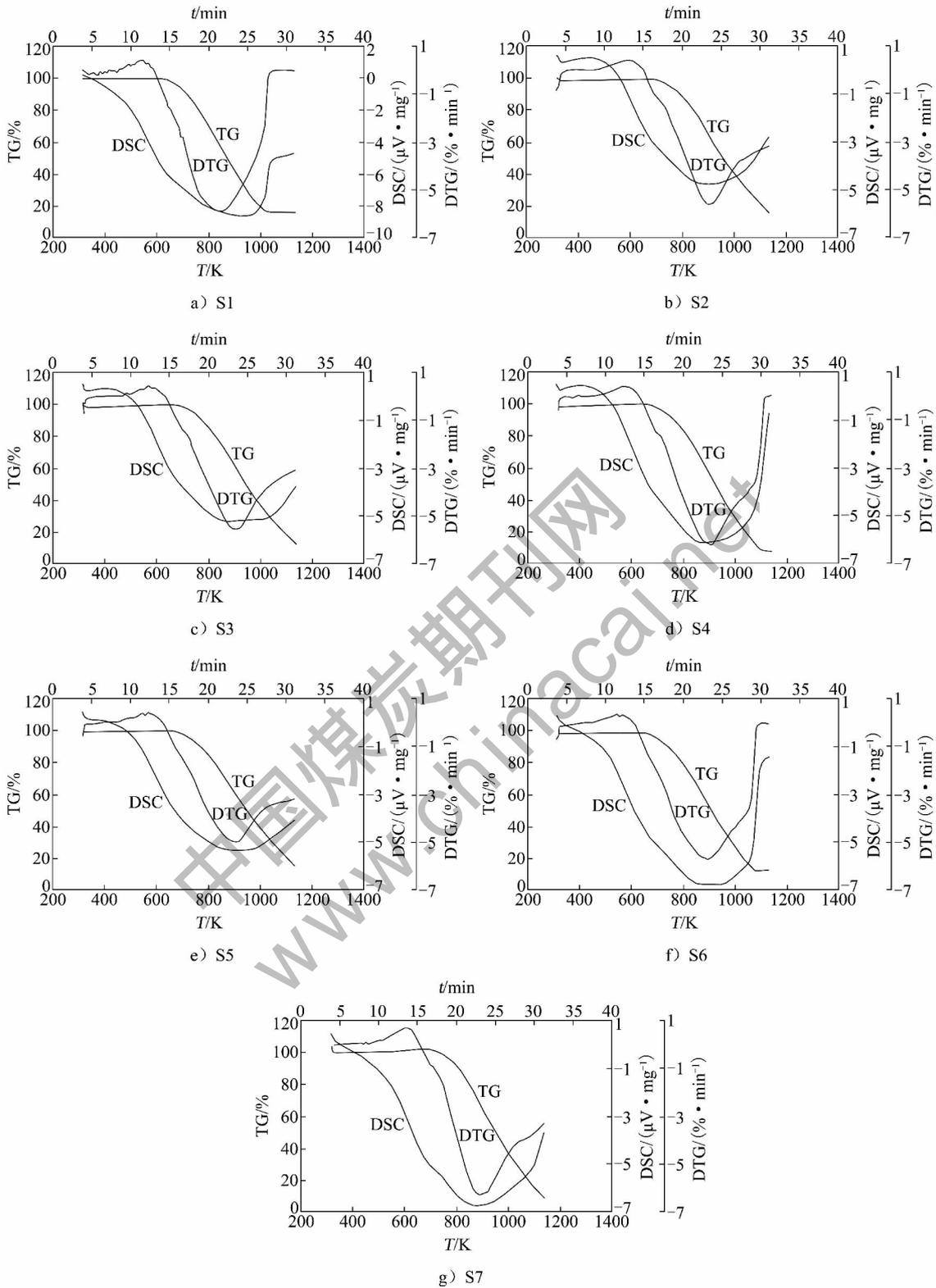


图1 S1 ~ S7 燃烧特性曲线

从图1b)、图1c)及图1e)可知,S2,S3及S5试样的TG,DTG及DSC曲线在燃烧结束时均没有水平段,表明燃烧还在继续,燃烧不充分且热量还没

有释放完全。3个试样的DTG峰值点附近曲线包围面积小表明激烈燃烧反应发生的区域小,表明这3个试样高温燃烧阶段后期还在继续燃烧,燃烧不

充分,燃尽时间长,导致热量释放不集中、释放时间长、释放量相对较少,故其 DSC 曲线显示热量释放面积较小。由图 1d) 及图 1f) 可知, S4 及 S6 试样的 TG、DTG 及 DSC 曲线在燃烧结束时均出现水平段,表明燃烧完全且充分。两者的 TG 曲线出现水平表明混合试样燃烧充分,DTG 曲线峰值附近面积大,表明其激烈燃烧区域集中,热量释放集中且速度快,燃尽时间短,同时两者的 DSC 热量释放面积均较大,表明其燃烧热量释放相对较多。

表 2 样品的可燃特性、着火特性及燃尽特性指数

样品	$C_r / (10^{-7} K^{-2} \cdot \text{min}^{-1})$	$C_i / (10^{-5} K^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$	f_1	f_2	τ_0 / min	$C_b / (10^{-3} \text{min}^{-1})$
S1	1.2221	2.2396	0.0876	0.9186	36.80	2.1867
S2	0.9183	1.0491	0.1039	0.7556	42.53	1.8459
S3	0.9460	1.2729	0.1024	0.8571	42.60	2.0603
S4	1.0667	1.5456	0.1063	0.8540	41.00	2.2142
S5	0.8748	1.3532	0.1050	0.9523	42.50	2.0933
S6	1.0627	1.8221	0.1007	0.9208	39.49	2.3481
S7	1.0308	0.8273	0.1012	0.8191	42.60	1.9458

表 3 样品的综合燃烧特性参数

样品	T_i / K	T_h / K	$(dw/dt)_{\max} / (\% \cdot \text{min}^{-1})$	$(dw/dt)_{\text{mean}} / (\% \cdot \text{min}^{-1})$	$S_N / (10^{-12} K^{-3} \cdot \text{min}^{-2})$
S1	696	1016	5.92	2.03	2.4418
S2	783	1125	5.63	2.01	1.6406
S3	768	1132	5.58	2.10	1.7549
S4	763	1099	6.21	2.11	2.0480
S5	756	1129	5.00	2.03	1.5729
S6	733	1069	5.71	2.10	2.0876
S7	783	1131	6.32	2.21	2.0143

由表 2、表 3 可知,混合试样 S4 及 S6 的可燃特性、着火特性、燃尽特性指数及综合燃烧特性参数较高,而混合试样 S2、S3、S5 的相应值较低;试样 S6 的着火特性、燃尽特性指数及综合燃烧特性参数最高且均大于石油焦的相应值,可燃特性指数也大于石油焦的可燃特性指数。试样 S6 的燃点和燃尽温度均低于其他各个混合试样及石油焦。试样 S6 的燃尽时间在所有混合试样中最短且也小于石油焦的燃尽时间。这主要是因为石油焦掺烧烟煤后,由于烟煤挥发分高于石油焦挥发分,随着烟煤掺烧量的增大,在混合试样逐步升温过程中,逐渐增多的烟煤挥发分首先析出并着火燃烧释放大量热量。该热量使整个混合试样包括石油焦的温度迅速升高,随后石油焦中挥发分也相应加快析出着火燃烧,前期大量挥发分析出着火燃烧释放的热量使混合试样含量逐渐减少的剩余焦炭温度迅速提高,一旦达到其燃点便着火燃烧,而且混合试样燃点随烟煤含量的增加而逐渐降低。由于石油焦挥发分少,含碳量高难以着火燃烧和燃尽,在其掺烧烟煤后,

2.2 燃烧特性参数分析

可燃特性指数采用 $C_r = [(dw/d\tau)_{\max}] / T_i^2$ 进行计算^[13-15],着火特性指数采用 $C_i = [V_{ad} \cdot (dw/d\tau)_{\max}] / T_i$ 进行计算^[16],燃尽特性指数采用 $C_b = (f_1 \cdot f_2) / \tau_0$ 进行计算^[11],综合燃烧特性指数采用 $S_N = [(dw/d\tau)_{\max} (dw/d\tau)_{\text{mean}}] / (T_i^2 T_h)$ 进行计算^[14-15],各计算式的相应参数意义、单位及计算结果见表 2、表 3。

各种燃烧特性显著提高,因此,将石油焦与煤混合燃烧,只要混合比例适当,其混合燃烧特性将优于石油焦单独燃烧,这为解决石油焦的燃烧利用提供了方法。

3 燃烧反应动力学

石油焦与烟煤及其混合燃料的燃烧反应动力学参数的计算采用常用的差减微分法 Freeman-Carroll^[17-18]进行求解,该方法适用于直接测定因发生质量变化及其变化率的反应。本实验样品燃烧过程中的热分解反应符合: A(固体) → B(固体) + C(气体),是属于固体分解的失重反应。燃烧反应是在程序升温速率(20 K/min)下进行的非等温热重实验,试样温度与炉温偏差小,故适宜采用微分法进行动力学参数的计算,该热分解速率的变化率根据 Arrhenius 定律可表示为^[17-18]

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = A e^{-E/RT} (1-\alpha)^n \quad (1)$$

式中 α 为混合燃料热分解的变化率(失重率), %;

A 为频率因子, min^{-1} ; E 为活化能, kJ/mol ; R 为气体常数 $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。对方程 (1) 两边取对数, 并对 $d\alpha/d\tau$, $1-\alpha$, T 进行微分, 并以差减形式表示可得式 (2):

$$\frac{\Delta \log(d\alpha/d\tau)}{\Delta \log(1-\alpha)} = \frac{E}{2.303R} \cdot \frac{\Delta(1/T)}{\Delta \log(1-\alpha)} + n \quad (2)$$

对等式 (2) 左边 $\Delta \log(d\alpha/d\tau) / \Delta \log(1-\alpha)$ 与

表 4 样品的动力学参数

样品	温度 T/K	活化能 $E/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	反应级数 n	频率因子 A/min^{-1}	相关系数 r
S1	753 ~ 953	38.84	0.53	20.81	0.9951
S2	673 ~ 1073	48.98	1.38	72.71	0.9960
S3	673 ~ 1073	49.53	1.49	84.39	0.9958
S4	673 ~ 1073	58.78	1.41	374.90	0.9913
S5	673 ~ 1073	40.66	1.41	23.22	0.9809
S6	673 ~ 1073	53.30	1.54	193.41	0.9919
S7	786 ~ 986	77.98	1.97	6.48×10^3	0.9837

烟煤 S1 挥发分高而固定碳低, 挥发分着火燃烧释放相对较多的热量且用于加热生成相对较少的焦炭, 因此, 烟煤 S1 高温段焦炭的着火燃烧所需热量相对较少。烟煤 S1 大量挥发分析出形成的大量孔隙为氧气扩散进入焦炭表面发生燃烧反应提供了更多的机会, 因此此高温段烟煤焦炭的着火燃烧所需热量相对较少, 故所需活化能少。石油焦 S7 挥发分少且固定碳高, 挥发分析出着火燃烧释放出的热量相对较少且用于加热生成相对较多的焦炭, 因此石油焦 S7 高温段焦炭的着火燃烧所需热量相对较多, 同时, 石油焦 S7 挥发分少则其挥发分析出形成的孔隙量相对较少, 减少了氧气向焦炭表面扩散的机会, 燃烧相对困难, 故此高温段石油焦 S7 着火燃烧所需热量多, 所需活化能多。

烟煤与石油焦混合试样的活化能介于二者之间, 且混合试样活化能均小于石油焦燃烧的活化能, 表明混合试样比石油焦更容易着火燃烧。这主要是因为混合试样挥发分比石油焦挥发分多, 而固定碳低于石油焦固定碳, 混合试样挥发分析出着火燃烧释放出较多的热量加热因挥发分析出而生成相对少量的焦炭, 因此, 此时混合试样的焦炭相对更容易着火燃烧且所需热量相对较少, 故混合试样活化能小于石油焦的活化能。混合试样活化能约为 50 kJ/mol , 反应级数约为 1.45。烟煤含量最多的试样 S6 的反应级数最大为 1.54, 这是因为混合试样 S6 的挥发分最多, 该试样着火燃烧前期的反应速率受到反应物浓度, 即挥发分和氧气浓度的影

响比其它混合试样相对较大^[17], 故反应级数略高于其它混合试样的反应级数。

右边 $\Delta(1/T) / \Delta \log(1-\alpha)$ 作图为一一直线, 其斜率为 $E=2.303R$, 截距为反应级数 n , 然后将所得活化能 E 和反应级数 n 代入等式 (1) 可得频率因子 A 。各试验样品的燃烧动力学参数见表 4, 其中 r 为线性相关系数。由表 4 可知, 采用最小二乘法对实验数据进行直线拟合所得线性相关系数 r 值均较高, 线性回归合理, 所采用模型的计算结果是可靠的。

4 结 论

1) 混合试样均只出现一个位于高温区段的 DTG 曲线峰和方向向下的 DSC 曲线的热量释放峰, 混合试样的燃烧过程主要是高温阶段焦炭的着火燃烧过程。

2) 混合试样 S2, S3 及 S5 热量释放相对较少且不集中, 燃烧时间长且不完全; 混合试样 S4 及 S6 的热量释放集中且时间短, 两者的 DSC 热量释放面积均较大, 燃烧释放的热量相对较多; S4 及 S6 燃烧特性曲线分析表明两者的燃烧特性优于混合试样 S2, S3 及 S5 的燃烧特性。

3) 烟煤含量最多的混合试样 S6 的着火特性、燃尽特性指数及综合燃烧特性参数均高于其它混合试样及石油焦的各个相应值, 且 S6 的可燃特性指数也大于石油焦的可燃特性指数; 混合试样燃点随烟煤含量的增加而逐渐降低。

4) 烟煤与石油焦混合试样的活化能值介于二者之间, 且均小于石油焦燃烧的活化能, 混合试样比石油焦更容易着火燃烧; 混合试样活化能约为 50 kJ/mol , 反应级数约为 1.45。

5) 只要石油焦与煤的混合比例适当, 石油焦掺烧烟煤后的燃烧特性优于石油焦单独燃烧特性, 解决了石油焦难以单独燃烧利用的问题。

(下转第 84 页)

角逐渐减小,一次风逆喷最远距离变短。双锥燃烧室良好运行的旋流强度区间为 1.37~1.64。

5) 叶片相同时,双锥燃烧室阻力损失随旋流强度减小而变小;在相同旋流强度的情况下,采用错角叶片燃烧室的阻力损失比采用直叶片的燃烧室阻力损失小。

参考文献:

[1] 周建明. 低挥发分煤粉燃烧新技术发展与应用[J]. 洁净煤技术 2011, 17(4): 54-57 81.
 [2] 王永英, 周建明, 杨晋芳. 双锥燃烧室冷态流场的数值模拟[J]. 洁净煤技术 2012, 18(2): 81-84.
 [3] 林宗虎, 徐通模. 实用锅炉手册[M]. 北京: 化学工业出版社 2009: 261-303.
 [4] 曹荣秀, 于景泽, 王伟. 电站锅炉燃烧器形式及分类[J]. 锅炉制造 2005, 3(3): 22-23.
 [5] Marc A Cremer, David H Wang, Andrew P Chiodo. CFD based evaluation of the sensitivity of furnace conditions to burner air and fuel imbalances [C]//Combined Power Plant Air Pollutant Control Mega Symposium. Washington, D. C., Curran Associates, Inc 2004: 963-982.

(上接第 75 页)

参考文献:

[1] 刘耕戌. 高硫石油焦的利用[J]. 石油炼制与化工, 1998, 29(4): 36-41.
 [2] 沈伯雄, 刘德昌, 陆继东. 石油焦着火和燃烧燃尽特性的实验研究[J]. 石油炼制与化工, 2000, 31(10): 60-64.
 [3] 田红. 石油焦与油页岩混合燃烧特性及其燃烧动力学[J]. 石油学报(石油加工) 2010, 26(2): 225-230.
 [4] R E Conn. Laboratory techniques for evaluating ash agglomeration potential in petroleum coke fired circulating fluidized bed combustors [J]. Fuel Processing Technology, 1995, 44(1): 95-103.
 [5] WANG JINSHENG, E J ANTHONY. Clean and efficient use of petroleum coke for combustion and power generation [J]. Fuel 2004, 83(10): 1341-1348.
 [6] E J ANTHONY, A P IRIBARNE, J V IRIBARNE, et al. Fouling in a 160 MWe FBC boiler firing coal and petroleum coke [J]. Fuel 2001, 80(7): 1009-1014.
 [7] 王文选, 赵石铁, 赵长遂, 等. 石油焦燃烧特性研究[J]. 锅炉技术 2005, 36(4): 39-42.
 [8] 许莹, 胡宾生. 石油焦与煤粉燃烧性能差异的研究[J]. 化学工程 2008, 36(8): 21-24.

[6] 陈东林, 刘欢, 邹婵, 等. 300 MW 燃煤锅炉烟气 SCR 脱硝系统流场的数值模拟与优化设计[J]. 电力科学与技术学报 2013, 28(1): 103-108.
 [7] 郭娟. 一种新型燃烧器的冷态模拟实验与数值研究[D]. 武汉: 华中科技大学 2006.
 [8] 孙杰. 电站锅炉燃烧器内气固两相流的实验测量及数值模拟[D]. 上海: 上海交通大学 2007.
 [9] 纪任山, 王乃继, 肖翠微, 等. 高效煤粉工业锅炉技术现状及研究[J]. 洁净煤技术 2009, 15(5): 52-55.
 [10] 冯现河. 高效煤粉工业锅炉技术开发及示范推广[J]. 洁净煤技术 2011, 17(4): 62-66.
 [11] 靖剑平. 燃用烟煤中心给粉旋流燃烧器流动及燃烧特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 2010.
 [12] 王琳. 双选刘燃烧器气固流动特性的实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
 [13] 何佩璠. 煤粉燃烧器设计及运行[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
 [14] 杜黎龙. 射流和管内气固多相流测量研究[D]. 杭州: 浙江大学 2002.
 [15] 于欢, 彭德其, 田清. 管内旋流场综合性能研究进展[J]. 化学进展 2013, 32(7): 1474-1478.
 [9] 王文选, 王凤君, 李鹏, 等. 石油焦与煤混合燃料热重分析研究[J]. 燃料化学学报 2004, 32(5): 522-524.
 [10] 蒋绪, 吕颖利, 邢相栋, 等. 烟煤与无烟煤混合煤粉燃烧过程的动力学研究[J]. 洁净煤技术 2012, 18(3): 78-83.
 [11] 董爱霞, 张守玉, 王健, 等. 煤焦燃烧特性及反应活性探究[J]. 洁净煤技术 2013, 19(1): 87-91.
 [12] 陈怀珍, 刘家利, 相大光. 神华动力用煤燃烧特性研究[J]. 洁净煤技术 2007, 13(6): 53-55.
 [13] 王玉召, 李江鹏. 生物质与煤混燃的燃烧特性实验研究[J]. 锅炉技术 2010, 41(5): 72-74.
 [14] 聂其红, 孙绍增, 李争起, 等. 褐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.
 [15] 顾利峰, 陈晓平, 赵长遂, 等. 城市污泥和混煤燃烧特性的热重分析法研究[J]. 热能动力工程 2003, 18(6): 561-563.
 [16] 谌伦建, 赵跃民. 工业型煤燃烧与固硫[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社 2001.
 [17] 沈兴. 差热、热重分析与非等温固相反应动力学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995.
 [18] 李余增. 热分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.