

煤炭转化

次烟煤与高硫焦煤共热解相互影响及动力学研究

王 鹏¹, 齐洪涛², 申岩峰¹, 王美君¹, 常丽萍¹

(1. 太原理工大学 煤科学与技术教育部和山西省重点实验室, 山西 太原 030024; 2. 山西太钢不锈钢股份有限公司焦化厂, 山西 太原 030003)

摘要: 为了研究次烟煤与高硫焦煤共热解过程中的相互作用, 选取资源相对丰富的水峪高硫焦煤 (SC) 作为主炼焦煤样, 伊宁次烟煤 (YC) 为配入煤样, 通过热重分析技术对 2 种煤样及其不同配比混煤的热解行为进行了研究, 并通过计算动力学参数分析热解过程的动力学特性。结果表明, 由于变质程度的不同, 煤样 SC 和 YC 单独热解的行为差异明显; 混煤共热解的失重率随着 YC 掺入比例的增加而增大, 但共热解行为并非 SC 和 YC 热解特性的简单加和。动力学分析表明, 2 种煤及其混煤在不同热解反应阶段的动力学参数不同, 各热解阶段的活化能和指前因子数值的大小顺序均随 YC 掺入比例的增加呈规律性变化, 但并非单种煤热解活化能和指前因子数值的简单加权平均, 混煤的热解行为是 2 种原煤相互作用的结果。

关键词: 次烟煤; 高硫焦煤; 共热解; 动力学

中图分类号: TQ530.2 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2016)06-0028-06

Research on interactions and kinetic during co-pyrolysis of sub-bituminous coal and high sulfur coking coal

WANG Peng¹, QI Hongtao², SHEN Yanfeng¹, WANG Meijun¹, CHANG Liping¹

(1. Key Laboratory of Coal Science and Technology of Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Coking Plant of Shanxi Taigang Stainless Steel Co., Ltd., Taiyuan 030003, China)

Abstract: To investigate the interactions between sub-bituminous coal and high sulfur coking coal during co-pyrolysis process, a Shuiyu high sulfur coking coal (SC) with relatively resource-rich was selected as the main coking coal sample, and a Yining sub-bituminous coal (YC) was selected as the blended coal sample. Two raw coals and their mixtures with different ratios were pyrolyzed by the thermogravimetric technique to study the interactions of co-pyrolysis process, and the kinetic parameters were calculated to analyze the pyrolysis process. YC and SC had significantly different pyrolysis behaviors. The weight loss during co-pyrolysis of blended coal increased with the increasing ratio of YC coal, and the co-pyrolysis behavior of blended coals was not the simple sum of the individual pyrolysis behavior of SC and YC. The kinetic parameters of two coals and their mixtures in different pyrolysis stages were different, the values of activation energy and pre-exponential factor in different pyrolysis stages changed regularly with the increasing ratio of blended YC coal, while their values were not simple weighted average of those of the two single coal. The pyrolysis characteristics of the mixed coal were the results of a interplay of the two raw coals.

Key words: subbituminous coal; high sulfur coking coal; co-pyrolysis; kinetics

收稿日期: 2016-03-21; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2016.06.006

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(21406152); 山西省回国留学人员科研资助项目(2014-028); 山西省煤基重点科技攻关资助项目(MJH2014-02); 太原理工大学引进人才基金资助项目(tyut-rc201366a); 太原理工大学青年基金资助项目(2013Z024)

作者简介: 王 鹏(1990—), 男, 甘肃甘谷人, 硕士研究生, 从事煤清洁利用与污染物控制研究。E-mail: wptyut@163.com。通讯作者: 常丽萍(1964—), 女, 博士生导师。E-mail: lpchang@tyut.edu.cn

引用格式: 王 鹏, 齐洪涛, 申岩峰, 等. 次烟煤与高硫焦煤共热解相互影响及动力学研究[J]. 洁净煤技术, 2016, 22(6): 28-33.

WANG Peng, QI Hongtao, SHEN Yanfeng, et al. Research on interactions and kinetic during co-pyrolysis of sub-bituminous coal and high sulfur coking coal[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(6): 28-33.

0 引言

由于长期不合理的开发利用,导致优质炼焦煤储量严重不足。由于优质炼焦煤在地理分布呈现不均匀的状态,使得炼焦行业的成本大幅度提高^[1-3]。而储量相对丰富的高硫焦肥煤资源仅当动力煤燃烧使用,造成了资源的浪费^[4],同时硫氧化物的排放也严重污染环境。在优质焦煤无法满足用量需求时,高硫焦肥煤因其与优质炼焦煤相当的成焦性,将会成为替代优质炼焦煤的唯一煤种。在保证焦炭质量不受影响的情况下,适当地配入一些高硫焦煤以降低炼焦成本,不仅丰富了配入煤的种类,也有效增加了高硫焦煤的利用效率^[5]。由于对焦炭中硫分的严格控制,势必会影响硫含量较高的焦肥煤的开发和利用^[6]。包括高硫焦煤在内的配入煤与主焦煤在炼焦过程中会发生相互作用,煤中硫分的变迁行为也会发生变化。热解过程产生的活性硫不断与挥发分中的活性含氢自由基结合后以气相硫形式释放出来,实现硫分从固相向气相定向迁移,达到降低焦炭中硫含量的目的。戴财胜等^[7]发现混入高挥发分的煤,混煤的热解反应更容易进行,但混煤的活化能并不等于单种煤活化能的加权平均值。平传娟

等^[8]利用热重技术发现在不同热解温度区间内无烟煤与烟煤的混煤热解机理不同。高挥发分煤热解过程会产生大量的挥发分,在与高硫焦煤混合后进行共热解的过程中有可能存在相互作用,并促进高硫煤中难以分解的有机硫转化并释放。为了探究这种可能的相互作用,笔者选择一种挥发分较高的低硫次烟煤与富含有机硫的高硫焦煤进行共热解试验,利用热重分析法考察不同混合比例的高挥发分次烟煤对高硫焦煤热解特性的影响,参考 Coats-Redfern 法计算出共热解的动力学参数,以期高硫焦煤配煤炼焦动力学理论研究提供参考。

1 试验

1.1 试验煤样

试验选用山西水峪煤矿的高硫焦煤(SC)和新疆伊宁煤矿的高挥发分次烟煤(YC)作为研究对象,对采集的2种原煤进行破碎、研磨、筛分。考虑到煤样粒径过大样品混合不均匀,粒径过小又会产生静电吸引团聚,不利于样品混合,因此选择粒度为0.106~0.15 mm的样品作为试验用样,置于深色的密闭储存罐中备用。对2种原煤进行工业分析和元素分析,结果见表1。

表1 试验用煤的工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of coal samples

煤样	工业分析/%				元素分析/%			
	M_{ad}	A_d	V_{daf}	$w(C_{daf})$	$w(H_{daf})$	$w(N_{daf})$	$w(S_{t,daf})$	$w(O_{daf})$
SC	0.49	11.45	20.65	86.70	3.81	1.10	1.99	6.36
YC	11.17	5.68	32.93	79.09	3.83	1.11	0.43	15.54

1.2 热重试验

伊宁煤、水峪焦煤以及不同比例的混合煤的热解试验使用热重技术分析,采用德国 NETZSCH-STA409C 热重分析仪。试验步骤如下:准确称取 20 mg 样品均匀铺于热分析仪的坩埚上,平稳闭合反应炉,启动真空泵,用高纯氮气(>99.999%)多次置换反应炉内的空气。待置换完成后切入 100 mL/min 的高纯氮气作为试验用气,设定试验程序,以 10 °C/min 升温速率从室温升到 1 000 °C。热分析会自动监测样品受热分解时质量的变化情况,并将采集的数据传输给计算机,分析软件会同步绘制出样品的 TG 及 DTG 曲线。

2 结果与讨论

2.1 原煤单独热解特性

煤样 SC 和 YC 热重分析曲线如图 1 所示。由图 1 可知 2 种原煤的失重曲线有明显差异性。YC 的起始分解温度为 250 °C 左右,比 SC 低 50 °C 左右;SC 的失重曲线滞后于 YC 的失重曲线,这是由于 SC 的变质程度相对较高,使得 SC 煤中有机结构更为牢固,热解过程必须有更高的能量才能使有机结构发生断裂^[9]。在 1 000 °C 的热解终温下,YC 的失重率为 41%(daf 基准,下同),而 SC 的失重率仅为 22%。2 种煤的 DTG 曲线图形也存在明显不同,YC 在 440、580 和 750 °C 处有着 3 个明显的失重峰,

而 SC 较为明显的失重峰仅有 500 和 680 °C 两处。其中, YC 的 440 °C 和 SC 的 500 °C 失重峰主要反映了煤的热裂解, 该阶段的失重率最大, 是挥发分释放的主要温度区间。2 种原煤热解过程出现最大失重速率时的温度明显不同, 这也体现了其结构稳定性的差异。相比 SC, YC 含有较多的受热易断裂分解的含氧官能团, 使得 YC 的热解温度相对低些; YC 煤在 580 和 750 °C 两处的失重峰可归为大分子结构的芳环缩聚反应产生的^[10], SC 在 700 °C 附近的失重行为主要是由含氧杂环、醚键等断裂造成的。

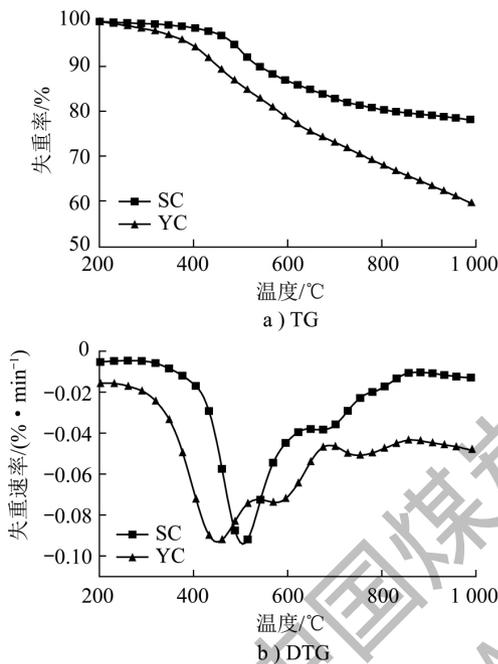


图1 2种原煤的TG和DTG曲线

Fig.1 TG and DTG curves of two raw coals

2.2 不同比例混煤热解特性

为了研究次烟煤的引入对高硫焦煤热解行为的影响, 设定 SC、YC 质量比分别为 5 : 1、3 : 1、2 : 1、1 : 1 进行热重试验, 那么 YC 在样品中所占比例分别为 17%、25%、33%、50%, 分别命名为 YC17、YC25、YC33、YC50。采用同样的数据处理方法并以原煤作为参照处理得到原煤及不同比例混煤的热重分析曲线, 如图 2 所示。

由图 2a 可知, YC 掺入比例越高的煤样, 其热解特性曲线逐渐向 YC 热解曲线方向移动, 且混煤的热解失重率都小于 YC 的失重率。在 1 000 °C 终温下, 混煤的总失重率增加顺序与 YC 掺入比例顺序相同。这说明 YC 的掺入量越多, 混煤的挥发分相比等质量的 SC 增加, 导致混煤的失重率增加。由图 2b 可知, 不同比例的混煤的最大失重峰对应温度

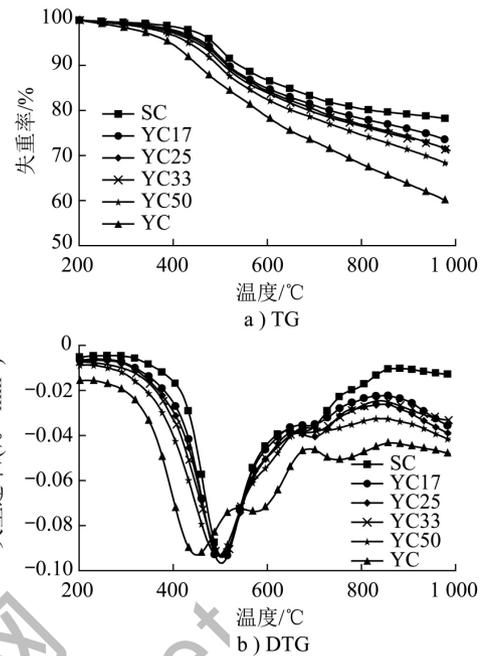


图2 2种原煤及其混煤的TG和DTG曲线

Fig.2 TG and DTG curves of two raw coals and

their mixtures

基本与 SC 重合, DTG 曲线整体上也更倾向于 SC。进一步解析发现, 煤样在 300 °C 时即已表现出较明显的失重行为, 450~500 °C 达到最大失重率, 故可将整个热解温度分成 3 段, 即 200~300 °C、300~500 °C、500~1 000 °C, 得到各温度段失重率见表 2。

表2 不同热解温度区间的样品失重率

Table 2 Weight loss of sample in different pyrolysis temperature interval

煤样	样品失重率/%		
	200~300 °C	300~500 °C	500~1 000 °C
SC	0.484	6.328	15.286
YC17	0.687	7.898	18.780
YC25	0.727	8.240	20.525
YC33	0.842	8.808	19.727
YC50	1.007	9.843	21.859
YC	1.738	12.648	26.762

由表 2 可知, 挥发分的释放区间主要为 300~500 °C 与 500~1 000 °C 两个温度段, 即煤的裂解反应与缩聚反应主要发生在这 2 个温度段内。除 YC25 在 500~1 000 °C 失重率外, 其余随着 YC 掺入比例的增加, 挥发分的释放基本上表现出逐渐增加的趋势。而 YC25 在 500~1 000 °C 失重率出现的差异值显示 2 种煤混合后热解行为可能并非是单种煤各自热解行为的简单混合。

为了进一步了解这2种煤的共热解行为,假定单种煤间不存在相互作用,按照加权平均的方法将模拟无相互作用时混煤的热解曲线与其实测曲线进

行对比,进一步确定各煤种混合后热解行为是否存在相互作用。不同比例混煤的试验值与理论值对比如图3所示。

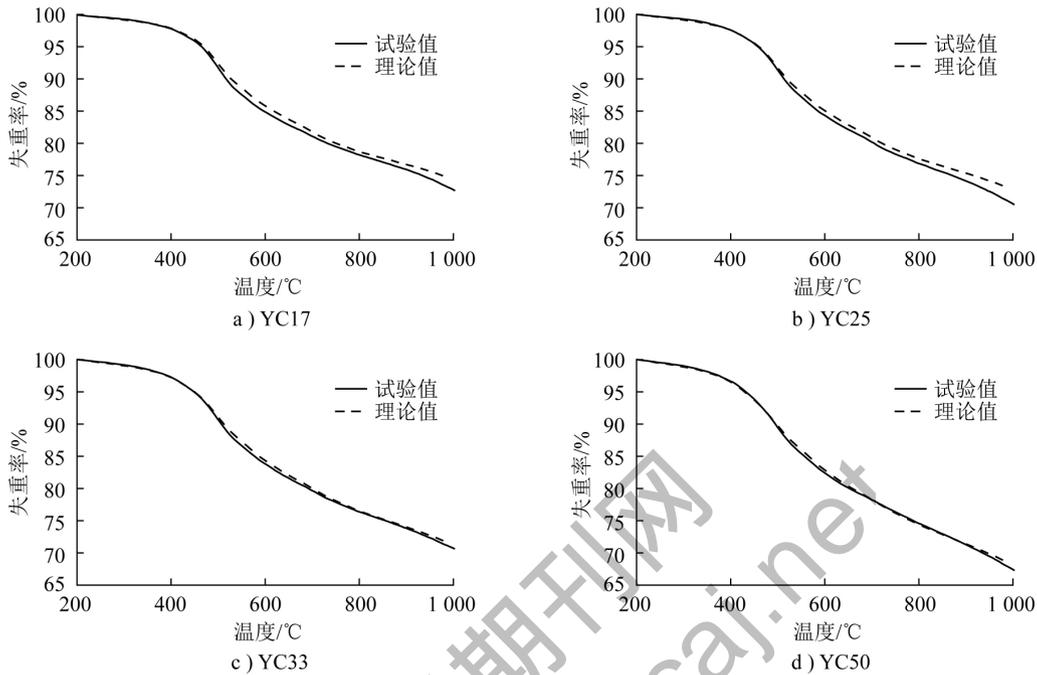


图3 不同比例混煤的试验值与理论值对比

Fig. 3 Comparison between experimental and calculated values of mixed coals with different ratios

由图3可知,低温阶段各煤样的实际失重率与理论加和值非常接近,但高温阶段,实际失重率有别于理论值。这是由于300℃前,SC分解并不明显(仅为0.5%),此时的热解行为主要表现为YC的分解过程。300℃时,YC已有约1.7%的挥发分逸出,使得自由基浓度增加,促进了SC的热解,进而使得试验值大于理论值。这说明YC与SC混合后热解行为已经发生了变化,高挥发分对煤的作用可能促进了煤的进一步分解,形成的气体成分和体积都产生了变化,所以在失重曲线上表现出实测值不同于理论值。

进一步处理数据得到各比例混煤热解过程中失重率的试验值与理论值的差值随温度变化的关系如图4所示。由图4可知,300℃前,这一差值接近于零,也正好对应了前面提及的这段热解过程主要表现为YC的分解过程。300℃后,除YC25外,该差值随着YC掺入比例的增加而先减后增,可能的原因是在相同热解温度下,配入的较高挥发分的YC比例增加,释放的挥发分增大,自由基浓度增加,促使了SC进一步发生热解,这表现为失重率会大于理论加和值,其差值有所减少。然而,随YC掺入量

的增加,自由基浓度也增加了自由基间的相互反应的几率,尤其发生内部氢自由基重排而使自由基稳定化,从而抑制了煤种间的相互作用,差值有所增加。尤其在650℃后,YC33和YC50这一差值大于零,即更多的YC反而抑制了SC的热解。可能原因是自由基稳定化过程中,增加了SC一些分子碎片上氢的释放,并与之发生无序重排,使更多自由基稳定,剩下更多固体残渣^[11]。而YC25所表现出的不同与其失重率出现的极大值相对应,说明2种煤样之间的相互作用复杂,体系中发生的反应并非多种基元反应的简单叠加。

2.3 热解反应动力学分析

煤组成复杂,热解反应过程复杂多变。用于描述气固相反应过程的模型^[12-13]中,Coats-Redfern法^[14-18]在研究煤分解动力学方面应用较为广泛,因此本文选用该方法计算2种原煤及其不同混煤热解的动力学参数。通过计算,这些煤样的热解反应均符合一级反应模型,按照上述处理过程即可得到各煤样热解反应的Arrhenius图,如图5所示。

由图5可知,在300和500℃附近存在2个明显的转折点,这与表2的结论一致。因此,主要选取

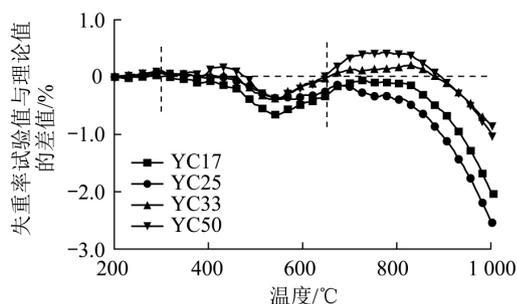


图4 混煤失重率的试验值与理论值的差值随温度的变化

Fig. 4 Change of differences between experimental and calculated values of mixed coals with temperature

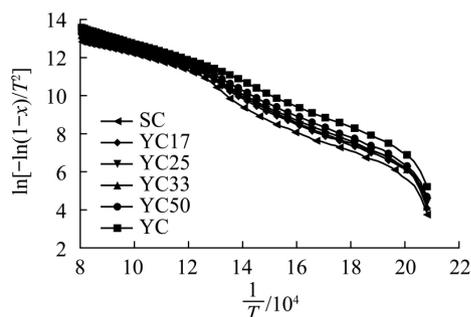


图5 2种原煤及其混煤热解反应的 Arrhenius 图

Fig. 5 Arrhenius plots for pyrolysis of two raw coals and their mixture

300~500 °C 和 500~1 000 °C 热解温度段,并求取各煤样热解动力学参数,结果见表3。

表3 煤热解反应的动力学参数

Table 3 Kinetic parameters of coal pyrolysis reactions

煤样	温度/°C	相关系数	活化能 $E/$ ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)	指前因子 $A/$ 10^{11}min^{-1}
SC	300~500	0.978 2	58.25	171.90
	500~1 000	0.984 6	33.20	4.00
YC17	300~500	0.990 4	57.35	213.92
	500~1 000	0.994 8	33.69	5.01
YC25	300~500	0.993 4	57.43	239.02
	500~1 000	0.995 9	34.74	6.22
YC33	300~500	0.993 6	56.54	225.41
	500~1 000	0.996 5	33.93	5.65
YC50	300~500	0.995 8	55.66	231.68
	500~1 000	0.997 8	34.28	6.57
YC	300~500	0.997 1	53.54	245.64
	500~1 000	0.999 3	35.55	10.30

由表3可知,拟合方程线性相关较好,除SC煤样外,其他相关系数为0.990 4~0.999 3。不同热解反应阶段对应着不同的活化能,300~500 °C 活化能要比500~1 000 °C 大,这主要是由于500~1 000 °C

温度段可以提供更高的能量,使低温下难以断裂的组织结构发生裂解,导致活化能较低。此外,各热解阶段的活化能与表2中失重率大小顺序恰好相反,这主要是由于煤热解过程中多种反应交叉进行,通过一级反应模型计算并不能解析出体系内部发生的真实反应的具体情况,仅表现出整个反应体系的总反应,从而影响到动力学参数的数值。此外,各混煤各温度段的活化能、指前因子均在2种原煤之间,随着YC的掺入比例呈规律变化,且在YC25时出现差异值,这表明活化能在一定程度上可以关联指前因子^[19]。此外,各混煤活化能并非是单种煤活化能的简单加权计算的平均值,这也进一步解释了混煤热解行为是各煤种间相互影响的综合体现,绝不是简单混合的结果。

3 结 论

1) 不同变质程度水峪焦煤(SC)和伊宁煤(YC)单独热解行为存在明显差异。与SC热解过程相比,YC热解更容易进行且最大失重速率对应温区较低;总失重率约为SC的2倍。

2) 对于不同混煤,除YC25在500~1 000 °C失重率外,其余随着YC掺入比例的增加,挥发分的释放基本呈逐渐增加趋势;试验值与理论值存在的差异表明,2种煤样之间的相互作用复杂,体系中发生的反应并非是多种基元反应的简单叠加。

3) 动力学分析表明,在各个热解反应阶段,2种煤及其混煤的活化能、指前因子差别较大,混煤各热解阶段的动力学参数大小顺序均随YC的掺入比例呈规律性变化,但在YC25热解时出现差异;混煤的动力学参数并非2种煤简单加权平均的结果,验证了混煤的热解行为是2种原煤间相互作用的结果。

参考文献(References):

- [1] 黄文辉,杨起,唐修义,等.中国炼焦煤资源分布特点与深部资源潜力分析[J].中国煤炭地质,2010,22(5):1-6.
Huang Wenhui, Yang Qi, Tang Xiuyi, et al. Distribution features of coal for coking resource in China and deep part potential analysis [J]. Coal Geology of China, 2010, 22(5): 1-6.
- [2] 马庆元.中国炼焦煤资源的分布特征[J].煤炭科学技术,2004,32(3):63-66.
Ma Qingyuan. Distribution features of coking coal resources in China [J]. Coal Science and Technology, 2004, 32(3): 63-66.
- [3] 姚润生,任慧琴.捣固炼焦在中国焦化工业发展中的前景与展望[J].煤化工,2004,32(4):1-3.
Yao Runsheng, Ren Huiqin. Prospect of stamp-charged coking in

- the coking industry of china[J]. Coal Chemical Industry, 2004, 32(4): 1-3.
- [4] 周良斌, 张海平, 朱应军, 等. 高硫焦煤的煤质研究及优化应用[J]. 武钢技术, 2014, 52(4): 1-3.
Zhou Liangbin, Zhang Haiping, Zhu Yingjun *et al.* Coal quality research and optimization applications for high sulfur coking coal[J]. Wuhan Iron and Steel Corporation Technology, 2014, 52(4): 1-3.
- [5] 张立岗. 中高硫瘦煤配煤炼焦试验及应用研究[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(4): 47-50.
Zhang Ligang. Coal quality research and optimization applications for high sulfur coking coal[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(4): 47-50.
- [6] 齐 炜. 炼焦过程中硫元素迁移规律研究[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(1): 34-36.
Qi Wei. Sulfur migration law during coking process[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(1): 34-36.
- [7] 戴财胜, 邱 平. 混煤的流化床热解动力学研究[J]. 煤炭转化, 2013, 36(2): 25-27.
Dai Caisheng, Qiu Ping. Study on the pyrolysis kinetics of blended coal in the fluidized-bed reactor[J]. Coal Conversion, 2013, 36(2): 25-27.
- [8] 平传娟, 周俊虎, 程 军, 等. 混煤热解反应动力学特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(17): 6-10.
Ping Chuanjuan, Zhou Junhu, Cheng Jun *et al.* Research on the pyrolysis kinetics of blended coals[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27(17): 6-10.
- [9] 赵丽红, 楚希杰, 辛桂艳. 煤热解特性及热解动力学的研究[J]. 煤质技术, 2010(1): 40-42.
Zhao Lihong, Chu Xijie, Xin Guiyan. Research on pyrolysis characteristics and pyrolysis kinetics of coal[J]. Coal Quality Technology, 2010(1): 40-42.
- [10] 闫金定, 崔 洪, 杨建丽, 等. 热重质谱联用研究兖州煤的热解行为[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(3): 311-315.
Yan Jinding, Cui Hong, Yang Jianli *et al.* Research on pyrolysis behavior of yanzhou coal using TG/MS[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(3): 311-315.
- [11] 谢克昌. 煤的结构与反应性[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 212.
- [12] Vlaev L T, Markovska I G, Lyubchev L A. Non-isothermal kinetics of pyrolysis of rice husk[J]. Thermochimica Acta, 2003, 406(1/2): 1-7.
- [13] 常 瑜, 李 林, 梁丽彤, 等. 内蒙和印尼褐煤的热解特性及动力学分析[J]. 煤炭转化, 2011, 34(2): 4-7.
Chang Yu, Li Lin, Liang Litong *et al.* Study on the pyrolysis characteristics and kinetics of mongolia lignite and indonesian lignite[J]. Coal Conversion, 2011, 34(2): 4-7.
- [14] 胡荣祖, 史启祯. 热分析动力学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2008: 54-55.
- [15] 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.
Dong Aixia, Zhang Shouyu, Wang Jian *et al.* Combustion performance and reaction activity of coal char[J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(1): 87-91.
- [16] 张 媛, 张海亮, 蒋雪冬, 等. 烟煤与生物质秸秆共气化反应动力学研究[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(8): 123-128.
Zhang Yuan, Zhang Hailiang, Jiang Xuedong *et al.* Reactivity and kinetics of bitumite and wheat straw blends during co-gasification[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(8): 123-128.
- [17] 武宏香, 李海滨, 赵增立. 煤与生物质热重分析及动力学研究[J]. 燃料化学学报, 2009, 37(5): 538-545.
Wu Hongxiang, Li Haibin, Zhao Zengli. Thermogravimetric analysis and pyrolytic kinetic study on coal/biomass blends[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2009, 37(5): 538-545.
- [18] 黄元波, 郝志峰, 蒋剑春, 等. 核桃壳与煤共热解的热重分析及动力学研究[J]. 林产化学与工业, 2012, 32(2): 30-36.
Huang Yuanbo, Zhao Zhifeng, Jiang Jianchun *et al.* Thermogravimetric analysis and kinetics of walnut shell and coal co-pyrolysis[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2012, 32(2): 30-36.
- [19] Essenhigh R H, Misra M K. Autocorrelations of kinetic parameters in coal and char reactions[J]. Energy Fuel, 1990, 4(2): 171-177.
- ~~~~~
- (上接第27页)
- [7] 朱书全, 邹立壮, 黄 波, 等. 水煤浆添加剂与煤之间的相互作用规律研究 I: 复合煤颗粒间的相互作用对水煤浆流变性的影响[J]. 燃料化学学报, 2003, 31(6): 519-524.
Zhu Shuquan, Zou Lizhuang, Huang Bo *et al.* Study on the interaction characteristics between different CWS dispersants and coals I: effect of the interaction of complex coal particle on CWS rheological behavior[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2003, 31(6): 519-524.
- [8] 王劫草, 阳 金, 党钾涛, 等. 低阶烟煤热解半焦制浆粘度模型的建立[J]. 黑龙江科技学院学报, 2013, 23(2): 120-123.
Wang Jincan, Yang Jin, Dang Jiatao *et al.* Development of slurry viscosity model from low rank bituminous coal pyrolyzed at medium-low temperature[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science and Technology, 2013, 23(2): 120-123.
- [9] 吴国光, 郭朝冰. 水煤浆成浆试验研究与制备因素分析[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(11): 544-546.
Wu Guoguang, Guo Chaobing. Experimental research and analysis of factors influencing CWS preparation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001, 30(11): 544-546.
- [10] 张荣曾. 水煤浆成浆技术[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [11] 高志芳, 朱书全, 黄 波, 等. 粒度分布对提质褐煤水煤浆性能影响的研究[J]. 选煤技术, 2009(1): 1-6.
Gao Zhifang, Zhu Shuquan, Huang Bo *et al.* Research on effect of particle size distribution of modified lignite-water slurry[J]. Coal Preparation Technology, 2009(1): 1-6.