

DOI: 10.7652/xjtuxb201403011

水洗对准东煤煤质特性影响的实验研究

付子文, 王长安, 翁青松, 车得福

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对准东煤由于灰中 Na 含量过高, 燃用中会出现严重的积灰问题, 在对准东煤中碱金属赋存形态进行研究的基础上, 着重研究了水洗温度和时间对准东煤 Na 脱除量及热解燃烧特性的影响。研究表明, 3 种典型的准东煤中 Na 主要以水溶形式存在, 水洗可以有效脱除 Na, 且脱除量与水洗温度和时间密切相关。水洗后煤热解特性指数减小, 20、40 °C 水洗使热解提前, 焦炭产量增加, 挥发分产量减少, 而 60 °C 水洗则相反。水洗使燃烧 TG、DTG(热质量损失、热质量损失率)曲线向高温区偏移, 燃尽温度和最大燃烧温度升高, 最大燃烧速率减小, 燃尽时间延长, 燃烧特性变差。动力学分析表明, 水洗使煤热解第一、三阶段表观活化能减小, 第二阶段表观活化能增大, 使燃烧表观活化能、指前因子和燃烧反应速率常数减小。Na 对煤样热解燃烧存在催化作用, 且存在最佳 Na 含量使催化作用最强。

关键词: 准东煤; 水洗; 碱金属; 赋存形态; 煤质特性; 动力学分析

中图分类号: TK16 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)03-0054-07

Experimental Investigation for Effect of Water Washing on Zhundong Coal Properties

FU Ziwen, WANG Chang'an, WENG Qingsong, CHE Defu

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The effects of water washing temperature and time on coal properties are investigated according to the occurrence mode of alkali metals in Zhundong coal. The experimental results show that Na mainly exists in water soluble form in three typical types of Zhundong coal. Harmful element Na can be effectively removed by water washing, and the removal amount is closely related to washing temperature and time, and the pyrolysis characteristic index number of washed coals reduces. When the temperature gets below 40 °C, the pyrolysis process of washed coals can be brought forward with more volatile yielded, and coals washed in 60 °C water vary oppositely. The combustion TG and DTG curves of water washed coals move towards higher temperature zone, while the burnout temperature and the maximum temperature increase, the maximum combustion rate decreases, the burnout time is prolonged, and the combustion performance is deteriorated. The kinetic analysis indicates that water washing facilitates decreasing the pyrolysis apparent activation energy during the first and third stages and increasing it during the second stage. The presence of Na exerts catalytic effect on coal pyrolysis and combustion behaviors. Moreover, there exists an optimal Na content for the strongest catalytic effect.

Keywords: Zhundong coal; water washing; alkali metal; occurrence mode; coal properties; kinetic analysis

随着我国经济持续快速发展,电力需求与日俱增,煤炭资源短缺问题越来越严重。已发现的准东煤田蕴藏着 3 900 亿吨煤炭资源,且准东煤具有低灰、低硫^[1],着火、燃尽性能优良等优点,能够很大程度上缓解我国煤炭资源短缺的问题。但是,在电厂燃用准东煤过程中出现了炉内燃烧器结渣严重,高温过热器、高温再热器沾污堵塞等问题,严重影响了电站锅炉的安全经济运行^[1-2]。目前,对准东煤的利用主要采用掺烧沾污性弱的煤种的方法,但这种控制方法只能减缓沾污,无法从根本上解决问题。

准东煤属于低阶烟煤,煤灰中 Na 含量很高。从灰分含量和灰中碱金属含量来看,准东煤和生物质十分相似。因此,对于准东煤燃用过程中存在的问题及解决措施的研究,可以借鉴生物质的一些理论和方法。碱金属是有害元素,在直接燃用或气化过程中,碱金属会挥发进入气相^[3],若燃料中碱金属含量过高,则会产生一系列问题,主要表现在以下 3 方面:①对于煤粉炉,烟气中的碱金属蒸气很容易冷凝在热交换器表面形成冷凝液膜,呈黏稠熔融状,会捕集固体颗粒,加速黏结灰的形成,降低设备的利用率^[2];②对于整体煤气化联合循环发电系统(IGCC)和增压流化床联合循环系统(PFBC),高温烟气中碱金属蒸气含量远高于规定值 0.024 mg/m³,会引起燃气轮机叶片的高温腐蚀,严重影响安全运行^[4];③对于循环流化床锅炉(CFB),碱金属会形成低温共熔体,引起床料聚团、结块、反流态化等问题^[5-6]。因此,燃料中碱金属的脱除一直是国内外学者研究的热点问题。脱除方法有燃料提质预处理、添加剂和吸附剂脱除法。通过对燃料进行提质预处理,可以脱除燃料中有害矿物质和污染物元素,提高燃料品质。Nasir 等对不同煤种的可洗性进行了研究^[7],Cuvilas 等研究了水、NaOH 和 H₂SO₄ 预处理对生物质燃料特性及燃烧特性的影响^[8],Sakanishi 等研究了水、CH₃COOH 和 HCl 预处理对煤中矿物质元素的脱除^[9],邓磊等对生物质进行水洗预处理,有效脱除了生物质中有害元素,延迟挥发分的析出

和燃烧,改善了灰熔融特性^[10]。通过向炉膛添加添加剂,从而抑制燃烧过程中碱金属向烟气中的挥发,Eyk 对燃烧过程中添加高岭土对床料反流态化问题的抑制作用进行了研究^[5]。吸附法是将气态碱金属与吸附剂通过化学反应或物理吸附作用将气态碱金属固定下来,很多学者对吸附剂的吸收速率、高温效率、碱容量、可再生性等特性进行了研究^[3-4]。显然,添加剂和吸附剂脱除方法均不能从根本上脱除燃料中碱金属元素,且实际生产中用量巨大,效果不太理想,而对燃料提质预处理可以从根本上改善燃料特性。因此,本文在研究准东煤中碱金属赋存形态的基础上,重点研究了水洗温度和时间对准东煤煤质特性的影响,包括燃料特性、热解特性和燃烧特性。

1 实 验

1.1 实验样品

选取紫金烟煤(ZJ)、天池烟煤(TC)和五彩湾烟煤(WCW)3 种典型的准东煤为研究煤种,工业分析和元素分析见表 1。

1.2 实验方案

1.2.1 碱金属赋存形态 称量 1 g 煤样,加入 50 mL 蒸馏水,在 60 ℃恒温水浴中恒温 24 h,之后过滤并稀释至 100 mL,用 1 mol·L⁻¹醋酸铵、1 mol·L⁻¹盐酸重复如上操作^[11],且每一种试剂洗涤都做试剂空白,对滤液和试剂空白用 Optima 7000DV 型 ICP-OES(电感耦合等离子体-原子发射光谱仪)进行定量分析。最后,对盐酸过滤之后的煤样在烘箱中恒温 105 ℃的条件下加热 24 h,然后取 0.1 g,加入适量氢氟酸、盐酸、硝酸和双氧水,用 Multiwave3000 微波消解仪对其消解,并对消解液用 ICP-OES 定量分析。

1.2.2 水洗及煤质特性分析实验 选取 3 种准东煤进行水洗,过程如下:称量约 1 g,粒径为 65~75 μm,浸没于 50 mL 蒸馏水中 2 h 和 24 h,水温控制为 20、40 和 60 ℃。对原煤进行微波消解,滤液和消解液用 ICP-OES 定量分析。对水洗后煤样进行 BET

表 1 3 种准东煤工业分析和元素分析

煤样	w/%(工业分析)				w/%(元素分析)				
	FC _{ad}	V _{ad}	A _{ad}	M _{ad}	C _{ad}	H _{ad}	O _{ad}	N _{ad}	S _{ad}
ZJ	53.76	28.42	3.52	14.30	64.77	3.72	12.34	0.77	0.58
TC	65.10	25.96	4.06	4.88	73.50	2.79	14.03	0.13	0.56
WCW	54.26	26.39	6.30	13.05	65.77	2.77	10.96	0.49	0.66

注:w(O)=100-w(C)-w(H)-w(N)-w(S)-w(A)-w(M)。

分析及热质量损失实验,BET 采用 N₂ 作为吸附气体,热质量损失实验采用法国塞塔拉姆公司生产的 Labsys Evo 同步热分析仪,样品质量为(10±0.1) mg,升温速率为 20℃·min⁻¹,热解和燃烧终温分别为 800℃和 1 200℃,燃烧条件为 O₂ 流量 10 mL·min⁻¹,N₂ 流量 40 mL·min⁻¹,热解条件为 N₂ 流量 50 mL·min⁻¹。

2 实验结果及分析

2.1 碱金属赋存形态

3 种准东煤中 Na 赋存形态见图 1,X 为每克煤中 Na 元素的质量。可以看出,3 种准东煤中 Na 均主要以水溶形式(氯化钠晶体和水合形式的无机钠)存在,其质量占 Na 总量的 67%~94%,这与生物物质中碱金属赋存形态十分类似^[6,12]。水溶钠主要来自于成煤植物所吸收的无机水分,紫金煤中盐酸溶钠(配位形式存在的有机钠)占 9%,与紫金煤和天池煤相比,五彩湾煤中醋酸铵溶钠(羧酸盐形式存在的有机钠)和不可溶钠(硅铝酸盐形式)较多,分别占 20%和 7%,不可溶钠含量多是由五彩湾煤中硅铝含量高造成的。3 种准东煤中 K 赋存形态见图 2,可以看出,紫金煤中 K 主要以不可溶钾形式存在,天池煤中盐酸溶钾所占比例较大,而五彩湾煤中水溶钾和醋酸铵溶钾所占比例相当,煤中碱金属的含量和赋存形态与成煤植物及环境有着必然的关系。由图 1 可知,准东煤中可溶钠所占比例在 93%以上,在燃烧或气化条件下,可溶钠一般都会从煤中挥发出来进入气相^[13],加速积灰过程,所以在燃用准东煤过程中出现了严重积灰的问题。

3 种准东煤中水溶钠所占比例很高,水洗能脱除大部分 Na,本文就水洗温度和时间对准东煤 Na 脱除量,以及对热解燃烧特性的影响展开了研究。

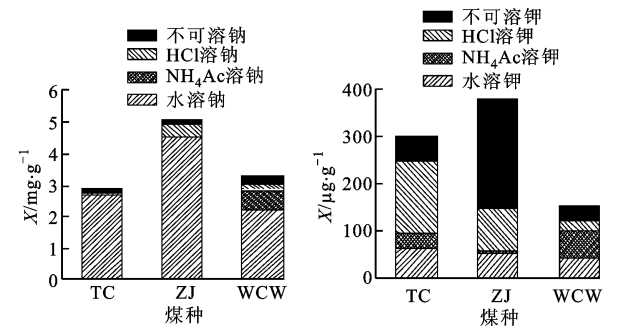


图 1 准东煤中 Na 赋存形态

2.2 燃料特性

2.2.1 比表面积分析 原煤及水洗煤样孔结构特

征参数见表 2,可以看出,水洗对比表面积和微孔体积有较大的影响,而对孔隙率影响较小。微孔体积随水洗温度的升高而增大,比表面积随水洗温度的升高而减小,而孔隙率变化较小,说明煤样微孔数量随水洗温度的升高而减少。研究表明,水洗只是脱除了水溶性矿物质,对煤的结构基团几乎没有影响^[14],因此水洗对煤孔结构的影响主要是由于矿物质的脱除造成的。

表 2 紫金原煤及水洗煤样孔结构特征参数				
参数	ZJ	ZJ-20℃	ZJ-40℃	ZJ-60℃
比表面积/ m ² ·g ⁻¹	1.60	2.39	2.15	0.66
微孔体积/ 10 ⁻³ cm ³ ·g ⁻¹	1.12	0.30	0.59	1.51
孔隙率/10 ⁻²	4.68	4.57	3.84	3.84

注:ZJ-20℃、ZJ-40℃、ZJ-60℃分别表示水洗温度为 20、40、60℃的水洗煤。

2.2.2 矿物质脱除 水洗温度对 Na 脱除量的影响见图 3。由图 3a 可以看出,水洗时间为 2 h 时,Na 脱除量较小,且温度对 Na 脱除量的影响不明显,而水洗时间为 24 h 时,60℃比 40℃水洗 Na 脱除量增加 46%。由图 3b 可以看出,水洗时间为 24 h、温度为 60℃时,可以脱除 67%~94%的 Na,邓磊等研究生物物质水洗得出了相似的结论^[10]。水洗温度较低时,紫金和天池煤的 Na 脱除量随温度升高增加幅度较小,温度较高时,Na 脱除量大幅度升高,五彩湾煤的 Na 脱除量随水洗温度升高均大幅度增加,这与煤中 Na 含量及赋存形态密切相关。

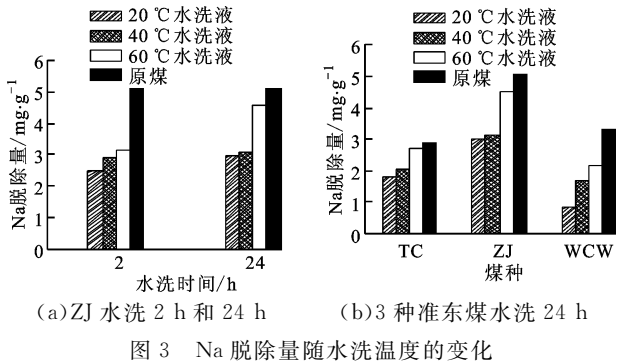


图 3 Na 脱除量随水洗温度的变化

图 4 为不同水洗温度下紫金煤 Na 脱除量随水洗时间的变化,可以看出,Na 脱除量随水洗时间的增加而增加,水洗温度越高,脱除量受水洗时间的影响越显著。因此,要保证足够长的水洗时间和较高的水洗温度,才能更有效地脱除煤中 Na 元素。

60 ℃水洗对准东煤中矿物质元素脱除率见图 5,水洗可以有效脱除 Na 元素,而对其他矿物质脱除效果不明显,水洗只能脱除煤中可溶性矿物质,这与前人研究结果一致^[14]。

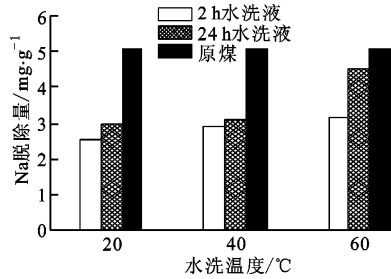


图 4 紫金煤中 Na 脱除量随水洗时间的变化

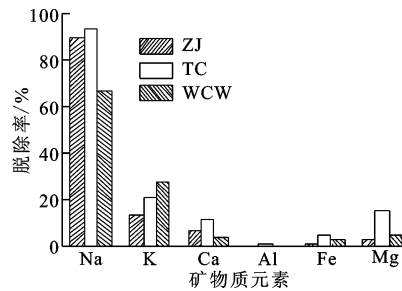
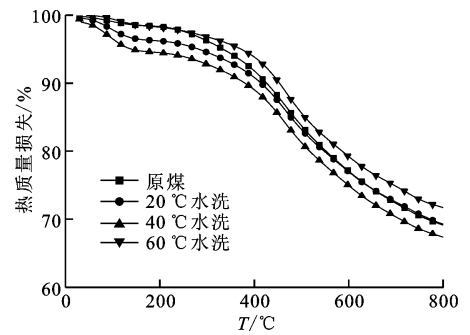


图 5 60 ℃水洗对 3 种准东煤中矿物质元素的脱除率

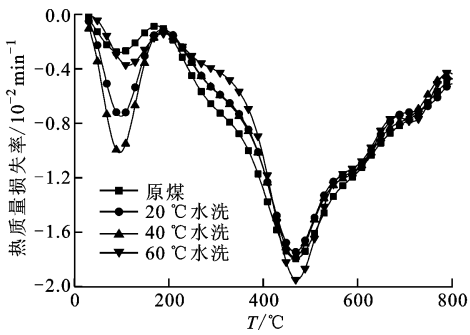
2.3 热解特性

2.3.1 热解 TG、DTG 曲线 紫金原煤及水洗煤样热解的 TG、DTG(热质量损失、热质量损失率)曲线见图 6,热解特征参数见表 3。可以看出,热解主要集中在 300~700 ℃,与原煤相比,水洗煤样挥发分初析温度 T_s 升高了 18~28 ℃,20 和 40 ℃水洗后煤样的 TG 曲线向低温区偏移,焦炭产量降低,挥发分产量增加,而 60 ℃水洗煤样则相反。由于水洗只是脱除了煤中部分 Na,而对煤官能团结构几乎没有影响,所以可以推断,少量 Na 可以对煤热解起催化作用,使热解提前。焦炭和挥发分产量的变化可能是因为 20 和 40 ℃水洗使煤样比表面积增大,60 ℃水洗使煤样比表面积减小(见表 2),而较大的比表面积有利于传热传质,促进挥发分的析出。

由 DTG 曲线可看出,在低温段(200~500 ℃)水洗后煤样质量损失速率减小,而高温段(500~700 ℃)质量损失速率几乎没有变化,60 ℃水洗后煤样最大质量损失速率 $(dw/dt)_{max}$ 明显增大,这可能是因为水洗脱除了煤中大部分 Na。熊杰等的研究表明,最大质量损失速率随 Na 含量的增加而减小^[15],所以 Na 的脱除有利于挥发分的快速析出。最大质量损失温度 T_{max} 几乎没有变化, T_{max} 代表了整个煤大分子结构的平均稳定程度,水洗后 T_{max} 基本不变说明



(a) TG 曲线



(b) DTG 曲线

图 6 紫金原煤及水洗煤样热解的 TG、DTG 曲线

水洗没有使煤大分子结构发生变化,与其他学者研究结果一致^[15]。为了综合评价水洗对煤热解特性的影响,引入热解特性指数 D ,计算式如下

$$D = \frac{(dw/dt)_{max}}{T_{max} T_s \Delta T_{1/2}} \quad (1)$$

式中: $(dw/dt)/(dw/dt)_{max} = 1/2$ 对应的温度区间为 $\Delta T_{1/2}$ 。可以看出,水洗后 D 小幅度减小,说明水洗不利于煤热解过程的进行,但影响不大。

2.3.2 动力学分析 煤的热解动力特性对煤的燃烧和气化过程有着重要的影响,本文采用 Coast-Redfem 积分方法^[16],通过对温度积分的近似推导,得出了在反应级数 $n=1$ 时的积分型方程

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

式中: α 为相对质量损失率; T 为温度; A 为指前因子; β 为升温速率; R 为气体常数,取 $8.314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$; E 为表观活化能。

动力学参数计算结果见表 4,原煤和水洗煤样热解的第二阶段表观活化能高于第一、三阶段。这是因为热解第一阶段发生的是热稳定性较差的侧链和活泼基团的断裂,其分解温度较低,因此其表观活化能较低;第二阶段是半焦形成前的塑性阶段,主要发生的是大分子的断裂,需要提供较高的能量,使得

表 3 紫金原煤及水洗煤样热解特征参数

煤样	$T_s/^\circ\text{C}$	$(\text{d}w/\text{d}t)_{\text{max}}/\text{min}^{-1}$	$T_{\text{max}}/^\circ\text{C}$	$\Delta T_{1/2}/^\circ\text{C}$	$D/10^{-10}\text{ min}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-3}$	$w(\text{V})/\%$	$w(\text{C})/\%$
ZJ	368	-0.017 9	507	351	2.50	34.17	65.83
ZJ-20 $^\circ\text{C}$	387	-0.017 5	500	372	2.23	34.24	65.96
ZJ-40 $^\circ\text{C}$	386	-0.017 8	500	372	2.28	38.22	61.78
ZJ-60 $^\circ\text{C}$	396	-0.019 5	504	394	2.28	32.16	67.84

表 4 原煤及水洗煤样热解动力学参数

煤样	$T/^\circ\text{C}$	$E/\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	A/min^{-1}	$-R_1$
ZJ	215~315	14.06	0.25	0.994
	315~562	23.13	2.47	0.996
	562~749	21.03	1.63	0.997
ZJ-20 $^\circ\text{C}$	298~393	8.11	0.06	0.991
	393~496	23.42	2.82	0.998
	496~744	18.78	1.10	0.998
ZJ-40 $^\circ\text{C}$	327~384	6.23	0.04	0.990
	384~498	20.23	1.59	0.996
	498~756	19.40	1.32	0.991
ZJ-60 $^\circ\text{C}$	230~394	9.77	0.07	0.990
	394~496	35.13	23.58	0.998
	496~730	20.71	1.51	0.998

表 5 准东原煤及水洗煤样燃烧特征参数

煤样	$T_i/^\circ\text{C}$	$T_f/^\circ\text{C}$	$T_{\text{max}}/^\circ\text{C}$	$(\text{d}w/\text{d}t)_{\text{max}}/10^{-2}\text{ min}^{-1}$
ZJ	339	677	491	-8.18
ZJ-20 $^\circ\text{C}$	341	773	559	-6.02
ZJ-40 $^\circ\text{C}$	341	773	566	-5.86
ZJ-60 $^\circ\text{C}$	346	729	529	-6.84
TC	324	662	477	-8.08
TC-20 $^\circ\text{C}$	316	699	469	-6.45
TC-40 $^\circ\text{C}$	317	695	469	-6.61
TC-60 $^\circ\text{C}$	320	702	470	-6.69
WCW	318	624	445	-8.94
WCW-20 $^\circ\text{C}$	319	700	474	-6.59
WCW-40 $^\circ\text{C}$	319	702	488	-6.73
WCW-60 $^\circ\text{C}$	323	743	490	-5.94

注: R_1 为相关系数。

其表观活化能较高;第三阶段,主要是二次气体(CO 、 H_2)的释放,半焦缩聚成焦炭,需要的能量较小。水洗后第一、三阶段表观活化能减小,除 40 $^\circ\text{C}$ 水洗煤样外,第二阶段表观活化能都增大,与 DTG 曲线反映的规律一致,说明水洗有利于煤样热解第一、三阶段的进行,却阻滞了第二阶段的进行。这是由于水洗改变了煤样孔结构和矿物质含量引起的。

2.4 燃烧特性

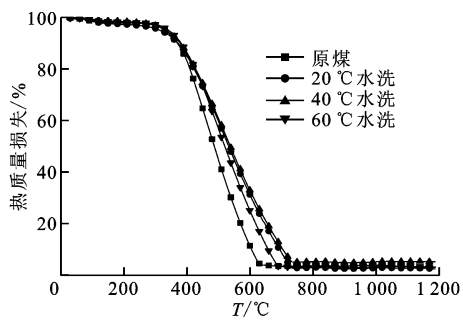
2.4.1 燃烧 TG、DTG 曲线 准东原煤及水洗煤样燃烧的 TG、DTG 曲线见图 7,燃烧特征参数见表 5。可以看出,与原煤相比,水洗使 TG、DTG 曲线向高温区偏移,3 种准东煤燃烧特性相近,这是因为 3 种准东煤挥发分和固定碳含量接近(见表 1)。水洗对着火温度 T_i 几乎没有影响,燃尽温度 T_f 升高 33~119 $^\circ\text{C}$,延长了燃尽时间,燃尽特性变差。水洗使 $(\text{d}w/\text{d}t)_{\text{max}}$ 减小 0.013 4~0.03 min^{-1} ,紫金煤和五彩湾煤水洗后 T_{max} 升高 29~75 $^\circ\text{C}$,天池煤 T_{max} 小幅度降低,水洗会使煤燃烧特性变差。水洗改变了煤孔结构和 Na 含量,20、40 $^\circ\text{C}$ 水洗使煤比表面积增大,但燃烧特性却变差,说明 Na 对燃烧起催化促进作用。对于紫金煤,60 $^\circ\text{C}$ 水洗比 20、40 $^\circ\text{C}$ 水洗时的 T_f 、 T_{max} 降低, $(\text{d}w/\text{d}t)_{\text{max}}$ 升高,燃烧特性有所改善,说明少量 Na 对燃烧起催化作用,而过多 Na 则起阻

滞作用。对于天池煤,Na 的催化作用不太明显,而五彩湾煤随着 Na 含量的增加 Na 的催化作用加强,这可能是由于不同煤种中 Na 含量不同引起的。因此,Na 对准东煤的燃烧起催化作用,但不是 Na 含量越高,催化作用越强,而是存在最佳 Na 含量。

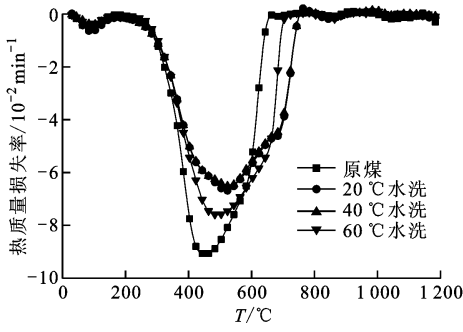
2.4.2 动力学分析 采用 Coast-Redfem 积分方法,以紫金煤为例,动力学参数计算结果见表 6。因为煤燃烧过程十分复杂,包括反应物的扩散、燃烧反应以及反应产物的扩散,所以表观活化能受反应温度、扩散等很多因素影响,水洗改变了煤样孔结构,影响了反应物和反应产物的扩散过程,从而使表观活化能计算值偏小。因此,不能仅从表观活化能来判定水洗对煤燃烧的影响。在此,本文引入反应速

表 6 原煤及水洗煤样燃烧动力学参数

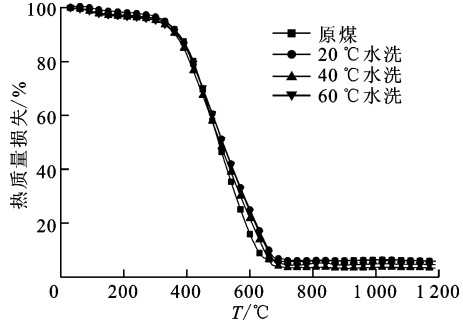
煤样	$T/^\circ\text{C}$	$E/\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	A/min^{-1}	$T_{1/2}/^\circ\text{C}$	K	$-R_1$
ZJ	339~677	51.75	541.87	483	0.144	0.998
ZJ-20 $^\circ\text{C}$	339~677	39.75	40.98	529	0.106	0.991
ZJ-40 $^\circ\text{C}$	341~734	36.38	21.45	530	0.092	0.993
ZJ-60 $^\circ\text{C}$	346~729	46.32	142.26	516	0.122	0.994



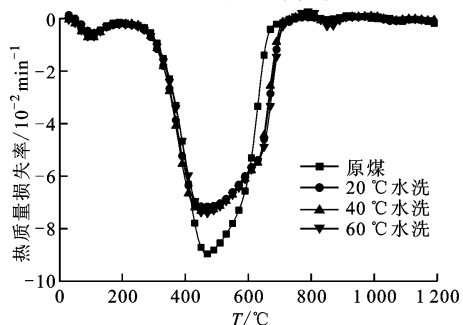
(a)ZJ 的 TG 曲线



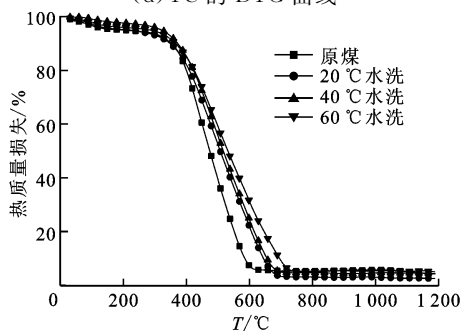
(b)ZJ 的 DTG 曲线



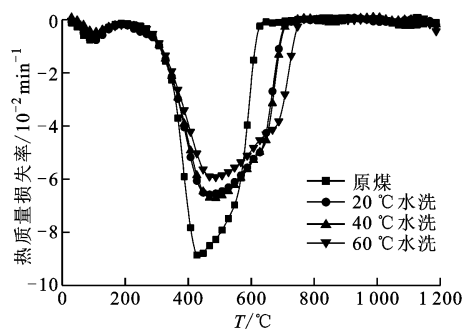
(c)TC 的 TG 曲线



(d)TC 的 DTG 曲线



(e)WCW 的 TG 曲线



(f)WCW 的 DTG 曲线

图 7 原煤及水洗煤样燃烧的 TG、DTG 曲线

率常数 K ,综合考虑了活化能 E 和指前因子 A 对燃烧反应的影响,见下式

$$K = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \tag{3}$$

从表 6 可以看出,当温度取 $T_{1/2}$ (α 为 1/2)时,水洗后 K 减小,表明水洗不利于煤燃烧过程的进行,这与燃烧的 TG、DTG 曲线变化一致。

2.5 水洗滤液处理

对准东煤进行水洗预处理需要消耗大量的水,也将产生大量待处理的滤液。准东煤中部分无机元素在水洗过程中进入滤液,可通过蒸馏或反渗透技术对滤液进行回收利用,其中反渗透技术是最为经济和高效的^[17],仅消耗较少的能量就能够将水的总含盐量大幅度降低,在水净化领域被广泛应用。

3 结 论

(1)3 种典型的准东煤中 Na 主要以水溶形式存在,可溶钠占 93%以上,易挥发进入气相,这是准东煤燃用过程中积灰沾污严重的根本原因。

(2)水洗可以有效脱除煤中 Na 元素,较高的水洗温度和足够长的停留时间有利于 Na 元素的脱除。水洗在脱除矿物质的同时也使煤孔结构发生了改变。

(3)20、40 °C 水洗使煤样热解提前,焦炭产量降低,挥发分产量增加,而 60 °C 水洗煤样则相反。水洗有利于煤样热解第一、三阶段的进行,却阻滞了第二阶段,水洗使燃烧特性变差。少量 Na 对煤热解燃烧起催化作用,而过多 Na 则可能阻滞热解燃烧过程。

(4)可在燃用准东煤的电厂建造洗煤池,使煤在水温不低于 60 °C、煤水比约为 20 g · L⁻¹的条件下浸泡 24 h 左右。锅炉冷凝器冷却水温度为 30~50 °C,经汽轮机抽汽加热至 60 °C 左右即可用于洗煤。

参考文献:

- [1] 杨忠灿, 刘家利, 姚伟. 准东煤灰沾污指标研究 [J]. 洁净煤技术, 2013(2): 81-84.
YANG Zhongcan, LIU Jiali, YAO Wei. Fouling index of Zhundong coal ash [J]. Coal Cleaning Technology, 2013(2): 81-84.
- [2] 杨忠灿, 刘家利, 何红光. 新疆准东煤特性研究及其锅炉选型 [J]. 热力发电, 2010, 39(8): 38-44.
YANG Zhongcan, LIU Jiali, HE Hongguang. Study on properties of Zhundong coal in Xinjiang region and type selection for boilers burning his coal sort [J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(8): 38-44.
- [3] BLASING M, MULLER M. Release of alkali metal, sulphur, and chlorine species from high temperature gasification of high-and low-rank coals [J]. Fuel Process Technology, 2013(106): 289-294.
- [4] ESCOBAR I, OLESCHKO H, WOLF K J, et al. Alkali removal from hot flue gas by solid sorbents in pressurized pulverized coal combustion [J]. Powder Technology, 2008, 180(1): 51-56.
- [5] EJYK P J, KOSMINSKI A, ASHMAN P J. Control of agglomeration and defluidization during fluidized-bed combustion of south Australian low-rank coals [J]. Energy & Fuels, 2012, 26(1): 118-129.
- [6] 徐婧. 生物质燃烧过程中碱金属析出的实验研究 [D]: 杭州, 浙江大学, 2006.
- [7] NASIR S, KUCERIK J, MAHMOOD Z. A study on the washability of the Azad Kashmir (Pakistan) coalfield [J]. Fuel Process Technology, 2012 (99): 75-81.
- [8] CUVILAS C A, YANG W H. Spruce pretreatment for thermal application: water, alkaline, and diluted acid hydrolysis [J]. Energy & Fuels, 2012, 26(10): 6426-6431.
- [9] SAKANISHI A, AKASHI E, NAKAZATO T, et al. Characterization of eluted metal components from coal during pretreatment and solvent extraction [J]. Fuel, 2004, 83(6): 739-743.
- [10] 邓磊, 张涛, 刘银河, 等. 水洗对生物质燃料特性及燃烧特性的影响 [J]. 工程热物理学报, 2010, 31(7): 1239-1242.
DENG Lei, ZHANG Tao, LIU Yinhe, et al. Effect of washing on fuel properties and combustion characteristics of biomass [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(7): 1239-1242.
- [11] 汉春利, 张军, 刘坤磊. 煤中钠存在形式的研究 [J]. 燃料化学学报, 1999, 27(6): 575-578.
HAN Chunli, ZHANG Jun, LIU Kunlei. Modes of occurrence of sodium in coals [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 1999, 27(6): 575-578.
- [12] 孟凡华, 杨天华, 孙洋, 等. 生物质燃烧过程中碱金属迁移转化研究进展 [J]. 可再生能源, 2010, 28(5): 111-114.
MENG Fanhua, YANG Tianhua, SUN Yang, et al. Research process migration and transformation of alkali metals during biomass combustion [J]. Renewable Energy Resource, 2010, 28(5): 111-114.
- [13] 李勇, 肖军, 章名耀. 燃煤过程中碱金属迁移规律的模拟研究与预测分析 [J]. 燃料化学学报, 2005, 33(5): 556-560.
LI Yong, XIAO Jun, ZHANG Mingyao. Modeling and prediction of migration mechanism of alkali metals during coal-fired process [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2005, 33(5): 556-560.
- [14] 王贤华, 陈汉平, 王静, 等. 无机矿物质盐对生物质热解特性的影响 [J]. 燃料化学学报, 2008, 36(6): 679-683.
WANG Xianhua, CHEN Hanping, WANG Jing, et al. Influences of mineral matters on biomass pyrolysis characteristics [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2008, 36(6): 679-683.
- [15] 熊杰, 周志杰, 许慎启, 等. 碱金属对煤热解和气化反应速率的影响 [J]. 化工学报, 2011, 62(1): 192-198.
XIONG Jie, ZHOU Zhijie, XU Shenqi, et al. Effect of alkali metal on rate of coal pyrolysis and gasification [J]. CIESC Journal, 2011, 62(1): 192-198.
- [16] LIU Q R, HU H Q, ZHOU Q, et al. Effect of inorganic matter on reactivity and kinetics of coal pyrolysis [J]. Fuel, 2004, 83(6): 713-718.
- [17] JENKINS B, MANNAPPERUMA J, BAKKER R. Biomass leachate treatment by reverse osmosis [J]. Fuel Processing Technology, 2003, 81(3): 223-246.

(编辑 荆树蓉)