

褐煤水分和挥发分析出特性研究

徐 通

(中煤科工清洁能源股份有限公司,北京 100013)

摘 要:为研究我国典型褐煤的水分和挥发分析出特性,以宝日希勒褐煤为原料,采用烘箱和热重等温实验在不同温度和粒径下对褐煤的水分分析出特性进行研究,并对褐煤水分分析出机理进行探讨,建立了相应的机理方程。采用马弗炉等温热解实验对褐煤的挥发分析出过程进行研究。结果表明,褐煤中水分的析出过程受温度和粒径2种因素影响,温度的升高可以弥补大颗粒传热传质阻力的影响。由于水分赋存形式的不同,褐煤低温脱水过程可分成2个阶段,分别对应不同结合形式水分的析出,有着不同的干燥机理方程,而相对较高温度脱水时则没有明显的界限差别,比较适合褐煤脱水温度和脱水粒径分别为150~200℃和15mm以下。挥发分的析出则主要与温度有关,从200℃开始析出,400℃后大量析出,1000℃以下,温度升高,析出量增多,但随着温度上升,增加趋势变缓。

关键词:褐煤;水分;挥发分;干燥;热解

中图分类号:TQ533 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2016)02-0031-06

Moisture and volatile releasing characteristics of lignite

XU Tong

(China Coal Technology and Engineering Group Clean Energy Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: In order to study the moisture and volatile releasing properties of Chinese typical lignite, a Mengdong lignite was adopted as research object at different temperature and particle size using isothermal oven and thermo-gravimetric to study its moisture releasing properties. The mechanism equations were gained. The volatile releasing properties were also studied using the isothermal muffle furnace. The results showed that the moisture releasing process was affected by temperature and particle size, which dramatically hampered the heat and mass transfer but it could be modified by increasing temperature. Due to different moisture storage forms, two stages existed during the low heating temperature dewatering process, corresponding to different kinds of moisture releasing and mechanisms. Whereas dewatering under the relative high temperature was not complex. The appropriate condition for dewatering was that, the temperature ranged from 150℃ to 200℃ and the coal particle size was below 15 mm. The volatile releasing process, which was mainly related to the temperature, lasted from 200℃ to 1000℃, and enhanced after 400℃. Besides, the releasing amount increased with the temperature rising, then increased gradually unobvious at high temperature.

Key words: lignite; moisture; volatile; dewatering; pyrolysis

0 引 言

褐煤是一种经过成岩作用而变质作用不充分、煤化程度较低的煤种。由于我国煤炭资源禀赋条件差,褐煤储量丰富^[1],可以预见在高阶煤资源不断消耗以及能源和资源需求量不断增加的未来,褐煤能源和资源的双重属性将使其具有不可

替代的重要地位。褐煤具有高挥发分、反应性好的优点,但其水分高,长期堆放容易自燃^[2],褐煤中的高水分不仅增加了运输成本,而且影响锅炉运行,降低电厂效率,增加温室气体CO₂的排放^[3]。因此如何脱除褐煤中高水分的同时,保持褐煤高挥发分的固有优势成为褐煤提质利用研究的重点,这也是褐煤提质技术大都选择在较为温

收稿日期:2015-08-19;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2016.02.007

作者简介:徐 通(1985—),男,江苏泗阳人,助理研究员,硕士,主要从事高效煤粉锅炉系统项目研究及推广工作。E-mail:xu_ccri@126.com

引用格式:徐 通.褐煤水分和挥发分析出特性研究[J].洁净煤技术,2016,22(2):31-36,41.

XU Tong. Moisture and volatile releasing characteristics of lignite[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(2): 31-36, 41.

和的温度和压力下进行的主要原因^[4-6]。此外以褐煤脱水干燥和热解为基础的褐煤水分回收,挥发分高效利用及焦炭燃烧能源梯级开发综合利用的多联产方案成为国内褐煤开发利用的重点研究方向^[7-10]。因此,研究褐煤自身水分和挥发分在其热转化利用过程中的析出脱除规律对褐煤提质利用过程及基于褐煤资源化利用的多联产技术具有重要意义。闫瑞东^[11]建立了火电厂烟气褐煤预干燥发电系统的热经济理论分析模型,以不同干燥程度的褐煤作为输入燃料(水分分别为34.1%、30%、25%、20%和18%),发现电厂锅炉效率最高可提高1.47%,节省原煤5.11%,节能效果明显。王卫东等^[12]运用微波实验设备对锡林郭勒褐煤进行微波干燥脱水分析,结果发现其主要影响因素为煤颗粒粒度、微波辐射功率和初始含水率。沈望俊等^[13]采用快速水分干燥仪模拟了锡盟褐煤在不同温度、不同粒径和不同时间下的恒温干燥过程,结果发现干燥过程主要受温度和粒径的影响,并建立了相应的干燥模型。邹祥波等^[14]对3种低品质

褐煤进行了水热改性提质,发现改性后褐煤的挥发分有所降低,并利用快速裂解仪对改性前后褐煤挥发分的析出特性进行研究。但这些研究都是基于褐煤提质改性的环境及实验条件做出的分析研究,没有对褐煤的水分和挥发分析出特性进行深入表征,也没有就单种褐煤给出其水分和挥发分共同的析出特性,而褐煤提质利用过程中通常是水分干燥与褐煤挥发分析出过程相结合的综合热利用。笔者以我国典型褐煤产区蒙东的宝日希勒褐煤为实验煤样,利用烘箱、热重和马弗炉等仪器研究了褐煤中水分和挥发分在不同颗粒粒径和不同温度下的析出特性,并对褐煤水分析出机理进行了深入分析,以期褐煤脱水提质利用技术和基于褐煤干燥为基础的多联产利用技术提供一定的基础数据。

1 实验部分

1.1 实验煤种

实验所选煤种为我国典型褐煤产区内蒙古东部地区的宝日希勒褐煤,煤质分析见表1。

表1 宝日希勒褐煤的煤质分析

Table 1 Coal quality analysis of Baorixile brown coal

工业分析/%					元素分析/%					$Q_{h,ad}/$
M_{ar}	M_{ad}	A_{ad}	V_{ad}	FC_{ad}	$w(C_{ad})$	$w(H_{ad})$	$w(N_{ad})$	$w(S_{t,ad})$	$w(O_{ad})$	$(kJ \cdot g^{-1})$
27.98	16.58	7.72	34.39	41.31	55.63	3.31	0.82	0.08	15.86	21.28

1.2 水分析出实验

将原煤破碎并筛分至1~3、3~8、8~15和15~30 mm,干燥脱水温度分别为55、105、150和200℃。实验中,设定好烘箱温度,一次性将多个称量好的原煤和称量皿放入烘箱,每隔5~10 min取出一个样品进行称重直至恒重,得到该温度下的褐煤水分析出特性。

采用等温热重脱水实验对褐煤水分析出机理进行分析,热重分析仪型号为METTLER-TOLEDO TGA/SSTA851e。取0.15 mm以下原煤10 mg左右放入热重分析仪,等温脱水温度分别为30、50、70、90和110℃,氮气流量为20 mL/min。

1.3 挥发分析出实验

褐煤挥发分的析出实验在马弗炉上完成,将宝日希勒原煤破碎、烘干后磨细至<0.074、0.074~0.15、0.15~0.3、0.3~1及1~3 mm。将烘干后的褐煤放入挥发分坩埚称量后放入马弗炉中,一段时

间后取出称重直至恒重,得到该温度和相应粒径下的褐煤挥发分析出特性。

在粒径<0.074 mm时(电厂用煤粒度),研究温度对挥发分析出过程的影响,温度为200~1 000℃,每100℃一个工况,并在600℃进行不同粒径的挥发分析出过程实验。

2 结果与分析

2.1 褐煤水分析出特性

不同温度下宝日希勒褐煤水分析出随褐煤粒径的变化如图1所示。由图1可知,同一温度下,随着粒径的增大,脱水时间延长,颗粒越大,差别越明显。55℃时各粒径煤的脱水时间相差不大,但最终失水量差别很大,如小粒径1~3 mm和3~8 mm的最终失水量为22.81%和23.08%,已经失去了原煤中大部分水分(原煤为27.98%),而大颗粒的8~15 mm和15~30 mm的最终值为17.12%和9.81%,降幅

十分明显。这是因为 55 ℃ 时褐煤脱除的主要为外在水,这部分水以游离态存在于煤的颗粒表面和大孔中(直径大于 10^{-5} cm)^[15],在褐煤全水中占有 60% 以上的比例^[16],是褐煤中最主要的水分,但这部分水以机械的方式与煤相结合,水分子之间以范德华力相结合,与常态水相似,用较小的能量就可以从煤颗粒表面或孔道中蒸发出来,而与煤结合能力更强的内水只有在更高温度的热力作用下才可以脱除。同时,煤颗粒过大时,低温传热阻力过大,且大孔孔道容易被堵塞,颗粒内部与外界通道受阻,水分子不易挥发出来,导致大颗粒褐煤的最终失水率很低,随着时间的延长,呈缓慢增长的趋势。

温度再升高后,脱除的主要是煤中内在水,小颗粒褐煤的脱水时间明显小于大颗粒褐煤,105 ℃ 时,15~30 mm 颗粒的脱水时间是 1~3 mm 颗粒的 2.67 倍,150 ℃ 时为 4.56 倍,200 ℃ 时则为 3.33 倍,这主要是因为温度升高后大颗粒褐煤的传质扩散阻力明显增加,所以其达到相同失水量所需时间更长,特别是对于 15~30 mm 颗粒。200 ℃ 时颗粒之间的脱水时间差距比 150 ℃ 时有所减小,这是因为更高的温度补偿了大颗粒传质阻力的影响。随着时间的增加,大颗粒也能缓慢达到与小颗粒煤粉相同的失水量,外界输入能量的增大是高温与低温时褐煤最终失水量相差很大的主要原因。

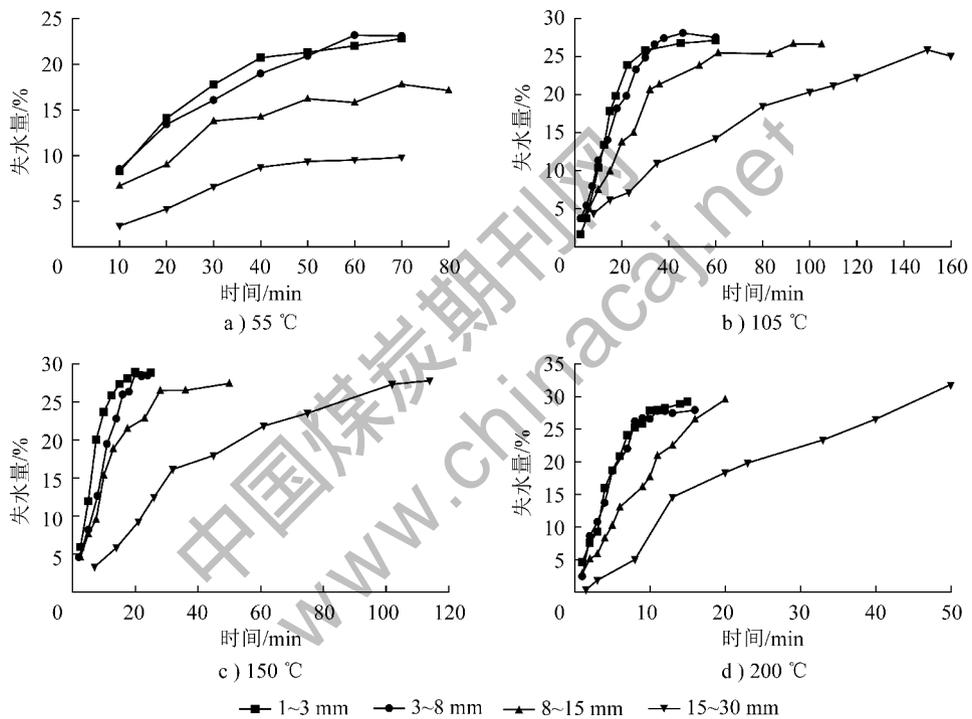


图 1 不同温度下宝日希勒褐煤粒径对水分的析出影响

Fig. 1 The influence of particle size of Baorixile brown coal on moisture releasing at different temperatures

由图 1 还可知,温度从 55 ℃ 升高到 200 ℃,脱水时间减少,脱水速度明显增加。对于 1~3 mm 煤粒,温度从 55 ℃ 升高到 200 ℃ 时,脱水时间从 70 min 缩短到 15 min,而对于 15~30 mm,脱水时间则从 160 min(105 ℃) 缩短到 50 min。这是因为脱水过程实质上是利用能量作用机理,温度升高后,输入的外在能量大幅增加,水分子与煤表面的机械结合力、孔隙表面张力、孔隙内部的毛细凝聚力、部分以氢键结合的分子水及某些化合方式结合的结晶水更容易被快速破坏而逐渐从煤结构中蒸发出来,更高温度则强化了过程进行的速度和强度。

不同工况下宝日希勒褐煤最终失水率如图 2 所示。由图 2 可知,温度超过 105 ℃ 后,最终失水率相差不大。这是因为超过 105 ℃ 后煤中水分已经基本脱除完全。温度超过 200 ℃ 后以收到基水分为基准的最终失水率会超过 100%,这表明在此温度下随着停留时间的延长会有微量的挥发分析出,这从后面的挥发分析出实验可以得到证实。

综上所述,褐煤颗粒的脱水过程是一个传热传质的热力学和动力学相结合的过程,低温时主要受热力学限制,脱水温度达不到内水脱除所需能量,水分无法完全脱除;温度升高至 105 ℃ 后,颗粒大小及

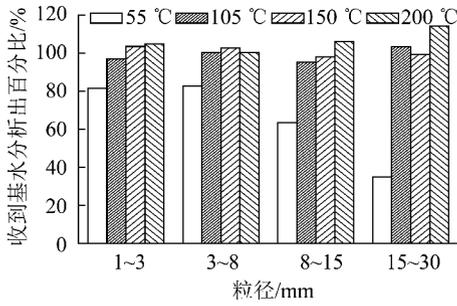


图2 不同工况下宝日希勒褐煤最终失水率

Fig.2 The final water loss rate of moisture releasing at different situations

褐煤中复杂的孔隙结构成为其动力学的主要限制,导致脱水时间不同,但升高温度可以有效补偿动力学上的这种差异。

2.2 褐煤水分析出机理探讨

采用热重分析仪对褐煤等温干燥脱水进行研究,考察不同温度对褐煤等温干燥过程的影响,得到干燥过程中不同阶段的干燥机理,为深入理解褐煤干燥过程水分迁移规律和寻找高效脱水方法提供借鉴^[17]。

宝日希勒褐煤在不同等温温度下的热重 TG 和 DTG 曲线如图 3 所示。由图 3 可知,随着温度的升高,最终失水量、失水速率都在增大,且不同温度之间的差距逐渐减小,30 ~ 90 °C 水分析出剧烈,90 °C 后水分析出量明显减少。虽然在某一温度下(如 30 °C),样品干燥过程已经结束,但褐煤中仍存在一定质量的水分无法蒸发出去,只有升高温度才能进一步脱除,这与烘箱干燥实验结果一致。

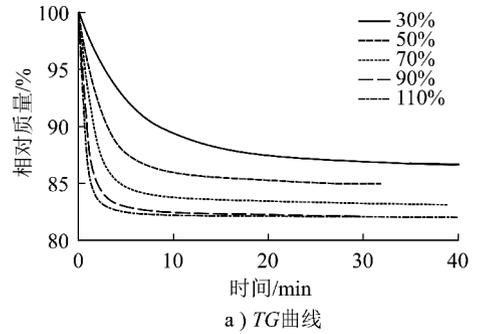
由样品的失重和失重速率曲线可以得到反映物料水分析出特性的重要参数^[18]:样品含水率(X)和样品干燥速率($-dX/dt$):

$$X = \frac{m - m_d}{m_d} \quad (1)$$

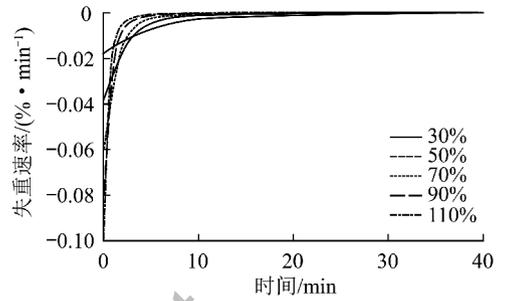
$$-\frac{dX}{dt} = -\frac{dm/dt}{m_d} \quad (2)$$

式中, m 为某一时刻热重测得的煤样质量, g ; m_d 为样品在某一等温条件下干燥失重后维持恒定的质量,对应该温度下的“干煤状态”, g 。

不同温度下宝日希勒褐煤干燥速率与含水率的关系如图 4 所示。由图 4 可知,随着干燥温度的上升,干燥速率逐渐增大,但差距逐渐减小,且温度越高,曲线越陡,脱水速率下降趋势加强,样品在同一含水率下的干燥速率明显升高,说明温度的升高有利于褐煤内水分的快速脱除。30、50 和 70 °C 这 3



a) TG曲线



b) DTG曲线

图3 宝日希勒褐煤等温脱水 TG 和 DTG 曲线

Fig.3 TG and DTG curves of Baorixile brown coal under isothermal heating condition

条曲线存在明显的拐点,定义为临界含水率 X_c 。在 $X < X_c$ 阶段,曲线呈凹向上型;在 $X > X_c$ 阶段,曲线呈凸向下型。拐点的存在说明褐煤等温干燥过程中存在不同的干燥机理。利用非线性拟合的方法对干燥速率曲线进行拟合,可以得到 X_c 前后的脱水干燥机理方程及相应的特征参数。方程如下

$$y = -dX/dt = a + bX + cX^2 + dX^3 \quad 0 < X < X_c \quad (3)$$

$$y = -dX/dt = a + b \ln(X + c) \quad X > X_c \quad (4)$$

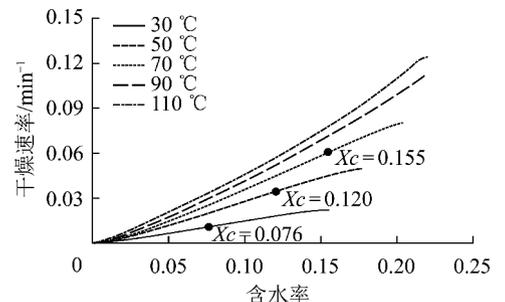


图4 宝日希勒褐煤干燥速率曲线

Fig.4 The drying rate curve of Baorixile brown coal

宝日希勒褐煤等温脱水机理方程的特征参数见表 2。由表 2 可知,温度从 30 °C 升高到 70 °C,临界含水率逐渐升高,而 90 °C 和 110 °C 曲线则一直呈现凹向上的形状,没有对应的拐点。30 ~ 70 °C 存在不同的脱水过程及相应的机理函数,水分脱除难易程

度不同,其干燥机理也可能存在区别。

由于成煤时间较短,褐煤含有大量的孔隙结构和丰富的亲水性含氧官能团,具有很强的吸水 and 固水能力,从而导致褐煤水分高于烟煤和无烟煤。在 $X > X_c$ 阶段,脱水过程首先从褐煤表面开始,随着结合能力最弱的自由水的减少,褐煤体积收缩,孔隙结构减少,水的脱除过程逐渐受到毛细作用限制,干燥速率逐渐下降。参数 b 值越大,干燥速率减小得越快,随着等温脱水温度的升高,褐煤结构的破坏和收缩增大,干燥速率降低越快,对应的 b 值也越大,其值大小与煤种、温度和孔隙结构有关。该阶段是褐煤中自由水和少量束缚水的脱除过程,脱除能耗较

低,温度越高,脱水越快越容易。所以临界含水率随着等温脱水温度的升高而呈现上升的趋势,直到更高温度的 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $110\text{ }^\circ\text{C}$ 时没有明显的拐点出现。随着脱水过程进行到 $X < X_c$ 阶段,干燥速率继续减小,该阶段脱除的是褐煤中结合能力较强的呈物理吸附和化学吸附的水分。脱水过程发生在褐煤内更小的微孔以及中孔表面上,这部分水在褐煤表面与含氧官能团通过氢键形成水分子簇,而这些簇状结构相连接形成单层或多层水分子膜,能耗较大,直到达到该温度时干燥速率为零的干燥状态。而此阶段的干燥速率受制于机理方程中多个特征参数值的共同作用,干燥过程也更加复杂。

表2 宝日希勒褐煤等温脱水机理方程的特征参数

Table 2 Characteristic parameters of mechanism equations under isothermal dewatering condition

参数	$30\text{ }^\circ\text{C}$	$50\text{ }^\circ\text{C}$	$70\text{ }^\circ\text{C}$	$90\text{ }^\circ\text{C}$	$110\text{ }^\circ\text{C}$	
X_c	0.076	0.120	0.155	—	—	
$0 < X < X_c$	$a/10^{-4}$	0.97	0.91	-1.7	-4.4	-4.5
	b	0.066	0.098	0.125	0.251	0.338
	c	1.835	3.315	3.833	2.043	1.317
	d	-11.41	-15.03	-14.14	-3.961	-1.227
	相关系数	0.999 6	0.998 6	0.998 7	0.999 1	0.999 2
$X > X_c$	a	0.064	0.104	0.183	—	—
	b	0.026	0.028	0.056	—	—
	c	0.075	-0.054	-0.041	—	—
	相关系数	0.999 4	0.998 9	0.999 4	—	—

2.3 褐煤挥发分析出特性

$<0.074\text{ mm}$ 褐煤在马弗炉中不同温度下的挥发分析出结果如图5所示。由图5可知,挥发分的析出速度和析出量都随着温度的升高而增加, $400\text{ }^\circ\text{C}$ 后挥发分析出速度和析出量明显增加, $600\text{ }^\circ\text{C}$ 后不同温度间的挥发分析出速度和析出量差距明显减小,其析出过程都在 10 min 内完成,这是因为挥发分的活性很高,在实际工业过程中其析出过程都是在瞬间完成。

$600\text{ }^\circ\text{C}$ 不同粒径的宝日希勒褐煤挥发分析出结果如图6所示。由图6可知,在马弗炉、固定床形式相对较长的停留时间下,粒径不同所造成的挥发分析出量和析出速度的差距很小,实验采用粒径对挥发分的析出过程基本没有影响。这是因为在相对较高的温度下,挥发分的析出非常迅速,如在颗粒升温速率达 $10^4\text{ }^\circ\text{C/s}$ 的流化床和气流床等快速升温装置

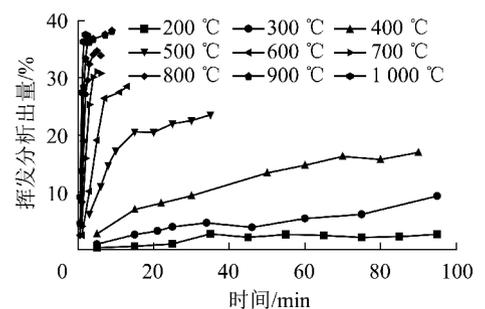


图5 $<0.074\text{ mm}$ 褐煤在不同热解温度下的挥发分析出结果

Fig. 5 The results of volatile releasing with different temperatures at particle size of under 0.074 mm

中,挥发分的析出几乎在瞬间完成,在马弗炉这样的环境下,由于时间相对较长,所以造成了不同颗粒粒径间的挥发分析出结果相近。

综上所述,褐煤颗粒挥发分的脱除同样是一个传热传质的热力学和动力学过程,与水分不同的是,

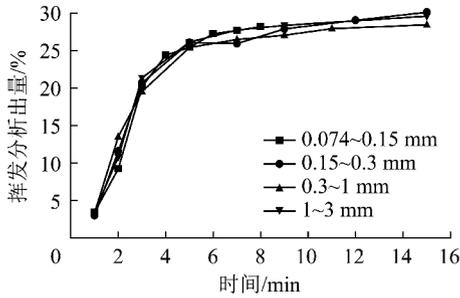


图6 600 °C不同粒径的宝日希勒褐煤挥发分析出结果

Fig. 6 The results of volatile releasing with different particle sizes at 600 °C

挥发分析出的动力学过程非常快,温度达到后几乎是瞬间完成,所以粒径造成的影响不如水分析出过程明显。

3 结 论

1)对于褐煤脱水提质过程,当温度 <150 °C时,脱水时间过长;而温度 >200 °C时,挥发分略有析出,温度超过 105 °C后各粒径褐煤最终脱水率相近,合适的褐煤脱水温度为 $150 \sim 200$ °C。褐煤粒径小于 15 mm时,脱水时间相差较小, 150 °C时分别为 25 min($1 \sim 3$ mm)、 24 min($3 \sim 8$ mm)和 50 min($8 \sim 15$ mm);而褐煤粒径大于 15 mm后,脱水时间增加, 150 °C时达到 114 min($15 \sim 30$ mm)。因此褐煤脱水的合适粒径为 15 mm以下。

2)褐煤等温干燥实验表明,低温时干燥速率曲线存在拐点,由于褐煤内部结构复杂,导致其水分赋存和结合形式不同,存在不同的脱除和干燥机理。 $X > X_c$ 阶段对应褐煤大孔径结构中的自由水和部分束缚水的析出干燥过程,主要受毛细作用影响。 $X < X_c$ 阶段则是褐煤内部微孔中以及官能团氢键作用那部分水的析出过程,受物理和化学吸附作用控制。而温度较高时,脱水过程相对容易和迅速,对褐煤中不同结合形式的水分的区分也相对低温时模糊。

3)干燥后褐煤的挥发分析出过程相对水分来说更加迅速,温度达到 200 °C后开始析出, 400 °C后挥发分大量析出; $600 \sim 1000$ °C温度越高,挥发分的析出量越多,析出速度越快,但温度升高的影响越来越弱。

参考文献:

[1] Wu Junhong, Liu Jianzhong, Zhang Xu, *et al.* Chemical and structural changes in XiMeng lignite and its carbon migration during hy-

drothermal dewatering[J]. *Fuel*, 2015, 148: 139-144.

- [2] Yu Jianguo, Tahmasebi A, Han Yanna, *et al.* A review on water in low rank coals: the existence, interaction with coal structure and effects on coal utilization[J]. *Fuel Processing Technology*, 2013, 106: 9-20.
- [3] 郭晓克,刘明,肖峰,等.带废热回收的预干燥燃煤发电系统理论研究[J].中国电机工程学报,2012,32(8):44-49.
Guo Xiaoke, Liu Ming, Xiao Feng, *et al.* Theoretical study on a pre-dried lignite-fired power system with waste heat recovery[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2012, 32(8): 44-49.
- [4] Cheng Jun, Zhou Fan, Wang Xin, *et al.* Physicochemical properties of Indonesian lignite continuously modified in a tunnel-type microwave oven for slurriability improvement[J]. *Fuel*, 2015, 150: 493-500.
- [5] Zhu Jiefeng, Liu Jianzhong, Shen Wangjun, *et al.* Improving the slurrying ability of XiMeng brown coal by medium-to-low-temperature thermal treatment[J]. *Fuel Processing Technology*, 2014, 119: 218-227.
- [6] Yu Yujie, Liu Jianzhong, Wang Ruikun, *et al.* Effect of hydrothermal dewatering on the slurrying ability of brown coals[J]. *Energy Conversion and Management*, 2012, 57: 8-12.
- [7] 李政,梁心玉,薛亚丽.基于烟煤、褐煤的IGCC系统技术经济性对比[J].中国电机工程学报,2012,32(5):39-47.
Li Zheng, Liang Xinyu, Xue Yali. Techno-economic comparison of IGCC systems employing bituminous and lignite[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2012, 32(5): 39-47.
- [8] 郭晓克,肖峰,严俊杰,等.高效褐煤发电系统研究[J].中国电机工程学报,2011,31(26):23-31.
Guo Xiaoke, Xiao Feng, Yan Junjie, *et al.* Study on efficient lignite-fired power system[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2011, 31(26): 23-31.
- [9] 关珺,何德民,张秋民.褐煤热解提质技术与多联产构想[J].煤化工,2011,39(6):1-4,9.
Guan Jun, He Demin, Zhang Qiumin. The technology of improving lignite quality through pyrolysis and the concept of poly-generation[J]. *Coal Chemical Industry*, 2011, 39(6): 1-4, 9.
- [10] 李文英,邓靖,喻长连.褐煤固体热载体热解提质工艺进展[J].煤化工,2012,40(1):1-5.
Li Wenying, Deng Jing, Yu Changlian. Development of lignite pyrolysis with solid heat carrier[J]. *Coal Chemical Industry*, 2012, 40(1): 1-5.
- [11] 闫瑞东.褐煤干燥对电站锅炉运行经济性影响的研究[D].保定:华北电力大学,2014.
Yan Ruidong. Study on the effect of lignite coal drying on boiler operation economy[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2014.
- [12] 王卫东,杨虓,孙远,等.微波场中褐煤水分脱除规律及影响因素分析[J].煤炭学报,2014,39(6):1150-1161.

(下转第41页)

低、稳定性好、浓度较高,为工业中大批量制备高性能、低成本的水煤浆提供重要依据。

参考文献:

- [1] Ma Sude, Zhao Pei, Guo Yan, *et al.* Synthesis, characterization and application of polycarboxylate additive for coal water slurry[J]. Fuel, 2013, 111: 648-652.
- [2] Zhu Junfeng, Zhang Guanghua, Li Junguo, *et al.* Synthesis, adsorption and dispersion of a dispersant based on starch for coal-water slurry[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2013, 422(7): 165-171.
- [3] Das D, Das U, Meher J, *et al.* Improving stability of concentrated coal-water slurry using mixture of a natural and synthetic surfactants[J]. Fuel Processing Technology, 2013, 113: 41-51.
- [4] Zhu Junfeng, Zhang Guanghua, Miao Zhou, *et al.* Synthesis and performance of a comblike amphoteric polycarboxylate dispersant for coal-water slurry[J]. Colloids Surf A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2012, 412(20): 101-107.
- [5] Li Junguo, Zhang Guanghua, Shang Ting, *et al.* Synthesis, characterization and application of a dispersant based on rosin for coal-water slurry[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24(5): 695-699.
- [6] Zhu Junfeng, Zhang Guanghua, Liu Guojun, *et al.* Investigation on the rheological and stability characteristics of coal-water slurry with long side-chain polycarboxylate dispersant[J]. Fuel Processing Technology, 2014, 118: 187-191.
- [7] Zhou Mingsong, Huang Kai, Yang Dongjie, *et al.* Development and evaluation of polycarboxylic acid hyper-dispersant used to prepare high-concentrated coal-water slurry[J]. Powder Technology, 2012, 229: 185-190.
- [8] Tadros T F, Taylor P, Bognolo G. Influence of addition of a polyelectrolyte, nonionic polymers, and their mixtures on the rheology of coal/water suspensions[J]. Langmuir, 2002, 11(12): 4678-4684.
- [9] Liu Mingqiang, Liu Jianzhong, Wang Chuancheng, *et al.* Research and development of coal water slurry additive[J]. Modern Chemical Industry, 2010, 31: 8-12.
- [10] Wang Ruikun, Liu Jianzhong, Yu Yanjie. The slurring properties of coal water slurries containing raw sewage sludge[J]. Energy Fuels, 2011, 25(2): 747-752.
- [11] 张延霖, 邱学青, 王卫星. 木素磺酸盐添加剂对水煤浆流变行为影响研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2005, 37(3): 42-46.
- [11] Zhang Yanlin, Qiu Xueqing, Wang Weixing. Influence of adding the sodium lignosulfonate surfactant on the rheological behavior of coal-water suspensions[J]. Coal Conversion (Engineering Science Edition), 2005, 37(3): 42-46.
- [12] M Pawlik. Polymeric dispersants for coal-water slurries[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2005, 266(1): 82-90.
- [13] Atesok G, Boylu V F, Sirkeci V A A, *et al.* The effect of coal properties on the viscosity of coal-water slurries[J]. Fuel, 2002, 81(14): 1855-1858.
- [14] 汪刚. 探索重庆煤制高浓度水煤浆技术的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [14] Wang Gang. Study on the technology of the preparation of high concentration coal-water slurry with chongqing coal[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [15] Dincger H, Boylu F, Sirkeci A A, *et al.* The effect of chemicals on the viscosity and stability of coal water slurries[J]. International Journal of Mineral Processing, 2003, 70(1/2/3/4): 41-51.
- [15] 技术, 2005, 24(1): 47-49.
- [15] Lyu Xiangqian, Liu Jiongtian. Study of water in flotation and dewatering[J]. Coal Technology, 2005, 24(1): 47-49.
- [16] Butler C J, Green A M, Chaffee A L. Remediation of mechanical thermal expression product waters using raw Latrobe Valley brown coals as adsorbents[J]. Fuel, 2007, 86(7/8): 1130-1138.
- [17] 赵卫东. 低阶煤水热改性制浆的微观机理及燃烧特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009: 39-55, 79-85.
- [17] Zhao Weidong. Micromechanism and combustion characteristics of low-rank coal water slurry upgraded by hot water treatments[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009: 39-55, 79-85.
- [18] 赵卫东, 刘建忠, 周俊虎, 等. 褐煤等温脱水热重分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(14): 74-79.
- [18] Zhao Weidong, Liu Jianzhong, Zhou Junhu, *et al.* Investigation on the isothermal dewatering of brown coal by thermobalance[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2009, 29(14): 74-79.

(上接第 36 页)

Wang Weidong, Yang Xiao, Sun Yuan, *et al.* Lignite dewatering rule and related influencing factors in the microwave field[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6): 1150-1161.

- [13] 沈望俊, 刘建忠, 虞育杰, 等. 锡盟褐煤干燥和重吸收特性的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(17): 64-70.
- [13] Shen Wangjun, Liu Jianzhong, Yu Yujie, *et al.* Experimental study on drying and reabsorption of the lignite of Ximeng[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2013, 33(17): 64-70.
- [14] 邹祥波, 王智化, 胡昕, 等. 提质褐煤的快速热裂解气体产物的析出特性[J]. 燃烧科学与技术, 2013, 19(3): 268-274.
- [14] Zou Xiangbo, Wang Zhihua, Hu Xin, *et al.* Release characteristics of gaseous products during rapid pyrolysis of upgraded lignite[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2013, 19(3): 268-274.
- [15] 吕向前, 刘炯天. 浮选精煤中水的存在形式与脱除[J]. 煤炭