

# 内蒙古锡林郭勒盟煤矸石燃烧特性分析

史志慧<sup>1</sup> 格日勒<sup>2</sup>

锡林郭勒职业学院 内蒙古 锡林浩特 026000

## 【作者简介】

1 史志慧 内蒙古锡林浩特市 机械与电力工程学院专任教师 硕士研究生 研究方向:电厂自动控制系统的改进及完善、废弃资源的燃烧应用、高等职业教育改革及课程建设

2 格日勒 内蒙古锡林浩特市 副教授 研究方向:农牧业机械、机电一体化、电气控制应用

课题项目:锡林郭勒职业学院院级科研课题,课题名称《锡盟地区废弃能源燃烧特性分析》;课题批号:YB2017-30。

DOI:10.18686/jxgc.v2i2.21241

**【摘要】**锡林郭勒盟煤矸石资源丰富,煤矸石作为一种废弃能源,其利用的途径和方式需要进行深入研究。本文在前人研究的基础上,针对本地区的煤矸石利用热重分析仪,采用改变其燃烧粒径、燃烧过程中的升温速率和燃烧气氛(氧气与二氧化碳混合气氛、氧气与空气混合气氛)的方式,通过分析其燃烧特性参数及 TG-DTG 曲线,分析煤矸石燃烧的过程并得出结论。

**【关键词】**煤矸石;燃烧;热重分析;TG-DTG 曲线

## 0 引言

煤矸石是煤形成过程中与煤伴生的含碳岩石,其具体成分与形成过程中岩石种类和矿物组成紧密相关。煤矸石的成分包括固定碳、水分、灰分、挥发分,其中固定碳及挥发分约占单位质量矸石的 30%~60%,灰分约占 40~70%。因此,煤矸石的发热量很低。

现阶段对于煤矸石燃烧过程的研究主要有以下方面。

①李淑强<sup>[1]</sup>利用热重分析仪,研究热解气氛变化对煤矸石的影响,结论为:氮气、二氧化碳及甲烷气氛中的煤矸石热解过程不同,需要分阶段进行分析,其中,甲烷气氛对煤矸石热解促进明显,煤矸石与甲烷反应活性最强。

②王炯<sup>[2]</sup>通过热重分析仪研究五种煤矸石的燃

烧特性发现,煤矸石中挥发分含量越大,越容易到达着火温度;煤矸石灰分含量越高,越不易燃尽。

③贾相如、杨帆等<sup>[3]</sup>利用热分析仪采用热重分析法对煤矸石和生物质单独热解和燃烧得到的数据进行分析与研究,认为在生物质和煤矸石混合燃烧时,混合物的燃烧特性既体现了生物质的燃烧特性又体现了煤矸石的燃烧特性,混合燃烧比单独燃烧更加稳定,燃烧性能更好。

锡林郭勒盟的煤质资源较丰富,在当地采煤过程中,排放了大量的煤矸石。煤矸石是排放量最大的固体废弃物之一,如果我们能加以利用,就能够减少土地占用及减轻环境污染。

本文研究过程中所用的煤矸石为锡林郭勒盟当地煤矸石,密度为 2800 kg/m<sup>3</sup>,其工业分析值、元素分析值及氧弹发热量如表 1 所示。

表 1 试验样品工业分析值、元素分析值及氧弹发热量

Table 1 The industrial analysis value and element analysis value and oxygen bomb calorific value of test sample

试样	工业分析/%				弹筒发热量/kJ·kg <sup>-1</sup> <i>Q<sub>ad</sub></i>
	<i>M<sub>ad</sub></i>	<i>A<sub>ad</sub></i>	<i>V<sub>ad</sub></i>	<i>FC<sub>ad</sub></i>	
煤矸石	1.93	55.55	19.68	22.84	10349.18
试样	元素分析/%				
	<i>C<sub>ad</sub></i>	<i>H<sub>ad</sub></i>	<i>O<sub>ad</sub></i>	<i>N<sub>ad</sub></i>	<i>S<sub>ad</sub></i>
	<i>C<sub>ad</sub></i>	<i>H<sub>ad</sub></i>	<i>O<sub>ad</sub></i>	<i>N<sub>ad</sub></i>	
煤矸石	38.2	2.61	3.63	0.48	0.89

# 1 煤矸石燃烧特性分析

## 1.1 煤矸石燃烧机理

煤矸石燃烧过程可以分为三个阶段:水分蒸发、挥发分着火燃烧及固定碳着火燃烧。在水分蒸发阶段,从开始加热至 200℃煤矸石的表面水及渗入空隙里的水分就已经被蒸发完毕;挥发分随温度升高析出速度逐渐增快、析出质量逐渐增大,当温度条件及燃烧环境中供氧量充足时,大量挥发分会着火并燃烧,挥发分燃烧温度为 400℃~750℃;固定碳着火燃烧可以分为两个过程,第一个过程为挥发分与固定碳中大部分表层碳在 400℃~750℃共同燃烧,第二个过程为固定碳中小部分深层碳在 750℃~900℃的单独燃烧<sup>[4]</sup>。

## 1.2 试验结果分析

### 1.2.1 粒径对燃烧特性的影响

本次燃烧试验条件为:利用氩气作保护气,空气为载气,气体流量同为 20 mL/min,在升温速率 20℃/min

条件下,进行粒径<120、120~140、140~160 目对比燃烧试验(表 2)。试验过程得到煤矸石的 TG-DTG 曲线如图 1 所示。

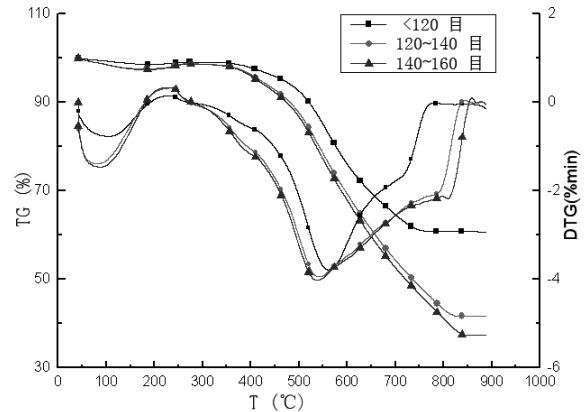


图 1 煤矸石粒径变化 TG-DTG 曲线

Fig. 1 TG and DTG curves of coal gangue under different particle size

表 2 煤矸石粒径变化的燃烧特征参数

Table 2 The combustion characteristic parameter of coal gangue under different particle size

试样	粒径(目)	$T_i$ (°C)	$T_h$ (°C)	$W_\infty$ (%)	$T_{max}$ (°C)	$(dw/dt)_{max}$ (mg/min)	$(dw/dt)_{mean}$ (mg/min)	$P \times 10^{-7}$ (mg) <sup>2</sup> /(min <sup>2</sup> ·°C <sup>3</sup> )
煤矸石	<120	473	779	60.70	559	-3.791	-0.925	0.201
	120~140	443	839	41.70	541	-3.970	-1.370	0.330
	140~160	443	867	37.42	538	-4.041	-1.472	0.350

从图 1 中 DTG 曲线及燃烧特性参数变化可以看出,颗粒粒径减小,煤矸石着火温度及最大失重速率温度降低,最大失重速率及燃烧特性指数增加。这是由于单位体积可参与反应的颗粒表面积增大,燃烧产生热量向颗粒内部传递过程中所受阻力减小,热滞后现象减缓,反应速度加快所导致的结果;从 TG 曲线可以看出,在燃烧反应结束后,随着粒径减小,燃尽温度后移 88℃,热失重率增加,燃烧结束所剩质量减少,这是由于煤矸石经过破碎筛分后,不可燃杂质破碎筛分程度增强,颗粒粒径减小,含碳量增高,同时,颗粒中心产生的热分解产物挥发分向外逸出更迅速,降低了在每个固相表面发生聚合反应的几率,减少了二次反应的影响,因此某些氧化物更容易扩散到固相表面或内孔中与深层固定碳发生反应,使固定碳燃烧更加充分,剩余质量减少。

### 1.2.2 升温速率对燃烧特性的影响

利用氩气为保护气,空气为载气,气体流量同为 20 mL/min,煤矸石粒径 120~140 目,进行升温速率 10℃/min、20℃/min、50℃/min 及 80℃/min 的对比燃烧试验。试验过程得到煤矸石的 TG-DTG 曲线,如图 2 所示,升温速率变化的燃烧特征参数见表 3。

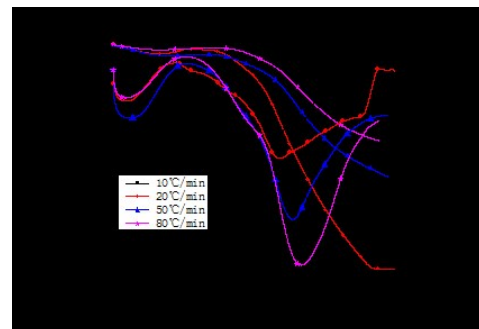


图 2 煤矸石升温速率变化 TG、DTG 曲线

Fig. 2 TG and DTG curves of coal gangue under different heating rate

表 3 煤矸石升温速率变化的燃烧特征参数

Table 3 The combustion characteristic parameter of coal gangue under different heating rate

试样	B(°C/min)	T <sub>i</sub> (°C)	T <sub>h</sub> (°C)	W <sub>∞</sub> (%)	T <sub>max</sub> (°C)	(dw/dt) <sub>max</sub> (mg/min)	(dw/dt) <sub>mean</sub> (mg/min)	P × 10 <sup>-7</sup> (mg) <sup>2</sup> /(min <sup>2</sup> · °C <sup>3</sup> )
煤矸石	10	437	688	42.21	527	-2.845	-0.680	0.147
	20	443	839	41.70	541	-3.970	-1.370	0.330
	50	460	864	65.66	578	-6.689	-2.020	0.739
	80	469	836	74.97	603	-8.733	-2.354	1.118

从煤矸石燃烧过程的 DTG 曲线可以观察到,升温速率增大,其着火温度升高 32°C,最大失重速率增加,最大失重速率温度升高 76°C,这是由于颗粒表面与内部温差加大,热滞后现象加剧,燃烧温度范围扩大,燃烧程度变得剧烈,从图中可以看到,当升温速率达到 50°C/min 后,固定碳燃烧阶段只有一个明显峰值,这是由于在较高的升温速率下,煤矸石内部受到的热冲击作用增强,挥发分与固定碳中表层碳的燃烧过程更加连续,但燃烧时间缩短,导致大量挥发分的快速释放,氧气很难进入颗粒内部与深层碳发生反应,造成深层碳的燃烧难度增加。

### 1.2.3 煤矸石在氧气二氧化碳混合气氛下燃烧特性分析

本次燃烧试验条件为:利用氩气作保护气,以氧气和二氧化碳的混合气体为载气,气体流量同为 20 mL/min,煤矸石粒径为 120~140 目,在升温速率 20°C/min 条件下,进行氧气浓度 20%、30%、

40%及 80%对比燃烧试验。试验过程得到煤矸石的 TG-DTG 曲线,如图 3 所示。

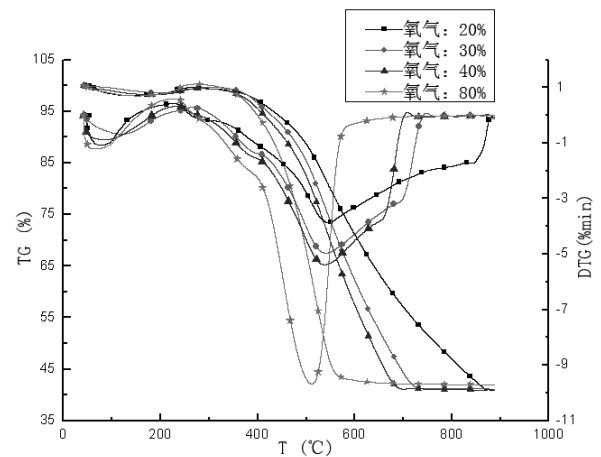


图 3 煤矸石氧气浓度变化 TG-DTG 曲线

Fig. 3 TG and DTG curves of coal gangue under different oxygen ratio

表 4 煤矸石氧气浓度变化燃烧特征参数

Table 4 The combustion characteristic parameter of coal gangue under different oxygen ratio

试样	O <sub>2</sub> (%)	T <sub>i</sub> (°C)	T <sub>h</sub> (°C)	W <sub>∞</sub> (%)	T <sub>max</sub> (°C)	(dw/dt) <sub>max</sub> (mg/min)	(dw/dt) <sub>mean</sub> (mg/min)	P × 10 <sup>-7</sup> (mg) <sup>2</sup> /(min <sup>2</sup> · °C <sup>3</sup> )
煤矸石	20	437	881	40.93	546	-3.861	-1.388	0.319 × 10 <sup>-7</sup>
	30	435	760	41.10	537	-4.983	-1.386	0.480 × 10 <sup>-7</sup>
	40	433	730	40.93	534	-5.382	-1.389	0.542 × 10 <sup>-7</sup>
	80	426	636	41.97	511	-9.707	-1.366	1.149 × 10 <sup>-7</sup>

从煤矸石在混合气氛中燃烧的 DTG 曲线及燃烧特征参数(表 4)可以得到,随着氧气浓度增大,煤矸石在混合气氛中着火温度降低 11°C,最大失重速率温度降低 35°C,燃烧特性指数逐渐增大。煤矸石在氧气和二氧化碳混合气氛中燃烧可以按照顺序分为三个阶

段,水分干燥、挥发分与固定碳中表层碳共同燃烧及固定碳中深层碳燃烧。氧气浓度增大,挥发分与表层碳共同燃烧阶段的最大失重速率明显增大;同时,氧气浓度为 20%~40%时,固定碳中表层碳与深层碳的燃烧峰值温度差值逐渐减少,燃烧过程连续性增强,

在氧气浓度为 80% 时, 固定碳中表层碳与深层碳燃烧同时进行, 最大失重速率迅速增大。这是因为氧气浓度增加, 能够充分提供表层碳与深层碳燃烧所需的氧气, 使深层碳燃烧提前。同时, TG 曲线显示, 氧气浓度增大, 曲线向低温区移动, 燃尽温度降低, 尽管各阶段的热失重率存在差异, 但最终剩余质量相差很小。

#### 1.2.4 不同燃烧气氛中燃烧特性比较

通过前文的试验曲线与试验数据, 对比煤矸石以空气为载气及以混合气体为载气的燃烧特性。其中, 煤矸石粒径为 120~140 目, 升温速率为 20°C/min。不同燃烧气氛中 TG-DTG 对比曲线如图 4 所示。

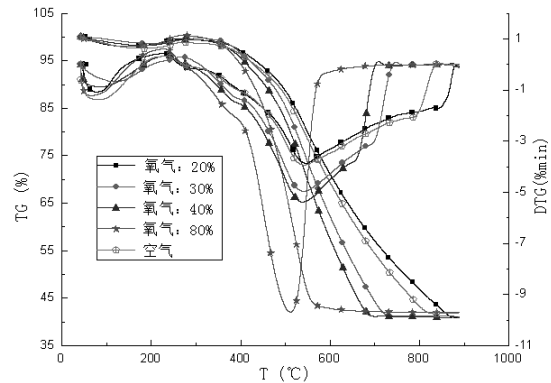


图 4 煤矸石气氛变化 TG-DTG 曲线

Fig.4 TG and DTG curves of coal gangue under different combustion atmosphere

表 5 煤矸石气氛变化特征参数

Table 5 The combustion characteristic parameter of gangue under different combustion atmosphere

试样	气氛	$T_i$ (°C)	$T_b$ (°C)	$W_\infty$ (%)	$T_{max}$ (°C)	$(dw/dt)_{max}$ (mg/min)	$(dw/dt)_{mean}$ (mg/min)	$P \times 10^{-7} (mg)^2 / (min^2 \cdot ^\circ C^3)$
煤矸石	O <sub>2</sub> :20%	437	881	40.93	546	-3.861	-1.388	0.319
	O <sub>2</sub> :30%	435	760	41.10	537	-4.983	-1.386	0.480
	O <sub>2</sub> :40%	433	730	40.93	534	-5.382	-1.389	0.542
	O <sub>2</sub> :80%	426	636	41.97	511	-9.707	-1.366	1.149
	空气	443	839	41.70	541	-3.970	-1.370	0.330

对比煤矸石在不同气氛燃烧 TG-DTG 曲线及特性参数可以发现, 煤矸石在空气中燃烧的 TG-DTG 曲线介于混合气氛中氧气浓度 20%~30% 之间, 除着火温度外, 煤矸石在空气中的燃烧特征参数也介于中氧气浓度 20%~30% 之间, 它在空气中燃烧的着火温度最高, 这可以证明氧气与二氧化碳的混合气体能够促进煤矸石燃烧。

## 2 结论

①从煤矸石在不同粒径下燃烧的 TG-DTG 曲线可以看出, 在燃烧反应结束后, 随着粒径减小, 剩余质量减少。

②从煤矸石在不同升温速率下燃烧的 TG-DTG 曲线可以看出, 升温速率增大, 曲线向高温区平缓移动, 燃尽温度升高, 热失重率总体呈现降低的趋势, 剩余质量增加。

③从煤矸石在氧气二氧化碳的混合气氛中燃烧的 TG-DTG 曲线可以看出, 随着氧气浓度增大, 燃尽温度降低, 但最终剩余质量相差很小, 同时与煤矸石在氧气空气的混合气氛中燃烧的 TG-DTG 曲线对比可知, 当混合气氛中氧气浓度在 20%~30% 时, 氧气与二氧化碳的混合气体能够促进煤矸石着火燃烧。

## 【参考文献】

- [1]李淑强. 不同气氛下煤矸石热解特性及热解动力学机理[D]. 重庆:重庆大学, 2008.
- [2]王炯. 低热值煤层气与煤矸石 CFB 混烧特性数值模拟与试验研究[D]. 重庆:重庆大学, 2010.
- [3]贾相如, 杨帆. 生物质与煤矸石混合热解和燃烧特性试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学, 2016.
- [4]宋德才, 王泉海, 双伟等. 川北低热值煤矸石燃烧特性研究[J]. 应用化工, 2014(10):1784-1787.
- [5]Zhang Yuanyuan, Zhang Zhezi, Zhu Mingming, et al. Interactions of coal gangue and pine sawdust during combustion of their blends studied using differential thermogravimetric analysis[J]. Bioresource Technology, 2016, 214:396-403.