

# 气化参数对气流床粉煤气化影响实验研究

陆成, 张忠孝, 乌晓江, 黄凤豹, 陈国艳, 周国锋

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

**摘要:**为评价和优化中国高、低灰熔点煤气化运行参数对气流床气化特性的影响,在 1600 °C 的一维常压沉降式气流床气化实验系统上,着重研究了中国典型高、低灰熔点煤在 1200 ~ 1600 °C 温度范围内、O/C 摩尔比在 0.9 ~ 1.2 范围内的干煤粉气化特性。结果表明:随着温度的升高,产气中 CO、H<sub>2</sub> 含量逐渐增多,CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 含量逐渐减少,碳转化率有很大提高;随着 O/C 的增加,CO、H<sub>2</sub> 含量不断减少,CO<sub>2</sub> 逐渐增加;煤的灰熔融性也是影响煤气组分一个重要因素,当气化反应温度接近煤灰熔点温度时,煤气组分(CO + H<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub>)达到一个最大值。

**关键词:**气流床;沉降炉;气化参数;灰熔融性

中图分类号:TQ546

文献标识码:A

文章编号:1006-6772(2010)02-0049-05

在中国,长期以来传统的煤燃烧利用方式带来了严重的资源与环境问题<sup>[1]</sup>,煤气化技术成为清洁高效利用煤炭的最有效途径。气流床气化技术与其他气化技术相比,具有气化强度高,碳转化率高,生产能力大的优点,近年来得到快速发展,受到中国煤化工行业和发电行业的普遍关注<sup>[2-5]</sup>,而气流床粉煤气化技术具有煤种适应性广,原料消耗低,碳转化率高等优势,在整体煤气化联合循环(IGCC)发电技术中得到广泛应用<sup>[6-7]</sup>。影响气流床气化的参数很多,国内外的研究者做了大量的研究工作。任永强,许世森<sup>[8]</sup>等人做了干煤粉加压气化技术的试验研究,得出了气化温度,氧煤比等参数对煤气组成的影响;吴学成<sup>[4,5]</sup>等人通过建立的气流床煤气化动力学模型研究了不同的气化剂、气化剂质量比率、气化温度、气化压力、停留时间等参数对气化过程和煤气组分的影响;Jae Goo Lee<sup>[9]</sup>等人做了沉降炉中粉煤气化的实验研究,得到了温度、氧煤比等参数对煤气组分和碳转化率的影响。笔者在给煤量约为 1.2 ~ 3 g/min 的一维沉降式气流床气化实验系统上,对中国高、低灰熔点煤进行了 1200 ~ 1600 °C 温度范围内干煤粉常压气流床气化特性实验研究,考察了影响气化特性的主要工艺参数,如

气化温度、O/C 摩尔比、不同煤种以及煤灰熔融温度等对干粉煤气流床气化特性的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 实验煤样与煤质分析

实验采用 2 种高灰熔点煤和 1 种低灰熔点煤为原料,煤样粒径为小于 75 μm,与实际煤粉气流床入炉煤粒径相同。实验所用煤样的成分分析见表 1。

表 1 实验煤的煤质分析

煤样		金华原煤	金华精煤	神府混煤
工业分析/%	$M_{ad}$	1.45	1.42	1.76
	$A_{ad}$	33.99	9.09	10.11
	$V_{ad}$	22.22	28.62	23.06
	$FC_{ad}$	42.34	60.87	65.07
元素分析/%	$C_{ad}$	53.53	77.66	74.84
	$H_{ad}$	3.41	4.76	3.31
	$O_{ad}$	6.01	5.03	9.66
	$N_{ad}$	0.95	1.41	0.97
	$S_{ad}$	0.66	0.63	0.51
灰熔融温度/°C	DT	1400	1490	1220
	ST	>1500	>1500	1270
	FT	>1500	>1500	1350
$Q_{net,ad}/(kJ \cdot kg^{-1})$		20762	30661	27358

收稿日期:2009-11-13

基金项目:国家自然科学基金项目(50906055)

作者简介:陆成(1983—),男,江苏连云港人,硕士研究生,主要从事洁净煤燃烧与气化方面的研究。

### 1.2 实验装置和实验方法

干煤粉常压气流床气化实验系统与干煤粉常压纯氧化实验系统如图1所示。整个系统由一维电加热管式沉降炉、供气系统、煤粉给料装置、合成气净化、分析系统、灰渣收集装置、气体分析装置组成。实验所采用的高温电加热沉降炉主要由刚玉管(内径为50 mm,高温恒温区长1.82 m,煤粉在炉内停留时间大于5 s)、加热元件、保温材料和温度控制柜4部分组成。温度范围为室温到1600 ℃,气体分析装置采用武汉四方光电科技有限公司生产的Gasboard-3100 红外煤气分析仪,对合成气中的主要气体成分CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>进行实时监测,以监视整个煤气化过程。

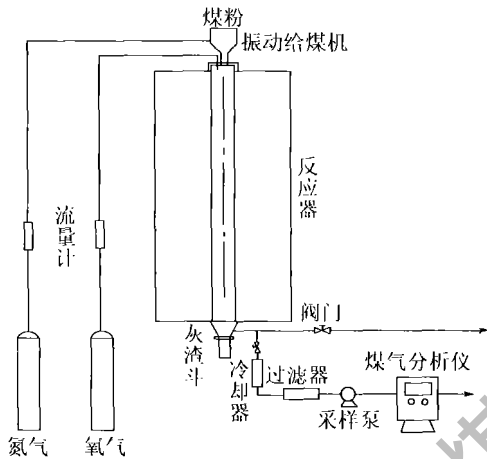


图1 实验装置示意

先将纯度为99.99%的N<sub>2</sub>通入炉膛2~3 h,以排空炉内及管道系统内的空气(保证炉内还原性气氛),同时以一定的升温速率将气化炉加热至实验所需反应温度并保持温度稳定;当达到反应温度后,采用振动式给煤机将平均粒度约为75 μm的煤粉以1.2~3 g/min的给煤量均匀稳定地送入炉膛;同时调节N<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>的流量以达到不同的O/C摩尔比,高温下,进入气化炉的干煤粉首先迅速升温、干燥并释放挥发分,由于此时有一定量的氧气存在,煤焦与炉内的氧气发生部分燃烧反应生成CO<sub>2</sub>,当氧气消耗完毕后,剩余煤焦与CO<sub>2</sub>等气化剂发生气化反应,生成H<sub>2</sub>、CO,反应结束后,合成气由气化炉底部合成气出口排出,经冷却、净化后进入煤气分析仪。对煤气的成分进行在线测量,气化产生的灰渣则落入气化炉底部的灰渣斗中。

### 1.3 气化炉内温度分布

由于给煤量很小,煤粉气化反应时产生的热量很小,不会改变炉内的温度场,沉降炉内保持恒温状态。如图2所示:气化炉的恒温区间在40~220 cm之间,这一区域为气化反应区。煤粉刚进入

炉子的时候温度较低,为预热释放水分和挥发分析出的过程。距炉体顶部40 cm以后,温度基本恒定,能够满足恒温气化的要求。

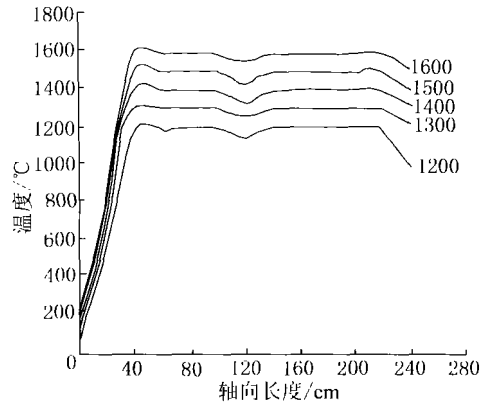
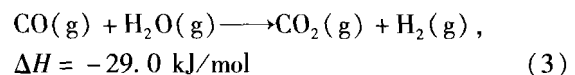
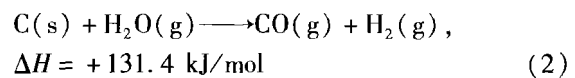
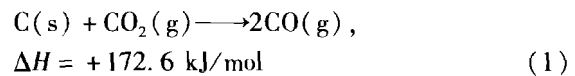


图2 炉内温度分布

## 2 结果与讨论

### 2.1 温度对煤粉气化特性的影响

气化温度是影响煤焦气化反应活性的重要因素,图3为气化温度对煤粉纯氧化特性的影响,由图可知,随着反应温度的升高,煤气成分中CO、H<sub>2</sub>体积分数逐渐增加;CO<sub>2</sub>体积分数逐渐减少;H<sub>2</sub>/CO比率逐渐减小。主要是因为反应式(1)、(2)为强吸热反应,因此提高炉内温度有利于气化反应向正方向进行,有利于加快反应速度,提高气化强度,最终生成更多的CO、H<sub>2</sub>,进而消耗更多的CO<sub>2</sub>; (3)式为放热反应,提高温度气化反应向逆方向进行,有利于CO的生成,不利于H<sub>2</sub>的生成,可知低气化反应温度有利于生成更多的H<sub>2</sub>。



同时气化温度也是影响碳转化率的主要因素,碳转化率随温度的升高逐渐增加,在同一工况下,反应温度对2种煤的影响基本相同。碳转化率X<sub>C</sub>的计算公式:

$$X_C = \frac{(W_{\text{CO}} + W_{\text{CO}_2} + W_{\text{CH}_4}) \times 12/22.4}{W_C} \times 100 = \left(1 - \frac{0.8 \times W_{\text{ash}}^{\text{coal}} W_C^{\text{char}}}{W_{\text{ash}}^{\text{char}} W_C^{\text{coal}}}\right) \times 100 \quad (4)$$

式中 W<sub>ash</sub><sup>coal</sup>——煤样中的灰分含量, %;

W<sub>C</sub><sup>char</sup>——灰渣中的碳含量, %;

W<sub>ash</sub><sup>char</sup>——灰渣中灰分含量, %;

$W_C^{\text{coal}}$ ——煤样中的碳含量, %。

这是由于炉内反应速度的提高, 炉中的煤粉即使在

很短的时间内也能完全气化, 获得很高的碳转化率。

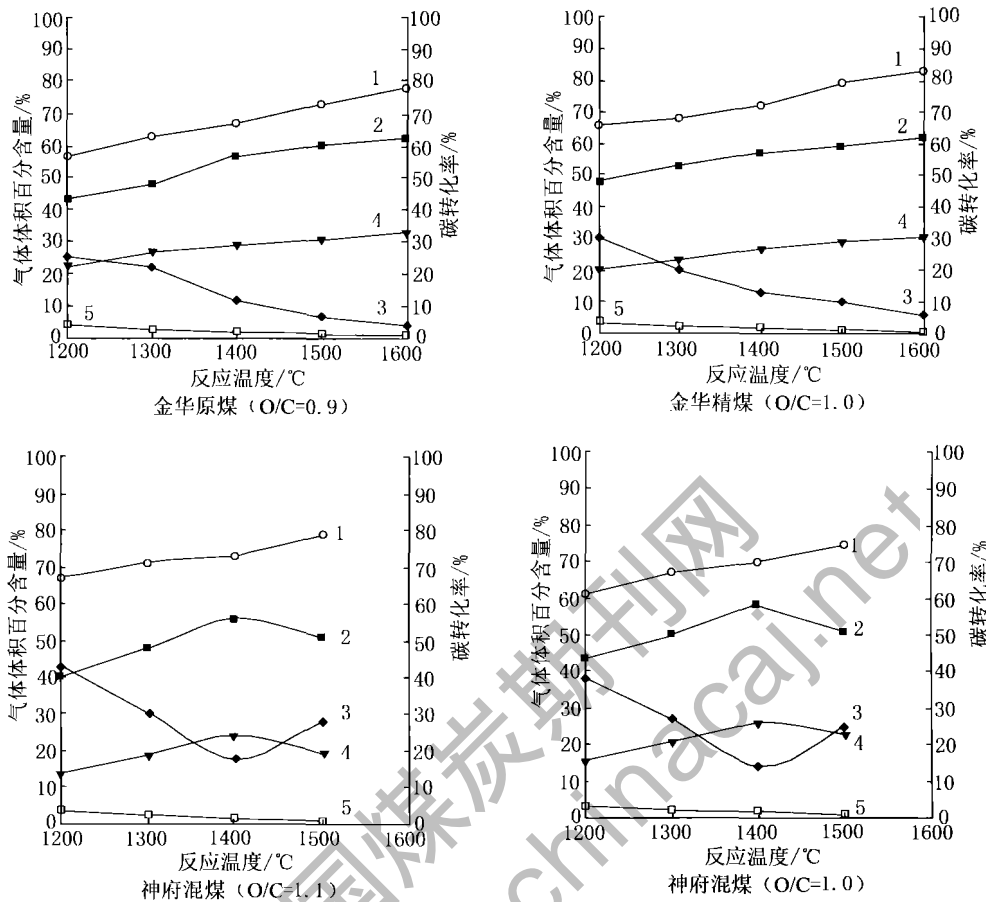


图3 温度对碳转化率和和合成气成分的影响

1—碳转化率; 2—CO; 3—CO<sub>2</sub>; 4—H<sub>2</sub>; 5—CH<sub>4</sub>

## 2.2 煤灰熔融性对气化反应的影响

煤灰熔融性是影响煤气化反应活性的一个重要因素, 当气化反应温度接近煤灰熔点时, 煤气组分(CO + H<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub>)达到一个最大值。由图3可知: 神府混煤灰熔点 FT 为 1350 °C, 当 O/C = 1.0, 气化温度 1400 °C 时, 神府混煤的煤气组分(CO + H<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub>)达到一个最大值 81.89 %; 当 O/C = 1.1, 气化温度 1400 °C 时, 神府混煤的煤气组分(CO + H<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub>)达到一个最大值 85.59 %。而金华原煤和金华精煤的灰熔点 FT 大于 1500 °C, 随着气化温度的升高, 煤气组分(CO + H<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub>)不断增大, 当气化温度为 1600 °C 时, 达到最大值。这是由于煤灰熔融性影响煤的气化反应活性, 随气化温度的上升, 灰分熔融变成液相状灰分, 熔融的液相状灰分很难浸润碳素, 而易在其表面收缩成球。气化温度高于灰熔点温度时, 灰分粘附于未反应碳内外表面的空隙中, 熔渣状灰分引起煤焦内部细孔堵塞, 使有效内表面积减少, 以至于未反应碳被熔渣状灰分包裹, 造成气化速率降低, 煤的气化反应活性降低。所以

在煤灰熔点附近, 煤的气化反应活性最大, 成气组分(CO + H<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub>)达到一个最大值。这与 Koyama<sup>[10]</sup> 和 Jae Goo Lee<sup>[9]</sup> 的研究结果一致。

## 2.3 不同 O/C 摩尔比对煤粉气化特性的影响

图4为不同氧碳摩尔比对干煤粉气化成气组成及碳转化率的影响, 从图中可以看出: 在同一反应温度下煤气中的 CO 和 H<sub>2</sub> 浓度均随氧碳摩尔比的增大而逐渐减小; 而煤气中 CO<sub>2</sub> 浓度和碳转化率则随着氧碳摩尔比的增大而逐渐增大。这是由于当 O/C 摩尔比较低时, 炉内的煤粉过量, 氧气量不足, 炉内存在大量未反应的煤粉和煤焦, 使得碳的转化率低, 从而影响气化效率。在高氧碳比的时候, 炉内的氧气过量, 过量的氧气会与未反应的煤焦发生燃烧反应, 使得碳的转化率升高; 过量的氧气还会与 CO 和 H<sub>2</sub> 发生燃烧反应, 使得煤气中 CO 和 H<sub>2</sub> 浓度逐渐减小, 煤气中 CO<sub>2</sub> 浓度逐渐增大。实验结果显示: 常压气化下, 气化温度为 1500 °C 时, 最佳 O/C 比为 0.9 左右, 这与 Jae Goo Lee<sup>[9]</sup> 等的研

究结果一致。

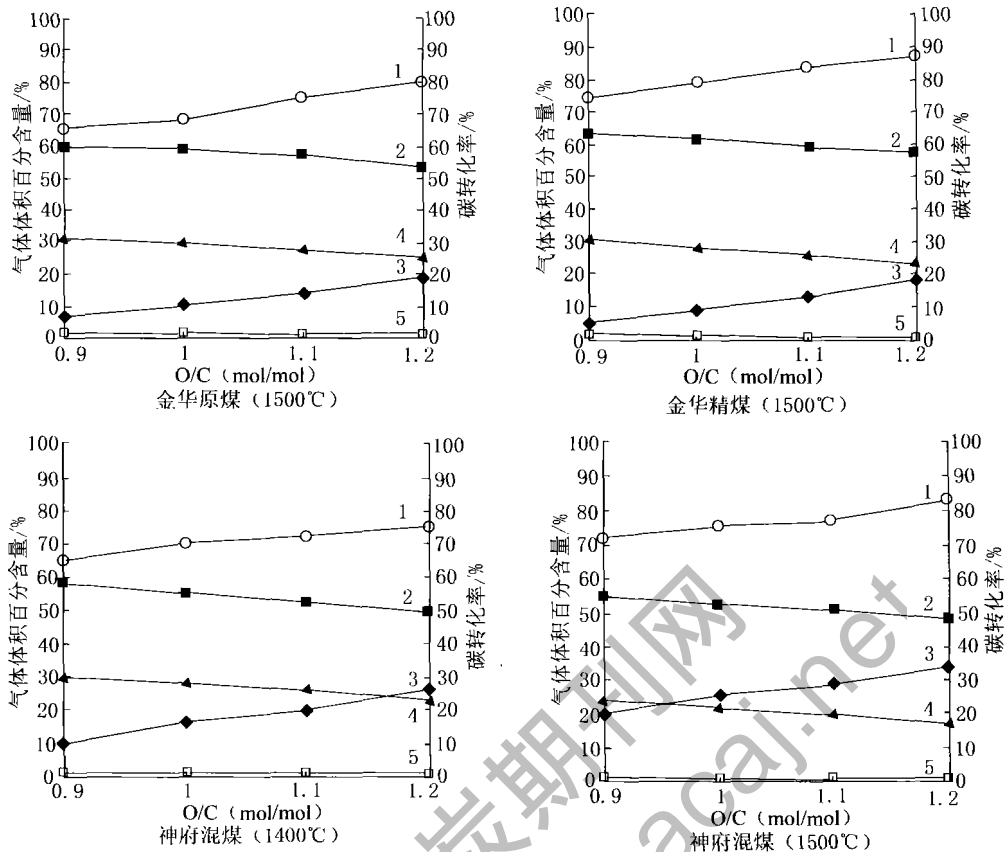


图4 1500℃和1400℃下氧碳比对碳转化率和合成气成分的影响  
1—碳转化率;2—CO;3—CO<sub>2</sub>;4—H<sub>2</sub>;5—CH<sub>4</sub>

## 2.4 煤种对煤粉气化特性的影响

在纯氧条件下,温度、O/C摩尔比一定的情况下,采用了2种高灰熔点煤(金华原煤和金华精煤)和一种低灰熔点煤(神府混煤)进行气流床煤气化实验。如图5所示:图中的有效气体指的是CO、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>。在反应温度1400℃;氧碳比0.9工况下,金华精煤的CO浓度(61%)比神府混煤的CO浓度(58%)高出3%;金华精煤的H<sub>2</sub>浓度(30%)比神府混煤的H<sub>2</sub>浓度(27%)高出3%;金华精煤的CO<sub>2</sub>浓度(8%)比神府混煤的CO<sub>2</sub>浓度(12%)低了4%。由于挥发分高的煤,其结构疏松,生成的煤焦具有丰富的孔隙,反应的比表面积大,气固相反应的扩散阻力小,气化剂容易扩散到内孔中去,煤焦的反应活性较高,气化反应完全,生成的有效煤气浓度变大。金华精煤的挥发分含量(28.62%)比神府混煤的挥发份含量(23.06%)高出5.56%,所以在同一工况下,金华精煤的煤气中CO和H<sub>2</sub>浓度比神府混煤的高。

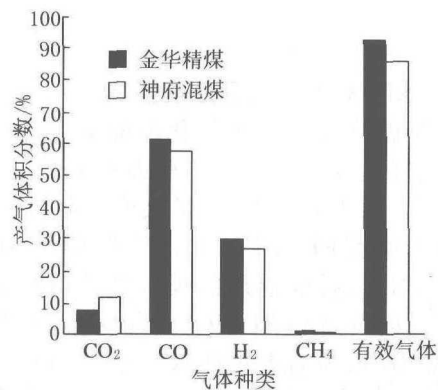


图5 不同煤种对产气组分浓度的影响  
反应温度1400℃;氧碳比0.9

## 3 结论

(1)温度是影响干燥粉气化特性的重要因素,随着温度的提高,合成气中有效气体成分(CO + H<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub>)含量增加、碳转化率升高。实验条件下,O/C摩尔比为0.9,温度为1600℃时,碳转化率达到90%。

(2)相同温度下,随着O/C摩尔比的增加,由于炉

内煤焦 - O<sub>2</sub> 的反应速率远大于煤焦 - CO<sub>2</sub> 的反应速率, 以及炉内氧化性气氛逐渐增强, 从而导致合成气中 CO<sub>2</sub> 含量不断增加, 有效气体成分下降。实验条件下, 在 1200 ~ 1600 °C 温度范围内, 对 3 种实验煤种来说, O/C 摩尔比为 0.9 时, 有效气体浓度达到最大值。

(3) 当气化反应温度接近煤灰熔点温度时, 煤气组分 (CO + H<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub>) 达到一个最大值, 随温度的进一步升高, 由于此时煤焦表面上的灰开始发生熔融, 阻碍了煤焦与气化剂的有效接触, 煤焦 - CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 气化反应速率下降, 合成气中 CO 和 H<sub>2</sub> 的含量也开始下降, 因此温度在煤灰熔融温度附近时, 合成气的有效成分达到最大值。

#### 参考文献:

- [1] 于广锁. 气流床气化技术的现状和发展趋势[J]. 世界科学, 2005, 1: 33 - 34.
- [2] 任永强, 许世森, 郜时旺. 干法进料煤气化技术在中国的进展与发展趋势[J]. 中国电力, 2004, 37(6): 49 - 52.
- [3] 魏亮, 张忠孝, 乌晓江. 煤焦气化反应过程中灰的熔融特性变化[J]. 洁净煤技术, 2007, 13(6): 66 - 69.

- [4] 吴学成, 王勤辉, 骆仲泱, 等. 气化参数影响气流床煤气化的模型研究(I) - 模型建立及验证[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(10): 1361 - 1365.
- [5] 吴学成, 王勤辉, 骆仲泱, 等. 气化参数影响气流床煤气化的模型研究(II) - 模型预测及分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(11): 1483 - 1489.
- [6] 乌晓江, 张忠孝, 朴桂林, 等. 高灰熔点煤高温下煤焦 CO<sub>2</sub>/水蒸气气化反应特性的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(32): 24 - 28.
- [7] 乌晓江, 张忠孝, 朴桂林, 等. 煤粉加压气流床气化特性实验研究[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(8): 1431 - 1434.
- [8] 任永强, 许世森, 张东亮, 等. 干煤粉加压气化技术的试验研究[J]. 煤化工, 2004, 112: 10 - 13.
- [9] Jae Goo Lee, Jae Ho Kim, Hyo Jin Lee. Characteristics of entrained flow coal gasification in a drop tube reactor[J]. Fuel, 1996, 75(9): 1035-1042.
- [10] Koyama, s., Matuo, M. and Miyadera, H. J. Fuel Soc. Japan 1986, 65: 660.

## Experimental study on effects of operation parameters on entrained flow pulverized coal gasification

LU Cheng, ZHANG Zhong-xiao, WU Xiao-jiang, HUANG Feng-bao, CHEN Guo-yan, ZHOU Guo-feng

(School of Energy and Power Engineering, Shanghai University of Science and Engineering, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Experimental studies on gasification characteristics of both high and low fusing temperature coal were carried out by using experimental equipment for atmospheric pressure entrained-flow gasification in a 1600 °C drop tube furnace. Investigate the characteristics of dry coal gasification in the temperature of 1200 °C to 1600 °C and O/C molar ratio 0.9 to 1.2. The concentration of CO and H<sub>2</sub>, the carbon conversion all increase with increasing reaction temperature whereas the concentration of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> decrease with increasing reaction temperature; With increasing O/C ratio, the concentration of CO and H<sub>2</sub> decrease and the concentration of CO<sub>2</sub> increase; Ash fusing characteristic of coal is a key factor on the syngas composition, The CO + H<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub> content of the product gas exhibit a maximum around the ash fusion temperature.

**Key words:** entrained-flow; drop-tube furnace; gasification; ash slag fusibility

欢迎订阅《洁净煤技术》杂志。  
全年定价 120 元/套