

# 水煤浆热解特性及影响因素

冯帆, 于娟, 张曜, 李博扬, 林晨, 张忠孝

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

**摘要:**水煤浆热解产物的分布、组成和产率对水煤浆的高效燃烧具有重要影响,同时水煤浆热解产生的  $H_2$ 、 $CH_4$ 、 $CO$  等气体有助于改善脱硝温度窗口,提高脱硝效率。采用高频加热炉对神木煤制成的水煤浆进行热解,测定并分析了热解气的产率和组成成分,探究了热解温度和加热速率对水煤浆热解特性的影响。结果表明,随着温度的升高,水煤浆的除水失重率持续增加,从  $700\sim 1\ 200\ ^\circ C$  增加了约 10%,挥发分和热解气体的产率继续增加,从  $0.50\ L/g$  增加到  $0.73\ L/g$ ,说明水煤浆的热解程度逐渐增加。热解气体的组成主要是  $H_2$ 、 $CO$ 、 $CH_4$  和  $CO_2$ 。随着温度的升高,总热解气体中  $H_2$ 、 $CH_4$ 、 $CO_2$  和  $CO$  总体积分数在  $700\sim 900\ ^\circ C$  降低,在  $900\sim 1\ 100\ ^\circ C$  保持稳定,  $1\ 100\ ^\circ C$  以上继续下降,从最初  $700\ ^\circ C$  时的 90% 下降到  $1\ 200\ ^\circ C$  时的 78%,其中  $H_2$ 、 $CO_2$  和  $CH_4$  体积分数呈阶梯式下降,而  $CO$  体积分数几乎不变,  $H_2$  体积分数下降最明显,约 6.1%,而  $CH_4$  则下降了约 4%,  $CO_2$  下降了 2.6% 左右。随着温度的升高,  $H_2$ 、 $CO_2$  和  $CH_4$  产率先增加后减小,峰值出现在  $1\ 100\ ^\circ C$  左右,而  $CO$  产率则持续增加。升温速率也影响挥发物的产率,升温速率  $667\ ^\circ C/min$  的除水失重率比  $400\ ^\circ C/min$  高 6%,但总体影响不大。研究结果为掌握水煤浆初级热解产物的形成特征提供了参考。

**关键词:**水煤浆;高频加热炉;热解;挥发分;加热速率

中图分类号:TK221

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2021)05-0138-06

## Characteristics and influencing factors of coal-water slurry pyrolysis

FENG Fan, YU Juan, ZHANG Yao, LI Boyang, LIN Chen, ZHANG Zhongxiao

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:**The distribution, composition and yield of pyrolysis products of coal water slurry have an important influence on the effective combustion of coal-water slurry, while  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$  and other gases produced by pyrolysis of coal-water slurry are conducive to improve the denitration temperature window and the denitration efficiency. In this paper, the coal-water slurry made from Shenmu coal (bituminous coal) was pyrolyzed by a high-frequency heating furnace, and the yield and composition of pyrolysis gas were measured and analyzed. The effects of pyrolysis temperature and heating rate on the pyrolysis characteristics of coal-water slurry were explored. The results show that as the temperature increases, the weight loss rate without water of coal-water slurry continues to increase, increasing by about 10% from  $700\ ^\circ C$  to  $1\ 200\ ^\circ C$ . The yield of volatile matter and pyrolysis gas continue to increase, from  $0.50\ L/g$  to  $0.73\ L/g$ , which shows that the degree of pyrolysis of coal-water slurry gradually increases. The pyrolysis gas is mainly composed of  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$  and  $CO_2$ . As the temperature rises, the total volume concentration of  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$  and  $CO$  in the total pyrolysis gas decreases in the range of  $700\sim 900\ ^\circ C$ , and remains stable in the range of  $900\sim 1\ 100\ ^\circ C$ , and then continues to decline above  $1\ 100\ ^\circ C$ , from initially 90% at  $700\ ^\circ C$  to 78% at  $1\ 200\ ^\circ C$ , in which the volume concentration of  $H_2$ ,  $CO_2$  and  $CH_4$  decrease in a stepwise manner, while the volume concentration of  $CO$  remains almost unchanged. The volume concentration of  $H_2$  decreases most significantly, about 6.1%, while  $CH_4$  decreases by about 4% and  $CO_2$  decreases by about 2.6%. As the temperature increases, the yields of  $H_2$ ,  $CO_2$  and  $CH_4$  increase first and then decrease, and the peak appears at about  $1\ 100\ ^\circ C$ , while the  $CO$  yield continues to increase. The yield of volatiles is affected by the rate of temperature increase. The weight loss rate without water at  $667\ ^\circ C/min$  is 6% higher than that at  $400\ ^\circ C/min$ . On the whole, the heating rate has not significantly influence on the pyrolysis. The research results provide a reference for understanding the formation characteristics of primary pyrolysis

收稿日期:2020-04-05;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.20040501

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0604202)

作者简介:冯帆(1995—),男,北京人,硕士研究生,研究方向为  $NO_x$  超低排放。E-mail:tony670132174@sjtu.edu.cn。通讯

作者:于娟,副教授,研究方向为  $NO_x$  超低排放、 $CO_2$  捕集与利用。E-mail:yujuan@sjtu.edu.cn

引用格式:冯帆,于娟,张曜,等.水煤浆热解特性及影响因素[J].洁净煤技术,2021,27(5):138-143.

FENG Fan, YU Juan, ZHANG Yao, et al. Characteristics and influencing factors of coal-water slurry pyrolysis [J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(5): 138-143.



移动阅读

products of coal water slurry.

**Key words:** coal-water slurry; high-frequency heating furnace; pyrolysis; volatiles; heating rate

## 0 引言

水煤浆是一种由 65%~70% 的不同粒度的煤、29%~34% 的水和约 1% 的化学添加剂混合而成的煤基燃料,具有高效、节能、环保等优势,可供锅炉燃烧或气化炉气化<sup>[1]</sup>。许多国家已将其作为基于长期能源战略考虑因素的煤基燃料技术进行研究和开发<sup>[2]</sup>。

国内外水煤浆的利用研究大多数集中在水煤浆的燃烧与气化等方面<sup>[3-4]</sup>,但水煤浆的热解特性研究还不充分。牛志刚<sup>[5]</sup>研究了温度、停留时间、粒径及煤种对无烟煤、烟煤、水煤浆及黑液水煤浆燃料氮(特别是前驱物 HCN、NH<sub>3</sub>)析出规律的影响。王辉等<sup>[6-8]</sup>采用热天平研究了不同加热速率下水煤浆的热解特性,发现水煤浆中的游离水和结合水的蒸发温度在 110~180 ℃;而水煤浆中的挥发分开始释放的温度在 380~430 ℃;利用居里点热解仪在 770 ℃ 对山西大同烟煤制成的水煤浆进行裂解,发现水煤浆达到热解活化能后的热解速率比原煤快,最终的热解气产量略高。孟德润等<sup>[9]</sup>利用管式炉对水煤浆进行热解试验,分析了热解产物中 HCN 和 NH<sub>3</sub> 随温度的变化。吴磊<sup>[10]</sup>用高频加热炉快速热解水煤浆,并分析了热解焦炭的特性,发现随着热解温度的升高,烟煤焦炭的产率下降,且在 900~1 200 ℃,水煤浆热解焦的产率远低于煤粉热解焦的产率,且随着热解温度的升高,两者之间的差异逐渐增大;但缺少热解气的组分分析和释放规律研究。已有文献表明,水煤浆热解能产生多种具有还原活性的气体如 H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、CO 等,可用于还原烟气中的 NO<sub>x</sub> 从而降低 NO<sub>x</sub> 排放。而这些还原性气体的产率、体积分数等与热解条件如反应温度、升温速率的关系研究较少,不利于选择合适的反应条件提高脱硝还原剂的品质。

水煤浆的热解特性和热解反应装置密切相关。目前大多数研究采用热天平、管式加热炉等低加热速率反应系统,会存在热解二次反应。热解产物测量的准确性还与试验样品量有关,相对而言,微量的样品更易发生损失,造成较大的试验误差。高频加热炉作为热解反应装置,具有较高的加热速率且加热功率可调,加热空间集中而有限,可较好地避免二次反应发生,试验样品量也可在较大范围内调节,有利于研究水煤浆的热解。

笔者建立了高频炉热解反应系统,对神木煤水煤浆进行热解试验,重点研究不同温度和升温速率下热解气的组成、产率的变化规律及变化原因,为水煤浆热解气用于还原 NO<sub>x</sub> 提供基础数据和依据。

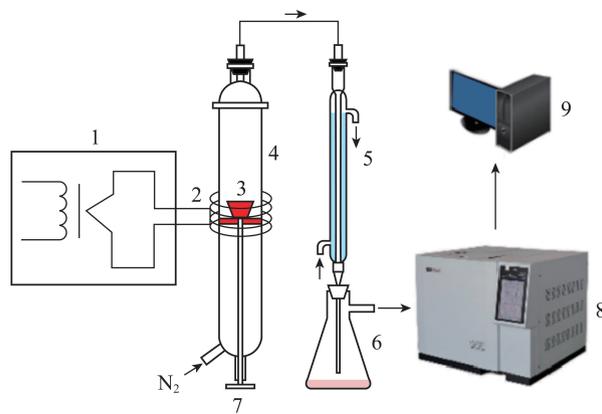
## 1 试验

### 1.1 高频炉参数

选定型号 HJ 的 25 kW 高频炉作为加热装置,加热电流为 200~1 000 A,输出振荡频率为 30~100 kHz。该高频炉热解装置具有加热速率快、冷却速度快、功率可控等优点,可以在不同温度和升温速率下对水煤浆热解进行研究。

### 1.2 热解加热系统

本研究使用的热解反应器(图 1)包括石英管和钼坩埚,石英管穿过高频炉的感应线圈,放置在管内的钼坩埚位于感应线圈的中间。石英管内径 40 mm,厚 4 mm,可承受 1 350 ℃ 的高温。钼坩埚用于装载试验样品,其上部直径为 30 mm,底部直径为 18 mm,高度为 13 mm,体积约 6.5 mL。加热时,感应线圈在钼坩埚中感应出涡流,使坩埚及水煤浆迅速升温。整个加热过程中只有钼坩埚处于高温状态,较为安全。



1—高频炉; 2—感应线圈; 3—钼坩埚; 4—石英反应器;  
5—冷凝管; 6—锥形瓶; 7—热电偶;  
8—气相色谱仪; 9—电脑

图 1 高频炉热解水煤浆系统

Fig.1 Experimental system of coal-water slurry pyrolysis in high-frequency heating furnace

### 1.3 试验方案

试验中,首先称量坩埚质量,将 0.160 g±0.015 g 水煤浆放入坩埚,并将坩埚放入反应器,连接好试验装置。然后将高频炉通电加热,按照试验工况调节电流控制升温速率和最终温度,并通过热电偶监测

钼坩埚的温度。试验载气为高纯  $N_2$ , 通过质量流量计控制  $N_2$  流量为  $0.5 \text{ L/min}$ 。考虑到管内的高温区仅存在于坩埚区域, 通过  $N_2$  的快速流动可将生成的热解气体带离高温区, 有效减少了二次反应的影响。热解气体离开石英管后经过冷凝器冷却实现气液产物分离, 气相产物收集在气袋中, 并利用气相色谱仪分析其组分。最后称量反应结束后的盛有热解焦的坩埚质量。结合气相色谱仪测出的各组分气体浓度、 $N_2$  流量、水煤浆消耗量以及反应时间, 计算出质量损失率、热解气产率等参数。

试验样品是神木煤制备的浓度为  $50\% \pm 2\%$  的水煤浆, 煤质数据见表 1。试验目的是测量热解气中  $H_2$ 、 $CH_4$ 、 $CO$  和  $CO_2$  的体积分数和产率, 并分析温度、加热速率和反应时间对热解气体组成的影响。

表 1 神木煤的工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of Shenmu coal

工业分析/%				元素分析/%			
$M_{ar}$	$A_{ar}$	$V_{ar}$	$FC_{ar}$	$C_{daf}$	$H_{daf}$	$N_{daf}$	$S_{daf}$
5.24	4.47	29.57	60.72	82.25	4.53	1.03	0.19

## 2 试验结果及分析

### 2.1 质量损失率和热解气产率

通过气相色谱仪获得的是混合气体中各组分的体积分数, 可以根据各组分与载气  $N_2$  体积分数的比例转化。该计算需要忽略  $N_2$  反应在热解气体中的影响。事实上,  $N_2$  反应一般在  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  以上, 因此误差可以忽略不计<sup>[5]</sup>。

温度和质量损失(失重率)与除水失重率之间的关系如图 2 所示, 此时加热速率为  $400 \text{ }^\circ\text{C/min}$ , 加热时间为  $3 \text{ min}$ 。失重率是热解后质量损失与水煤浆总质量之比。除水失重率是水煤浆的质量损失与煤的质量之比, 即

$$\rho = \left( 1 - \frac{M'_{mo} - M_{mo}}{M_{CWS}} \right) \times 100\%, \quad (1)$$

$$\rho_w = \left( 1 - \frac{M'_{mo} - M_{mo}}{cM_{CWS}} \right) \times 100\%, \quad (2)$$

式中,  $\rho$  为失重率;  $M_{mo}$ 、 $M'_{mo}$  分别为反应前后坩埚及坩埚加煤焦的质量,  $g$ ;  $M_{CWS}$  为水煤浆质量,  $g$ ;  $\rho_w$  为除水失重率, %;  $c$  为水煤浆浓度, %。

由图 2 可知, 失重率和除水失重率趋势一致, 即随温度升高而增加, 其原因在于水煤浆升温过程中水分的蒸发温度在  $110 \sim 180 \text{ }^\circ\text{C}$ , 而水煤浆中挥发分

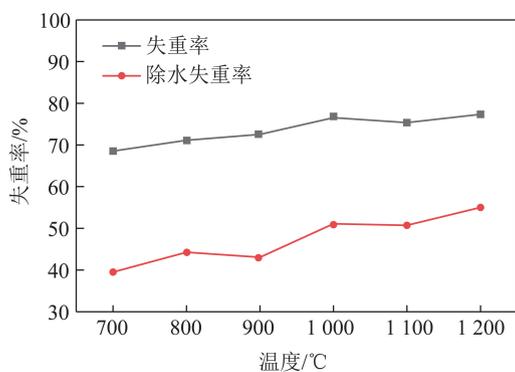


图 2 失重率与温度的关系

Fig.2 Relationship between weight loss rate and temperature

开始释放的温度在  $380 \sim 430 \text{ }^\circ\text{C}$ , 所以在水煤浆挥发分开始析出时水已经基本蒸发完全且流出了反应器, 因此用于制作水煤浆的水更多的是在结构上产生作用, 基本不参与化学反应。图 2 还表明水煤浆的热解程度随温度的升高而增加, 这与前人研究结论一致<sup>[10-11]</sup>。随温度升高, 水煤浆热解气产量呈上升趋势, 如图 3 所示。热解气产率计算公式为

$$w_i = \frac{\varphi_i}{M\varphi(N_2)} Q(N_2)t, \quad (3)$$

式中,  $w_i$  为组分气体的产率,  $L/g$ ;  $\varphi_i$  为气相色谱仪测量的组分气体体积分数, %;  $M$  为煤的质量,  $g$ ;  $\varphi(N_2)$  为测量的  $N_2$  体积分数, %;  $Q(N_2)$  为  $N_2$  流量,  $L/min$ ;  $t$  为反应时间,  $min$ 。

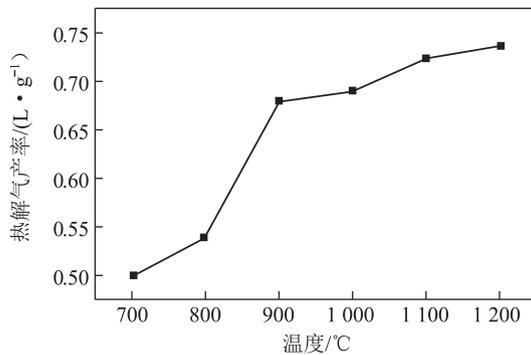


图 3 热解气产率与温度的关系

Fig.3 Relationship between pyrolysis gas yield and temperature

温度升高时, 煤的热解程度增加从而导致热解气产率增加; 同时热解气的释放增大了煤结构中孔隙的大小和数量, 而较多的孔隙结构对于热解气的释放有促进作用<sup>[10]</sup>。由于本文使用的反应系统可将产生的热解气快速吹出高温反应段, 使热解气快速降温, 有效避免了二次反应发生, 所以热解气可认为不是挥发分的重整反应、炭的气化反应等反应产生的。

热解试验中各热解产物占水煤浆的比例见表 2。

表2 热解产物占水煤浆的比例  
Table 2 Proportion of pyrolysis products in coal water slurry

温度/ °C	占比/%						
	焦炭	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	水蒸气	其他气体、焦油等
700	31.45	0.86	2.93	5.90	5.19	50.73	2.94
800	28.87	0.91	3.03	5.82	5.35	50.90	5.12
900	27.48	0.95	3.46	6.94	6.38	54.27	0.52
1 000	23.48	1.02	3.55	6.95	6.40	54.52	4.08
1 100	24.63	1.08	3.85	7.63	7.01	52.62	3.18
1 200	22.65	0.94	2.89	6.00	7.02	52.27	8.23

由表2可知,热解焦炭、H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>、CO、加入的水与煤中水分总质量占反应前水煤浆质量的90%以上,试验未测物质包括其他热解气体如C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>、O<sub>2</sub>、含N气体、含S气体以及焦油等。温度很高时,热解过程中产生的焦油随热解气带离反应器,通过冷凝器与热解气分离,仍有一部分焦油随温度降低会附着在管路中无法收集。

## 2.2 热解气组分产率

组分气体产率与温度的关系如图4所示,可知随温度升高,只有CO产率随温度升高而增加,H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>的产率在700~1 100 °C连续增加,1 100 °C达到最大值后开始下降。其中H<sub>2</sub>产率升高约30%,最大值与最小值相差最大,约0.065 L/g,而CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>的极差相对较小,分别为0.03 L/g和0.04 L/g,但提升比例高达50%左右。说明水煤浆热解过程中,1 100 °C是H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>生成的最适宜温度。而对于CO,温度越高,产率越高,极差约为0.05 L/g,提升约60%。

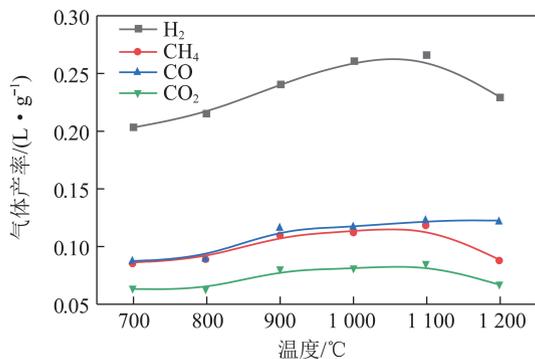


图4 组分气体产率与温度的关系

Fig.4 Relationship between gas yields and temperature

热解过程中,煤被加热到一定温度时,煤中不稳定的化学键被破坏形成活性很高的自由基,如甲基自由基和氢自由基。自由基间相互结合会形成如H<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>等小分子气体作为挥发分析出。

H<sub>2</sub>产生分为不同的阶段。700~900 °C,煤和热

解产生的环数较小的芳环通过缩聚反应变为环数更大的稠环芳烃并产生大量H<sub>2</sub>,这与400~600 °C的H<sub>2</sub>产生原理不同,后者H<sub>2</sub>主要来自脂肪链的脱氢。其他研究<sup>[11-13]</sup>也证实了H<sub>2</sub>产率从700~900 °C显著增加。水煤浆热解过程中H<sub>2</sub>释放量持续增加到1 100 °C。水煤浆热解时,煤焦的比表面积和孔径远高于煤热解焦炭,更有利于气体释放<sup>[10,14]</sup>,所以水煤浆中热解气产量较煤的热解气产量更高。约1 100 °C达到最大值后,H<sub>2</sub>释放量开始下降,原因是在热解速率较低条件下,高温促进了HCN和NH<sub>3</sub>的增加而消耗了H<sub>2</sub><sup>[9,15]</sup>。

CH<sub>4</sub>主要来源于煤大分子结构中的大量侧链(苯环上的取代基)和支链(链烃上烷基)的断裂。当烃处于较低温度时,长链和短链脂肪族侧链的—CH<sub>3</sub>被破坏,与氢自由基产生CH<sub>4</sub>。随温度升高,甲基断裂程度增加,且长链脂肪族烃物质会二次裂解形成甲基。另一方面,由于芳香结构的缩聚,从脂肪结构释放的碳会发生加氢反应与氢自由基形成CH<sub>4</sub>。此外,还有少量CH<sub>4</sub>来自部分挥发性烃的分解和焦炭的自由氢化。温度高于1 100 °C后,CH<sub>4</sub>产率逐渐降低,这是由于H<sub>2</sub>产率和浓度均下降,抑制了碳的加氢反应,因此CH<sub>4</sub>产率有所下降。

热解气中CO和CO<sub>2</sub>主要来自煤中含氧官能团。热解后期温度升高后,CO含量的轻微增加可能来自煤中含氧杂环如醚键和OH—的化学反应<sup>[16]</sup>。

## 2.3 体积分数

H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>和水蒸气的总体积分数,以及不考虑N<sub>2</sub>及水蒸气影响时H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、CO、CO<sub>2</sub>的总体积分数V随温度变化如图5所示。

$$V = \frac{\sum \varphi_i}{1 - \varphi(\text{N}_2) - \varphi(\text{H}_2\text{O})}, \quad (4)$$

式中,  $\sum \varphi_i$  为气相色谱仪测出的H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、CO、CO<sub>2</sub>

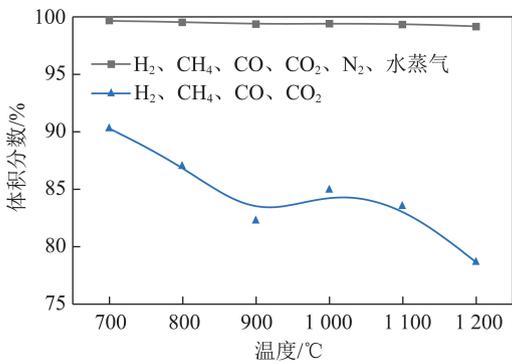


图5 总体积分数与温度的关系

Fig.5 Relationship between total volumetric concentration and temperature

体积分数之和,%; $\varphi(\text{H}_2\text{O})$ 为水蒸气体积分数,%,假设水蒸气在热解气中为饱和状态。

由图5可知,随温度升高,热解气体中 $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CO}$ 总体积分数在700~900°C逐渐降低,900~1100°C保持基本稳定,1100°C以上继续下降,700~1200°C下降约12%。这表明其他气体组分的体积分数将在700~900°C和1100°C以上随温度升高逐渐增加。这些气体中可能有 $\text{C}_m\text{H}_n$ 、 $\text{O}_2$ 、少量的含N气体( $\text{N}_2$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{HCN}$ 等)和含S( $\text{SO}_2$ 、 $\text{CS}_2$ )组分等。 $\text{C}_m\text{H}_n$ 虽然会在高温下进行二次反应发生分解,但由于本试验能有效避免二次反应带来的影响,所以即使温度在1000°C以上,热解气中也可能含有一定量的 $\text{C}_m\text{H}_n$ 。高温还会促进 $\text{HCN}$ 形成,同时增加 $\text{NO}$ 和 $\text{N}_2$ 浓度,导致硫酸盐分解形成 $\text{SO}_2$ <sup>[11]</sup>,所以随温度升高,含N气体和含S气体占比逐渐升高。

组分气体体积分数与温度的关系如图6所示。可知不考虑 $\text{N}_2$ 及水蒸气影响时,热解气体中3种气体组分 $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 和 $\text{CO}_2$ 的体积分数随温度升高逐渐降低, $\text{H}_2$ 下降最明显,约为6.1%,其次是 $\text{CH}_4$ 下降了4%, $\text{CO}_2$ 下降了2.6%。 $\text{CO}$ 体积分数几乎恒定,略增

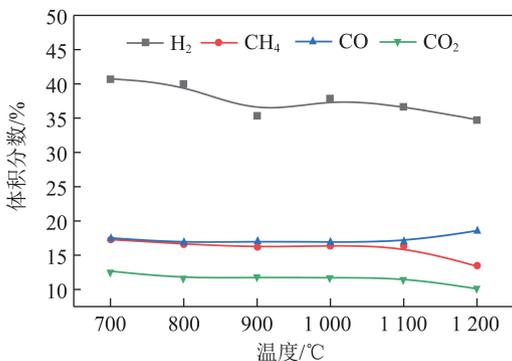


图6 组分气体体积分数与温度的关系

Fig.6 Relationship between volume concentrations of component gas and temperature

加约1%。700~900°C, $\text{H}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 体积分数下降,900~1100°C保持稳定,温度高于1100°C时,体积分数继续下降。 $\text{CO}_2$ 的差异在于第1次体积分数下降在700~800°C,而后趋势与 $\text{H}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 几乎相同。

## 2.4 加热速率

失重率和除水失重率与加热速率的关系如图7所示,可知反应温度1000°C时,随着加热速率增加,失重率也增加,但变化不明显。这与王辉等<sup>[6]</sup>研究结果一致。温度迅速升高时,煤中挥发物的释放速度很快,容易在颗粒内部形成正压,从而促进煤焦形成丰富孔结构,有利于热解产物进一步释放。因此,当加热速率较快时,产生的热解气体更多,失重率也越大<sup>[10]</sup>。

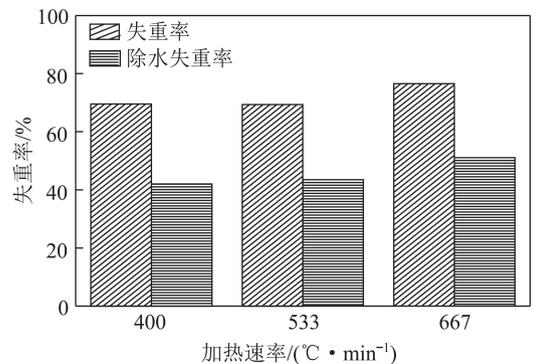


图7 失重率和除水失重率与加热速率的关系

Fig.7 Relationship between weight loss rate considering/not considering water and heating rates

## 3 结论

1)随着温度升高,水煤浆的热解程度逐渐增加,热解气产量呈上升趋势。 $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 产率在700~1100°C持续增加,在1100°C达到最大值后开始下降。随温度升高, $\text{CO}$ 产率持续增加。

2)随着温度的升高,热解气中 $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CO}$ 总体积分数逐步降低,其他气体组分的比例越来越大。 $\text{H}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 和 $\text{CO}_2$ 的体积分数逐步降低。其中 $\text{H}_2$ 下降最明显,约为6.1%,其次是 $\text{CH}_4$ 下降了4%, $\text{CO}_2$ 下降了2.6%。 $\text{CO}$ 体积分数几乎恒定,甚至略增加。

3)随着加热速率的增加,水煤浆的热解程度增加,但变化不明显。

## 参考文献 (References):

- [1] 陈浩,熊君霞,何国锋.我国水煤浆技术现状及发展趋势[J].煤炭经济研究,2019,39(6):85-88.  
CHEN Hao, XIONG Junxia, HE Guofeng. Current status and development trend of coal water slurry technology in China[J]. Coal Economic Research, 2019, 39(6): 85-88.

- [2] 梁兴,闫黎黎,徐尧.水煤浆技术现状分析及发展方向[J].洁净煤技术,2012,18(6):62-66.  
LIANG Xing, YAN Lili, XU Yao. Status analysis and development of coal water mixture technology [J]. Clean Coal Technology, 2012, 18(6): 62-66.
- [3] 史俊高,安晓熙,王帅.我国水煤浆气化技术现状及发展趋势[J].中外能源,2020,25(3):21-28.  
SHI Jungao, AN Xiaoxi, WANG Shuai. Current status and development trend of coal water slurry gasification technology in China [J]. Sino-Global Energy, 2020, 25(3): 21-28.
- [4] 段清兵.中国水煤浆技术应用现状与发展前景[J].煤炭科学技术,2015,43(1):129-133.  
DUAN Qingbing. Application status and development prospect of coal water mixture technology in China [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1): 129-133.
- [5] 牛志刚.煤、水煤浆燃料氮析出特性和燃料型 $\text{NO}_x$ 生成特性研究[D].杭州:浙江大学,2004.
- [6] 王辉,姜秀民,刘建国,等.不同升温速率下水煤浆的热解特性分析[J].动力工程,2007,27(2):263-266.  
WANG Hui, JIANG Xiumin, LIU Jianguo, et al. Analysis of pyrolysis characteristics of coal water slurry under various heating rates [J]. Power Engineering, 2007, 27(2): 263-266.
- [7] 王辉,姜秀民,袁德权,等.水煤浆挥发分热解的FG-DVC模型[J].化工学报,2006,57(10):2428-2432.  
WANG Hui, JIANG Xiumin, YUAN Dequan, et al. Pyrolysis of coal water slurry volatile matter by FG-DVC model [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2006, 57(10): 2428-2432.
- [8] 王辉,姜秀民,刘建国.水煤浆和原煤粉居里点裂解仪对比实验研究[J].化学工程,2007,35(3):19-22.  
WANG Hui, JIANG Xiumin, LIU Jianguo. Experimental study on comparison of coal water slurry and parent pulverized coal with curie point pyrolyser [J]. Chemical Engineering, 2007, 35(3): 19-22.
- [9] 孟德润,赵翔,周俊虎,等.水煤浆热解过程中HCN和 $\text{NH}_3$ 释放特性的分析[J].热能动力工程,2006,21(4):394-396,400.  
MENG Derun, ZHAO Xiang, ZHOU Junhu, et al. Analysis of release characteristics of HCN and  $\text{NH}_3$  during pyrolysis of coal water slurry [J]. Thermal Power Engineering, 2006, 21(4): 394-396, 400.
- [10] 吴磊.水煤浆快速热解过程及热解焦气化特性研究[D].上海:华东理工大学,2013.
- [11] 王鹏,文芳,步学朋,等.煤热解特性研究[J].煤炭转化,2005,28(1):8-13.  
WANG Peng, WEN Fang, BU Xuepeng, et al. Study on coal pyrolysis characteristics [J]. Coal Conversion, 2005, 28(1): 8-13.
- [12] 李超.烟煤流化床热解机理以及挥发产物组分分布特性研究[D].杭州:浙江大学,2016.
- [13] 陆志峰,王亦飞,李季林,等.典型煤种快速热解气体的逸出特性[J].华东理工大学学报(自然科学版),2016,42(6):764-770.  
LU Zhifeng, WANG Yifei, LI Jilin, et al. Evolution characteristics of gas from pyrolysis of typical coals [J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science), 2016, 42(6): 764-770.
- [14] WU Dun, ZHANG Wenyong, FU Biao, et al. Chemical structure and gas products of different rank coals during pyrolysis [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019, 136(5): 2017-2031.
- [15] NAOTO Tsubouchi, MIWA Abe, XU Chunbao, et al. Nitrogen release from low rank coals during rapid pyrolysis with a drop tube reactor [J]. Energy & Fuels, 2003, 17: 940-945.
- [16] LI Qian, WANG Zhihua, HE Yong, et al. Pyrolysis characteristics and evolution of char structure during pulverized coal pyrolysis in drop tube furnace: Influence of temperature [J]. Energy & Fuels 2017, 31: 4799-4807.