

水煤浆快速热解特性及影响因素研究

冯帆, 于娟, 张曜, 张忠孝

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要:为研究水煤浆(CWS)的快速热解特性,利用高频加热炉,以神木煤作为CWS制作原料,开展快速热解实验,并与慢速热解实验结果作对比,分析了热解气的释放规律(产率、组分及比例等)及热解特性与反应温度、加热速率、停留时间之间的关系。结果表明:热解气以 H_2 、CO、 CH_4 和 CO_2 成分为主;在高于1 000℃和较长的反应时间下进行快速热解,有利于生成高体积分和高产率的还原性气体;快速热解条件下,随着温度的升高, H_2 和CO的产率持续增加(H_2 的产率增加了约0.45 L/g, CO的产率增加了约0.14 L/g),而 CH_4 的产率先上升后下降(在900℃时产率最高为0.12 L/g), CO_2 产率在低温段有些许上升之后几乎没有明显变化(只增加了约0.03 L/g);快速热解条件下, H_2 和CO的相对体积分数随着温度的升高而持续增加(分别增加了约45%和5%), CH_4 和 CO_2 的体积分数则随温度的升高而下降(CH_4 下降约35%,较为剧烈,而 CO_2 则下降了约10%~20%);在慢速热解时, H_2 、 CO_2 和 CH_4 的产率会随着最终温度的增加,呈先上升后下降的趋势(最高点约在1 100℃),CO产率则呈上升趋势;慢速热解阶段 H_2 和 CO_2 的相对体积分数随着温度的增加略有变化(CH_4 则下降了3%),CO增加约5%。

关键词:CWS;高频加热炉;影响因素;热解气;快速热解

中图分类号:TQ530.2

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.11.019

[引用本文格式]冯帆,于娟,张曜,等.水煤浆快速热解特性及影响因素研究[J].热能动力工程,2021,36(11):133-140. FENG Fan, YU Juan, ZHANG Yao, et al. Study on characteristics and influencing factors of coal-water slurry rapid pyrolysis[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(11):133-140.

Study on Characteristics and Influencing Factors of Coal-water Slurry Rapid Pyrolysis

FENG Fan, YU Juan, ZHANG Yao, ZHANG Zhong-xiao

(School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code:200240)

Abstract: In order to study the rapid pyrolysis characteristics of coal-water slurry (CWS), Shenmu coal was used as a raw material for coal-water slurry production, and a high-frequency heating furnace was used to carry out the rapid pyrolysis experiment, comparing with the experimental results of the slow pyrolysis, which analyzed the release rules of pyrolysis gas, such as gas yield, composition and ratio, etc., and the relation of pyrolysis characteristics and reaction temperature, heating rate and residence time. The results show that the pyrolysis gases mainly consist of H_2 , CO, CH_4 and CO_2 . Rapid pyrolysis proceeds at temperatures of above 1 000℃ and for longer reaction time, which is beneficial to the generation of reducing gas with high volume fraction and yield. Under the conditions of rapid pyrolysis, with the increase of temperature, the yield of H_2 and CO continues to increase, the yield of H_2 is increased by about 0.45 L/g, and the yield of CO is increased by about 0.14 L/g, while the yield of CH_4 firstly increases and then decreases, reaching the highest point of 0.12 L/g at 900℃, the yield of CO_2 hardly changes after a slight

收稿日期:2020-01-18; 修订日期:2020-02-26

基金项目:国家重点研发计划(2018YFB0604202)

Fund-supported Project: National Key Research and Development Program of China(2018YFB0604202)

作者简介:冯帆(1996-),男,北京人,上海交通大学硕士研究生。

通讯作者:于娟(1973-),女,河南郑州人,上海交通大学副教授。

increase in the low temperature section, which is only increased by about 0.03 L/g. Under the conditions of rapid pyrolysis, the relative volume fractions of H_2 and CO continue to increase with the increase of temperature, increasing by about 45% and 5% respectively; the volume fractions of CH_4 and CO_2 decrease with the increase of temperature, the decrease of CH_4 by about 35% is more severe, and the CO_2 is decreased by about 10% to 20%. Under the conditions of slow pyrolysis, the yields of H_2 , CO_2 and CH_4 firstly increase and then decrease with the increase of the final temperature, reaching the highest point at about 1 100 °C; but the yield of CO shows an upward trend. In the stage of slow pyrolysis, the relative volume fractions of H_2 and CO_2 change slightly with the increase of temperature, while CH_4 is decreased by about 3%, and CO is increased by about 5%.

Key words: coal-water slurry (CWS), high-frequency heating furnace, influencing factors, pyrolysis gas, rapid pyrolysis

引言

还原性气体可作为添加剂参与氨还原剂还原 NO_x 的过程中,以达到降低反应温度、扩大温度窗口以及提高还原效率等目的。这些气体添加剂可以单独添加参与脱硝反应^[1-4],也可以同时添加促进 NO_x 的还原^[5-6]。

董若凌等人^[7]、孟德润等人^[8]在研究水煤浆再燃时发现,在高温下水蒸汽不仅促进更多的 CO 和 H_2 生成,而且还提供了大量的 H 和 OH 自由基,促进中间活性物质 HCN、 NH_3 和 CH_i 的形成,有助于降低 NO 的排放。吴磊^[9]用高频加热炉对水煤浆进行快速热解实验,探究热解焦的生成原理和规律,发现温度从 900 升至 1 200 °C,水煤浆热解焦质量急速减少,比煤的热解焦小很多,从另一个角度说,同质量煤制成水煤浆的热解气的释放量远高于煤,且产率差距会随着热解温度的增加而逐渐扩大。

由于反应器的限制,目前多数有关水煤浆热解的研究都在低加热速率下进行。牛志刚等人^[10]使用石英床反应器对普通水煤浆、黑液水煤浆及其原煤进行了燃料氮释放实验。孟德润等人^[8]采用管式炉分别在 800、1 000 和 1 200 °C 下对水煤浆进行了热解实验,并通过化学分析法分析了 HCN 和 NH_3 随温度的变化。王辉等人^[11]使用热天平作为加热装置,对水煤浆热解气在不同加热速率下的释放规律进行研究,发现随着加热速率的增加,水煤浆热解的重量损失率和活化能提高,热解特性变好,在 373 ~ 453 K 左右,水煤浆中的游离水和结合水基本

蒸发,当温度达到 653 ~ 703 K 时,水煤浆开始释放挥发份。王辉等人^[12]利用居里点热解仪对烟煤水煤浆进行裂解实验,裂解温度控制在 770 °C。在达到热解活化能后,水煤浆的热解速率比原煤快,热解气的产量也会更高。居里点热解仪虽然能达到较高升温速率,但其实验样品量为微克级,易引起较大质量损失,精度难以保障。Dunn-Rankin 等人^[13]采用滴管炉研究了煤和水煤浆的燃烧反应,虽然该反应器升温速率可达到 10^4 K/s,但无法消除二次反应的影响。吴磊^[9]采用高频加热炉也达到了 10^4 K/s 以上的升温速率,而且可以避免热解气体的二次反应,但其对水煤浆热解的研究集中在对热解焦的分析上,未对热解气的成分进行测量。

根据研究可知,水煤浆快速热解时热解气的组分以及热解特性研究还不充分。因此,本文采用高频加热炉对神木煤制成的水煤浆进行快速热解,研究不同温度、不同热解时间对热解气组成及产率的影响,为水煤浆热解气在 NO_x 的还原领域中的应用奠定数据基础。

1 实验

1.1 实验系统

实验系统示意如图 1 所示。采用高频加热炉热解水煤浆。高频炉通过电流调节加热速率,调节范围在 200 ~ 1 000 A 之间。采用石英管和钼坩埚作为反应器。石英管内部直径 4 cm,壁厚 0.4 cm,温度可升高到 1 600 K 而不变形。钼坩埚口部内径为 3 cm,锅底内径 1.8 cm,高 1.3 cm,容积约 6.6 mL,架空在石英管中,位于感应线圈的中间。高频炉通

过感应线圈在钼坩埚中感应出涡流,使坩埚迅速加热,水煤浆由进样装置滴落进炽热的坩埚,完成快速热解。实验装置中只有钼坩埚处于高温状态,实验载气是高纯氮气,快速热解时选择合适的流量,可以将热解气体迅速带离高温区,有效避免二次反应。整个热解装置具有加热速率快、冷却速度快和定量准确等优点。

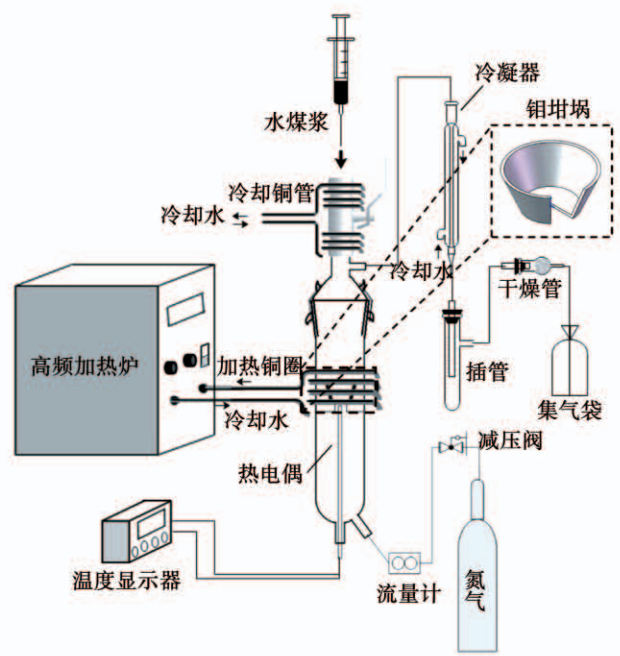


图 1 高频炉热解系统

Fig. 1 Pyrolysis system of high-frequency furnace

1.2 实验样品

使用神木烟煤制备质量浓度约为 52% 的水煤浆,神木煤的煤质分析数据如表 1 所示。由于高浓度神木煤粉在与水混合过程中易凝聚成球形,成浆性能较差,因此选择浆液性能较好的较低浓度水煤浆作为实验样品。

表 1 神木煤工业分析和元素分析

Tab. 1 Industrial and elemental analyses of Shenmu coal

工业分析/%				元素分析/%			
M	A	V	FC	C	H	N	S
5.24	5.05	31.2	63.8	82.25	4.53	1.03	0.19

1.3 实验方法

在快速热解实验中,先将坩埚加热到目标温度,然后打开顶部球阀滴加水煤浆,水煤浆质量控制在

(0.34 ± 0.04) g。水煤浆在坩埚中快速热解后,由载气将热解气体吹离高温反应区。热解气体离开石英管之后进入冷凝器,以分离气相和液相。液相主要物质为水、焦油等。气体最终进入气袋中,并通过气相色谱分析测出热解气组分。快速热解实验中载气的流量为 1.2 L/min,可有效减少二次反应的影响。

为了与低升温速率热解作对比,本研究在同一实验系统中,采用先将水煤浆放入坩埚再进行加热的方式,对水煤浆进行了慢速热解。慢速热解和快速热解的升温速率数量级相差 10³ ~ 10⁴ K/s。

本研究的主要目的是测量热解气中脱硝活性组分 H₂、CH₄、CO 和可能在后续焦炭气化中起作用的 CO₂ 的体积分数和产率,并分析热解气受终温、升温速率和停留时间等因素影响的规律。

2 实验结果及分析

2.1 重量损失

重量损失率(失重率)可以比较直观地反映热解进行的程度。在水煤浆的快速热解过程中,水煤浆中水在改变煤粉结构上起很大作用,但化学反应参与不多,所以失重率不考虑水煤浆中的水造成的质量损失,即:

$$wt = \left(1 - \frac{m_{mo}' - m_{mo}}{c \cdot m_{CWS}} \right) \times 100\%$$

(1)

式中: wt —重量损失率,%; c —水煤浆浓度,%; m_{CWS} —水煤浆质量,g; m_{mo} —反应前坩埚质量,g; m_{mo}' —反应后坩埚与热解焦质量和,g。

图 2 显示了失重率与温度的关系。可以看出,随着温度的增加,失重率持续上升。当快速热解时,温度越高不仅意味着反应温度高,也意味着加热速率更快。当温度急剧增加时,煤中热解气的溢出速度极快,会导致煤内部产生正压,使得煤焦内部形成更丰富的孔隙以及裂痕^[9]。而较高的破碎程度和较多的孔隙结构更有利于热解气的释放。因此,温度越高时,产生的热解气体越多,失重率越大。

失重率的两条曲线都有一个共同的特点:从 800 ~ 1 200 °C 呈现 S 型,斜率在 1 000 °C 时达到最大。其中 800 ~ 900 °C 失重率几乎不变,从 900 ~ 1 100 °C 变化剧烈,然后在 1 100 ~ 1 200 °C 增加幅

度又会减小。这种变化趋势说明在 900 ~ 1 100 ℃ 之间热解气体产率对反应温度很敏感,在实际炉内热解中随工况的变化会产生较大的波动,不利于对脱硝反应的控制。而在 1 100 ℃ 以上,热解气体产率较稳定,对实炉脱硝添加剂的供给是有利的。

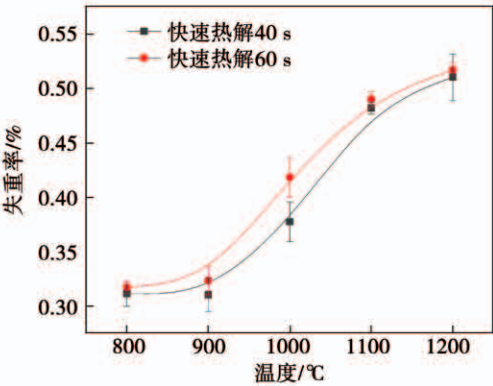


图 2 失重率与温度的关系

Fig. 2 The relationship between weight loss rate and temperature

2.2 热解气主要组分产率

图 3 是将水煤浆提前加入坩埚进行慢速热解时热解气中 H₂、CH₄、CO 和 CO₂ 产率随温度的变化。由图 3 可见,只有 CO 的产率随温度的升高而增加。其他 3 种气体的产率趋势基本相同,在 700 ~ 1 100 ℃ 呈上升趋势之后开始下降,1 100 ℃ 是峰值温度。其中,H₂的变化最为明显。这表明在水煤浆热解过程中,H₂、CH₄和 CO₂在 1 100 ℃ 时更容易产生。温度越高越有利于 CO 的生成。

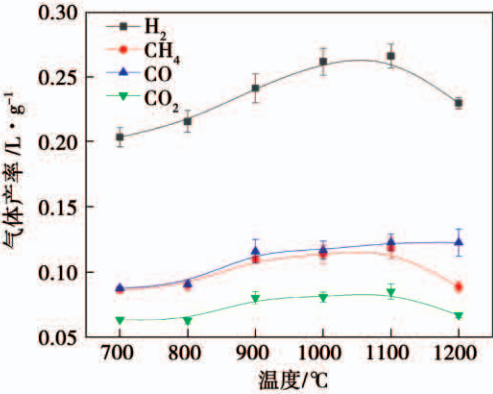


图 3 慢速热解时热解气中气体产率与温度的关系

Fig. 3 The relationship between the gas yields in the pyrolysis gases and temperature during slow pyrolysis

相比于慢速热解,在快速热解的条件下这 4 种气体的变化趋势有明显不同,如图 4 所示。H₂的产率随着温度的升高直线上升,这与慢速热解的情况有显著差别;CH₄的产率随着温度的升高先上升然后下降,与慢速热解中 CH₄的变化趋势几乎一致,不同的是达到最大产率时的温度不同;CO 的产率随着温度的升高而稳步提高,这在两种热解速率情况下也几乎一致;在慢速热解条件下,CO₂的产率随着温度的提高先小幅度上升,而后保持平稳最后下降,而快速热解条件下,在 800 ~ 1 100 ℃ 范围内 CO₂的产率相对平稳,没有明显的变化。

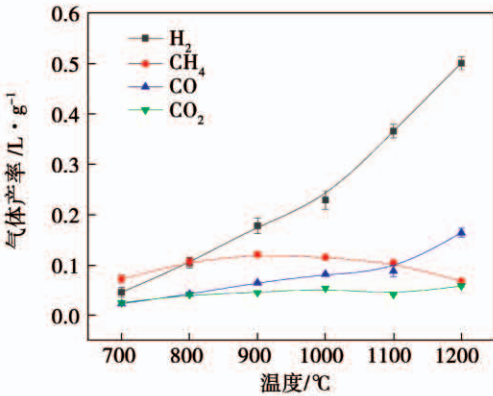


图 4 60 s 反应时间下快速热解气体产率与温度的关系

Fig. 4 The relationship between the gas yields of rapid pyrolysis gases and temperature under reaction time of 60 s

从图 4 可以看出,随着温度的升高,H₂和 CO 的产率持续增加,H₂的产率增加了约 0.45 L/g, CO 的产率增加了约 0.14 L/g;而 CH₄的产率呈先上升后下降的变化规律,在 900 ℃ 时产率最高为 0.12 L/g;CO₂产率在低温段有小幅上升之后几乎没有明显变化,只增加了 0.03 L/g 左右。

在热解过程中,煤被加热并且温度升高到破坏不稳定的化学键时,会形成大量的自由基,形成小分子气体从煤中释放,如两个 H 会结合生成 H₂,H 和 CH₃会形成 CH₄等。文献[14-16]研究发现,在 700 ~ 900 ℃ 温度范围内可产生大量的氢气。水煤浆快速热解时,煤焦会发生破裂出现孔隙或者裂痕等结构,导致其比表面积或孔径比煤热解焦炭大,这

更有利于气体的释放。但是在慢速热解时, H₂的释放在高于 1 100 ℃后开始下降,这是因为在慢速热解的条件下,高温促进生成 HCN^[8,17]。

CH₄的产生主要是长链脂族烃裂解形成甲基,甲基自由基与氢自由基结合形成 CH₄,还有小部分的 CH₄来自热解时释放的部分烃类的分解以及 C 的氢化反应^[18]。当温度更高时,产生的自由基更倾向于形成稳定的气体分子,例如 H₂和 HCN,相比之下 CH₄的产率则会下降。

热解气中的 CO 和 CO₂主要来自煤中的含氧官能团的分解。其热稳定性为羟基(- OH) > 羰基(> C = O) > 羧基(- COOH) > 甲氧基(- OCH₃)。与羰基相比,由酚羟基和杂环氧形成的 CO 需要较高的温度,而羧基断裂形成 CO₂的温度相对较低。这导致在较低的热解温度下,CO₂含量相对较高。而温度继续上升后,CO 体积分数少量升高则与煤中的含氧杂环的化学反应有关^[18]。

2.3 反应时间对气体产率的影响

图 5 为不同反应时间对热解气组分产率的影响。可以看出,H₂的产率随着热解时间的增长而增大。因为热解时间越长,煤中的长链分子芳构化的程度越高,氢自由基的产率也越高,所以生成的 H₂也就越多。与 H₂产率变化类似的还有 CO 的产率变化趋势,即产率随着热解时间的增加而增加。因为生成 CO 的化学反应需要更高的能量,所以高温和较长的热解时间都会使 CO 的产率增加。

相比于 CO,CH₄的生成反应所需要的能量较低,所以热解时间为 40 s 时 CH₄的产率比 30 s 的略有增加,但是与 60 s 时的产率相差不大,所以可以证明 CH₄的完全转化时间要早于 H₂和 CO。

CO₂的产率趋势与 CH₄的相似,说明 CO₂的生成反应对能量的需求也较低,所以随着热解时间的变化不大,只是略有增加。

2.4 相对体积分数

图 6 表示的是慢速热解条件下,上述 4 种气体的相对体积分数。可以发现,H₂和 CO₂的相对体积分数受温度影响不大,CH₄呈下降趋势,而 CO 的相对体积分数呈上升的趋势。

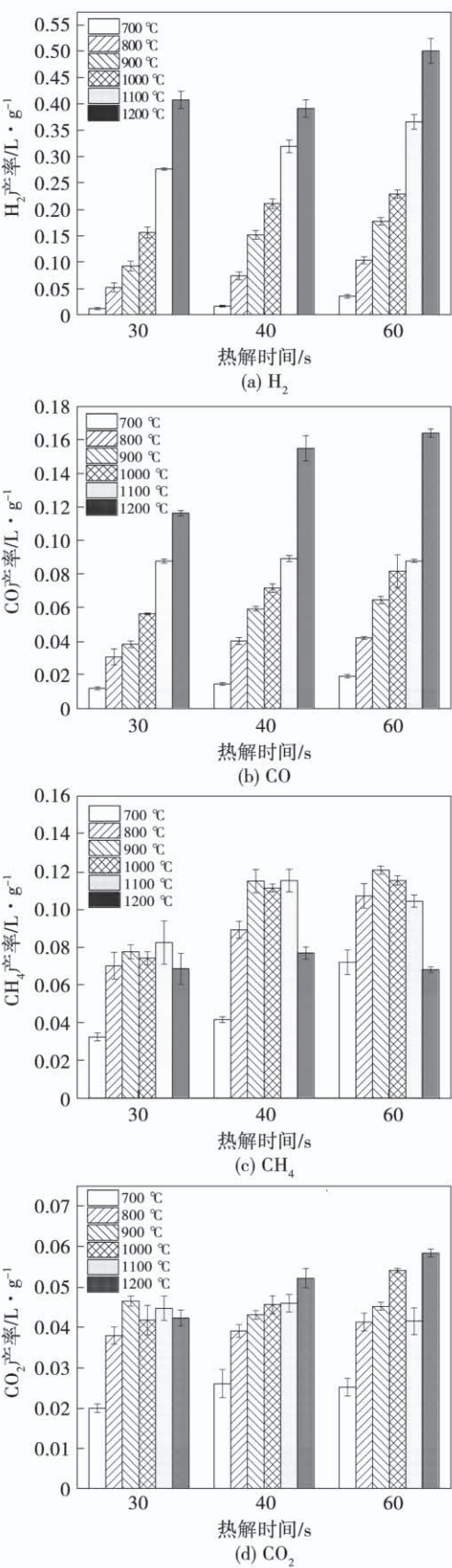


图 5 热解反应时间对组分气体产率的影响
Fig.5 Effect of pyrolysis reaction time on component gas yields

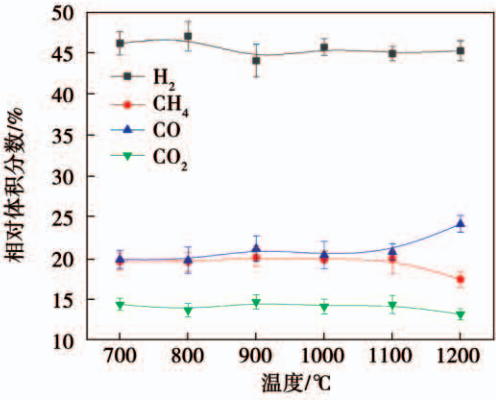
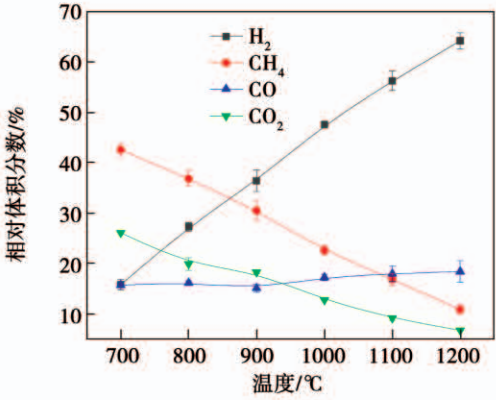


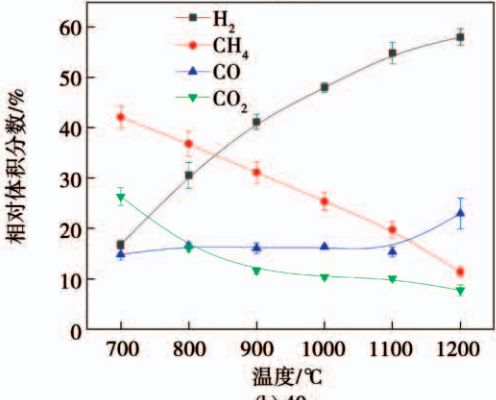
图 6 慢速热解气相对体积分数与温度的关系

Fig. 6 The relationship between relative volume fractions of slow pyrolysis gases and temperature

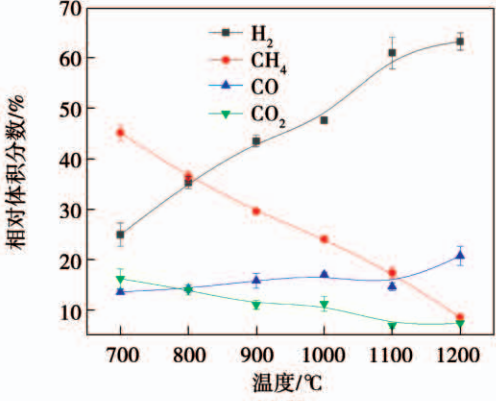
当热解时间不同时,快速热解的各组分气体相对体积分数的变化趋势基本相同。如图 7 所示,随着温度的升高, H_2 的相对体积分数会剧增,从 700 °C 时的 20% 左右增至 1 200 °C 时的 65% 左右,增加了约 45%; CO 的相对体积分数也会持续上升但是变化不剧烈,增加约 5%; CH_4 的相对体积分数变化几乎与 H_2 截然相反,即随着温度的升高剧烈下降,从 45% 左右剧烈下降到 10%,下降了 35%; CO_2 相对体积分数持续降低,减小了 10% ~ 20%。从中可以明显看出,当温度较低时, CH_4 是热解气的主要组分;热解时间较短时, CO_2 的占比比较 CO 和 H_2 约高 10%;而 CO 和 H_2 几乎占相同的比例。但随着热解时间的增加, H_2 的占比会逐渐增加,而 CH_4 以及 CO 的占比几乎不变, CO_2 的占比会逐渐低于 H_2 ,降到与 CO 水平相同。结合上文的实验结果可知,在温度较低时, CH_4 以及 CO_2 会较早地挥发出来,而 H_2 则会随着热解时间的增加而增加, CO 在低温下由于产量不高而不会有太大的变化。随着温度的增加, CH_4 比例快速下降,主要原因在于 H_2 的大量生成。从 800 °C 开始, H_2 逐渐成为了热解气的主要成分且占比越来越高。当温度达到 1 200 °C 时, CH_4 比例已经降到了与 CO_2 同等水平,约为 8%,而 CO 则较高,约占 20%, H_2 则达到 64% 的比例。



(a) 30 s



(b) 40 s



(c) 60 s

图 7 30,40 和 60 s 下快速热解气体相对体积分数与温度的关系

Fig. 7 The relationship between relative volume fractions of rapid pyrolysis gases and temperature for 30,40 and 60 seconds

2.5 有效还原气体组分

热解气中 NO 的有效还原成分为 H_2 、 CH_4 和 CO ,由图 8 可见,这 3 种气体在快速热解气中的总含量随着温度的升高而增加,从 700 °C 的 49% 增加到 1 200 °C 时的 80%。快速热解的有效还原气体产

率也随着温度的升高快速增加,从最初的 0.12 L/g 增加到 0.73 L/g,提升了 6 倍左右。这些结果说明,在高温下可以获得更高体积分数和更高产量的有效还原性气体,有利于提高水煤浆热解气利用率和作为添加剂的品质。

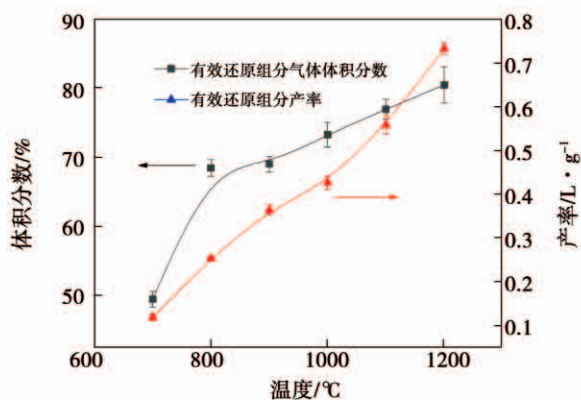


图 8 快速热解时还原组分气体体积分数与产率的变化

Fig. 8 Variations of volume fractions and gas yields of reducing component gases during rapid pyrolysis

3 结 论

(1) 快速热解条件下,随着温度的增加,水煤浆失重率持续上升,曲线呈 S 型,其中 900 °C ~ 1 100 °C 之间热解气体总产率对反应温度较敏感,而在 1 100 °C 以上,热解气体总产率较稳定,对实炉脱硝添加剂的供给和控制是有利的。

(2) 加热速率对产物的产率和分布规律影响较大。在慢速热解条件下,随着温度的升高,CO 的产率和相对体积分数增加, H₂、CH₄和 CO₂的产率先上升后下降,峰值出现在 1 100 °C 左右;CO 产率则持续升高。H₂和 CO₂的相对体积分数受温度影响不大,CH₄则减少了约 3%, CO 相对体积分数略微增加,提高了 5%。快速热解条件下,随着温度的升高, H₂和 CO 的产率持续增加,在 60 s 反应时间内 H₂的产率增加了约 0.45 L/g, CO 的产率增加了约 0.14 L/g; CH₄的产率呈先上升后下降的规律,在 900 °C 时产率最高为 0.12 L/g; CO₂产率在低温段有小幅上升之后几乎没有明显变化,只增加了 0.03 L/g 左右。H₂和 CO 的相对体积分数随着温度的升高而持续增加,从 700 °C 升高到 1 200 °C 时,分别增

加了约 45% 和 5%; CH₄和 CO₂的体积分数则随温度的升高而下降, CH₄下降 35% 左右较为剧烈,而 CO₂则下降了 10% ~ 20% 左右。

(3) 热解反应时间对 H₂和 CO 产率的影响较大。随着时间的增加, H₂和 CO 产率增加, CH₄和 CO₂的产率略有增加,变化不大。

(4) 水煤浆高温快速热解产物主要的还原性气体是 H₂、CO 和 CH₄。提高反应温度和延长反应时间,有利于生成更高体积分数和更高产率的有效还原性气体,可进一步提升水煤浆热解气作为脱硝还原添加剂的品质。

参考文献:

- [1] HEMBERGER R, MURIS S, PLEBAN K U, et al. Experimental and modeling study of the selective noncatalytic reduction of NO by ammonia in the presence of hydrocarbons [J]. Combustion and Flame, 1994, 99(3/4): 660 - 668.
- [2] YAO T, DUAN Y, YANG Z, et al. Experimental characterization of enhanced SNCR process with carbonaceous gas additives [J]. Chemosphere, 2017, 177: 149.
- [3] ALZUETA M U, ROJEL H, KRISTENSEN P G, et al. Laboratory study of the CO/NH₃/NO/O₂ system: implications for hybrid reburn/SNCR strategies [J]. Energy and Fuels, 1997, 11(3): 716 - 723.
- [4] YANG Mei, YU Juan, ZHANG Zhong-xiao, et al. Selective non catalytic reduction of flue gas in a circulating fluidized bed [J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects, 2016, 38(7): 921 - 927.
- [5] 曹庆喜. 气体添加剂对选择性非催化还原脱硝反应过程影响的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- CAO Qing-xi. Effects of gaseous additives for selective non-catalytic reaction of NO_x [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [6] 李德龙, 杨 梅, 于 娟, 等. 添加煤气化合成气的 SNCR 脱硝反应实验与机理研究 [J]. 电站系统工程, 2014(3): 5 - 8.
- LI De-long, YANG Mei, YU Juan, et al. Study on experiment and mechanism of selective non-catalytic reduction with coal syngas as an additive [J]. Power System Engineering, 2014(3): 5 - 8.
- [7] 董若凌, 周俊虎, 孟德润, 等. 再燃区水煤浆脱硝反应特性的试验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(4): 56 - 59.
- DONG Ruo-ling, ZHOU Jun-hu, MENG De-run, et al. Experimental investigation on NO_x reduction performance of coal water slurry in the reburning zone [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(4): 56 - 59.

- [8] 孟德润,赵翔,周俊虎,等.水煤浆热解过程中 HCN 和 NH_3 释放特性的分析[J].热能动力工程,2006(4):394-396,400,437-438.
- MENG De-run,ZHAO Xiang,HOU Jun-hu,et al. Analysis of release characteristics of HCN and NH_3 during pyrolysis of coal water slurry[J]. Thermal Power Engineering,2006(4):394-396,400,437-438.
- [9] 吴磊.水煤浆快速热解过程及热解焦气化特性研究[D].华东理工大学,2013.
- WU Lei. Study on the rapid pyrolysis and the char gasification reactivity of coal water slurry[D]. East China University of Science and Technology,2013.
- [10] 牛志刚.煤、水煤浆燃料氮析出特性和燃料型 NO_x 生成特性研究[D].浙江大学,2004.
- NIU Zhi-gang. Study on fuel-N and fuel- NO_x produce characteristics of coal and coal water slurry[D]. Zhejiang:Zhejiang University,2004.
- [11] 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(2):263-266.
- WANG Hui,JIANG Xiu-min,LIU Jian-guo,et al. Analysis of pyrolysis characteristics of coal water slurry under various heating rates[J]. Power Engineering,2007(2):263-266.
- [12] 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(3):19-22.
- WANG Hui,JIANG Xiu-min,LIU Jian-guo. Experimental study on comparison of coal water slurry and parent pulverized coal with Curie point pyrolyser[J]. Chemical Engineering,2007(3):19-22,2013.
- [13] DUNN R D,HOORNSTRA J,GRUELICH F A. Combustion of coal water slurries:evolution of particle size distribution for coals of different rank[J]. Fuel,1987,66:1139-1145.
- [14] 王鹏,文芳,步学朋,等.煤热解特性研究[J].煤炭转化,2005(1):8-13.
- WANG Peng,WEN Fang,BU Xue-peng,et al. Study on coal pyrolysis characteristics[J]. Coal Conversion,2005(1):8-13.
- [15] 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].浙江:浙江大学,2016.
- LI Chao. Research on bituminous coal pyrolysis behavior in a fluidized bed reactor and release of volatile products[D]. Zhejiang: Zhejiang University,2016.
- [16] 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 Zhi-feng,WANG Yi-fei,LI Ji-lin,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.
- [17] TSUBOUCHI N,ABE M,XU Chun-bao,et al. Nitrogen release from low rank coals during rapid pyrolysis with a drop tube reactor[J]. Energy & Fuels,2003,17:940-945.
- [18] LI Qian,WANG Zhi-hua,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.

(金圣迪 编辑)