

废轮胎流化床气化特性试验研究

缪麒, 池涌*, 肖刚, 朱文俐, 蒋旭光, 岑可法

(浙江大学热能工程研究所能源清洁利用国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 为了掌握废轮胎在流化床内的气化特性, 利用自行设计的小型流化床试验装置系统, 对废轮胎在不同的过量空气系数下在 400~700℃ 温度范围内进行了空气气化实验. 分析了废轮胎气化效率、固定碳转化率、气化气热值、产气量以及气化气成分随气化温度、过量空气系数的变化规律. 结果表明, 废轮胎气化的最佳运行条件为气化初始温度 700℃, 过量空气系数 $\alpha = 0.4$. 在此条件下得到的气化气成分主要包括 CH_4 、 CO 、 H_2 、 C_2H_6 和长链有机化合物, 此时的气化效率为 47.96%, 气化气低位热值为 4 804 kJ/m³.

关键词: 废轮胎; 流化床; 气化

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)05-1003-05

Gasification Characteristics of Waste Tires in Laboratory-Scale Fluidized-Bed Gasifier

MIAO Qi, CHI Yong, XIAO Gang, ZHU Wen-li, JIANG Xu-guang, CEN Ke-fa

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Institute for Thermal Power Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A laboratory-scale fluidized-bed gasifier was designed and used to investigate the characteristics of waste tires gasification. Granulated tires were gasified with different excessive air ratios at a temperature range of 400~700℃. The gasification efficiency, carbon conversion efficiency, heating value, yield and components of syngas were analyzed. Results showed that the optimum operation conditions were achieved when the gasification temperature was 700℃ and the excessive air ratio (EAR) was 0.4. A gaseous product, mainly containing CH_4 , CO , H_2 , C_2H_6 , and longer-chain hydrocarbon with a lower heating value (LHV) of about 4 804 kJ/m³, can be generated at the highest gasification efficiency of 47.96% under the optimum operation conditions.

Key words: waste tires; fluidized-bed; gasification

随着我国工业的发展和汽车使用的迅速增长, 废轮胎的产生已经达到了令人担忧的地步. 这些废轮胎带来诸如环境污染、卫生、审美和垃圾处理等许多问题. 目前, 大多数的废轮胎采用填埋或积存的方法处理, 占用大量有价值的土地空间. 只有一小部分废轮胎用于再利用和再循环, 例如: 用于沥青路面的填料, 或者作为生产二次产品、可回收橡胶、人造橡胶和防洪堤的原料等等. 除了以上一些应用, 废轮胎还可以被视为一种能量来源. 轮胎是由橡胶材料以 C_xH_y 的形式组成, 它含有很高的挥发份和碳含量, 热值比煤还高, 如果采用合适的技术, 它将成为一种很好的能量回收的材料.

焚烧^[1,2], 和煤或其他燃料混烧^[3~5], 热解^[2,6] 和气化^[7~10] 被认为是从废轮胎中回收能量的有效方法. 目前世界上只有很少关于实验室规模以及工业规模废轮胎气化方面的研究^[8~10]. 这说明废轮胎气化技术仍然处于发展阶段, 许多基本的机理还需要更深入的研究.

本研究对废轮胎在自行设计的小型流化床试验

装置系统中进行了一系列气化试验, 分析了废轮胎气化效率、固定碳转化率、气化气热值、产气量以及气化气成分随气化温度、过量空气系数的变化规律, 其目的在于通过试验研究, 掌握废轮胎在流化床内的气化特性.

1 材料与方法

1.1 实验装置

图 1 为试验采用的流化床气化装置示意图. 流化床主体采用内径为 30mm, 高 560mm 的不锈钢管, 炉膛采用电热丝加热及维持气化反应的初始温度, 加热过程及加热温度由温控装置控制和调节.

1.2 试验物料特性

试验采用的废轮胎原料的工业分析和元素分析如表 1 所示. 由于给料口尺寸较小, 因此需要对废轮

收稿日期: 2005-07-03; 修订日期: 2005-09-15

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(N59836210)

作者简介: 缪麒(1981~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为城市生活垃圾气化熔融技术.

* 通讯联系人, E-mail: chiyong@cmee.zju.edu.cn

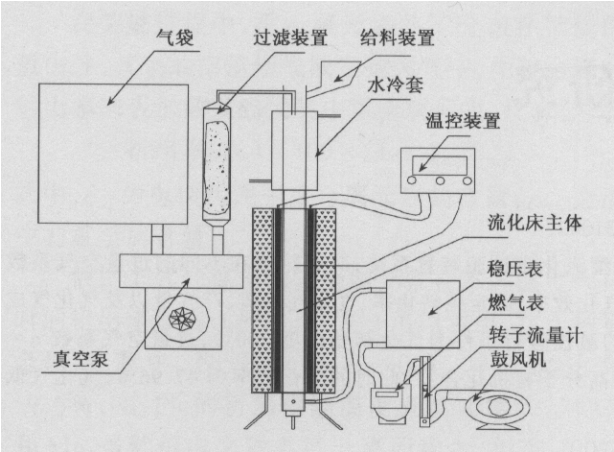


图 1 流化床气化炉
Fig. 1 Fluidized bed gasifier

表 1 废轮胎的工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of waste tire

原料	工业分析					元素分析				
	M _{ad} / %	A _{ad} / %	V _{ad} / %	FC _{ad} / %	热值/ kJ•kg ⁻¹	C _{ad} / %	H _{ad} / %	N _{ad} / %	S _{ad} / %	O _{ad} / %
废轮胎	1.09	4.95	73.74	20.22	37 059	81.46	6.84	2.27	1.38	2.01

品被过滤装置收集,不可冷凝气体产品用气袋收集。
产生的气化气体采用意大利生产的 Trace GC2000 气体分析仪进行气体分析。

2 结果与讨论

2.1 气化气成分体积含量与气化温度和过量空气系数的关系

气化的目的是生产适合工业应用的可燃性气体,在实际应用中,知道气化气的成分是十分重要的.废轮胎气化产生的产品气的主要成分为:CO₂、CO、N₂、H₂、CH₄、C₂~C₈ 气体等(其中 N₂ 为气化介质空气中的氮,未参与气化反应).本试验设计的流化风量在 0.5~1.6m³/h 之间,选用流化风量 1.3m³/h.废轮胎的气化反应机理可以由以下反应来表达^[11]:

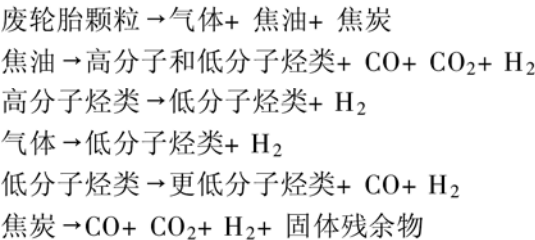


图 2 给出了不同温度下废轮胎气化气组分随过量空气系数的变化规律(由于 N₂ 含量较高,为了不影响其他气体在图中的直观性,将 N₂ 从图中移除).从图 2 可以看到,在 400℃ 时烃类气体的含量几乎都为 0,而只产生少量 CO 气体,这可能是由于

胎进行破碎处理,选择粒径在 2mm 左右。

1.3 试验方法

流化床的载热流化物料为 0.250~0.355mm 的石英砂,床层高度大约 10cm,实验采用空气作为流化介质,流化风速约为 0.51m/s.过量空气系数 α 为 0.2~0.8.

流化床的热源一部分来自电加热炉,并配有温控仪,控制气化反应温度在 400~700℃ 范围内;另一部分来自废轮胎气化反应产生的热量。

经过破碎的废轮胎颗粒从流化床上方的给料装置连续给入,给料速度为 2~12g/min,在流化风速不变的情况下,通过调节给料速度来控制过量空气系数为 0.2~0.8.反应产物中的固体物质和冷凝产

没有达到废轮胎气化所需要的最低温度.随着温度的升高,可燃性气体特别是烃类气体的含量明显提高,这主要是因为较高的温度有利于挥发份的析出以及焦油的裂解,从而产生较多的低分子烃类气体和 H₂.而在温度不变的情况下(以 700℃ 为例),随过量空气系数的升高,可燃性气体含量降低,而 CO₂ 的含量先升高后降低.这主要是因为较高的过量空气系数使得气化气中的 N₂ 含量较高,而且有更多的 CO 与空气中的 O₂ 反应转化为 CO₂.

2.2 过量空气系数及气化温度对气化气热值的影响

气化气热值是反映气化过程进行好坏的一个重要参数,图 3 给出了气化气热值与过量空气系数和 气化温度的关系.下面就气化气热值与过量空气系数和 气化温度之间的关系展开讨论。

(1) 过量空气系数对气化气热值的影响 过量空气系数对气化气热值有着重要的影响.由图 3 可以看到,在初始气化温度为 400~700℃ 的范围内,气化气热值随 α 的增加而降低,这主要是因为废轮胎本身的热值较高,而本实验是通过改变给料速度来控制过量空气系数的;而且由于空气的稀释作用,α 越大, O₂ 的含量就越多,这样生成的 CO、H₂ 和 CH₄ 等可燃气体参与燃烧反应就增加了,从而导致 气化气热值的降低。

(2) 气化反应温度对气化气热值的影响 气化反应温度是影响气化气热值的另一重要因素.由图

3 可以看到, 在 α 为 0.2~0.8 的范围内, 气化气热值随温度的升高而有明显增加, 这说明温度越高越有利于废轮胎的气化反应的进行, 有利于挥发份的

析出和焦油的裂解, 产生更多的可燃性气体, 从而增加了气化气热值. 在气化初始温度为 700 °C, $\alpha=0.2$ 的时候, 气化气的热值达到最大值.

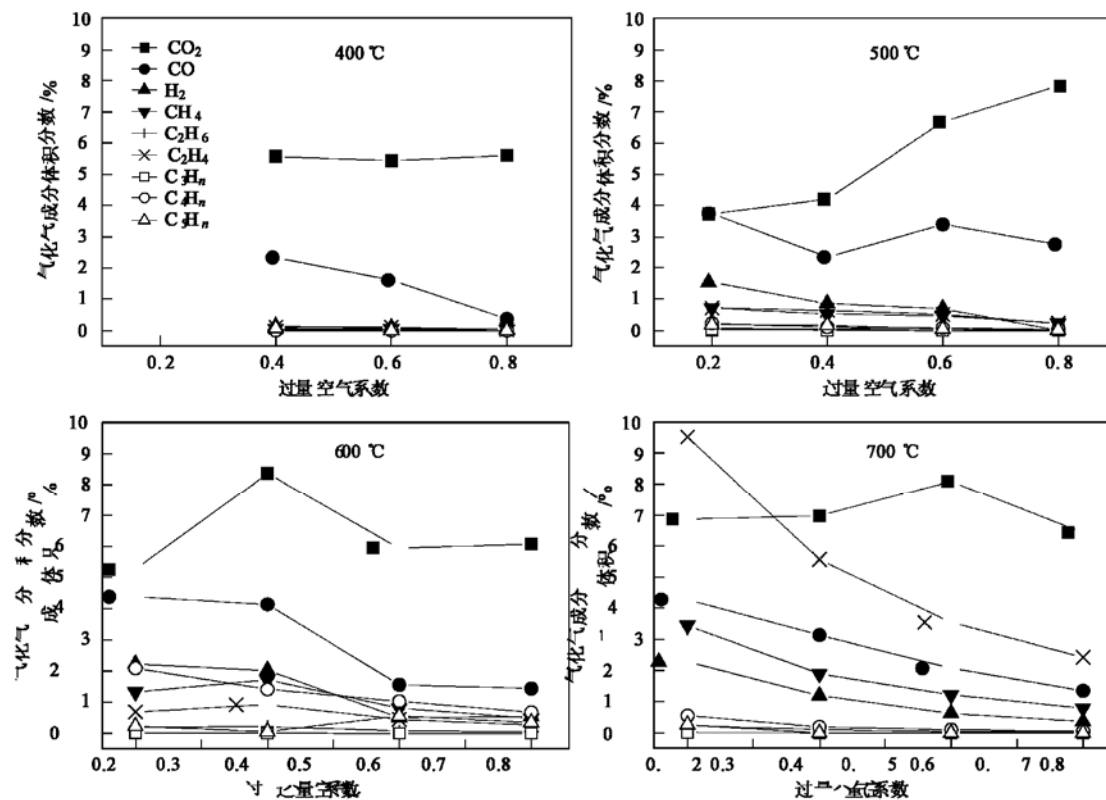


图 2 气化气组分变化曲线

Fig. 2 Percentage of components in syngas of waste tire gasification at different temperature and EAR

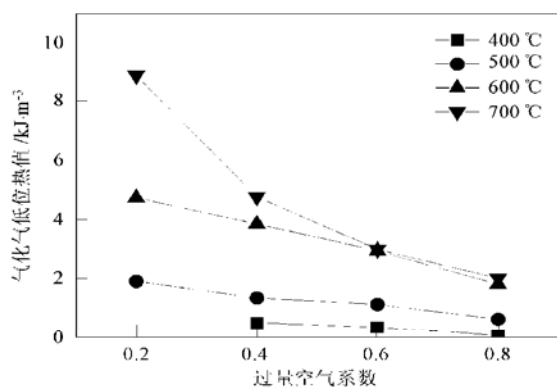


图 3 气化气低位热值变化曲线

Fig. 3 LHV of waste tire syngas from gasifier at different temperature and EAR

2.3 过量空气系数和气化温度对气化效率的影响

气化效率是指气化气热值占原料热值百分比含量, 这个概念表征了原料在整个气化反应中转化为

气体的能力, 能较好地反映原料的气化效果. 下面讨论不同的气化温度、不同的过量空气系数下气化效率的变化规律.

气化效率随过量空气系数和反应温度的关系如图 4 所示. 在气化初始温度为 400~700 °C 的范围内, 气化效率随温度的升高而升高. 温度继续升高到 700 °C, 气化效率的升高已经变得不是很明显, 其中 $\alpha=0.6$ 和 0.8 时, 从温度 600 °C 上升到 700 °C, 气化效率几乎没有提高. 由此可以看出, 过高的温度不一定获得很好的气化效果.

另一方面, 在温度一定的情况下, 气化效率随 α 的增大先升高后降低, 400 °C 和 500 °C 时气化效率均在 $\alpha=0.6$ 时达到峰值, 600 °C 和 700 °C 时气化效率在 $\alpha=0.4$ 时达到峰值.

气化效率是反映气化过程进行好坏的一个重要参数, 从上面的分析可以得出下面的结论: 当气化初始温度在 700 °C 左右, 过量空气系数为 0.4 时, 废轮

胎气化效果最好, 气化效率达到 47.96%。

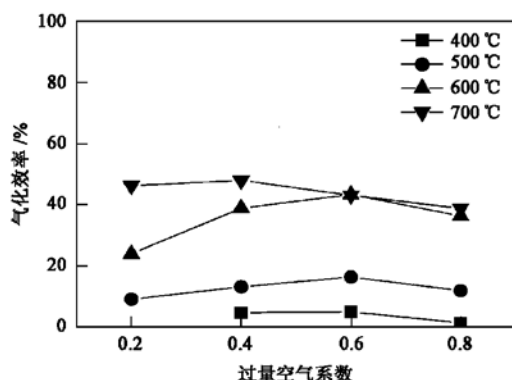


图 4 气化效率变化曲线

Fig. 4 Gasification efficiency of waste tire at different temperature and EAR

2.4 固定碳转化率与过量空气系数及温度的关系

固定碳转化率是指单位质量废轮胎固定碳的损失量与单位质量废轮胎固定碳含量的比值, 是表征废轮胎在流化床内气化程度好坏的一个重要参数. 如图 5 所示, 固定碳转化率随过量空气系数的升高基本呈现升高的趋势, 这说明过量空气系数的增加有利于固定碳的转化.

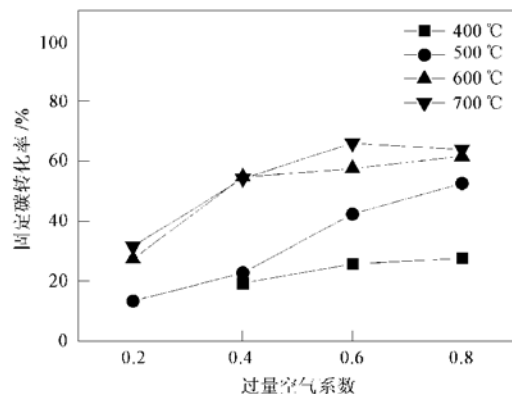


图 5 固定碳转化率变化曲线

Fig. 5 Carbon conversion efficiency of waste tire gasification at different temperature and EAR

另一方面, 气化初始温度在 400~ 600 °C 的范围时, 固定碳转化率受温度影响十分明显. 温度越高, 固定碳转化率越高, 这与气化气低位热值以及气化效率与温度的关系是类似的. 而气化初始温度为 600~ 700 °C 时, 固定碳转化率变化不大, 这也说明了过高的温度不一定能获得很好的气化效果. 在气化初始温度为 700 °C, $\alpha = 0.6$ 时固定碳转化率达到最

大值, 约为 65%。

2.5 产气率与过量空气系数及温度的关系

气化反应产气率是另一重要参数, 它是指单位时间内生成的气化气体积量 (m^3) 与给料量 (kg) 的比值, 反映物质由固体转化为气体的能力. 废轮胎在流化床内气化的产气率主要受到过量空气系数的影响, 另外, 温度的升高对产气率也有一定的促进作用. 图 6 为产气率随过量空气系数及温度的变化曲线.

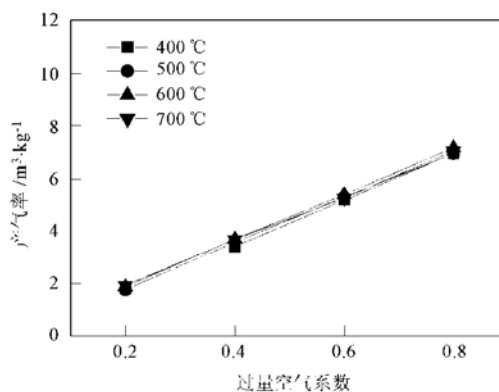


图 6 产气率变化曲线

Fig. 6 Yield of waste tire gasification at different temperature and EAR

3 结论

(1) 气化气中含有的气体成分较多, 主要有: CO_2 、 N_2 、 CH_4 、 CO 、 H_2 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_3H_8 、 C_4H_{10} 、 C_5H_{12} 等, 且可燃气体成分的体积含量占总体积的 20% 左右.

(2) 温度对气化气热值、气化效率、固定碳转化率、产气率的影响都是积极的, 这说明较高的温度有利于废轮胎在流化床内的气化, 但过高的温度对气化的促进作用明显减弱. 在本实验条件下, 气化初始温度为 700 °C 对废轮胎的气化是比较适宜的.

(3) 气化气热值随过量空气系数的增大而降低; 随气化温度的升高而增加. 当气化初始温度为 400 °C 时, 气化效果不好; 在 400~ 500 °C 时, 所得气化气热值偏低.

(4) 对于废轮胎的气化, 气化初始温度 700 °C, 过量空气系数 $\alpha = 0.4$, 废轮胎的气化效果最好. 此时的气化效率为 47.96%, 气化气低位热值为 4 804 kJ/m^3 .

(5) 产气率随气化温度的升高略有增加; 在气化

温度为 400~ 700 ℃的范围内, 随过量空气系数的增加而以近似线性规律升高. 产气率最高为 7.05 m³/kg, 此时气化气流量为 0.85m³/h.

参考文献:

- [1] Atal A, Levendis Y A. Comparison of the combustion behavior of pulverized waste tires and coal[J]. Fuel, 1995, **74**: 1570~ 1581.
- [2] Levendis Y A, Atal A, Carlson J, *et al.* Comparative study on the combustion and emissions of waste tire crumb and pulverized coal[J]. Environ. Sci. Technol., 1996, **30**: 2742~ 2754.
- [3] Kim J R, Lee J S, Kim S D. Combustion characteristics of shredded waste tires in a fluidised bed combustor[J]. Energy, 1994, **19**: 845~ 854.
- [4] Tang Y, Curtis C W. Thermal and catalytic co-processing of waste tires with coal[J]. Fuel Processing Technol., 1996, **46**: 195~ 215.
- [5] Leung Y C, Wang C L. Kinetic study of scrap tire pyrolysis and combustion[J]. J. Anal. Appl. Pyrolysis, 1998, **45**: 153~ 169.
- [6] Leung Y C, Wang C L. Kinetic modeling of scrap tire pyrolysis[J]. Energy Fuel, 1999, **13**: 421~ 427.
- [7] Lee J M, Lee J S, Kim J R, *et al.* Pyrolysis of waste tires with partial oxidation in a fluidised bed reactor[J]. Energy, 1995, **20**: 969~ 976.
- [8] Lee J S, Kim S D. Gasification kinetics of waste tire char with CO₂ in a thermobalance reactor[J]. Energy, 1996, **21**: 343~ 352.
- [9] Raman K P, Walawender W P, Fan L T. Gasification of waste tires in a fluidized bed reactor[J]. Conserv. Recycl., 1981, **4**: 79~ 89.
- [10] Wey M Y, Liou B H. The autothermal pyrolysis of waste tires[J]. J. Air Waste Manage., 1995, **45**: 855~ 863.
- [11] Leung D Y C, Wang C L. Fluidized bed gasification of waste tire powders[J]. Fuel Processing Technology, 2003, **84**: 175 ~ 196.