

# The Experimental Study on MSW Oxygen-Enriched Pyrolysis

Haoran Yuan<sup>1</sup>, Kobayashi Noriyuki<sup>2</sup>, Huafang Guo<sup>1</sup>, Hongyu Huang<sup>2</sup>, Yong Chen<sup>3,\*</sup>

1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China,

2. Japan Nagoya University EcoTopia Science Institute, 464-8603 Nagoya University, Nagoya Japan,

3. Guangzhou division Academy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China

**Abstract:** Oxygen-enriched pyrolysis technology for the treatment of municipal solid waste (MSW) was proposed in this paper. Its advantages with respect to air pyrolysis, such as high efficiency, lower heat loss and emissions, have been described based on the mechanism analysis and thermodynamic calculations. Suitable range of equivalence ratio (ER) was also presented. Effects of oxygen concentration, equivalence ratio and moisture content on gas products and their heat values were investigated and the experimental results were compared with the theoretically calculated results. It was found that with the increase of oxygen concentration the gas yield and heat values decrease, and with the increase of ER, the content of CO and CH<sub>4</sub> decrease, while the content of H<sub>2</sub> varied from increase into decrease with ER=0.27 as the turning point. When the ER exceeded 0.30, the pyrolysis controlled reaction changed into the combustion controlled reaction. The most suitable ER for oxygen-enriched pyrolysis was the range from 0.2 to 0.3 and the moisture of MSW should be controlled in the range from 15% to 25% during the oxygen-enriched pyrolysis and gasification process.

Therefore, the choice of ER was very important in oxygen-enriched pyrolysis process. Because it could not only control the heat values of gas products but also control the gas products components directionally. In addition gas product quality could be improved owing to the increase of oxygen concentration within a certain ER range.

**Keywords:** MSW; oxygen-enriched; pyrolysis

## 城市固体废弃物富氧热解气化试验研究

袁浩然<sup>1</sup>, 小林敬幸<sup>2</sup>, 郭华芳<sup>1</sup>, 黄宏宇<sup>2</sup>, 陈勇<sup>3,\*</sup>

1、中国科学院广州能源研究所, 广州 510640;

2、名古屋大学环境友好型社会研究所, 日本, 名古屋, 464-8603;

3、中国科学院广州分院, 广州 510070

**摘要:** 本文提出了处理固体废弃物 (MSW) 的富氧热解气化技术路线。通过对 MSW 富氧热解气化机理分析及热力学计算, 得出了富氧热解气化相对于空气热解气化具有高效、低损耗、排烟少等优点的结论, 并给出了比较适宜的当量比范围。考察了氧浓度、当量比、水分含量等对气体产物、气体热值等的影响, 并将试验结果与理论计算结果进行了比较。通过研究可知, 富氧量的增加可以大幅度增加可燃气产量, 提高气体产物热值; 随着当量比的增加 CO 和 CH<sub>4</sub> 的含量递减, 而 H<sub>2</sub> 的含量由增变减, 在当量比 0.27 时出现明显的转变点; 当当量比大于 0.30 后, 反应由热解控制向燃烧控制转变, 因此, 当量比 0.2-0.3 是富氧热解气化最适合的范围; 富氧气化过程中 MSW 的水分应控制在 15%~25%。

因此, 在富氧热解气化过程中, 当量比的选择非常重要, 不仅可控制气体产物热值, 还可定向控制产物组分, 在一定当量比范围内, 增加氧浓度有利于提高气体产物的品位。

**关键词:** 城市固体废弃物; 富氧; 热解气化

### 引言

固体废弃物包括一般性固体废弃物和极具危害性

固体废弃物两种<sup>[1]</sup>。本文主要针对一般性固体废弃物中的城市固体废弃物(municipal solid waste, MSW),

指在城市居民生活中或为城市日常生活提供服务的活动中产生的固体废弃物或半固体废弃物甚至液体废弃物。

处理固体废物的方式大致分为填埋、部分回收、部分发酵和热处置等几种<sup>[2]</sup>。由于垃圾热处置的效率高、减容率大，部分能源可利用，又无需占用大量土地资源，尤其是其热值不断提高，许多发达国家都采用热处置法处理固体废弃物。热处置法中又分为焚烧法和热解气化法，前者技术较为成熟，后者则是近几年发展起来的新技术。

关于 MSW 热处置法的研究已很多，取得了一些很有价值的理论和方法。Guo<sup>[3]</sup>等对 MSW 燃烧动力学研究发现：复杂的垃圾可燃物归纳成纤维类物质和聚合物类物质两大类，建立了 MSW 热解燃烧数学模型，并提出热解燃烧可抑制二恶英等的生成理论。Galvagno<sup>[4]</sup>和 Dai<sup>[5]</sup>等研究了废轮胎的热解转化机理及工艺。李<sup>[6]</sup>等通过对生活垃圾焚烧飞灰重金属特性分析，提出了重金属在燃烧过程的迁移规律和控制方法。Buekenws<sup>[7]</sup>等研究了 MSW 燃烧过程二恶因的生成机理和控制方法。另外，Wang<sup>[8]</sup>和 Mclachlan<sup>[9]</sup>分别研究了 MSW 衍生燃料和农业废弃物的燃烧激励和特性。但是，以上研究大多集中在燃烧过程或针对单一组分上，今年，由于 MSW 热解气化可将尺度、物性、热值不均的混合固体废弃物转化成均匀混合、用途多样化的可燃气体，并且具有能源回收率高、污染小等优点，因而热解气化技术受到广为关注。有关热解气化理论和实验研究受到国内外的专家学者的重视<sup>[10-12]</sup>，并取得一系列研究成果，但离实际应用还有一段距离。富氧燃烧技术，由 Horne 和 Steinburg 于 1981 年提出<sup>[13]</sup>，具有燃烧充分、大幅减少排烟量、高效等优点。富氧燃烧技术目前的主要研究应用于电站锅炉、磁流体发电技术、燃料电池、IGCC 及联合能源生产系统，燃烧对象有煤粉、天然气及焦炉气等。国内学者张<sup>[13]</sup>和刘<sup>[14]</sup>等分别研究了流化床富氧燃烧技术和城市生活垃圾富氧燃烧特性等。

单纯的热解气化或燃烧仍存在气体中惰性组分含量高、热值低、排烟量大等问题，单纯的富氧燃烧技术不能从根本上解决固相（非均相）燃烧控制难度大、易产生二次污染等问题。为解决上述问题，本文提出了 MSW 富氧热解气化的技术路线，探索 MSW 富氧热解气化的机理，并进行相关系统性研究，为 MSW

转化为多用途的可燃气提供理论和实验依据。

## 1 实验系统和实验材料

### 1.1 实验系统

研究用的实验主要装置为处理量为 5kg/h 的小型下吸式气化炉，实验系统如图 1 所示：

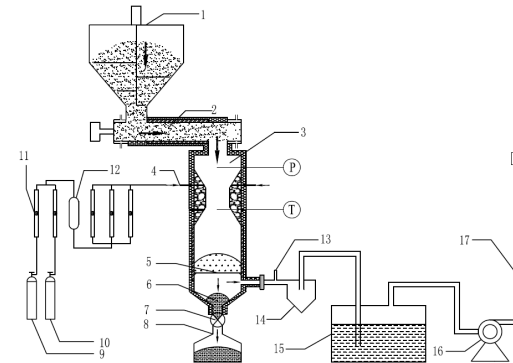


Fig 1 MSW Experimental system

图 1 MSW 实验系统

- 1.料仓；2.螺旋进料器；3.气化炉主体；4.气化段炉体；5.炉排；6.灰烬；7.排灰阀；8.接灰桶；9.灌装氧气；10.灌装氮气；11.气体流量计；12.混合罐；13.采样口；14.除灰器；15.水洗箱；16.罗茨风机；17.排气管；T.测温点；P.测压点

实验中通过调节氧气配比、流量、氧气和可燃物的当量比以及物性进行 MSW 富氧热解气化实验研究，并对气体产物进行分析。

### 1.2 实验材料

为了使所做的试验具有普遍性以及工业适用性，本文使用安徽芜湖南陵县垃圾回收站中的 MSW 作为原料。MSW 经过前处理，水分经过挤压装置压榨、烘干等预处理过程，达到了部分干化的效果，然后送入 MSW 热解气化系统中。

所取的 MSW 为  $\rho = 520\text{kg/m}^3$ 、形状不规则的混合物，经过初筛后，主要成份有塑料、纸、布、草木、白塑料、厨余等，元素分析见表 1，其中对于干基可燃组分的元素分析我们没有将灰分列入，其表中组分总和与 1 之差为灰分的含量。

Tab 1 Elemental analysis of experimental materials

表 1 实验材料元素分析

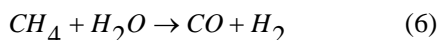
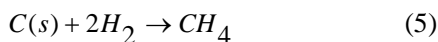
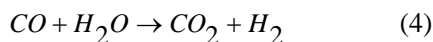
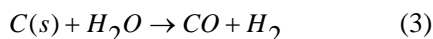
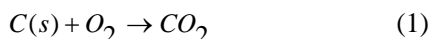
	干基可燃组分元素分析	垃圾干基元素分析	应用基
C(%)	43.79%	29.25%	13.06%
H(%)	5.87%	3.92%	1.75%
N(%)	0.60%	0.40%	0.18%

S(%)	0.39%	0.26%	0.12%
O(%)	21.53%	14.38%	6.42%

## 2 MSW 富氧热解气化机理分析

### 2.1 MSW 富氧热解气化反应

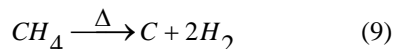
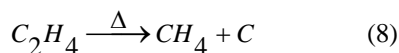
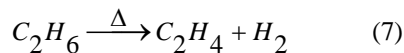
MSW 主要组成元素为 C、H、O，具有 N、S 等元素含量较少，挥发份、固定碳含量较高，在热转化过程中 N、S 元素所形成的污染排放量相对较少等特点，这些特点都决定了 MSW 较为适宜气化。MSW 富氧热解气化整个过程可分为四步：干燥、热解、氧化和还原，化学反应步骤如下<sup>[10]</sup>：



MSW 中的有机成分在干馏层内干馏产生部分燃气  $C_nH_m$ （主要成分  $CH_4$ ），还原层的物料碳层主要发生水煤气反应及从氧化层而来的  $CO_2$  的还原反应，氧化层内为氧气与垃圾碳的氧化反应，所以燃气成分主要为  $CO$ 、 $H_2$ 、 $C_nH_m$  等<sup>[11]</sup>。MSW 在干燥区内与热解设备的高温壁面以及其他反应区生成的热气体产物进行干燥及脱水，为进一步的大分子裂解环节做准备<sup>[12]</sup>。

热解区是 MSW 热化学反应较强的一个区域。热解过程的所需热量主要由部分可燃物氧化反应提供。

热解反应主要包括裂解、脱氢等反应



热解过程中，MSW 中有机物化合键断裂，产生小分子物质及固体残渣。聚合物在高温条件下可加速聚合物分子的运动，使其化学键断裂，产生自由基。这种极不稳定的自由基又与周围各类分子或自由基发生反应，使之断裂形成更多的自由基，从而引起聚合

物的降解和交联。结合能较低的键容易在受热时断裂，对应的元素或基团是结构上的弱点，成为热解的活跃点<sup>[15,16]</sup>。热解反应最终使 MSW 转化为各种含碳物质，包括：碳原子为 1~5 的烃类、氢、CO 为主的可燃性气体；碳原子在 5 个以上的烃类、焦油类物质；固体碳及灰分<sup>[17,18]</sup>。

### 2.2 MSW 富氧热解气化相关理论计算

MSW 富氧热解气化理论温度的计算是通过将气化过程中的燃烧产物发热焓值相加后反查得出，而实际的炉膛温度会比理论计算温度低些<sup>[19]</sup>。在使用空气作为氧化剂时，过量冷空气进入炉膛以及空气中含量 79% 的惰性气体氮气使炉膛温度降低，增加了热损，同时产生大量排烟，气化产物中还存在较多的未参加反应的  $N_2$  以及未完全反应而被带出的  $O_2$ ，而富氧热解气化技术由于氧化剂采用的是富氧气体，惰性组分少，因此，排烟量小，反应充分，所产生的气化产物中  $N_2$  含量少，相对于空气热解气化热损失少。而在计算反应器内的输入热量时，一般是由燃料带入的低位发热值、外热源加热氧化剂带入的热量和喷入炉膛内的蒸汽带入的热量三部分所构成，计算公式如下所示。

$$t = (Q_d^y + C_r t_r + C_k t_k L_a) / C_y V_y \quad (10)$$

式中  $Q_d^y$  - 燃料低位发热量，kJ/kg( $m^3$ )

$C_r$  - 燃料热容量，kJ/(kg·°C)、

$C_k$  - 氧化剂气体热容，kJ/(Nm<sup>3</sup>)

$C_y$  - 气化产物的热容量，kJ/(Nm<sup>3</sup>·°C)

$t$  - 反应温度，°C

$t_r$ ,  $t_k$  - 燃料、氧化剂气体的温度，°C

$V_y$  - 气化生成的烟气量，m<sup>3</sup>

$L_a$  - 单位燃料氧化剂气体耗量，m<sup>3</sup>/kg( $m^3$ )

从式(10)中可以看出：富氧热解气化时  $V_y$  要小得多，则分数值大。可见富氧热解气化有利于反应进行及节能。

对于反应过程中热损失的计算，我国现行热力计算标准对气体产物热损失的计算是采用以下公式计算<sup>[20]</sup>。

$$(I_{py} - \alpha_{py} I_{ik})(100 - q_4) / Q_{dw} \quad (11)$$

式中： $I_{py}$  - 气化产物热焓

$\alpha_{py}$  — 出口处过量空气系数

$I_{ik}$  — 冷空气焓

$q_4$  — 不完全气化损失

$Q_{dw}$  — 燃料低位发热量

从式中可以看出空气热解气化产物热焓中包含了空气中 79% 的氮气的热焓，而氮气不参加反应，只造成热损。富氧热解气化输入的是氮含量极低的富氧气体，因此，由于氮气造成的热损比空气作为氧化剂时小得多，达到节能的目的。

### 2.3 MSW 富氧热解气化过程热力学计算

在热力学中处理复杂体系的化学平衡较常用的是平衡常数法和 Gibbs 最小自由能法，本文采用的是 Gibbs 最小自由能法，即：在等温等压条件下以体系的 Gibbs 自由能最小作为平衡的判据，在一定温度、压力下，空气、MSW 等原始反应物质加入实验装置中进行各种复杂化学反应，将整个装置看作封闭的理想反应体系，当体系达到化学平衡态时，整个体系的 Gibbs 自由能为最小<sup>[21,22]</sup>。主要计算式为：

$$\mu_i = \left[ \frac{\partial G}{\partial n_i} \right]_{n_i \neq n_j} \quad (12)$$

其中  $\mu_i$  为组份  $i$  的化学势能， $G$  为吉布斯自由能， $n_i$  为  $i$  组份的物质的量，将式(12)进行变换，则吉布斯自由能最小表达式为：

$$\text{Min}(G) = \text{Min}(\sum G_i) = \sum (n_i \mu_i) \quad (13)$$

在计算过程中，各类物质的参数参照热力学数据参考手册<sup>[23,24]</sup>，计算过程中使用的化学反应式参照公式(1)-(6)，系统的温度以及压力为设定值，其中由于实际设备是在常压下工作，所以设定压力为  $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ ；反应温度可根据热力学第一定律<sup>[25]</sup>进行计算：

$$Q_{\text{system}} = H_P - H_R \quad (14)$$

其中  $H_P$  为生成物热焓， $H_R$  为反应物热焓，在反应过程中除 MSW 本身具有燃烧放热效应以外，其他物质都是不同终温下热焓的变化（在这里我们认为反应过程温度均一），而 MSW 放出热量可以通过其低位热值进行计算，从而最终求得反应温度。在这里我们主要计算当量比和氧气浓度的改变对气体产物成份的影响。

计算时分别取氧气含量为 20%、40%、60%、80%、100%，当量比（ER，通入氧气量占物质完全燃烧所需氧气的比例）选择在 0.20~0.40 之间。计算结果如图 2、3 所示。

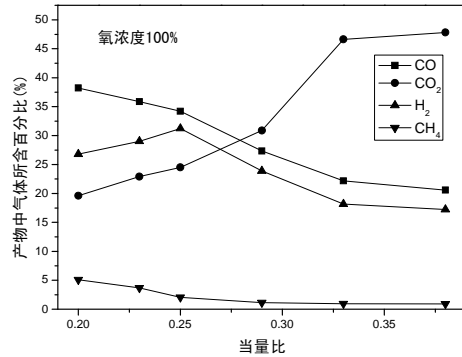


Fig 2 Effect of ER on composition of the gas products

图 2 当量比对产物组成的影响

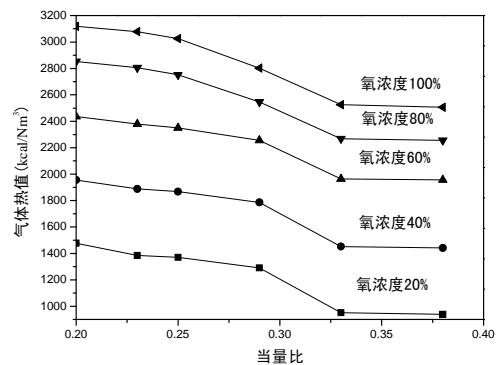


Fig 3 Effect of oxygen concentration on the heating values of the gas products

图 3 氧气浓度对产物热值的影响

图 2 表示的是在纯氧条件下，当量比变化与气体产物组成变化的关系。由图可知，随着当量比的增加 CO 和 CH<sub>4</sub> 的含量递减；H<sub>2</sub> 的含量增加，在当量比 0.25 时达到最大值，然后开始下降；CO<sub>2</sub> 的含量缓慢上升，当当量比大于 0.25 时急速增加而当量比大于 0.35 后，各类气体的成分变化趋缓。产生这种结果的主要原因是因为随着当量比的增加，反应由热解控制向燃烧控制转变，而当量比 0.25 前后是转变点。图 3 比表示的是当量比和氧浓度变化与气体产物热值变化的关系。由图可知，随着富氧程度的提高，气体产物热值提升较快，这是可燃气体含量增加以及氮气含量减少共同作用的结果；随着当量比的增加，气化产物热值降低，尤其是当量比大于 0.30 后，气体产物热值快速下降。



这是由于当量比的增加，气体产物中二氧化碳含量增加以及 CO 和 CH<sub>4</sub> 含量减少所致，尤其是当量比大于 0.25 这一转变点后，H<sub>2</sub> 浓度也开始下降，导致热值快速下降。

综合上述理论计算和分析，选择当量比 0.20~0.30 之间有利于热解，而且通过控制当量比可定向控制气体产物中气体成分。氧含量的增加有利于热值的提高，但随着氧浓度的增加，制氧成本和能耗也在提高，因此，在实际应用过程中需找到平衡点。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 不同当量比下氧气浓度对产物的影响

通过热力学计算得知，当量比大于 0.30 时反应过程中燃烧程度加深，而当量比过小时，供给热解反应的能量不足，反应慢而不充分，导致气体产量较少，因此我们在实际实验过程中选取当量比 0.23~0.29。图 4 至 7 为不同当量比下氧气浓度对产物的影响。

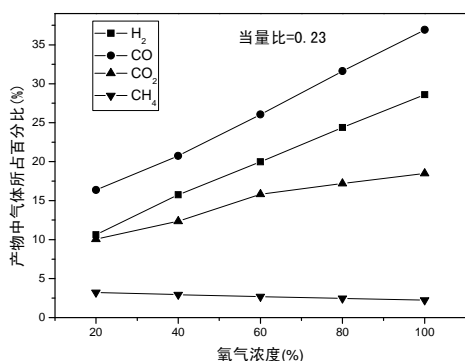


Fig 4 Effect of oxygen concentration on composition of the gas products (ER=0.23)

图 4 ER=0.23 时氧气浓度对产物组成的影响

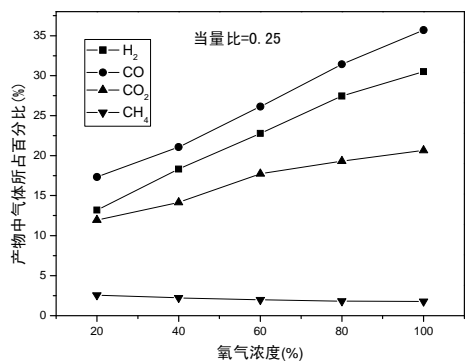


Fig 5 Effect of oxygen concentration on composition of the gas products (ER=0.25)

图 5 ER=0.25 时氧气浓度对产物组成的影响

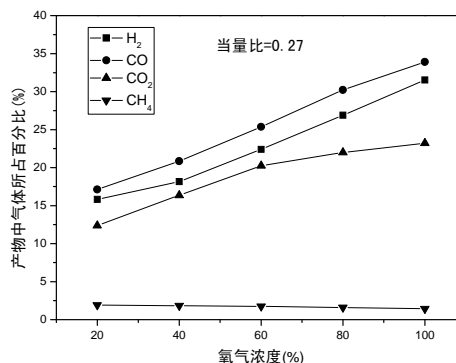


Fig 6 Effect of oxygen concentration on composition of the gas products (ER=0.27)

图 6 ER=0.27 时氧气浓度对产物组成的影响

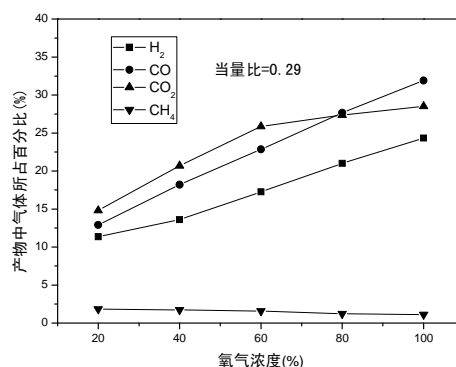


Fig 7 Effect of oxygen concentration on composition of the gas products (ER=0.29)

图 7 ER=0.29 时氧气浓度对产物组成的影响

由图 4 至 7 可见，提高氧气浓度，二氧化碳的增加趋势变缓，这是由于氮气的减少和二氧化碳绝对值量减小所致；产物中 H<sub>2</sub>、CO 所占的比例提升较快，是由于减少氧化剂中 N<sub>2</sub> 的含量，必然增加产物中其他气体所占的比例，其次是因为当氧量增加，反应温度上升，一部分原有的大分子物质在高温条件下，产生了 H<sub>2</sub> 和 CO。由此可见，在 MSW 热解气化过程中，氧量的增加有利用反应的进行，可以大幅度提高产物的品质。实验结果与上述理论计算结果基本一致。

#### 3.2 相同氧气浓度下当量比对产物气体成份的影响

在不同富氧量的情况下，当量比对气体产物的影响，见图 8 至 11：

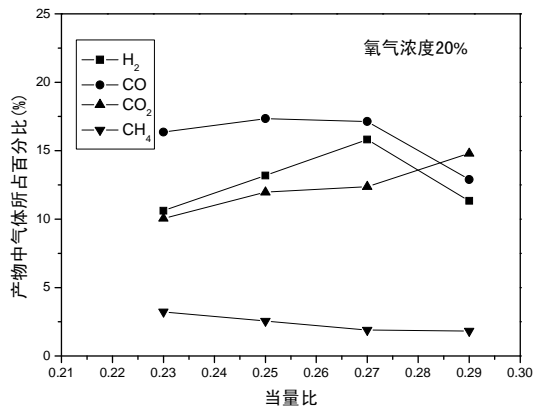


Fig 8 Effect of ER on composition of the gas products (oxygen concentration of 20%)

图 8 氧气浓度 20% 时 ER 对产物组成的影响

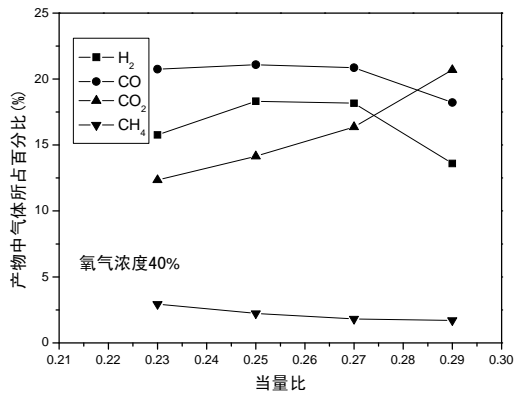


Fig 9 Effect of ER on composition of the gas products (oxygen concentration of 40%)

图 9 氧气浓度 40% 时 ER 对产物组成的影响

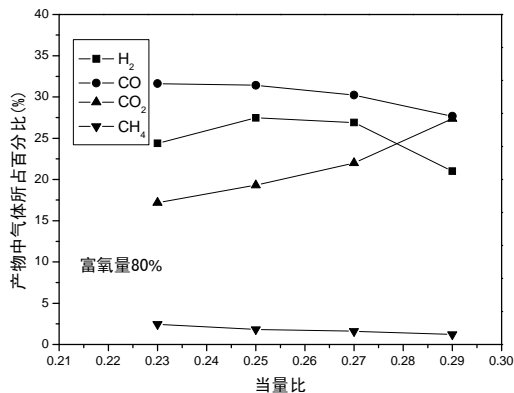


Fig 10 Effect of ER on composition of the gas products (oxygen concentration of 80%)

图 10 氧气浓度 80% 时 ER 对产物组成的影响

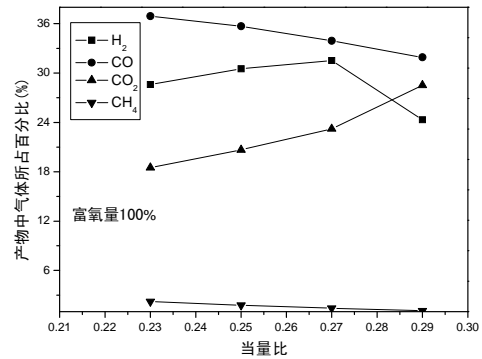


Fig 11

Effect of ER on composition of the gas products (oxygen concentration of 100%)

图 11 氧气浓度 100% 时 ER 对产物组成的影响

由图 8-11 可见, ER 由 0.23 增加到 0.27, 由于气化温度上升使裂解反应更加彻底, 生成的 H<sub>2</sub> 也就更多; ER 继续增加到 0.29 时, 这时反应产生的部分 H<sub>2</sub> 由于在氧气过量的条件下参与了燃烧, 导致产物中 H<sub>2</sub> 的含量降低; ER 由 0.23 增加到 0.29, CO、CH<sub>4</sub> 含量逐渐减少, CO<sub>2</sub> 逐渐含量增加, 这也是由于随着当量比增加, 反应物和产物均参与燃烧所致。实验结果与上述理论计算结果基本一致。

### 3.3 含水率对气体产物的影响

在 ER=0.27、氧化剂为纯氧的状态下, 考察 MSW 中的水分对气体成份的影响, 实验结果如图 12 所示。

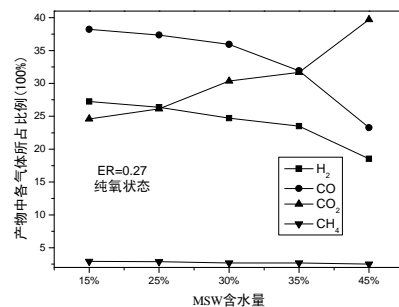


Fig 12 Effect of moisture on the gas products of MSW gasification

图 12 水分对 MSW 气化产物的影响

原料水分过高, 会导致消耗很多热量蒸发水分, 而且过多的水分也会使  $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$  反应程度加深, 导致 CO 含量降低较快, 相对 H<sub>2</sub> 含量降低较慢; 除此以外, 过高的水分还会使燃气热值、气体产率、气化效率和碳转化率均明显下降这些变化趋势

在水分由 35% 增加至 45% 时尤为明显。

由图 12 可见水分在一定范围内变化 (小于 30%) 对气化的影响不大, 但是随着水分的继续上升 (大于 30%) 时会导致气化气内  $H_2$  和  $CO$  的含量减少的较为明显, 降低气化效率, 但是水分过低会导致气体产率降低、成本增加等问题, 所以我们认为在 MSW 富氧化过程中水分应控制在 15%~25%。

### 3.4 理论计算结果与实验结果比较

分别取当量比 0.23、0.29 时的氧含量对气体产物影响的计算结果与实验结果进行比较。

图 13-14 分别表示的是当量比 0.23、0.29 时, 氧浓度对气化产物热值的影响, 正方形标记为理论计算值, 菱形标记为实验结果, 由图可知,

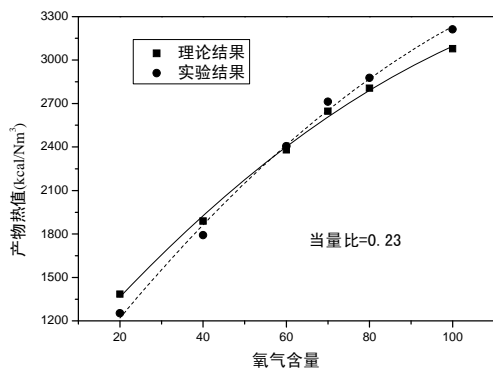


Fig 13 Comparison of experimental and calculated results (ER=0.23)

图 13 ER=0.23 时实验与理论计算结果比较

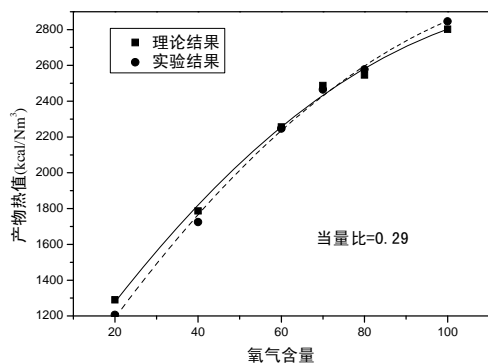


Fig 14 Comparison of experimental and calculated results (ER=0.29)

图 14 ER=0.29 时实验与理论计算结果比较

实验结果与理论计算基本吻合, 但当氧浓度低于 60% 时实验值略小于理论值, 而当氧浓度超过 60% 后,

试验结果实验值略小于理论值。

取氧浓度 100% 时的当量比对气体产物影响的理论计算与实验结果进行比较, 结果如图 15 所示, 图中实线为理论计算值, 虚线为实验值。

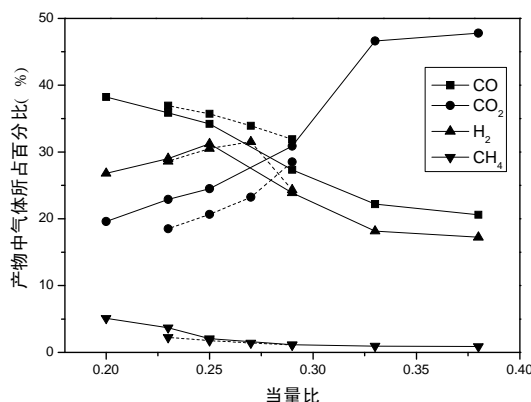


Fig 15 Comparison of calculated (solid line) and experimental (dot line) results at different equivalence ratios

图 15 氧气浓度 100% 时 ER 对产物影响的理论计算与实验结果进行比较

由图 15 可见, 理论计算结果在当量比为 0.23~0.29、纯氧状态时与实验结果较为符合, 但是总体上有一定的偏差。这是由于在纯氧情况下, 反应温度高, 且反应更为剧烈, 导致在反应的过程中, 最先反应的区域  $CO_2$  生成量较多, 而在较后反应区域, 这里主要包括气化气二次反应区域中  $CO$  含量较高, 致使实验过程中  $H_2$  的含量增高而产生波动, 同时在试验中 ER=0.27 时出现拐点, 而计算中以 ER=0.25 为拐点, 这是由于没有计算 0.27 这点而造成的, 另外, 检测手段可能也是造成误差的因素。

## 4. 结论

通过对 MSW 富氧热解气化的理论分析和实验研究可知, 富氧量的增加可以大幅度增加可燃气体产量, 提高气体产物热值; 随着当量比的增加  $CO$  和  $CH_4$  的含量递减, 而  $H_2$  的含量由增变减, 在当量比 0.27 时出现明显的转变点; 当当量比大于 0.30 后, 反应由热解控制向燃烧控制转变, 因此, 当量比 0.2-0.3 是最适合富氧热解气化的; 富氧化过程中 MSW 的水分应控制在 15%~25%。

总之, 在富氧热解气化过程中, 当量比的选择非常重要, 不仅可控制气体产物热值, 还可定向控制产

物组分,在一定当量比范围内,增加氧浓度有利于提高气体产物的品位。

## References (参考文献)

- [1] ChenYong et. Used of MSW[M]. Guangzhou. South China University of Technology Press. 2-5  
陈勇等. 固体废物能利用[M].广州.华南理工大学出版社. 2-5
- [2] Gao Zhongai, QiMenglan, et. Solid Waste Treatment and Disposal. BeiJing. Higher Education Press, 2003, 230  
郭振明,高忠爱,祁梦兰,等. 固体废物的处理与处置.北京:高等教育出版社,2003,230
- [3] X. Guo, Z. Wang, H. Li, H. H. C. Wu, Y. Chen, B. Li, A Study in Combustion Characteristics and Kinetic Model of Municipal Solid Wastes, Energy and Fuels, 15 (2001) 1141-1146
- [4] S. Galvagno, S. Casu, T. Casabianca, et al., Pyrolysis process for the treatment of scrap tyres: preliminary experimental results. Waste Management, 22 (2002) 917-923
- [5] X. Dai, X. Yin, C. Wu, W. Zhang, Y. Chen, Pyrolysis of waste tires in a circulating fluidized bed reactor, Energy, 26 (2001) 385-399
- [6] Li Jianxin, Yan Jianhua, et. Characteristic analysis of heavy metals in MSWI fly ash[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2004,38(4):48-52  
李建新,严建华,金余其等. 生活垃圾焚烧飞灰重金属特性分析. 浙江大学学报(工学版),2004,38(4):48-52
- [7] M.S. McLachlan, Accumulation of PCDD/F in an agricultural food chain, Organohalogen Comp, 26(1995) 105-108
- [8] Z. Wang, H. Huang, H. Li, C. Wu, Y. Chen, B. Li, Pyrolysis and Combustion of Refuse-Derived Fuels in a Spouting-Moving Bed Reactor, Energy & Fuels, 16 (2002) 136-142
- [9] A. Buekens, H. Huang, Comparative evaluation of techniques for controlling the formation and emission of chlorinated dioxins/furans in municipal waste incineration, Journal of Hazardous Materials, 62 (1998) 1-33
- [10] Yan Jianhua, Zhu Hongmei, et. Pyrolysis and gasification characteristic of multi-component medical waste[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2008,42(5): 885-889  
严建华,祝红梅,蒋旭光等. 医疗垃圾多组分热解气化特性[J]. 浙江大学学报, 2008,42(5): 885-889
- [11] Zhang Yi, Tao Hua. Waste Treatment Technology and Projects. Bei Jing: Chemical Industry Press,2002,106  
张益,陶华. 垃圾处理处置技术及工程实例.北京:化学工业出版社,2002,106
- [12] Bao XiangJun, Cai Jiuju, et. New regenerative technologies of MSW pyrolysis. Metallurgy and Energy. 2003,22(3):44-48  
包向军,蔡九菊,罗光前等. 新型蓄热式城市垃圾热解技术.冶金能源, 2003,22(3):44-48
- [13] Zhang Qing, Chen Jihui, et. The Evolve of Research on CFB Oxygen-enriched Combustion Technology[J]. Power System Engineering, 2007, 23(2): 4-7.  
张清,陈继辉,卢啸风等. 流化床富氧燃烧技术的研究进展[J]. 电站系统工程,2007, 23(2): 4-7.
- [14] Liu Guohui, Ma Xiaoqian, Yu Zhaosheng. Research on the Characteristics of MSW Oxygen-enriched Combustion Based on Computational Fluid Dynamics[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power. 2009,24(2): 247-251  
刘国辉,马晓茜,余昭胜. 利用CFD技术对城市生活垃圾富氧燃烧特性分析[J]. 热能动力工程, 2009,24(2): 247-251
- [15] W.Schnabel. Principle and Application of Polymer Degradation. Bei Jing: Chemical Industry Press, 1981  
W.施纳贝尔(W.Schnabel). 聚合物降解原理及应用. 北京:化学工业出版社, 1981
- [16] Deng Na. Medical waste pyrolysis characteristics and kinetics model. Tianjin University. 2005.12  
邓娜. 医疗废物热解特性及动力学模型研究. 天津大学, 2005.12
- [17] Song Yuyin. Pyrolysis Research on MSW[J]. Environmental Science,1992, 18(3):43-50  
宋玉银. 城市有机固体废弃物的热解研究.环境保护科学,1992, 18(3):43-50
- [18] Xie Qiang, Bian Bingxin, et. MSW Energy Utilization Technology. Bei Jing: Chemical Industry Press, 2004, 158  
解强,边炳鑫,赵由才等. 城市固体废弃物资源化利用技术.北京:化学工业出版社, 2004, 158
- [19] Department of Thermal Engineering, Xi'an Jiaotong University, Heat transfer[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University  
西安交通大学热工教研室, 传热学[D].西安:西安交通大学, 1973.
- [20] Department of Thermal Engineering, Xi'an Jiaotong University, Boiler[M]. Bei Jing: Water Resources and Electric Power Press, 1977  
西安交通大学热工教研室, 直流锅炉[M].北京:水利电力出版社, 1977.
- [21] F. Flemming, Trace elements from coal combustion [D], Copenhagen: Technical University of Denmark, 1995
- [22] Xu Zhihong, Wang Leshan. norganic thermochemical database[M]. Bei Jing: Science Press, 1987.  
许志宏,王乐珊. 无机热化学数据库[M] 北京:科学出版社, 1987.
- [23] I. Barin, Thermochemical Data of Pure Substances [M], New York: VCH, 1995.
- [24] W. Malcolm. Jr. Chase, NIST-JANAF Thermochemical Tables [M], Washington DC: American Chemical Society; Wood-bury New York; American Institute of Physics for the National Institute of Standards and Technology, 1998.
- [25] M.C. Potter, C.W. Somerton, Schanms's outline of theory and problems of thermodynamics for engineers [M], McGraw-Hill, Inc., 1998.