

中国城市生活垃圾燃烧的特性

金余其, 严建华, 池涌, 李晓东, 马增益, 蒋旭光, 倪明江, 岑可法(浙江大学热能工程研究所能源洁净利用与环境工程教育部重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 根据我国 23 个主要城市约 40 组垃圾的统计数据(包括元素分析和工业分析及组分分析), 较好地拟合了生活垃圾净热值、垃圾焚烧理论空气量的计算公式; 在此基础上研究了垃圾净热值与绝热火焰温度的数学关系, 进而分析了垃圾单独焚烧(无辅助燃料)所需的临界热值及过剩空气率、预热空气温度等参数对临界热值的影响。本研究为了解垃圾的燃烧特性及垃圾的焚烧利用提供分析依据。

关键词: 城市生活垃圾; 燃烧特性; 临界热值

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2002)03-04-0107

Combustion Characteristics of Municipal Solid Wastes in China

Jin Yuqi, Yan Jianhua, Chi Yong, Li Xiaodong, Ma Zengyi, Jiang Xuguang, Ni Mingjiang, Cen Kefa
(Clean Energy and Environment Engineering Key Lab of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: On the basis of about 40 groups of statistical data of municipal solid wastes (MSW) from 23 main cities in China, equations to calculate net heat value and theoretical air were regressed, furthermore, the mathematical relation between net heat value and adiabatic flame temperature, critical heat value for MSW incineration without support fuel and effect of such parameters as excess air and temperature of preheated air on critical heat value were analyzed.

Keywords: municipal solid wastes; combustion characteristics; critical heat value

由于我国城市人口的生活习惯、经济水平、垃圾收集方式、气候条件等因素与国外存在较大的差异, 城市垃圾的组成也必然与国外城市相差甚远, 套用国外公式的计算结果势必会引起较大误差, 这对垃圾焚烧的决策及焚烧炉的设计都极为不利, 所以有必要针对我国的城市垃圾燃烧特性作分析研究。为此, 本研究收集整理了我国 20 多个主要城市的近 40 组垃圾分析数据(包括元素分析、工业分析及物理组成), 根据该分析数据回归了生活垃圾净热值和垃圾焚烧理论空气量的计算公式, 在此基础上研究了垃圾净热值与绝热火焰温度的数学关系, 进而分析了垃圾单独焚烧(无辅助燃料)所需的临界热值及过剩空气率、预热空气温度等参数对临界热值的影响。

1 垃圾净热值

垃圾净热值是垃圾焚烧设计中最重要基础数据, 目前推估垃圾净热值的公式有根据元素分析和根据工业分析或物理组成 2 类经验公

式。根据元素分析的有 Dulong 公式、日本环境卫生中心推估公式、Steuer 公式、Scheurer-Kestner 公式等, 而根据工业分析或物理组成的有 3 成分、4 成分等简化公式^[1]。然而, 据笔者对我国 23 个主要城市的近 40 组垃圾数据(表 1、表 2 仅为收集整理的一部分典型城市垃圾的元素分析、工业分析及物理组成)的初步分析, 由上述计算公式计算的结果与测试的净热值偏差很大, 这说明有必要针对我国的城市垃圾特性进行分析研究。

城市生活垃圾工业分析的 4 种成分中, 对净热值有贡献的主要是固定碳、水分和挥发份。固定碳的主要成分为碳, 其热值为碳的燃烧热; 水分对热值是负贡献, 主要考虑其蒸发潜热; 而挥发份的热值与垃圾中的塑胶份额有密切关

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(N59836210); 国家自然科学基金项目(50076037); 浙江省青年科技人才专项基金项目(RC99041)

作者简介: 金余其(1971~), 男, 博士生

收稿日期: 2001-05-11; 修订日期: 2001-06-11

系,因塑胶(特别是塑料)中的氢元素含量较高,所以塑胶份额越高,其挥发份热值越高.根据以上分析,由垃圾的工业分析及物理组成中的塑胶份额可回归出垃圾净热值的计算公式:

$$NHV = (3P + 176) \times V - 25W + 340FC \quad (1)$$

NHV 为垃圾净热值, kJ/kg; P 为垃圾中塑胶份额, %; V 为工业分析中挥发份份额, %; W

为工业分析中水分份额, %; FC 为工业分析中固定碳份额, %.

根据公式(1)计算的热值与实际测试的垃圾净热值的对比如图 1 和表 3 所示,从图表中可以看出,公式(1)可较为准确地预测我国城市垃圾的净热值,个别最大误差约 10%,剩余标准差为 235.2 kJ/kg.

表 1 中国部分典型城市生活垃圾的组成

Table 1 Compositions of MSW of typical cities in China

| 城市 | 年份 | 有机物 / % | 无机物 / % | 可回收废物 / % | | | | | |
|----|-----------|---------|---------|-----------|-------|------|-------|------|-------|
| | | | | 纸类 | 布类 | 木竹 | 塑胶 | 玻璃 | 金属 |
| 青岛 | 1997 | 42.20 | 36.10 | 4.00 | 3.20 | | 11.20 | 2.20 | 1.10 |
| 西安 | 1997 | 15.74 | 63.52 | 3.35 | 2.48 | 3.94 | 7.93 | 1.84 | 1.20 |
| 北京 | 1997 | 16.59 | 58.76 | 9.27 | 1.70 | 1.61 | 10.88 | | 1.19 |
| 澳门 | 1992 | 35.90 | 4.30 | 21.80 | 14.60 | 6.70 | 11.20 | 3.50 | 1.04 |
| 浦东 | 1996~1997 | 55.33 | 11.13 | 12.30 | 2.64 | 0.78 | 13.98 | 3.01 | 0.83 |
| 武汉 | 1996 | 52.00 | 19.78 | 7.12 | 1.42 | 1.71 | 9.85 | 7.14 | 0.98 |
| 杭州 | 1997 | 58.19 | 24.00 | 3.68 | 2.23 | 1.20 | 7.63 | 2.09 | 0.98 |
| 宁波 | 1996~1997 | 53.69 | 25.48 | 5.40 | 2.96 | 1.10 | 7.90 | 2.43 | 1.04 |
| 台南 | 1992 | 28.02 | 0.28 | 24.36 | 7.77 | 1.38 | 22.99 | 5.19 | 10.01 |
| 广州 | 1996 | 60.17 | 17.12 | 5.40 | 3.40 | 1.06 | 8.99 | 3.37 | 0.49 |
| 深圳 | 1994 | 40.00 | 15.00 | 17.00 | 5.00 | | 15.00 | 5.00 | 3.00 |

表 2 中国部分典型城市生活垃圾的工业分析和元素分析

Table 2 Proximate and ultimate analysis of MSW of typical cities in China

| 城市 | 年份 | 工业分析 / % | | | | 元素分析 / % | | | | |
|----|-----------|----------|-------|------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | 水分 | 挥发分 | 固定碳 | 灰分 | C _{ar} | H _{ar} | O _{ar} | S _{ar} | N _{ar} |
| 青岛 | 1997 | 42.36 | 18.57 | 2.78 | 36.29 | 12.47 | 1.84 | 6.64 | 0.07 | 0.34 |
| 西安 | 1997 | 24.95 | 15.03 | 2.41 | 57.61 | 9.63 | 1.47 | 6.02 | 0.09 | 0.22 |
| 北京 | 1997 | 26.17 | 18.88 | 2.8 | 52.15 | 12.4 | 1.9 | 7.08 | 0.08 | 0.23 |
| 澳门 | 1992 | 39.19 | 42.87 | 5.43 | 12.51 | 27.10 | 3.69 | 16.62 | 0.16 | 0.74 |
| 浦东 | 1996~1997 | 51.58 | 27.3 | 4.15 | 16.97 | 18.46 | 2.62 | 9.86 | 0.08 | 0.43 |
| 武汉 | 1996 | 47.67 | 21.09 | 3.39 | 27.85 | 14.08 | 1.99 | 7.96 | 0.08 | 0.36 |
| 杭州 | 1997 | 51.56 | 18.9 | 3.04 | 26.5 | 12.27 | 1.75 | 7.43 | 0.09 | 0.40 |
| 宁波 | 1996~1997 | 49.09 | 19.83 | 3.11 | 27.97 | 12.76 | 1.83 | 7.89 | 0.08 | 0.39 |
| 台南 | 1992 | 34.46 | 42.03 | 5.3 | 18.21 | 28.83 | 4.04 | 13.79 | 0.13 | 0.54 |
| 广州 | 1996 | 53.50 | 21.37 | 3.36 | 21.77 | 13.98 | 1.97 | 8.28 | 0.08 | 0.43 |
| 深圳 | 1994 | 40.94 | 31.18 | 4.14 | 23.74 | 20.84 | 2.96 | 10.95 | 0.10 | 0.46 |

2 垃圾焚烧理论空气量

理论空气量是垃圾焚烧设计中不可缺少的参数,在精确设计中一般采用元素分析法,然而在工程计算或在缺少元素分析(这对于城市垃圾特殊燃料而言较为普遍)的情况下,也可采用近似算法.本文主要研究垃圾焚烧理论空气

量与垃圾净热值的数学关系.文献[2]曾提出下列公式:

$$L_0 = 3.59 \times 10^{-4} NHV \quad (2)$$

L₀ 为垃圾理论空气量, kg/kg.

研究中发现,根据该公式计算煤炭类燃料有一定的准确性,而由于城市垃圾中较高的水

表 3 垃圾净热值、理论空气量计算值与测量值的比较

Table 3 MSW net heat value and theoretical air comparison between test and calculation

| 城市 | 年份 | 净热值/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ | | | 理论空气量/ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | | |
|----|-----------|---------------------------------------|----------|------|---|----------|------|
| | | 测试值 | 公式(1)计算值 | 误差/% | 测试值 | 公式(3)计算值 | 误差/% |
| 青岛 | 1997 | 4204 | 3778 | 10.1 | 1.78 | 1.87 | 5.0 |
| 西安 | 1997 | 3363 | 3198 | 4.9 | 1.35 | 1.56 | 15.5 |
| 北京 | 1997 | 4624 | 4237 | 8.4 | 1.77 | 2.02 | 14.1 |
| 澳门 | 1992 | 9436 | 9852 | 4.4 | 3.67 | 3.63 | 1.1 |
| 浦东 | 1996~1997 | 6343 | 6071 | 4.3 | 2.60 | 2.62 | 0.8 |
| 武汉 | 1996 | 4469 | 4296 | 3.9 | 1.96 | 1.97 | 0.5 |
| 杭州 | 1997 | 3569 | 3504 | 1.8 | 1.69 | 1.64 | 3.0 |
| 宁波 | 1996~1997 | 3942 | 3790 | 3.9 | 1.76 | 1.77 | 0.6 |
| 台南 | 1992 | 10755 | 11237 | 4.5 | 4.11 | 4.04 | 1.7 |
| 广州 | 1996 | 4326 | 4142 | 4.3 | 1.93 | 1.91 | 1.0 |
| 深圳 | 1994 | 7403 | 7275 | 1.7 | 2.94 | 2.97 | 1.0 |

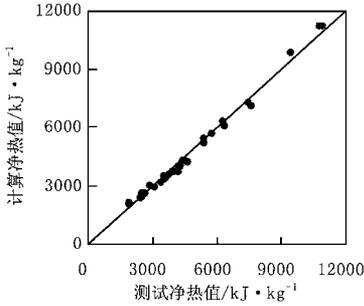


图 1 垃圾净热值计算值与实测值比较

Fig. 1 MSW net heat value comparison between test and calculation

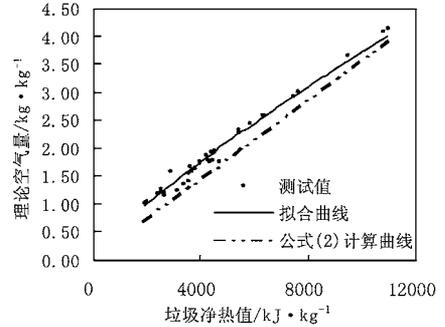


图 2 垃圾理论空气量拟合曲线

Fig. 2 Regressive curve for theoretical air of MSW

分含量使根据公式(2)计算的理论空气量明显偏小,为此,笔者根据收集整理城市垃圾数据,重新进行回归,得出如下公式:

$$L_0 = 0.002 \text{NHV}^{0.8197} \quad R = 0.9863 \quad (3)$$

式中 R 为相关系数。

理论空气量的拟合曲线如图 2 所示。为了便于对比,图 2 也画出了根据公式(2)计算的理论空气量曲线。从图 2 或表 3 中可以看出,公式(3)计算理论空气量具有较高的精确度,而根据公式(2)计算的理论空气量大约要偏小 20%。

3 绝热火焰温度及临界热值

3.1 绝热火焰温度

绝热火焰温度指的是焚烧释放的全部热量加热焚烧产物所能达到的温度。绝热火焰温度的计算有精确法和近似算法 2 种。精确计算

过于繁琐,工程上可采用近似法加以计算。以 1 kg 垃圾为基准,根据热平衡可用下式计算绝热火焰温度:

$$\text{NHV} + (1 + \text{EA}) \cdot L_0 \cdot C_{\text{pk}} \cdot t_{\text{air}} = (1 + \text{EA}) \cdot L_0 \cdot C_{\text{py}} \cdot t_a + C_{\text{py}} \cdot t_a \quad (4)$$

式(4)中, C_{pk} 为空气平均热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; C_{py} 为烟气平均热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 近似可取为 $1.254 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{[2]}$; t_a 为绝热火焰温度, $^\circ\text{C}$; EA 为空气过剩率; t_{air} 为空气预热温度, $^\circ\text{C}$ 。由公式(4)可得:

$$t_a = \frac{\text{NHV} + (1 + \text{EA}) \cdot L_0 \cdot C_{\text{pk}} \cdot t_{\text{air}}}{(1 + \text{EA}) \cdot L_0 \cdot C_0 \cdot C_{\text{py}} + C_{\text{py}}} \quad (5)$$

因 L_0 可根据公式(3)计算,所以由垃圾净热值 NHV 、空气过剩率 EA 、预热空气温度 t_{air}

等参数就可根据公式(5) 求出垃圾绝热火焰温度.图3 示出了垃圾绝热火焰温度与垃圾净热值关系的求解结果.(a) (b) 分别计算了过剩空

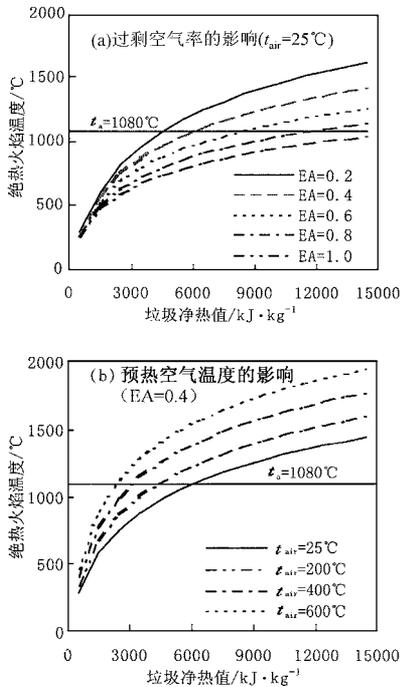


图3 垃圾绝热火焰温度与净热值的关系

气率.预热空气温度对绝热火焰温度的影响.由图3 可知,对一定的垃圾,垃圾绝热火焰温度随过剩空气率的增大而明显降低,随预热空气温度上升而迅速升高.

3.2 临界热值

采用焚烧方式处理某一城市的垃圾时,最为关心的是该城市的垃圾能否单独焚烧,即能否在无辅助燃料的条件下稳定燃烧.本文临界热值指的就是垃圾在无辅助燃料条件下稳定燃烧所需具有的最小净热值.临界热值与焚烧采用的方式(如流化床、机械炉排等)、设计采用的过剩空气率及空气预热温度等参数密切相关.根据有关文献^[3-5],对于一定的炉型,要维持稳燃,绝热火焰温度必须不低于相应的临界值.文献[3]认为,流化床锅炉临界绝热火焰温

度为 1050 ~ 1100 °C.而炉排炉,临界绝热火焰温度为 1427 °C^[4],也有认为是 1093 °C.

本研究结果表明,绝热火焰温度与垃圾净热值具有确定的关系(公式5),因此,对于一定的炉型,只要根据其临界绝热火焰温度及空气过剩率 EA、预热空气温度 t_{air} 等参数就可确定临界热值.图3(a)、(b)以流化床临界绝热火焰温度 1080 °C 为例,表明了临界热值与空气过剩率、空气预热温度的关系.以常规参数值 $EA = 0.4$, $t_{\text{air}} = 200$ °C 为例,临界热值约为 3615 kJ/kg.

当然,考虑到垃圾焚烧处理是以洁净处理(即垃圾的燃尽及降低烟气排放)为目的,在垃圾焚烧炉设计中,空气过剩率选择不能过低,根据我国的标准(GWKB 3-2000 生活垃圾焚烧污染控制标准)应不小于 40%.因此,对于垃圾热值较低的城市,如采用焚烧法处理垃圾,为降低辅助燃料量,可通过适当提高预热空气温度实现稳燃目的.

4 结论

通过回归分析,本文提出了一种计算城市垃圾净热值及焚烧所需理论空气量的方法,只要提供某一城市垃圾的工业分析数据及塑胶的份额,就能较为准确地计算出该城市垃圾净热值,同时由垃圾净热值可计算出其理论空气量,根据选择的过剩空气率及预热空气温度就可进一步计算出其绝热火焰温度,并可判断是否需添加辅助燃料.本研究可为了解垃圾的燃料特性及垃圾的焚烧利用决策和设计提供分析依据.

参考文献:

- 1 张乃斌.垃圾焚化厂——系统工程规划与设计.高雄:新雅出版社,1997.21~22.
- 2 毕振明,高忠爱等.固体废物的处理与处置(修订版).北京:高等教育出版社,1993.164~165.
- 3 Louhimo J T, Mullen J F. Sludge Burning in Fluidized Bed Boilers. TAPPI Engineering Conference, 1990: 885~900.
- 4 Kraft D L, Orender H C. Considerations Using Sludge as a Fuel. TAPPI Engineering Conference, 1991, 331~337.
- 5 Mc Dermott R J, Morris K W, Sanderson J G. A Better Boiler for Wet Hog Fuel. Pulp & Paper Canada, 1981, 82(6): 133~138.