

文章编号: 1005-8893 (2000) 02-0040-05

工业废物焚烧炉辅助燃料消耗分析*

李明¹, 肖立川², 费鸿仁¹

(1. 同济大学热能工程系, 上海 200092; 2. 江苏石油化工学院机械工程系, 江苏常州 213016)

摘要: 从分析工业废物焚烧炉的热量平衡着手, 分焚烧炉正常运行阶段和冷炉升温阶段两个方面探讨辅助燃料消耗量与废物热值及焚烧炉炉壁结构间的关系, 并提出不需消耗辅助燃料时的最低废物热值和比较合理的炉壁厚度。

关键词: 工业废物焚烧炉; 燃料消耗量; 热值; 炉壁厚度

中图分类号: TK

文献标识码: A

近年来, 生活垃圾焚烧厂的建设或筹划正在国内不少大中城市轰轰烈烈地展开。这些垃圾焚烧厂的处理规模一般都比较大, 通常有100吨/日, 并利用焚烧垃圾的热能发电^[1]。相比之下, 目前针对工业废物的焚烧炉, 其规模要小得多, 如: 10吨/日。并且, 由于工业废物与生活垃圾的成分和热值差异较大, 焚烧炉的结构就必然有不同。比如, 生活垃圾焚烧炉内常布置有水冷壁等受热面以利用炉内热能, 而工业废物焚烧炉因其规模不大, 可利用的热能有限; 而且若炉内布置受热面, 则炉温不易达到工业废物焚烧处理要求的高温^[2]。因而绝热炉墙式布置是工业废物焚烧炉的常用结构之一。本文主要针对中小型、绝热炉墙式工业废物焚烧炉。

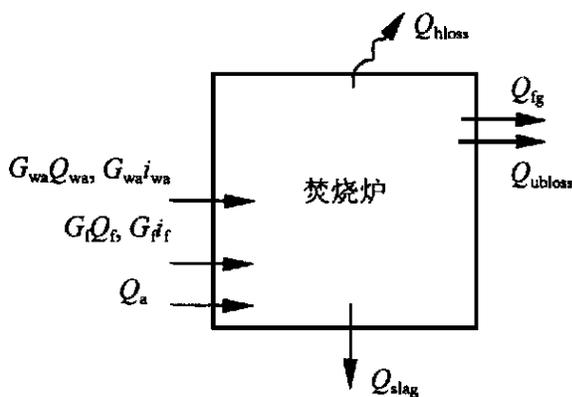


图1 焚烧炉热量收支示意图

1 废物焚烧炉的热量平衡

焚烧炉的辅助燃料消耗量, 必须在焚烧炉规模、炉型、结构和容积确定的前提下, 进行输入、输出热量平衡分析后得出。以绝热炉墙式的工业废物焚烧炉整体作为分析对象, 其热量收支示意图1。

以小时为单位, 并以0℃为基准温度, 焚烧炉的热平衡分析如下:

1.1 焚烧炉的收入热量

进入焚烧炉的热量包括: 废物的发热量; 废物的物理显热; 辅助燃料的发热量; 辅助燃料的物理显热; 燃烧用空气带入的物理显热等。即:

$$Q_{in} = G_{wa} Q_{wa} + G_f Q_f + G_{wa} i_{wa} + G_f i_f + Q_a \quad (1)$$

式中: G_{wa} —— 焚烧炉废物处理量, kg/h; Q_{wa} —— 废物应用基低位热值, kJ/kg; G_f —— 焚烧炉辅助燃料消耗量, kg 燃油/h 或 Nm^3 燃气/h; Q_f —— 辅助燃料应用基低位热值, kJ/kg 燃油或 kJ/ Nm^3 燃气; i_{wa} —— 每 kg 废物物理显热, kJ/kg; i_f —— 每 kg 或每 Nm^3 辅助燃料物理显热, kJ/kg

* 收稿日期: 2000-03-24

作者简介: 李明(1966—), 女, 福建福州人, 讲师, 硕士, 主要从事热能利用方面的研究。

燃油或 kJ/Nm^3 燃气; Q_a ——废物及燃料燃烧用空气带入的显热, kJ/h 。

1.2 焚烧炉的支出热量

流出焚烧炉的热量包括: 烟气带走的热量; 炉渣带出的热量; 可燃物质(废物、辅助燃料)不完全燃烧热损失; 炉壁向外界的散热量等。有:

$$Q_{\text{out}} = Q_{\text{fg}} + Q_{\text{slag}} + Q_{\text{hloss}} + Q_{\text{ubloss}} \quad (\text{kJ}/\text{h}) \quad (2)$$

式中: Q_{fg} ——烟气带走热量, kJ/h ; Q_{slag} ——灰渣带走热量, kJ/h ; Q_{hloss} ——炉壁向环境的散热量, kJ/h ; Q_{ubloss} ——不完全燃烧热损失, kJ/h 。

于是, 根据热力学第一定律^[3], 有:

$$G_{\text{wa}}Q_{\text{wa}} + G_{\text{f}}Q_{\text{f}} + G_{\text{wa}}i_{\text{wa}} + G_{\text{f}}i_{\text{f}} + Q_a = Q_{\text{fg}} + Q_{\text{slag}} + Q_{\text{hloss}} + Q_{\text{ubloss}} \quad (3)$$

2 焚烧炉的输入、输出热量分析

2.1 输入热量

2.1.1 废物焚烧发热量 $G_{\text{wa}}Q_{\text{wa}}$

对处理规模 G_{wa} 确定的焚烧炉, 该热量的关键在于废物单位质量的低位应用基热值 Q_{wa} 。具有一定热值的废物可通过测热计测得其单位质量的分析基弹筒发热量 Q_{dtf} , 再利用工业分析及元素分析的有关结果, 推算出其低位应用基热值 Q_{wa} ^[4]:

$$Q_{\text{wa}} = \frac{100 - W^y}{100 - W^f} (Q_{\text{dtf}} - Q_{\text{S}} - Q_{\text{N}} - Q_{\text{Cl}}) - 25 (W^y + 9H^y) \quad (\text{kJ}/\text{kg}) \quad (4)$$

式中: W^y ——废物应用基含水质量百分数, %; W^f ——废物分析基含水质量百分数, %; Q_{dtf} ——废物分析基弹筒发热量, kJ/kg 废物; Q_{S} ——硫酸的生成热和溶解热, kJ/kg 废物; Q_{N} ——硝酸的生成热和溶解热, kJ/kg 废物; Q_{Cl} ——盐酸的生成热和溶解热, kJ/kg 废物; H^y ——废物应用基含氢质量百分数, %。

2.1.2 辅助燃料发热量 $G_{\text{f}}Q_{\text{f}}$

焚烧处理废物常用的辅助燃料有油和天然气, 它们的低位应用基热值 Q_{f} 在不少的相关资料上均可查得。而燃料消耗量 G_{f} 正是本文要确定的。

2.1.3 废物和辅助燃料的物理显热 $G_{\text{wa}}i_{\text{wa}}$ 、 $G_{\text{f}}i_{\text{f}}$

对单位质量的废物和燃料, 其物理显热与各自的温度和比热成正比, 有:

$$i_{\text{wa}} = (C^{\theta})_{\text{wa}} \quad (\text{kJ}/\text{kg}) \quad \text{废物} \quad (5)$$

$$i_{\text{f}} = (C^{\theta})_{\text{f}} \quad (\text{kJ}/\text{kg}) \quad \text{燃油或} \quad (\text{kJ}/\text{Nm}^3) \quad \text{燃气} \quad (6)$$

式中: (C^{θ}) ——物质单位质量或容积的热焓, kJ/kg 或 kJ/Nm^3 ; 下标 wa , f ——分别代表废物和燃料。

2.1.4 燃烧用空气带入显热 Q_a

单位质量废物及单位质量(油)或单位容积(气)燃料所需空气量可由它们的元素组分得出, 于是:

$$Q_a = (G_{\text{wa}}V_{\text{wa}}^a + G_{\text{f}}V_{\text{f}}^a)(Ct)_a \quad (7)$$

式中: V_{wa}^a ——每 kg 废物燃烧需要的空气量, Nm^3/kg ; V_{f}^a ——每 kg 燃油或每 Nm^3 燃气燃烧需要的空气量, Nm^3/kg 燃油或 Nm^3/Nm^3 燃气; $(Ct)_a$ —— 1 Nm^3 干空气的湿空气在环境温度 t $^{\circ}\text{C}$ 时的焓, kJ/Nm^3 。

2.2 输出热量

2.2.1 烟气带走的热量 Q_{fg}

为减少废物焚烧过程中二次污染的产生, 废物焚烧炉内运行温度有严格的规定。工业废物焚烧炉的出口烟温应达 1100 $^{\circ}\text{C}$ ^[2]。因此, 离开焚烧炉的烟气就带走了热量。该热量是绝热式工业废物焚烧炉输出热量的主要部分。其数值的大小与烟气流、烟气温度和烟气比热有关:

$$Q_{\text{fg}} = V_{\text{fg}}(C^{\theta})_{\text{fg}} \quad (\text{kJ}/\text{h}) \quad (8)$$

式中: V_{fg} ——焚烧炉产生的烟气流, Nm^3/h ; $(C^{\theta})_{\text{fg}}$ —— 1 Nm^3 烟气在排出温度 θ $^{\circ}\text{C}$ 时的焓, kJ/Nm^3 。

2.2.2 灰渣带走的热量 Q_{slag}

排出焚烧炉的炉渣和飞灰温度很高, 一般可达 600 $^{\circ}\text{C}$ 甚至更高, 因而也带走了热量。同样地, 灰渣携带的热量也与灰渣量、灰渣焓有关:

$$Q_{\text{slag}} = G_{\text{slag}}(C^{\theta})_{\text{slag}} \quad (\text{kJ}/\text{h}) \quad (9)$$

式中: G_{slag} ——每小时的灰渣产生量, kg/h ; $(C^{\theta})_{\text{slag}}$ ——灰渣的焓, kJ/kg 。

2.2.3 炉壁向环境的散热量 Q_{hloss}

焚烧炉内是高温运行环境, 尽管炉壁覆有耐火材料、保温材料, 但炉体外表面的壁温仍高于环境温度。因而存在炉壁与环境空气间的热传递, 散热损失不可避免。图 2 表示了绝热炉墙内的温度分布。具有温度 t_b 的炉外壁与外界环境间的换热量为^[5]:

$$Q_{hloss} = \alpha F (t_b - t_0) \text{ (kJ/h)} \quad (10)$$

式中： α ——炉壁与外界换热系数， $\text{kJ}/\text{hm}^2 \cdot \text{C}$ ； F ——炉壁外表面积， m^2 。

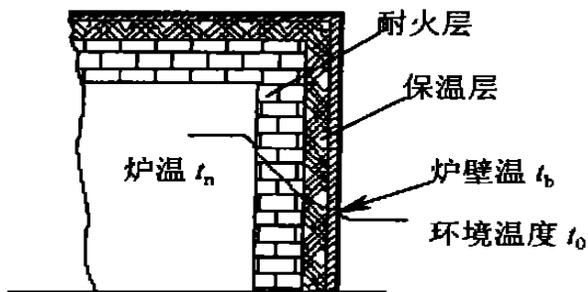


图2 焚烧炉炉墙温度分布

2.2.4 焚烧炉不完全燃烧热损失 Q_{ubloss}

该项数值与焚烧炉的运行效率直接相关，无现成的计算式，只能凭实践摸索和积累逐渐总结。但对某一具体结构的焚烧炉，该热损失占焚烧炉输入热量的百分数应基本接近。

2.3 辅助燃料消耗量的确定

从以上各输入、输出热量可见，焚烧炉的燃料消耗量将影响燃料带入炉内的热量 $G_f Q_f$ 、 $G_f i_f$ 、燃烧用空气带入热量 Q_a 、烟气量 V_{fg} 、烟气带走的热量 Q_{fg} 、炉温及炉体向外界的散热量 Q_{hloss} 。于是，式(3)等号两侧均含有与燃料消耗量有关的量，可采用迭代方法确定焚烧炉的辅助燃料消耗量。一般思路见图3。

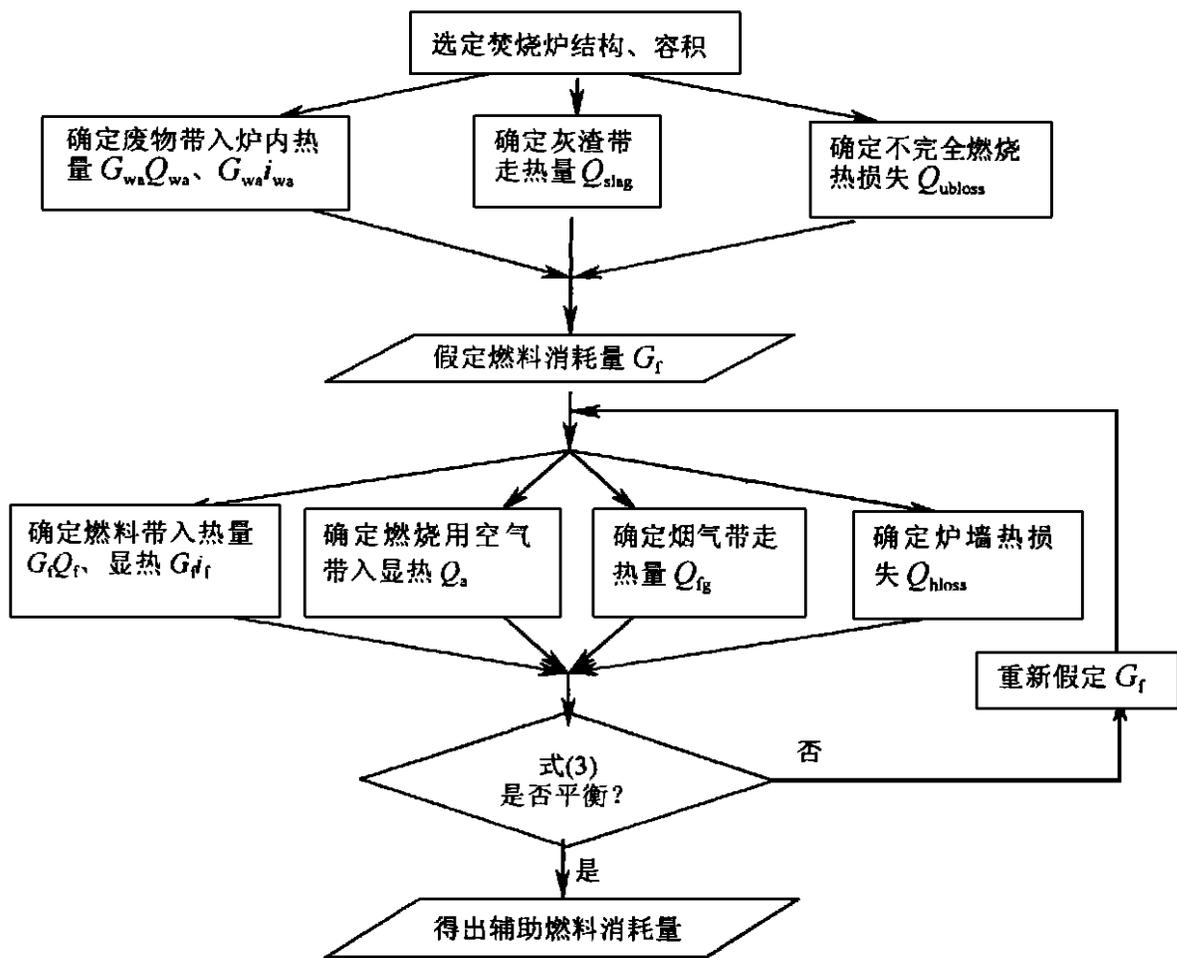


图3 焚烧炉燃料消耗量确定流程

可以预见，废物焚烧炉的辅助燃料消耗量随着废物热值的增高而减少。对处理量为7.2吨/日的炉排式绝热焚烧炉，根据以上流程可得出不同废物热值时焚烧炉的燃料消耗量。二者间的变化关系见

图4（图中燃料以轻柴油计）。由图可见，废物热值低于8000 kJ/kg时焚烧炉燃料消耗量与废物热值间几乎呈线性递减关系。当废物热值高于8000 kJ/kg时，废物焚烧炉在正常运行阶段不但不

需消耗外来燃料, 而且废物本身的热值即可维持焚烧炉在规定的炉温 (第二燃烧室 1 100 °C) 甚至更高的温度下运行。见图 5。

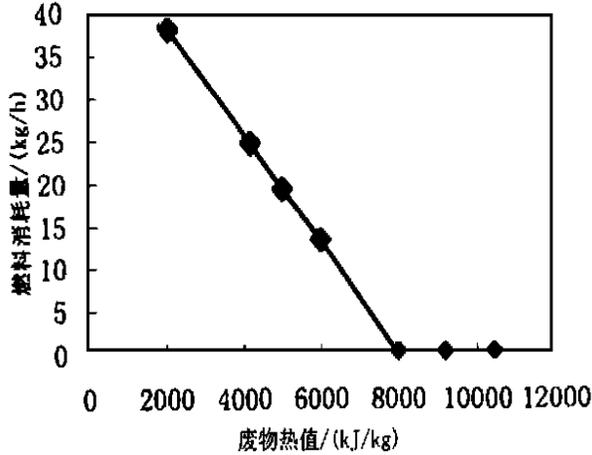


图 4 废物热值与燃料消耗量间的关系

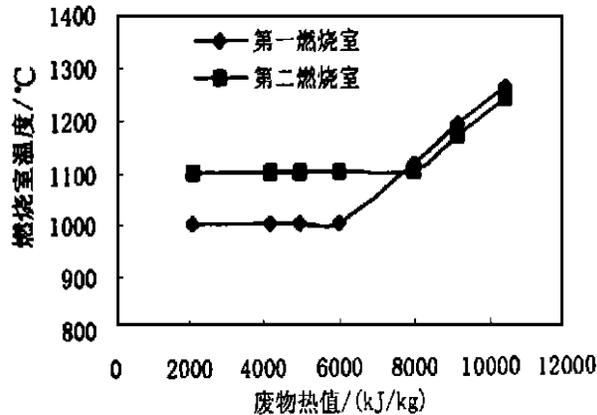


图 5 废物热值与炉温的关系

3 进一步的考虑

但是, 应该指出式 (3) 的热量平衡仅在焚烧炉处于正常运行阶段时成立。当焚烧炉由冷炉状态开始升温时, 炉壁材料也要从环境温度开始吸热升温, 直到燃烧室温度达到废物焚烧炉规定的正常运行温度、并且炉壁材料温度与燃烧室温度平衡, 冷炉升温过程结束, 进入正常运行。这样, 即使焚烧炉处理的废物热值高于 8 000 kJ/kg, 在正常运行阶段可无需消耗辅助燃料, 但在冷炉升温阶段仍需辅助燃料升高炉温。因此, 冷炉升温阶段焚烧炉的支出热量还需要计及炉壁材料的吸热量。

设此时完全由辅助燃料 (油或气) 升高炉温,

无灰渣热损失, 于是, 式 (3) 的热平衡式应改写为式 (3'), 如下: $G_f Q_f + G_f i_f + Q_a = Q_{fg} + Q_{hloss} + Q_{ubloss} + Q_{ab}$ (3')

式中, Q_{ab} ——炉壁材料的小时吸热量, kJ/h。

Q_{ab} 可通过材料的重量、比热及升温过程中的温差获得:

$$Q_{ab} = C^p V \Delta t \quad (11)$$

由式 (3') 可见, 冷炉升温阶段的燃料消耗与焚烧炉所处理的废物热值无关, 只取决于炉壁材料的敷设结构和炉壁材料的用量。对以上述及的 7.2 吨/日处理规模的废物焚烧炉, 如果炉壁材料的敷设结构如表 1, 则每种炉壁结构对应的冷炉升温期的燃料消耗量 (以轻柴油计) 见图 6 所示。图中考虑炉温从室温 (设为 15 °C) 升温至 800 °C。

表 1 炉壁敷设结构

| 序号 | 耐火砖 | 轻质砖 | 硅酸砖 | 总厚度 |
|----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 115 | 115 | 70 | 300 |
| 2 | 115 | 230 | 70 | 415 |
| 3 | 230 | 230 | 70 | 530 |
| 4 | 460 | 115 | 70 | 645 |
| 5 | 460 | 230 | 70 | 760 |

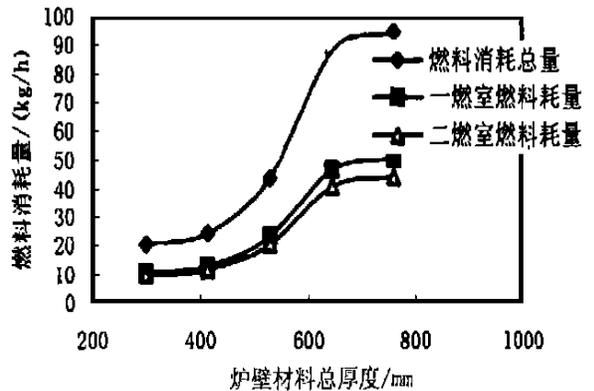


图 6 7.2 吨/日焚烧炉燃料消耗量随炉壁厚度变化的关系

由图 6 可见, 对相同处理规模的废物焚烧炉, 炉壁材料越厚, 辅助燃料的消耗量就越多, 尤其随耐火层厚度的增加而明显增多。

然而, 这并不意味着炉壁材料越薄就越有利, 因为从焚烧炉的运行安全考虑, 其外壁温度以不超过 60 °C 为宜^[9]。对表 1 和图 6 中所列的几种炉壁敷设结构, 图 7 给出了当炉内温度为 1 100 °C 时的外壁温度。由图可见, 当炉壁材料厚度小于 400 mm 时, 外壁温度远高于 60 °C, 而当炉壁材料厚度在 (400—760) mm 时, 外壁温度基本符合规定, 且厚度越大外壁温度越低, 但差异不大。

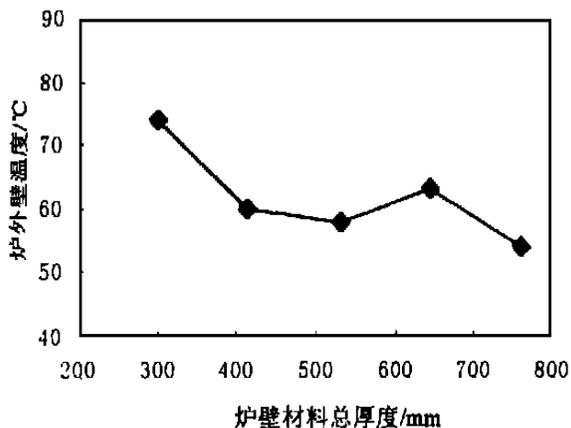


图7 焚烧炉外壁温度随炉壁厚度变化的关系

4 结论

总结以上讨论, 可归纳如下:

(1) 焚烧炉正常运行阶段的辅助燃料消耗量随所处理的废物热值的升高而减少。当废物热值高于 8 000 kJ/kg 时, 基本不需消耗辅助燃料就能维持焚烧炉第二燃烧室内 1 100 °C 甚至更高的运行温度。

(2) 焚烧炉的冷炉升温期通常需由辅助燃料升高炉温, 此时的燃料消耗量与废物的热值无关。

(3) 冷炉升温期的燃料消耗量只与焚烧炉炉壁材料的敷设结构和材料用量直接相关。炉壁材料越厚, 特别是耐火层越厚, 消耗的燃料则越多。

(4) 焚烧炉炉壁材料的结构和用量应综合考虑燃料消耗量和炉外壁温度两方面因素。对本文所讨论的炉壁敷设结构, 400 mm 厚度是比较经济合理的。

参考文献:

[1] 李明, 奚士光. 我国垃圾焚烧处理的发展 [J]. 能源技术, 1998, 74 (2): 13-16.
 [2] 志垣政信. 废弃物の烧却技术 [M]. 东京: オーム株式会社, 1998.
 [3] 沈维道, 郑佩芝, 蒋淡安. 工程热力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
 [4] 奚士光, 吴味隆, 蒋君衍. 锅炉及锅炉房设备 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
 [5] 杨世铭. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
 [6] HJ/T18-1996. 小型焚烧炉行业标准 [S].

Analysis on Fuel Consumption for Industrial Waste Incinerator

LI Ming¹, XIAO Li-chuan², FEI Hong-ren¹

(1. Department of Heat Energy, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Jiangsu Institute of Petrochemical Technology, Changzhou 213016, China)

Abstract: Based on the heat balance of the industrial waste incinerator, this paper reveals the relation between the fuel consumption and the heat value of the waste, and also the relation between that and the wall structure of the incinerator, in the two periods, i. e. the steady operation period and the warming-up period. Furthermore, the minimum heat value of the waste is given, with which no fuel consumption is necessary. And the reasonable thickness of the wall structure is also raised here.

Key words: industrial waste incinerator; fuel consumption; heat value; wall thickness