

文章编号:1000-582X(2004)11-0084-04

# 垃圾焚烧烟气喷雾干燥净化分析\*

蒲 舸,张 力,辛明道

(重庆大学 动力工程学院,重庆 400030)

**摘 要:**应用喷雾干燥法净化垃圾焚烧烟气的工艺具有系统简单、投资和运行费用低、不产生废水等优点,是一种极有前途的工艺。文中详细分析了喷雾干燥塔中碱性液滴与烟气之间的传热、传质与化学反应机理,得出液滴干燥4个阶段的传热、传质的计算公式,同时分析了喷雾干燥法去除垃圾焚烧酸性气体的影响因素,为建立喷雾净化过程数学模型打下了基础。

**关键词:**喷雾干燥净化;传热;传质;化学反应

**中图分类号:**X77

**文献标识码:**A

随着城市生活垃圾的逐年增加,垃圾的无害化处理显得日益迫切。焚烧处理虽然投资较大,但在垃圾的无害化、减量化方面优点明显,故在世界各国得到逐渐推广。然而垃圾在燃烧时,会产生不少有害物质,主要是飞灰、以多氯二恶英/呋喃 PCDDs/PCDFs 为代表的毒性有机物质、Hg 等重金属,以及 HCl、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、HF、CO 等有害气体。这些有害物质如果得不到有效净化处理,必将对环境产生严重污染。

垃圾焚烧烟气典型的烟气吸收净化工艺有3种:半干式喷雾干燥法、干式烟气净化和湿式烟气洗涤<sup>[1-3]</sup>,这几种工艺各有特点。其中,半干式喷雾干燥法污染物去除效率介于干法和湿法之间,具有系统简单、投资和运行费用低、不产生废水等优点,是一种极有前途的工艺,目前在生活垃圾焚烧厂烟气净化系统中的应用越来越多。该工艺被美国国家环保局定为生活垃圾焚烧烟气净化最佳工艺<sup>[4]</sup>。半干式喷雾干燥法净化工艺常以 Ca(OH)<sub>2</sub> 浆液为吸收剂,用喷嘴将其雾化成 50~150 μm 的液滴,与垃圾焚烧烟气充分混合,在液滴蒸发干燥的同时吸收酸性气体。喷雾干燥净化工艺是一个很复杂的流动、传热、传质与化学反应过程,它的机理有许多方面迄今尚未被很好认识和理解。近几十年来,随着多相流理论的日益成熟,计算机技术的迅猛发展,人们尝试用数学模拟的方法研究喷

雾干燥过程,以提高对污染物的去除效率,降低运行成本。要建立喷雾干燥塔整体的数学模型,首先就应仔细研究烟气与碱性液滴之间传热、传质与化学反应。

## 1 传热、蒸发

喷雾干燥净化工艺污染物的去除效率与碱性液滴的蒸发干燥过程密切相关。液滴干燥过快污染物的去除效率急剧下降;液滴干燥过慢,喷雾干燥器出口还是潮湿状态,会影响后续设备的正常工作。研究喷雾干燥过程的传热、蒸发过程对提高污染物的去除效率有十分重要的作用。

### 2.1 传热和蒸发机理

整个喷雾干燥过程的机理是:碱性雾滴离开雾化器后,在干燥室内与热烟气混合,在两者的边界层内同时发生热量和质量的交换。影响液滴与烟气之间传热、传质的因素有许多,它包括烟气的温度和流动状态,液滴的大小及吸收剂浓度、液滴在干燥器内的停留时间等等,为便于分析,文中作如下假设:

- 1)液滴为球形;
- 2)反应热和溶解热很小,可以忽略;
- 3)水在液滴内部不循环;
- 4)酸性气体和水蒸气同时扩散,水分蒸发和酸性气体吸收互不影响。

\* 收稿日期:2004-06-16

基金项目:教育部春晖计划资助项目(24026)

作者简介:蒲舸(1969-),男,四川南充人,重庆大学博士研究生,主要从事燃烧与环保研究。

喷雾干燥净化过程中,碱性液滴与烟气之间不断发生的热、质交换,可分别用努谢尔特数  $Nu$  和舍伍德数  $Sh$  来表示。考虑到干燥塔中风场流动和粒子运动的特性,整个干燥过程中发生的传热可认为属于强制对流传热,对传热系数的影响因素,全部包括在有关的无因次数群(准则数)中。对于球形雾可用兰兹 - 马歇尔关系式表示过程的传热、传质<sup>[5]</sup>

$$Nu = 2.0 + 0.6 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (1)$$

$$Sh = 2.0 + 0.6Re^{1/2}Sc^{1/3} \quad (2)$$

式中:

$$Nu = \frac{h_c \cdot d_p}{k_\infty}; \quad Sh = \frac{K_H \cdot d_p}{D_v};$$

$$Re = \frac{d_p \cdot V \cdot \rho}{\mu}; \quad Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k_\infty}; \quad Sc = \frac{\mu}{\rho D_v}$$

其中,  $Re$  为雷诺数;  $Pr$  为普朗特数;  $Sc$  为施密特数;  $h_c$  为对流换热系数;  $d_p$  为液滴直径;  $k_\infty$  为烟气的导热系数;  $K_H$  为以湿含量表示的传质系数;  $D_v$  为蒸汽的扩散系数;  $V$  为烟气与液滴的相对速度;  $\rho$  为烟气密度;  $\mu$  为烟气动力粘度;  $c_p$  为烟气比热。

### 2.2 传热和蒸发过程

液滴的干燥经历了 4 个阶段,具体如图 1 所示:

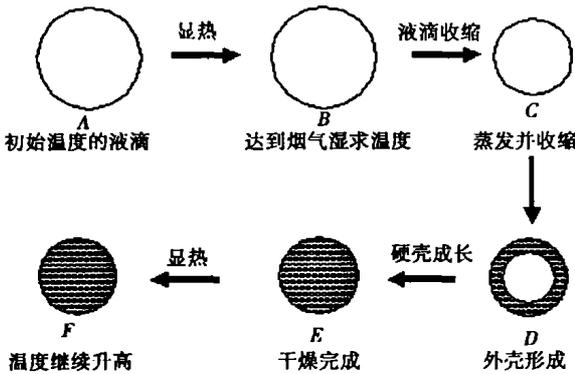


图 1 液滴干燥过程示意图

1) 第 1 阶段(图 1, A - B), 碱性液滴进入喷雾干燥塔以后, 被烟气加热直到液滴表面达到烟气湿球温度, 这个过程没有显著的蒸发, 液滴与空气之间通过边界层传递的热量为:

$$\frac{dQ}{dt} = h_c \cdot A \cdot (T_\infty - T_s) \quad (3)$$

$$\text{将 } h_c = \frac{Nu \cdot k_\infty}{d_p}, \quad A = \pi \cdot d_p^2$$

代入上式, 得

$$\frac{dQ}{dt} = Nu \cdot k_\infty \cdot \pi \cdot d_p \cdot (T_\infty - T_s) \quad (4)$$

式中:  $dQ/dt$  为传热速率;  $A$  为液滴的面积;  $T_\infty$  为液滴周围烟气的温度;  $T_s$  为液滴表面的温度。

烟气传给液滴的热量主要用于液滴温度升高。忽略液滴内部的液体流动, 热传导方程(5), 可以用来计算这个阶段液滴内部的温度分布<sup>[6]</sup>。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (5)$$

2) 第 2 阶段(图 1, B - C), 液滴的水分大量蒸发, 液滴尺寸收缩。在这个阶段, 液滴的温度将保持烟气的湿球温度, 并假定液滴有一致的温度分布。液滴的收缩将一直持续到液滴的外表面形成一个  $SO_2$  与  $Ca(OH)_2$  发生反应生成的  $CaSO_3 \cdot 1/2H_2O$  刚性的外壳。这个阶段的传热量也由(3)式计算, 液滴内部的水分可以自由扩散到液滴表面, 使液滴表面保持润湿状态, 此过程相当于纯水滴的蒸发。烟气传给液滴的热量几乎全部用于液滴中水分的蒸发, 传质与传热能瞬时达到平衡<sup>[5]</sup>。因此

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dm_t}{dt} \cdot r \quad (6)$$

式中:  $\frac{dQ}{dt}$  为传热速率;  $\frac{dm_t}{dt}$  为水分蒸发速率;  $r$  为水的汽化潜热。

$$\frac{dm_t}{dt} = K_H \cdot A \cdot (H_w - H_\infty) \quad (7)$$

式中:  $H_w$  为粒子表面的饱和湿含量;  $H_\infty$  为周围烟气的湿含量。

液滴半径的变化为:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{1}{4\pi\rho_l R_p^2} \cdot \frac{dm_t}{dt} \quad (8)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dm_t}{dt} \cdot r, \quad \frac{dQ}{dt} = h_c \cdot A \cdot (T_\infty - T_{wb})$$

$$\text{因此: } \frac{dR_p}{dt} = - \frac{h_c}{\rho_l r} (T_\infty - T_{wb}) \quad (9)$$

式中:  $R_p$  为液滴半径;  $T_{wb}$  为烟气湿球温度;  $\rho_l$  为液体密度。

3) 第 3 阶段(图 1, C - D - E), 颗粒的尺寸保持不变, 固体外壳变厚, 形成了不断向内核延伸的移动界面, 颗粒分为两部分: 干的外壳和湿的内核。在这个阶段粒子内部水分向表面的扩散过程变得比较困难, 液滴表面无法继续保持湿润, 传质速率比传热速率要小, 两者之间不可能始终保持平衡。一旦空气对粒子的传热速率高于粒子对空气的传质速率, 在干燥过程中会自动调整粒子的温度, 进而也调整粒子的饱和蒸汽压, 达到调整粒子传质速率, 维持两者之间的平衡的目的。因此, 由空气传递给液滴的热量不能完全消耗于水分的蒸发, 还有一部分使颗粒的温度上升<sup>[5]</sup>。这个阶段

烟气向颗粒的传热仍用(3)式计算,同一时间步长内所蒸发的水分可按式(7)计算,但液滴表面的饱和湿含量  $H_w$  应换成表面湿含量  $H_s$ 。将传质系数  $K_H = \frac{Sh \cdot D_v}{d_p}$  代入(7)式得

$$\frac{dm_l}{dt} = Sh \cdot D_v \cdot \pi \cdot d_p \cdot (H_s - H_w) \quad (10)$$

由水分蒸发所带走的热量仍可按式(6)计算

$$\frac{dQ_1}{dt} = \frac{dm_l}{dt} \cdot r \quad (11)$$

剩余部分的热量用来使物料颗粒的温度升高。设这一时间内物料的温度升高  $\frac{dT_s}{dt}$ , 则有

$$\frac{dQ_2}{dt} = (m_l \cdot c_{p1} + m_s \cdot c_{p2}) \cdot \frac{dT_s}{dt} \quad (12)$$

式中:  $m_l, m_s$  分别为液体与固体的质量;  $c_{p1}, c_{p2}$  分别为液体与固体的比热。整个过程中的热量应保持平衡(忽略热损失),液滴总吸热量为:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ_1}{dt} + \frac{dQ_2}{dt} \quad (13)$$

经整理得到液滴温度变化的计算公式<sup>[5]</sup>:

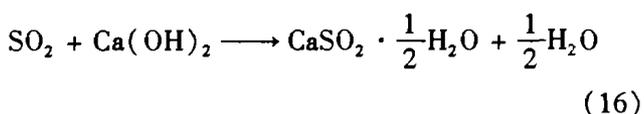
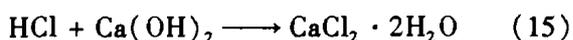
$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{Nu \cdot k_s \cdot \pi \cdot d_p (T_w - T_s) - Sh \cdot \pi \cdot d_p \cdot D_v \cdot r \cdot (H_s - H_w)}{m_l \cdot c_{p1} + m_s \cdot c_{p2}} \quad (14)$$

4) 第4阶段(图1, E-F), 颗粒完成干燥, 烟气传给颗粒的热量使颗粒温度继续升高。这个阶段可由(3)式计算烟气与颗粒之间的传热。小直径的颗粒能在喷雾干燥塔内开始这个阶段, 大直径的颗粒这个阶段主要在喷雾干燥塔以后的烟道及除尘设备中进行。

## 2 酸性气体吸收

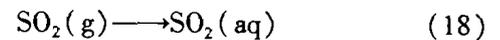
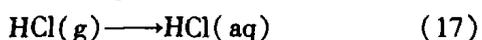
### 2.1 吸收过程

垃圾焚烧时产生的酸性气体主要是  $SO_2$  与  $HCl$ , 这些气体进入喷雾干燥塔后与  $Ca(OH)_2$  液滴发生以下反应而被除去<sup>[7-10]</sup>:

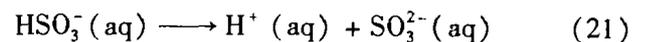
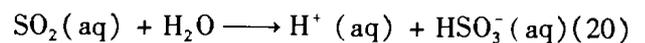
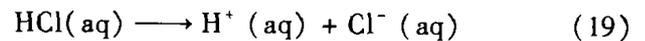


反应可分为以下几个步骤:

- 1) 酸性从气相主体到液滴表面的扩散;
- 2) 液滴表面  $HCl, SO_2$  的吸收;

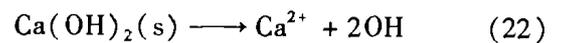


3) 液相中溶解的  $HCl, SO_2$  离解;

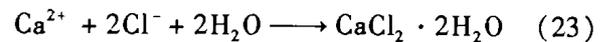


4) 液相溶解的离子在液相中的扩散;

5)  $Ca(OH)_2$  颗粒的溶解;



6) 氯化钙、亚硫酸钙的生成;



通常, 离子反应在液相中是瞬间完成的, 但在缺水的情况下相对缓慢, 液滴中水分的蒸发直接影响着酸性气体的脱除, 干燥过程和去除酸性气体密切相关(当液滴干燥成固体颗粒且含水量低于临界值时, 酸性气体去除效率急剧减少)。延长液滴表面呈湿润状态的时间, 对提高酸性气体去除效率具有重要意义。

喷雾干燥过程的吸收、扩散、反应及液滴蒸发干燥是同时进行的,  $SO_2$  与  $Ca(OH)_2$  发生反应生成的  $CaSO_3 \cdot 1/2H_2O$  在水中的溶解度很低, 很快在液滴表面形成沉淀, 当达到一个临界湿度, 液相后退, 接着在外表面形成  $CaSO_3 \cdot 1/2H_2O$  壳体, 然后在里面形成  $Ca(OH)_2$  核心。因为壳体的形成将阻碍酸性气体与  $Ca(OH)_2$  的接触, 从而使吸收效率下降。

### 2.2 影响酸性气体去除效率的主要因素

#### 2.2.1 化学计量比对酸性气体去除效率的影响

化学计量比是指进入系统的氢氧化钙的摩尔数与氯化氢和二氧化硫的摩尔数之比<sup>[11]</sup>。酸性气体的去除效率随化学计量比的增加而增大, 但当化学计量比增大到一定的数值后, 继续提高计量比, 则酸性气体的去除效率提高缓慢而吸收剂的利用率将会显著的降低。因此合理地选择酸性气体去除效率, 对节约吸收剂用量、降低运行费用是至关重要的。

#### 2.2.2 烟气近绝热饱和温度对酸性气体去除效率的影响

吸收塔出口烟气的近绝热饱和温度值, 即吸收塔出口烟气的平均温度与烟气绝热饱和温度的差值<sup>[11]</sup>。在相同的化学计量比和较高的近绝热饱和温度的条件下, 去除效率较低; 降低近饱和绝热温度, 去除效率提高明显。这是因为, 近绝热饱和温度越低, 浆滴干燥的时间就越长, 从而延长了浆滴吸收酸性气体的时间, 吸收塔的去效率就越高。在实际的操作中, 出塔烟气温度必须高于绝热饱和温度  $10 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , 否则会

凝结,造成粉料在除尘器部分板结,影响系统的运转。

### 2.2.3 HCl 对 SO<sub>2</sub> 吸收的影响

在焚烧垃圾等固体废弃物时,由于含有较多的氯元素,将产生 HCl 气体。由于有 HCl 气体的存在,将使液滴的吸收、反应蒸发过程发生改变。虽然 SO<sub>2</sub> 与 Ca(OH)<sub>2</sub> 发生反应生成的 CaSO<sub>3</sub> · 1/2H<sub>2</sub>O 在水中的溶解度很低,但是 HCl 与 Ca(OH)<sub>2</sub> 反应生成的 CaCl<sub>2</sub> 在水中的溶解度很高。这样, CaCl<sub>2</sub> 就降低了液滴中水的蒸发压力,从而延长了液滴蒸发的时间,在 HCl 浓度较低时,对提高 SO<sub>2</sub> 吸收效率是有利的。另外,由于液滴吸收 HCl 的热动力特性占优势,在 HCl 浓度较高时将取代 SO<sub>2</sub> 的吸收,从而使 SO<sub>2</sub> 的吸收效率降低<sup>[10]</sup>。

## 3 结论

1) 液滴的蒸发干燥过程十分复杂,文中将其化分为4个阶段,得出了各阶段的传热、传质计算公式。

2) 离子反应在液相中是瞬间完成的,但在缺水的情况下相对缓慢,碱性液滴中水分的蒸发直接影响着酸性气体的脱除。

3) 影响酸性气体去除效率的因素很多,其中化学计量比与出口烟气的近绝热饱和温度是两个主要因素。当有烟气中有 HCl 气体存在时,对 SO<sub>2</sub> 气体的吸收会产生影响。

### 参考文献:

[1] 贾健鹏. 垃圾焚烧及烟气净化技术分析[J]. 电力环境保护,2002, 18(1): 34-37.

- [2] 张记市,谢刚,王华. 垃圾焚烧烟气净化处理技术[J]. 环境技术,2002, (6): 26-30.
- [3] 胡德飞,孙云生. 垃圾焚烧发电中烟气净化系统的选择与分析[J]. 中国电力,2002, 25(11): 79-82.
- [4] 张益,赵由才. 生活垃圾焚烧技术[M]. 北京: 化学工业出版社,2000.
- [5] 廖传华,董金善,顾海明. 喷雾干燥操作中传热过程[J]. 南京化工大学学报,1998,20(6): 87-89.
- [6] MOHAMMED FARID. A new approach to modelling of single droplet drying[J]. Chemical Engineering Science,2003,58: 2 985-2 993.
- [7] MARKUS REINHOLD, CHRISTIAN HORST, ULRICH HO! MANN. Experimental and theoretical investigations of a spray dryer with simultaneous chemical reaction[J]. Chemical Engineering Science,2001,56: 1 657-1 665.
- [8] HILL F F, ZANK J. Flue gas desulphurization by spray dry absorption[J]. Chemical Engineering and Processing,2000, 39: 45-52.
- [9] FABRIZIO SCALA, MICHELE D' ASCENZO, AMEDEO LANCIA. Modeling flue gas desulfurization by spray-dry absorption[J]. Separation and Purification Technology, 2004, 34: 143-153.
- [10] JENS STEIN., MATTHIAS KIND, ERNST - ULRICH SCHLUNDER. The influence of HCl on SO<sub>2</sub> absorption in the spraydry scrubbing process[J]. Chemical Engineering Journal, 2002, 86: 17-23.
- [11] 潘朝群. 喷雾干燥法烟气脱硫工艺评述[J]. 重庆环境科学,2003,25(8): 43-46.

## Analysis of Spray Dry Scrubbing of MSW Incineration Flue Gas

PU Ge, ZHANG Li, XING Ming-dao

(College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** The advantages of spray dry scrubbing of MSW incineration flue gas include simple system, low investment and operating costs, byproduct without waste water and so on. Spray dry scrubbing is a very promising technique. Heat transfer, mass transfer and chemical reaction between alkaline droplet and flue gas in the spray dryer are analyzed in detail. Calculation formulas of heat transfer and mass transfer of four-step of droplet drying are gained. Influence factors of spray dry scrubbing acid gas components are also analyzed. The conclusion lay the foundation for establishing mathematics model of spray dry scrubbing process.

**Key words:** spray dry scrubbing; heat transfer; mass transfer; chemical reaction.

(编辑 陈移峰)