

# 目 录

## 第十章 有害气体净化的一般方法

|        |       |       |
|--------|-------|-------|
| § 10—1 | 冷凝法   | (289) |
| § 10—2 | 液体吸收法 | (289) |
| § 10—3 | 吸附法   | (292) |
| § 10—4 | 催化转化法 | (294) |
| § 10—5 | 燃烧法   | (296) |

## 第十一章 冶炼烟气制酸

|        |                |       |
|--------|----------------|-------|
| § 11—1 | 概述             | (298) |
| § 11—2 | 烟气的净化和干燥       | (301) |
| § 11—3 | 二氧化硫的转化        | (307) |
| § 11—4 | 三氧化硫的吸收和硫酸蒸气冷凝 | (325) |

## 第十二章 低浓度二氧化硫废气的净化与利用

|        |                |       |
|--------|----------------|-------|
| § 12—1 | 概述             | (337) |
| § 12—2 | 湿式石灰石(石灰)——石膏法 | (341) |
| § 12—3 | 间接石灰石(石灰)——石膏法 | (347) |
| § 12—4 | 钠盐吸收法          | (355) |
| § 12—5 | 氨吸收法           | (364) |
| § 12—6 | 氧化镁法           | (374) |
| § 12—7 | 活性炭吸附法         | (377) |

## 第十三章 含氮氧化物废气的净化与利用

|        |       |       |
|--------|-------|-------|
| § 13—1 | 概述    | (383) |
| § 13—2 | 催化还原法 | (386) |
| § 13—3 | 液体吸收法 | (401) |
| § 13—4 | 吸附法   | (416) |

## 第十四章 含氟废气的净化与利用

|        |       |       |
|--------|-------|-------|
| § 14—1 | 概述    | (423) |
| § 14—2 | 液体吸收法 | (424) |
| § 14—3 | 干式吸附法 | (431) |

## 第十五章 管道系统的设计

|        |        |       |
|--------|--------|-------|
| § 15—1 | 管道压力损失 | (436) |
|--------|--------|-------|

|        |                 |       |
|--------|-----------------|-------|
| § 15—2 | 管道中的压力分布        | (442) |
| § 15—3 | 除尘管道系统的设计       | (447) |
| § 15—4 | 高温烟气管道的设计计算     | (456) |
| § 15—5 | 煤气管道的设计计算       | (461) |
| § 15—6 | 水蒸汽和压缩空气管道的设计计算 | (466) |

## 第十六章 粉料输送装置

|        |       |       |
|--------|-------|-------|
| § 16—1 | 皮带运输机 | (470) |
| § 16—2 | 斗式提升机 | (475) |
| § 16—3 | 螺旋输送机 | (477) |
| § 16—4 | 气力输送  | (479) |

## 第十七章 有害气体净化装置的设计

|        |               |       |
|--------|---------------|-------|
| § 17—1 | 概述            | (497) |
| § 17—2 | 有害气体净化装置的设计程序 | (498) |
| § 17—3 | 填料吸收塔的设计程序    | (507) |
| § 17—4 | 湍球吸收塔的设计程序    | (513) |
| § 17—5 | 绝热式接触反应器的设计程序 | (518) |
| § 17—6 | 设计计算举例        | (523) |

## 第十八章 空气污染控制系统的防爆、防腐及防磨

|        |               |       |
|--------|---------------|-------|
| § 18—1 | 空气污染控制系统的防爆   | (537) |
| § 18—2 | 空气污染控制系统的防腐   | (548) |
| § 18—3 | 粉尘对金属的磨损与防磨措施 | (556) |

## 第十九章 空气污染控制系统的测试和运行管理

|        |                  |       |
|--------|------------------|-------|
| § 19—1 | 测定位置的选择和测点的确定    | (563) |
| § 19—2 | 管道中气体含湿量的测定      | (566) |
| § 19—3 | 管道中气体压力、流速和流量的测定 | (570) |
| § 19—4 | 管道中气体含尘浓度的测定     | (573) |
| § 19—5 | 管道中有害气体的采样方法     | (587) |
| § 19—6 | 净化装置性能的测试        | (590) |
| § 19—7 | 除尘装置的运行管理        | (593) |
| § 19—8 | 有害气体净化装置的运行管理    | (596) |

## 第二十章 大气扩散

|        |         |       |
|--------|---------|-------|
| § 20—1 | 大气概述    | (600) |
| § 20—2 | 大气的热力过程 | (605) |

|        |                 |       |
|--------|-----------------|-------|
| § 20—3 | 空气污染与气象的关系      | (614) |
| § 20—4 | 大气扩散试验及理论研究方法简介 | (617) |
| § 20—5 | 平坦开阔地形上的点源扩散    | (623) |
| § 20—6 | 厂址选择和烟囱设计       | (635) |

|      |  |       |
|------|--|-------|
| 参考文献 |  | (646) |
|------|--|-------|

## 附录

|      |                                             |       |
|------|---------------------------------------------|-------|
| 0—1  | 常用常数                                        | (648) |
| 0—2  | 各种单位与国际单位制 (SI) 的换算表                        | (648) |
| 1—1  | 居住区大气中有害物质最高容许浓度                            | (652) |
| 1—2  | 车间空气中有害物质的最高容许浓度                            | (653) |
| 1—3  | 十三类有害物质的排放标准                                | (656) |
| 2—1  | 干空气的物理参数 (压力为 $9.8 \times 10^4$ 帕)          | (658) |
| 2—2  | 空气的密度、体积、饱和水蒸汽压力和含湿量 (压力为 $1 \text{ atm}$ ) | (661) |
| 2—3  | 几种气体的物理参数                                   | (664) |
| 2—4  | 水的物理参数                                      | (666) |
| 2—5  | 水在不同温度下的粘度                                  | (667) |
| 2—6  | 一定温度和一定压力下气体密度计算图                           | (668) |
| 2—7  | 一定含湿量下气体密度计算图                               | (669) |
| 2—8  | 气体的粘度                                       | (670) |
| 2—9  | 某些元素、单质和化合物的比热、标准生成热及标准燃烧热                  | (672) |
| 2—10 | 气体的真实比热图 ( $1 \text{ atm}$ )                | (680) |
| 2—11 | 湿空气的焓湿图                                     | (682) |
| 2—12 | 一定温度和一定压力下气体体积计算图                           | (683) |
| 2—13 | 一定含湿量下气体体积计算图                               | (684) |
| 3—1  | 排气柜工作口截面的排气速度                               | (685) |
| 15—1 | 局部阻力系数                                      | (687) |
| 15—2 | 动压头计算图                                      | (696) |
| 17—1 | 某些气体的水溶液的亨利系数                               | (697) |
| 18—1 | 几种气体或蒸气的爆炸特性                                | (699) |
| 18—2 | 各种粉尘的爆炸特性                                   | (699) |

## 第十章 有害气体净化的一般方法

前已述及,一般工业废气中含有气溶胶状污染物和气体状污染物两大类。对于气溶胶状污染物的净化问题,即气体除尘问题,前面各章已作了较详细的讨论。从本章开始,主要讨论气体状污染物的净化问题,即有害气体的净化与综合利用问题。

由于气体状污染物是以分子状态存在的,所以一般不能用重力、惯性力、离心力、电场力及过滤等作用进行净化,而是根据有害气体的物理、化学性质不同,基于不同组分所具有的不同蒸气压,不同溶解度,选择性吸着作用及某些化学作用等特性来进行净化。目前国内外净化有害气体的方法归纳起来主要有五种:吸收法,吸附法,催化氧化或催化还原法,燃烧法,冷凝法等。下面分别对这些净化方法的基本原理和净化流程等作一综述。

### § 10—1 冷 凝 法

冷凝法适用于回收蒸气状态的有害物质。利用物质在不同的温度下具有不同的饱和蒸气压这一性质,冷却气体,使处于蒸气状态的有害物质冷凝成液体,而从废气中分离出来。冷凝法一般多用来回收浓度在 10000ppm 以上的有机溶剂蒸汽。

从冷凝法方法的本身来讲可以达到较高的净化程度,但是净化要求愈高,则需冷却的温度愈低,冷却所需费用也就愈大。因此,当废气中所含蒸气浓度比较高时,冷凝回收才比较经济有效,而对于一般冷却水的温度来说,冷凝的净化程度也是有一定限制的。

冷凝回收法的优点是所需设备和操作条件比较简单,而回收的物质比较纯净。因而冷凝回收往往用作吸附、燃烧等净化方法的前处理,以减轻这些方法的负荷,或预先除去影响操作,腐蚀设备的有害组分,以及用于预先回收某些可以利用的纯物质。

一般氯碱工业中,常用冷凝法使汞蒸气变成液体汞而加以回收。焦化厂用冷凝法回收沥青蒸气,解决了沥青烟的污染。炼油厂、油毡厂等的氧化沥青生产的尾气,一般先经冷凝回收废油,然后送去燃烧净化。北京市卫生材料厂制造橡皮膏时曾用此法回收过汽油。

冷凝回收,还适用于处理含有大量水蒸汽的高湿废气。在这种情况下,废气中部分有机物质或其它有害组分可以溶解在冷凝液中,冷凝液以及冷却水可起洗涤气体的作用,特别是由于大量水蒸汽的凝结,大大减少了气体流量,这对下一步的燃烧、吸附、过滤等净化工序或高烟囱排放,都是十分有利的。

冷凝回收所用的设备是接触冷凝器、表面冷凝器(通常是列管式换热器)等。

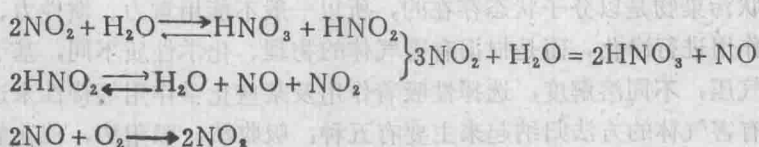
### § 10—2 液 体 吸 收 法

液体吸收法是用适当的液体(水、水溶液或溶剂)来吸收废气中有害物质或蒸气的方  
法。有害气体被溶解在液体吸收剂中,或者与吸收剂发生化学反应而被吸收。吸收过程实

际上就是物质从气相通过相界面传入液体的传质过程。常用的液体吸收法有水吸收法，碱液吸收法以及采用其它吸收剂的吸收方法。其使用范围大多为几百到几千 ppm 的含无机有害物的废气。

## 1. 水吸收法

水吸收法适用于处理易溶于水的有害气体。如：氯化氢、氨、二氧化硫、二氧化氮、氟化氢、二氧化碳、氯气等等。这些气体溶于水后，在水中发生了物理化学过程，如用水吸收二氧化氮。



废气中的二氧化氮以硝酸形式被回收。

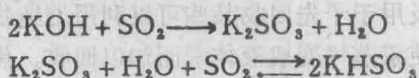
水吸收效率与吸收温度有关，一般随着吸收温度增高，吸收效率下降。当废气中有害物质含量很低时，水吸收效率很低，这时则需采用其它高效吸收剂。

由于水便宜，极易获得，所以采用水吸收法较为经济。

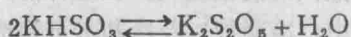
许多制药、染料、农药及其他化工厂用水吸收废气中的氯化氢气体，回收盐酸。磷肥厂排出含氟废气可用水吸收，制成氟硅酸钠或冰晶石。硝酸生产中排除的含二氧化氮废气也可以采用水或稀硝酸加以净化回收。

## 2. 碱液吸收法

此法用来处理能和碱液发生化学反应的有害气体，如二氧化硫、氮氧化物，氟化氢、氯化氢、硫化氢等等。常用的碱液有：碳酸钠、氢氧化钠、氢氧化钙、氨水等等。例如用碱液吸收二氧化硫，发生下列反应：

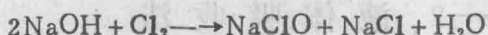


反应温度控制在60℃左右。将吸收SO<sub>2</sub>后的吸收液冷却后亚硫酸氢钾就成焦亚硫酸钾结晶出来，



过滤后，滤液是KHSO<sub>3</sub>溶液，返回吸收塔循环使用，滤饼是K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub>，加少量水溶解又重新变为亚硫酸氢钾的水溶液，将此溶液加热到100℃左右，即分解为SO<sub>2</sub>和K<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>，后者又送回吸收塔循环使用。所得SO<sub>2</sub>纯度很高，可送去制造液体二氧化硫或硫酸。

氯碱工业排出的含氯气的尾气，可用稀碱液吸收，生产次氯酸钠。



用氢氧化钙吸收硫化氢气体，反应如下：



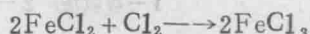
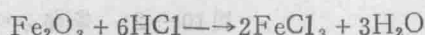
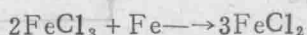


生成的硫化钙在85℃左右与石灰氮缩合，就能得到重要的化工原料——硫脲。



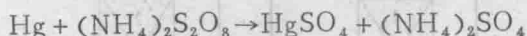
### 3. 采用其它吸收剂的吸收法

除了水和碱液被广泛用作气体吸收剂外，还可选用其它吸收剂来吸收不同的有害气体。例如，用加入铁屑的三氯化铁水溶液吸收有机氯农药生产中排除的含氯和氯化氢的混合废气。其化学反应如下：



从中可制得三氯化铁。

日光灯生产中产生的含汞废气，可用过硫酸铵溶液来吸收，其反应式为：



吸收液饱和后可将溶液放入含汞污水净化池，用硫化钠——明矾沉降法，使生成硫化汞沉淀。然后将硫化汞沉淀放入废渣熔烧炉加热至400℃，回收金属汞。北京市灯泡厂使用此法处理日光灯生产中排除的汞蒸汽。

### 4. 吸收流程

液体吸收过程是在塔器内进行的，比较常用的有中空洗涤器、填料塔、泡沫塔，文丘里洗涤器等等。在一般的吸收塔中，多采用逆流操作，借以提高吸收剂的使用效率，亦即获得最大的吸收效率。最简单的吸收流程如图10—1所示。在这种流程中，吸收剂只与要处理的混合气体进行一次接触。若使用大量的吸收剂时，可将要吸收的组分吸收得比较完全，但从塔底排出吸收液中被吸收组分的浓度较低，若吸收剂用量小时，则排除吸收液中被吸收组分的浓度可较大，但吸收推动力较小，需要塔较高。如用填料塔时，可能出现吸收剂不能将填料充分湿润的情况，因而造成吸收率降低。所以此流程只适用于吸收液不需要回收利用的情况。

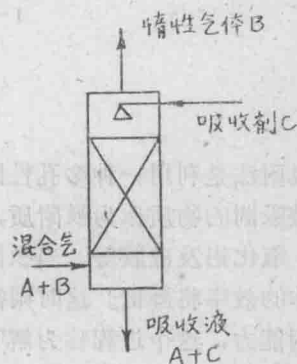


图10—1 液体吸收示意图

当吸收剂价格较贵，或为了得到浓的吸收液以便加工成产品时，则需要将塔底流出的吸收液用泵循环，如图10—2所示，使吸收剂与气体多次接触，提高其中要分离组分的浓度，当循环吸收液（母液）的浓度达到规定值时连续取出一部分送去加工处理，同时补充相应数量的新鲜吸收剂。为了移走吸收过程中产生的热量，有的还需在循环管路上装设冷

却器，以冷却循环吸收液。

有时由于气量大或有害气体浓度较高，而使吸收的负荷加大时，若采用一个吸收塔吸收，则吸收塔的尺寸过大，则可采用几个小塔相互组合起来而组成一套吸收塔组。例如，当塔径太大时，可采用几个小塔并联起来使用，当塔太高时，则可将几个小塔串联起来使用。根据冷却吸收的需要，可在液体通路上装设冷却器。图10—3为一种串联逆流吸收流程的简图。

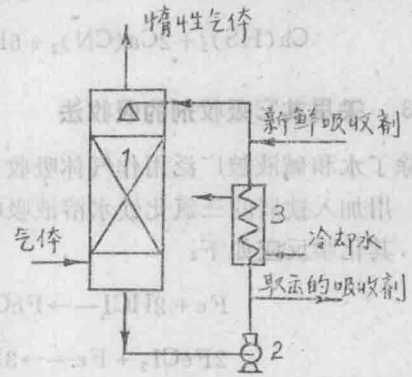


图10—2 带部分吸收剂再循环的流程  
1—吸收塔；2—泵；3—冷却器

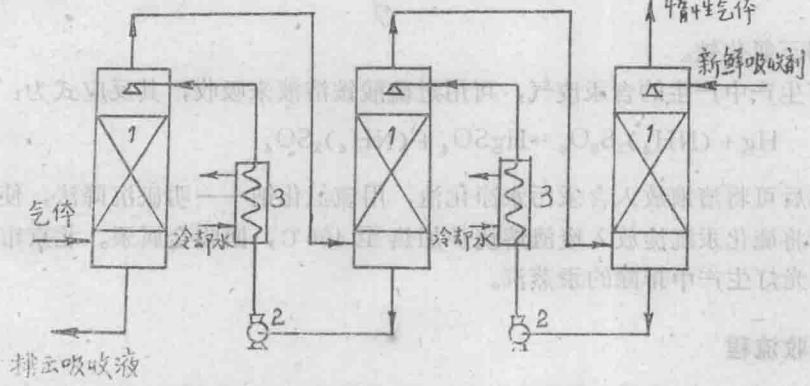


图10—3 串联的逆流吸收流程  
1—吸收塔；2—泵；3—冷却器

§ 10—3 吸 附 法

吸附法是利用一种多孔性固体吸附剂吸附废气中的有害物质，而使废气得以净化的方法。被吸附的物质称为吸附质，这种多孔性固体称为吸附剂。常用的吸附剂有活性炭、分子筛、氧化铝及硅胶等。当吸附剂工作一段时间后，吸附剂就逐渐失去吸附能力，净化有害气体的效率将降低。这时则需把吸附在吸附剂表面上的物质除去，才能重新恢复吸附剂的吸附能力，这个过程称为解吸。经过解吸后的吸附剂，必须通过一定的活化处理，才能恢复其吸附活性，这个过程称为吸附剂的再生。再生后的吸附剂可以重复使用。

吸附剂吸附废气中的有害物质时，既有物理作用，又有化学作用，一般前者叫物理吸附，后者叫化学吸附。

物理吸附是由于固体表面粒子(分子、原子或离子)存在着剩余的吸引力而引起的。如图10—4所示，固体

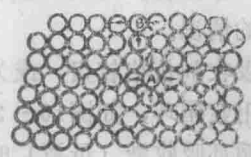


图10—4 固体表面力示意图

内部的粒子A，在各个方向上与相邻的力场相互抵消，而处在表面层粒子B在垂直于表面方向上的力场没有得到抵消，即存在着剩余的吸引力，它会吸引其它固体、液体、气体的粒子（分子、原子或离子），当然这些粒子也存在着力场，即固体吸附剂表面粒子的剩余力场与被吸引粒子的力场相互作用，使被吸引的粒子吸附在固体表面上，这就是物理吸附。

当被吸附的一层粒子没有完全抵消固体表面的力场时，还可以再吸附一层粒子，直至完全抵消固体表面力场，可见物理吸附是多层吸附。此外，一般地说，任何一对粒子（分子或原子）彼此都相互吸引，而任何一对显示相反电性的粒子（或粒子的一部分，如极化分子的极性部分）都存在着静电吸引力。因此，可以认为物理吸附没有选择性。

伴随吸收过程的同时，由于粒子的热运动而摆脱固体表面粒子的吸引又回到空间时，这就是解吸。由于物理吸附是一个放热过程，因此，降温则有利于吸附，升温则有利于解吸。

化学吸附是由于吸附剂与吸附质的原子或分子间的电子转移或共有，也就是靠化学键进行吸附的。因为伴随有化学反应，所以化学吸附是有选择性的吸附。它也是个放热过程，放出热量相当于化学反应热。因为化合只在吸附剂表面进行，所以是单层吸附。

由上可知，一方面是吸附剂吸附吸附质的粒子，另一方面有一部分吸附质粒子由于热运动而脱离吸附剂的表面而解吸，当吸附和解吸速度相等时，吸附就达到了平衡。

既然吸附剂能吸附吸附质，为什么有时候处理有害气体效果好，而有些时候效果就差呢？影响吸附的主要因素是什么？

影响吸附的因素很多，但主要有下面一些因素：

1. **吸附剂性质**：因为吸附发生在吸附剂表面，因此吸附剂的表面积（比表面积）对吸附影响很大，比表面积越大，吸附能力就越强。因此，一般吸附剂都呈松散多孔状结构，具有巨大的比表面积，如活性炭的比表面积可达到1000米<sup>2</sup>/克以上。

吸附剂的种类不同，吸附效果也不同。一般是极性分子（或离子）型的吸附剂易吸附极性分子（或离子）型吸附质，非极性分子型的吸附剂易吸附非极性的吸附质。

2. **温度**：因为吸附是放热反应，因此随着吸附温度升高，则吸附剂的吸附能力下降。一般吸附温度应在50℃以下。

3. **浓度**：图10—5是一般常见的吸附等温线，它表示一定温度下，吸附达到平衡时单位吸附剂的吸附量A与吸附质浓度C的关系。在曲线的低浓度部分，吸附剂表面很大部分是空着的，此时吸附质浓度增加多少，吸附剂就接近于吸附多少。当浓度增到一定程度后，随着浓度的增加，吸附量虽有增加，但增加的量变小了，这说明吸附剂表面已大部被吸附质所占据。当全部表面被占满时，吸附就达到极限状态，吸附量就不再随浓度增加而增加了。

4. **气流速度**：通过吸附层的气流速度不宜过大，否则将使气体与吸附剂的接触时间缩短，使净化效率降低。一般应保持在0.2~0.5米/秒。

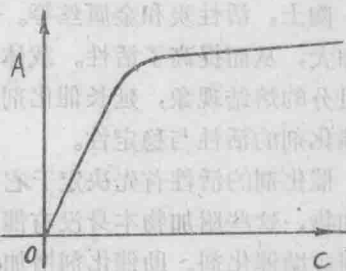


图10—5 吸附等温线



吸附法广泛用来回收有机溶剂和净化废气，例如，北京新华印刷厂采用活性炭吸附回收甲苯蒸气，上海燎原化工厂用活性炭吸附氯乙烯尾气，回收氯乙烯；常州热工仪表厂使用了用氯或碘处理过的活性炭吸附净化含汞蒸汽的空气，使车间空气大为改善。另外含二氧化硫、氮氧化物的废净也可用吸附法除去。

吸附过程一般在固定的吸附床中进行。

## § 10—4. 催化转化法

催化转化法是利用催化剂的催化作用将废气中的有害物质转化成各种无害的化合物，或者转化成比原来存在状态更易除去的化合物的方法。

所谓催化作用就是在化学反应中加入某种物质，则化学反应的速度因这种物质的存在而加速，但加入的物质在反应前后的量和其化学性质均没有改变。所加入的物质称为催化剂。催化剂可以增加（正催化）或降低（负催化）反应的速度，或者使反应沿着特定的途径进行。催化过程包括均相催化和非均相催化。均相催化是指催化剂和反应物质都处于同一种物相中的催化过程，而在非均相催化中，催化剂和反应物则不处于同一物相中。气体催化转化净化过程是应用正催化剂，而由于催化剂通常呈固体，故属非均相催化。

在非均相催化中，催化剂和反应物间在相界面上的接触是极为重要的。这种接触是由反应物吸附在催化剂表面上而完成的，其结果是增加了反应物的浓度。吸附发生在催化剂表面上吸引能力特别高的局部地区，此地区称为“活性中心”。因此，催化剂的活性与单位面积上活性中心的数目以及有效的总面积有关。从表面效应的观点出发，就无怪乎许多吸附剂（如硅胶与活性炭等）也都具有明显的催化活性了。非均相催化的整个机理包括：（1）反应物从气相主体到催化剂表面和反应产物从催化剂表面到气相主体的物质传递；（2）反应物和反应产物扩散进入与离开催化剂细孔；（3）反应物在固相上的活性吸附和反应产物的活性脱附；（4）吸附反应物的表面化学反应形成了化学吸附产物。

绝大多数气体净化过程中所用的催化剂为金属盐类或金属，通常担载在具有巨大表面积的情性载体上。但是没有载体的催化剂也常被应用。典型的载体为氧化铝、铁矾土、石棉、陶土，活性炭和金属丝等。使用载体可以节约催化剂，并且能使其分散度或有效表面积加大，从而提高了活性。载体还可以增大催化剂的机械强度，并能防止高温下催化剂活性组分的熔结现象，延长催化剂寿命，载体还可能和活性组分起某种化学作用。从而加强了催化剂的活性与稳定性。

催化剂的活性首先决定于它的化学组成。常于催化剂中加入主要活性组分以外的某些附加物，这些附加物本身没有催化活性，但能大大增加催化剂的活性，这类附加物称为活化剂或助催化剂。助催化剂增加活性的原因之一，是由于它能影响催化剂的物理结构。

既然如前所述，催化剂性质不因反应而改变，故理论上它们可无限期使用。然而，实际上绝大多数催化剂在操作中会损坏或逐渐失去活性，必须周期地再生或更换。催化剂的损坏，可由于物理原因或化学原因。物理损坏可能是由于催化剂的机械摩擦或过热与烧结所引起。摩擦引起了过多的夹带损失和通过催化剂床层的压力降增高，烧结会使催化剂表面变化并很快丧失活性。化学损坏主要是催化剂和存在原料气流中的物质间的化学反应并

生成稳定反应产物的结果。另一原因是重化合物的积累,重化合物是存在于气流中的,或者是过程中由付反应产生。在此两种情况下,催化剂表面上的活性中心数目就减少,催化剂的活性便降低。由于存在于气流中的杂质作用而引起的失活现象通常称为催化剂中毒。

工业上使用的催化剂必须具有要求的活性和抗催化剂毒物的能力,另外还必须要有一定强度,以防止在使用中破碎。

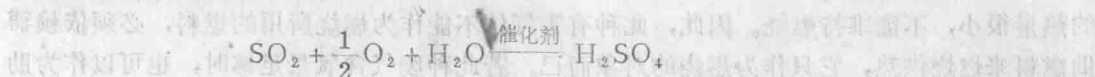
根据在催化过程中所发生的反应,催化转化法可分为催化氧化法和催化还原法。现分述如下。

### 1. 催化氧化法

在催化剂的作用下,废气中的有害物质能被氧化为无害物质或更易处理的其它物质。如一氧化氮在水中几乎不被吸收,而二氧化氮则易被水吸收,为了提高氮氧化物水吸收的效率,使用活性炭催化剂将一氧化氮氧化成二氧化氮,然后再通入水吸收塔中。这样使废气中氮氧化物更易被除去。

有色冶炼生产中所产生的尾气,含二氧化硫的浓度较高,污染较大。为了消除污染,回收硫资源,利用这部分废气来制硫酸。其原理就是在催化剂作用下,将二氧化硫氧化成三氧化硫、然后三氧化硫被水吸收就可制得硫酸。

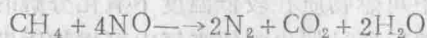
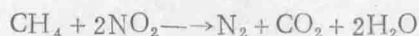
对电力、冶金行业排出的含二氧化硫浓度较低的尾气,不宜直接用来制酸,可采用湿式活性炭吸附尾气中二氧化硫的方法进行处理。当用活性炭吸附二氧化硫时,活性炭除了有吸附作用外,还有催化作用,在有水蒸汽和氧存在条件下,在活性炭表面发生催化氧化反应,使二氧化硫转化为硫酸。



### 2. 催化还原法

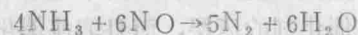
在催化剂的作用下,一些还原性气体(如甲烷、氢、氨等)可将废气中的有害物质还原为无害物。如含氮氧化物的废气在催化剂作用下,可被甲烷、氢、氨等还原为氮气。所用的催化剂有:以铝为载体的铂催化剂,磁性载体的铂催化剂,铜镍催化剂,镍铬催化剂以及浸于载体上的钨、钼的硫化物,铁、镍、钴、铜的硫化物等等。

含氮氧化物的废气,在催化剂作用下,可用甲烷进行还原。甲烷首先和 $\text{NO}_2$ 反应,然后与 $\text{O}_2$ 反应,在氧基本反应完后,再与 $\text{NO}$ 反应。



经催化还原后,废气中的氮氧化物含量可降低到200ppm以下。

氮氧化物与氨气在以硅胶为载体的氧化铜—氧化铬催化剂的作用下,也可将氮氧化物还原为氮。当 $\text{NH}_3$ 和氮氧化物以1.5:1的比例通过催化床时,反应立刻完成。其反应式如下:



## § 10—5 燃 烧 法

燃烧法是利用废气中某些有害物质可以氧化燃烧的特性，将它燃烧变成无害物质的方法。燃烧净化仅能处理那些可燃的，或在高温下能分解的有害气体。其化学作用主要是燃烧氧化，个别情况下是热分解。因此，燃烧净化不能回收废气中含有的原来物质，只是把有害物质烧掉，或者可以从中回收利用燃烧氧化后的产物，另外，根据条件也可以回收燃烧氧化过程中产生的热量。

燃烧净化法主要用于含有机溶剂蒸汽及碳氢化合物的废气的净化处理。这些物质在燃烧氧化过程中被氧化成二氧化碳和水蒸汽。

燃烧净化的方法有直接燃烧和催化燃烧两种。

### 1. 直接燃烧

直接燃烧，就是利用废气中可燃的有害气体作燃料来燃烧的方法。因此，适用于有害气体与空气混合浓度接近于燃烧下限的，或者不加空气即可燃烧的有害气体。这就是说，只适用于有害气体中含可燃组分浓度较高，或者燃烧氧化后放出的热量比较高的气体。因为，只有燃烧氧化后放出的热量能够补偿传给周围的热量，才能维持燃烧区域的温度，也才能继续维持燃烧。

对于可燃物质含量较低的有害气体，由于其可燃组分含量很低，经过燃烧氧化后放出的热量很小，不能维持燃烧。因此，此种有害气体不能作为燃烧所用的燃料，必须依赖辅助燃料来燃烧供热，它只作为燃烧的对象而已。若此种废气含氧量足够时，也可以作为助燃气体，帮助燃烧，以节约部分燃料。

直接燃烧的温度一般在 $700\sim 800^{\circ}\text{C}$ ，有时可达 $1000^{\circ}\text{C}$ 以上。

炼油厂、油毡厂等将氧化沥青生产中产生的废气，经水冷却后，送入生产用加热炉燃烧净化。

B—40型再燃式废气净化器，在隧道开凿中柴油内燃机所产生的含氮氧化物的废气净化中被采用。净化器的原理就是加燃料把废气再烧到高温，使废气在燃烧器中燃烧，从而使氮氧化物迅速被破坏。

### 2. 催化燃烧法

催化燃烧，是用催化剂使废气中可燃物质在较低温度下氧化分解的净化方法。催化燃烧，也要先将废气予热混合均匀，然后通过催化剂使废气中可燃物质发生氧化反应。催化燃烧对于燃烧温度要求较低，由于所需温度较低，因而所需辅助燃料少，设备也较小。

催化燃烧的净化效率为 $90\sim 95\%$ ，也就是说，催化氧化的转化率为 $90\sim 95\%$ ，这样可以用合理的适当体积的催化剂来实现。

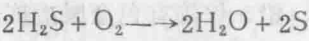
催化燃烧的温度一般为 $320^{\circ}\text{C}\sim 480^{\circ}\text{C}$

催化燃烧，只适应于含有可燃气体的废气净化，而不适用于含有大量尘粒雾滴的废气净化。因为，尘粒雾滴不仅可以堵塞催化剂的床层，而且能使催化剂本身污塞复盖而

造成活性衰退。

催化燃烧已应用于印铁（金属印刷）、绝缘材料、漆包线、炼焦、印刷、油漆、化工、脱硫、消除NO<sub>x</sub>等方面。

某化学纤维厂在二硫化碳(CS<sub>2</sub>)生产中排出含H<sub>2</sub>S尾气（其中H<sub>2</sub>S 40%），将此尾气与氧（空气）按1:1.2~1:1.6的比例混合燃烧，反应温度400~500℃，在触煤铝矿石作用下，氧化为元素硫，回收率达99%，硫磺纯度达99.93%。每年从废气中可回收硫磺一百多吨，为国家创造了大量财富。燃烧的反应为：



## 第十一章 冶炼烟气制酸

### § 11—1 概

有色金属矿多以硫化物形态存在。在铜、铅、锌等有色金属冶炼过程中，所用原料主要为硫化精矿，因此要放出大量浓度较高的二氧化硫烟气。将这些烟气中的硫回收制酸，不仅消除了二氧化硫的危害，而且对发展硫酸工业起着相当重要的作用。

#### 一、冶炼烟气的特点

由于生产工艺的不同，冶炼烟气和以硫铁矿为原料制酸的烟气相比具有如下不同特点：

##### (1) 烟气和二氧化硫浓度波动大

制酸工艺要求气量稳定和二氧化硫浓度适中。但冶炼烟气则很难满足这些要求。特别是目前普遍采用的转炉烟气，气量和二氧化硫浓度不仅出现周期性的变化，而且由于频繁地进行加料、排渣和出料而导致停止送风的间断现象。这些都给制酸生产带来一定的困难。

##### (2) 二氧化硫浓度低

冶炼烟气一般比硫铁矿制酸烟气中二氧化硫浓度低 $1/3 \sim 2/3$ 。硫铁矿制酸，出炉烟气中二氧化硫浓度一般为 $11 \sim 13\%$ ，而冶炼烟气除了锌精矿或铜精矿采用沸腾炉氧化焙烧和铜精矿闪速熔炼烟气二氧化硫浓度可达 $10 \sim 13\%$ ，锌精矿沸腾炉硫酸化焙烧烟气二氧化硫浓度可达 $8 \sim 9\%$ 外，其余冶炼烟气的二氧化硫浓度均较低，转炉烟气在二周期理论上可达 $21\%$ ，但由于加料、排渣所造成的间断和烟罩的大量漏风，也不能将它们列为高浓度的烟气之列。铅锌烧结机烟气二氧化硫浓度为 $4 \sim 6.5\%$ ，密闭鼓风炉（铜）烟气二氧化硫浓度为 $3 \sim 5\%$ ，而鼓风炉、电炉、反射炉等烟气二氧化硫浓度则更低。如何提高烟气中二氧化硫浓度，是当前大家共同关心和急于解决的重要课题。

##### (3) 冶炼烟气的成分较复杂

在冶炼烟气中，不仅含有二氧化硫和三氧化硫，而且还含有比硫铁矿制酸烟气粒径范围更广、更细的金属氧化物粉尘，如铅、锌、镉、铋、锡、硒、碲、铈等的氧化物。要除去这些杂质需要采取较复杂的净化装置。此外，还含有氟化氢、一氧化碳、二氧化碳等气态杂质以及大量的水蒸汽，这都给制酸生产带来一定的困难。

#### 二、强化冶炼烟气制酸的主要途径

为了更好地利用冶炼烟气制酸，必须设法提高烟气中二氧化硫浓度和减少烟气的量。近年来国内外出现不少行之有效的改进冶炼工艺技术和其它措施，有些还在试验阶段，大致有以下几个方面：



(1) 改进工艺、更新设备、采用富氧、密闭操作,以提高烟气中二氧化硫浓度。例如,转炉密闭罩的采用、烟道采用内部保温并加强堵漏,混涅法密闭加料等。

(2) 采用新的冶炼工艺产生高浓度的烟气。例如采用闪速熔炼炉、氧气顶吹转炉、铅锌烧结机鼓风烧结,以及湿法冶金技术等。

(3) 采用新的制酸工艺流程。例如干法净化、热浓酸洗净化等,这些新工艺目前均取得了很大进展。

(4) 使用高浓度二氧化硫进行配气。如在冶炼烟气中配入焚烧炉气体,或掺入硫铁矿磁化焙烧或半磁化焙烧所获得的高浓度气体。

(5) 采用高效电除尘器,提高对细粉尘的净化效率。

(6) 对低于2%的冶炼烟气进行浓缩或采用液相催化氧化法制酸等。

### 三、硫酸的性质及用途

了解硫酸的性质,特别是它的某些物理性质,对掌握硫酸生产,拟定操作条件,进行硫酸工厂设计和科研等都具有重要意义。

#### (1) 硫酸的物理性质

硫酸是无色无臭透明的油状液体。工业硫酸因混有杂质而稍有颜色。硫酸和发烟硫酸的比重、沸点和熔点都随硫酸的浓度及其组成而变化。如图11-1所示。

从图中可以看出,硫酸的比重随浓度的增加而增大,在其浓度为98.3%时达到最大值,此后又递减。发烟硫酸的密度或比重亦随游离三氧化硫的含量增大而增大,到62%三氧化硫(游离)时达到最大值,而后则又减小。由于硫酸的比重随浓度而变化,因此工厂操作中广泛使用比重计测定酸样的比重,然后在特制的表格或算图中查出对应的酸样浓度。在酸的浓度大于93%时,其准确度稍差。

硫酸的沸点随其浓度的增加而升高。当硫酸浓度达到98.3%时,沸点达到最大值(338.8℃),在此温度下即使继续蒸发,浓度也不再改变,此点即为恒沸点(见图11-1)。此后浓度升高,沸点下降,当硫酸浓度到100%时,沸点为296.2℃。发烟硫酸的沸点则随游离三氧化硫含量的增大而降低,直到最低温度44.7℃为止,这正好是100%三氧化硫的沸点。由此可见,借加热法浓缩稀硫酸时,其最终浓度不会超过98.3%。

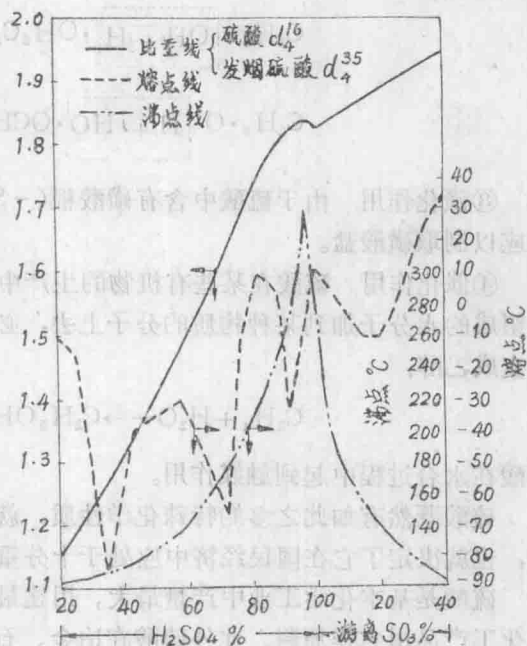


图11-1 硫酸的比重、熔点和沸点

硫酸和发烟硫酸的熔点也是随其浓度变化而变化的,发烟硫酸根据不同浓度,即使在

常温下也有结晶的（见图11—1）。因此在设计工厂时，可根据国家需要的硫酸品种、生产地区的气候条件，来选择合适的硫酸浓度。例如在冬季，尤其是在寒冷地区，由于气温较低，如果生产、储藏和运输时没有很好的防冻保温措施，是不能生产98%酸和发烟硫酸的，一般工厂此时可生产93%酸。

在一定温度下，硫酸溶液上面的总蒸汽压随着 $H_2SO_4$ 浓度的增大而降低，且在98.3%  $H_2SO_4$ 时为最低值。至于较浓的硫酸溶液以及发烟硫酸中 $SO_3$ （游离）增高时，总蒸汽压也随之增大。

硫酸的粘度大小对管道输送时流体阻力有很大影响，它是决定酸泵动力消耗的因素之一。一般说来，粘度是随其浓度的增加而增大；随其温度下降而增加。

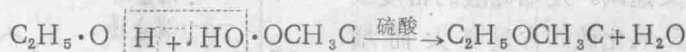
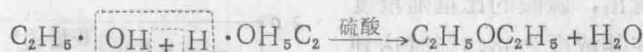
## （2）硫酸的化学性质

硫酸是一种活泼的无机酸，它具有强烈的腐蚀性。硫酸具有强酸的通性，几乎能与所有的金属及其氧化物、氢氧化物和盐类作用生成该金属的硫酸盐。

除此之外，硫酸还具有很多特殊性质，现分述如下：

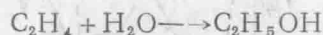
①吸水作用 硫酸对水亲合性非常强，可以与水以任何比例混合。这一特性在工业上已广泛用于干燥气体、浓缩硝酸和有机物的硝化。

②脱水作用 硫酸具有从有机物中脱除水分的特性，在用醇类制造醚类的反应和脂化反应中，都需用硫酸作脱水剂。如



③磺化作用 由于硫酸中含有磺酸根（ $-SO_3H$ ），在有机物生产中常用硫酸进行磺化反应以制取磺酸盐。

④催化作用 硫酸在某些有机物的生产中还能作触媒。如在某些有机合成中需要将氢氧组成的水分子加到某种物质的分子上去，必需借助于硫酸的帮助才能实现，如用乙烯水合变成乙醇：



硫酸在水合过程中起到触媒作用。

硫酸既然有如此之多的特殊化学性质，就必然要同现代物质生活发生日益广泛的联系，也就决定了它在国民经济中应处于十分重要的地位。

硫酸是基本化学工业中产量最大、用途最广的重要化工产品，在化工行业中，有上千种化工产品用它作原料。此外硫酸在冶金、石油、国防和轻工业等部门也有着广泛的用途。

## 四、冶炼烟气制酸的生产过程

冶炼烟气制酸一般采用接触法。

由有色冶金炉产生的烟气中，除含二氧化硫和氧气（制酸的主要成分），外还含有较

多的有害杂质（包括经过预处理后剩余的粉尘、三氧化硫、砷、氟等）。这些杂质的存在对制酸不利，因此在制酸前必须将这些杂质除去。

在接触法制酸中，烟气首先进入净化系统，进行净化处理，将所含杂质脱除到规定的指标。若采用湿法净化处理烟气，则烟气被水蒸汽饱和，还必须进行干燥处理。干燥后的烟气进入转化系统。在转化系统中，烟气在触媒的作用下将其中所含的二氧化硫转化为三氧化硫。然后，含有三氧化硫的烟气进入成酸系统。三氧化硫被吸收（或冷凝）就制得了硫酸。

综上所述，冶炼烟气接触法制酸的生产过程可分为烟气净化工序（包括干燥），转化工序和吸收（或冷凝）成酸工序三部分。

图11—2 表示接触法制酸的流程之一——干法净化制酸工艺流程。

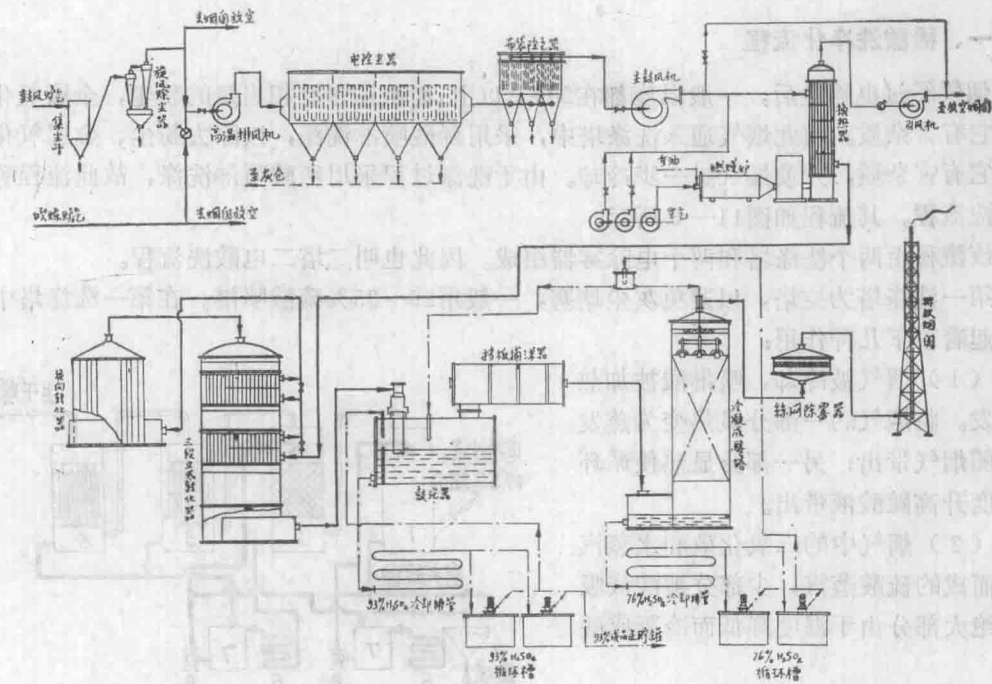


图11—2 干法净化制酸工艺流程图

§ 11—2 烟气的净化和干燥

前已述及，由有色冶炼炉产生的烟气，除含二氧化硫和氧气外，还含有一些其它杂质，如三氧化硫、粉尘、三氧化二砷、氟化氢等，此外，烟气中的三氧化硫和水分还能结合成酸雾，这些杂质的存在对制酸过程是有害的。它们有的能堵塞或腐蚀设备、管道；有的会使触媒中毒、粉化和结块。要想顺利进行硫酸生产，就必须将这些杂质去除到规定的指标，这就是烟气净化的目的和任务。

根据净化烟气所采用的净化方法不同，烟气净化流程可分为稀酸洗流程、水洗流程、热浓酸洗流程和干法净化流程等几种。

在净化工序中, 含有杂质的烟气经过净化处理后达到的指标如下:

水分(干法净化除外)  $0.1\text{克/标米}^3$ 以下

酸雾 一级电除雾器  $0.035\text{克/标米}^3$ 以下

二级电除雾器  $0.005\text{克/标米}^3$ 以下

热浓酸  $0.05\text{克/标米}^3$ 以下

其它流程  $0.035\text{克/标米}^3$ 以下

尘  $0.002\text{克/标米}^3$ 以下

砷、氟如何控制, 现尚没有统一的规定, 有的单位推荐以下指标:

砷  $< 5\text{毫克/标米}^3$

氟  $< 10\text{毫克/标米}^3$

### 一、稀酸洗净化流程

烟气经过电除尘后, 一般温度都在 $200^\circ\text{C}$ 以上, 而且还含有相当量的粉尘, 金属氧化物和其它有害杂质。将此烟气通入洗涤塔中, 采用稀酸喷淋洗涤, 以除去粉尘、金属氧化物和其它有害杂质, 并使烟气进一步冷却。由于洗涤过程采用稀酸喷淋洗涤, 故此流程称为稀酸洗流程。其流程如图11—3所示。

该流程由两个洗涤塔和两个电除雾器组成。因此也叫二塔二电酸洗流程。

第一洗涤塔为空塔, 以避免灰尘堵塞, 一般用 $20\sim 35\%$ 硫酸喷淋。在第一洗涤塔中, 同时起着以下几种作用:

(1) 烟气被冷却, 喷淋酸被加热而蒸发。将烟气的一部分显热变为蒸发潜热随烟气带出; 另一部分显热使循环酸温度升高随酸液带出。

(2) 烟气中的三氧化硫和水蒸汽化合而成的硫酸蒸汽, 少部分被酸液吸收, 绝大部分由于温度降低而冷凝成酸雾。

(3) 烟气中的三氧化二砷一部分被喷淋酸所吸收, 大部分冷凝成固体微粒而成为酸雾的冷凝核心并溶解在酸雾中, 未凝聚成固体状态的三氧化二砷也大部分被酸雾吸收。

烟气在出第一洗涤塔时, 温度降到 $65\sim 90^\circ\text{C}$ , 所含杂质主要是剩余的少量粉尘、金属氧化物, 含有砷的酸雾以及水分。

第二洗涤塔为填料塔, 其喷淋酸浓度为 $5\sim 10\%$ 。进入第二洗涤塔烟气含尘量已经很少, 不致堵塞。采用填料塔可大大提高气液接触面积, 提高洗涤效率。

第二洗涤塔主要有以下作用:

(1) 烟气主要有以下一步被冷却, 使出塔气体温度降至 $30\sim 40^\circ\text{C}$ , 同时, 喷淋酸被加热。

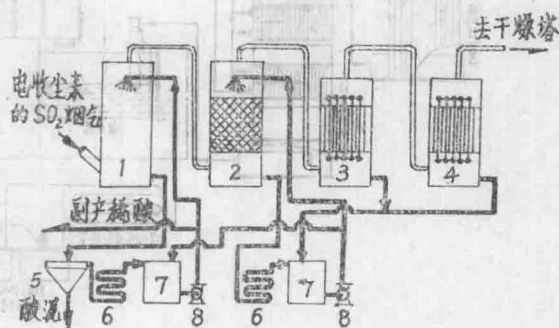


图11—3 稀酸洗涤净化流程

- 1—第一洗涤塔; 2—第二洗涤塔; 3—第一级电除雾器;  
4—第二级电除雾器; 5—沉淀槽; 6—排管冷却器;  
7—循环槽; 8—稀酸泵