

甘肃省“十四五”职业教育规划教材

# 化工安全与环保

主 审 魏占鸿

主 编 王崇国

副主编 丁维莲 茹宝琳 王 璐



合肥工业大学出版社  
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

## 图书在版编目 (CIP) 数据

化工安全与环保 / 王崇国主编. —合肥: 合肥工业大学出版社, 2023.10 (2025.1 重印)  
ISBN 978-7-5650-6462-3

I. ①化… II. ①王… III. ①化工安全 ②化学工业—环境保护 IV. ① TQ086 ② X78

中国国家版本馆 CIP 数据核字 (2023) 第 185324 号

## 化工安全与环保

HUAGONG ANQUAN YU HUANBAO

王崇国 主编

---

|      |                                                     |
|------|-----------------------------------------------------|
| 责任编辑 | 汪 铎                                                 |
| 出版发行 | 合肥工业大学出版社                                           |
| 地 址  | 合肥市屯溪路 193 号                                        |
| 网 址  | www.hfutpress.com.cn                                |
| 电 话  | 理工图书出版中心: 0551-62903004<br>营销与储运管理中心: 0551-62903198 |
| 规 格  | 787 毫米 × 1092 毫米 1/16                               |
| 印 张  | 20                                                  |
| 字 数  | 473 千字                                              |
| 版 次  | 2023 年 10 月第 1 版                                    |
| 印 次  | 2025 年 1 月第 2 次印刷                                   |
| 印 刷  | 三河市海新印务有限公司                                         |
| 书 号  | ISBN 978-7-5650-6462-3                              |
| 定 价  | 58.00 元                                             |

---

如果有影响阅读的印装质量问题, 请与出版社营销与储运管理中心联系调换。



党的二十大报告明确指出：“推进安全生产风险专项整治，加强重点行业、重点领域安全监管。”由于化工行业涉及易燃易爆、有毒有害、强腐蚀性物质和高温高压生产环境，正是国家监管的重点行业、重点领域。为进一步强化安全环保工作，我国分别在 2014 年修订了《中华人民共和国环境保护法》和 2021 年修订了《中华人民共和国安全生产法》，从客观上要求从事化工生产的管理人员、技术人员及操作人员必须掌握基本的安全环保知识。

为了落实国家对安全环保工作的最新要求和深化职业院校“校企合作、双元育人”的人才培养模式，我们在认真调研西北地区化工类企业和化工类职业院校安全教育情况后，充分利用甘肃有色冶金职业技术学院与金昌国家级化工产业园区共同成立化工产业学院的平台优势，紧密结合化工类企业和学校的实际需求，与园区内的金川集团化工新材料有限责任公司、甘肃佰利联化学有限公司、甘肃瓮福化工有限责任公司等数十家化工企业密切合作，组织化工企业工程师和高校教师团队共同编写了这本《化工安全与环保》教材。本教材既可作为职业院校化工类等专业的基础课或核心课教材，也可作为化工类企业一线职工或安全环保专职人员的培训和学习参考用书。

本教材的编写以化工生产中的安全与环保基本知识为主线，突出校企双元、合作开发，注重立德树人、以书载道，按照需求导向重构教学内容体系，制定了完善的教学解决方案。教材编写遵循了以下理念：

**一是课程思政、润物无声。**积极挖掘课程蕴含的思政教育元素，在课前小故事、案例选取、教学要求、知识拓展、课后任务等各环节巧妙融入思政元素，实现了化工安全环保与思政的融合，达到了思政教育与专业知识学习的有机统一。

**二是理实一体，产教融合。**教材大量引用真实案例和实践应用场景，通过真实案例分析、实景任务设置等将理论知识融入生产实践中，同时充分参考借鉴岗位安全操作规程和安全生产要求，实现课程设计与岗位需求的无缝对接。

**三是校企合作，成果共享。**邀请企业工程师参与教材编写，积极吸收了企业在安全管理、安全防护、环境保护等方面的有效做法，同时园区内所有化工企业在职工安全培训教



育过程中,也将本教材作为培训必选教材,真正达到了“校企合作,成果共享”的目的。

**四是知识更新,注重实用。**将党的二十大精神、习近平总书记对安全环保工作的重要论述及新修订的安全环保法律法规精神和内容有机融入教材内容,同时教材中还融入了诸多最新、最前沿的化工安全环保技术成果。

本教材采用篇章式进行设计和编写,除绪论外,分为化工安全、职业健康、化工环保、循环经济4篇,共计14章,涵盖了化工企业安全与环保工作中应掌握的基本内容。为了更好地激发学生的学习兴趣和提升学生的自学能力,每章均设置了“案例分析”“知识拓展”“学习检测”“综合实训”“学习评价”等学习环节,并采用线上线下相结合的方式进行展示。本教材为智能化融媒体新形态教材,含电子活页的拓展阅读和在线测试,读者可扫描微信小程序码免费浏览查看,其他配套的电子版教案、课件均可扫描二维码后免费下载使用。

本教材由甘肃有色冶金职业技术学院王崇国担任主编,甘肃有色冶金职业技术学院丁维莲、茹宝琳、王璐担任副主编。其中王崇国负责编写绪论和第二、三、六、七章;丁维莲负责编写第四、五、八章;茹宝琳负责编写第十、十一、十二章;王璐负责编写第一、九、十三、十四章。全书由王崇国负责统稿。

本教材由金川集团化工新材料有限责任公司安全总监、中国氯碱工业协会安全生产专家、甘肃省化工安全生产专家魏占鸿担任主审,并对教材内容设计、案例应用等方面提出了宝贵意见,在此表示特别感谢!同时,得到了兰州资源环境职业技术大学、兰州石化职业技术大学、咸阳职业技术学院、呼伦贝尔职业技术学院、宁夏职业技术学院以及甘肃金川集团、内蒙古太西煤集团、新疆中泰集团、内蒙古汇能集团、金昌市经济技术开发区等企事业单位的大力支持,在此表示真诚的感谢!在教材的编写过程中,还参阅和引用了近年来出版的相关教材与论著,在此向相关作者表示衷心的感谢!

由于编者水平所限,教材中难免有疏漏和不足之处,恳请广大读者批评指正!

编 者

2023年8月



《化工安全与环保》微信小程序码





|    |     |
|----|-----|
| 绪论 | 001 |
|----|-----|

## 第一篇 化工安全

|                |     |
|----------------|-----|
| 第一章 化工安全概述     | 008 |
| 第一节 化工生产的特点    | 008 |
| 第二节 化工安全技术措施   | 015 |
| 学习检测           | 019 |
| 综合实训           | 019 |
| 学习评价           | 020 |
| 第二章 化工过程安全技术   | 021 |
| 第一节 典型化工工艺安全技术 | 021 |
| 第二节 化工单元操作安全技术 | 030 |
| 第三节 化工事故应急处置   | 041 |
| 学习检测           | 046 |
| 综合实训           | 047 |
| 学习评价           | 047 |
| 第三章 化工设备安全技术   | 048 |
| 第一节 化工设备基础知识   | 048 |
| 第二节 压力容器安全技术   | 051 |
| 第三节 工业气瓶安全技术   | 057 |
| 第四节 锅炉安全技术     | 063 |
| 第五节 化工设备检修安全技术 | 067 |
| 学习检测           | 074 |



|                          |            |
|--------------------------|------------|
| 综合实训 .....               | 074        |
| 学习评价 .....               | 075        |
| <b>第四章 危险化学品管理 .....</b> | <b>076</b> |
| 第一节 危险化学品基础知识 .....      | 076        |
| 第二节 危险化学品的储运安全 .....     | 079        |
| 第三节 化学品安全技术说明书 .....     | 082        |
| 学习检测 .....               | 089        |
| 综合实训 .....               | 089        |
| 学习评价 .....               | 090        |
| <b>第五章 化工安全管理 .....</b>  | <b>091</b> |
| 第一节 化工企业安全管理体系 .....     | 091        |
| 第二节 安全生产责任制 .....        | 098        |
| 第三节 化工安全事故管理 .....       | 104        |
| 学习检测 .....               | 107        |
| 综合实训 .....               | 108        |
| 学习评价 .....               | 108        |
| <b>第六章 防火防爆技术 .....</b>  | <b>109</b> |
| 第一节 火灾爆炸基础知识 .....       | 109        |
| 第二节 化工防火防爆基本方法 .....     | 114        |
| 第三节 化工防火防爆主要技术 .....     | 122        |
| 第四节 化工消防技术 .....         | 128        |
| 学习检测 .....               | 133        |
| 综合实训 .....               | 134        |
| 学习评价 .....               | 134        |
| <b>第七章 电气安全技术 .....</b>  | <b>135</b> |
| 第一节 电气安全基本知识 .....       | 136        |
| 第二节 电气安全技术 .....         | 143        |
| 第三节 静电防护技术 .....         | 147        |
| 第四节 防雷技术 .....           | 153        |
| 学习检测 .....               | 157        |



|            |     |
|------------|-----|
| 综合实训 ..... | 157 |
| 学习评价 ..... | 158 |

## 第二篇 职业健康

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 第八章 工业防毒技术 .....     | 160 |
| 第一节 毒物的分类及毒性 .....   | 160 |
| 第二节 工业中毒的救护与预防 ..... | 169 |
| 学习检测 .....           | 172 |
| 综合实训 .....           | 173 |
| 学习评价 .....           | 173 |
| 第九章 职业危害防护技术 .....   | 174 |
| 第一节 职业病的概述 .....     | 174 |
| 第二节 噪声职业危害与控制 .....  | 181 |
| 第三节 振动职业危害与控制 .....  | 185 |
| 第四节 电磁辐射危害与防治 .....  | 190 |
| 第五节 化工灼伤及防护 .....    | 194 |
| 学习检测 .....           | 197 |
| 综合实训 .....           | 197 |
| 学习评价 .....           | 198 |

## 第三篇 化工环保

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 第十章 化工废气治理技术 .....    | 200 |
| 第一节 化工废气概况 .....      | 200 |
| 第二节 除尘技术 .....        | 206 |
| 第三节 气态污染物处理技术 .....   | 210 |
| 第四节 含二氧化硫的废气的防治 ..... | 217 |
| 第五节 含氮氧化物的废气的防治 ..... | 223 |
| 学习检测 .....            | 225 |
| 综合实训 .....            | 226 |
| 学习评价 .....            | 226 |
| 第十一章 化工废水治理技术 .....   | 227 |
| 第一节 化工废水概况 .....      | 227 |



|                         |            |
|-------------------------|------------|
| 第二节 化工废水的物理处理方法         | 231        |
| 第三节 化工废水的化学处理方法         | 239        |
| 第四节 化工废水的物理化学处理方法       | 244        |
| 第五节 化工废水的生物处理方法         | 247        |
| 学习检测                    | 257        |
| 综合实训                    | 258        |
| 学习评价                    | 258        |
| <b>第十二章 化工固体废物的处理技术</b> | <b>259</b> |
| 第一节 化工固体废物的来源与危害        | 259        |
| 第二节 化工固体废物处理技术          | 263        |
| 第三节 化工固体废物的最终处理技术       | 269        |
| 第四节 典型废渣的处理技术           | 273        |
| 学习检测                    | 280        |
| 综合实训                    | 281        |
| 学习评价                    | 281        |
| <b>第四篇 循环经济</b>         |            |
| <b>第十三章 绿色化工</b>        | <b>284</b> |
| 第一节 绿色化工概述              | 284        |
| 第二节 绿色化工发展方向            | 290        |
| 学习检测                    | 294        |
| 综合实训                    | 295        |
| 学习评价                    | 295        |
| <b>第十四章 循环经济</b>        | <b>296</b> |
| 第一节 循环经济概述              | 296        |
| 第二节 新发展格局下的循环经济         | 299        |
| 第三节 循环经济与可持续发展          | 304        |
| 学习检测                    | 309        |
| 综合实训                    | 309        |
| 学习评价                    | 310        |
| 附录                      | 311        |
| 参考文献                    | 312        |

第三篇

# 化工环保



## 第十章

# 化工废气治理技术

### 知识目标

1. 了解化工废气的主要来源与特点。
2. 掌握大气污染综合防治的主要措施。
3. 了解常见除尘器的基本结构与优缺点。
4. 掌握常见化工废气治理方法的原理、典型工艺和主要设备。
5. 熟悉含二氧化硫废气和含氮氧化物废气的处理方法。

### 能力目标

具备选择化工废气治理方法的初步能力。

### 育人目标

树立化工环保的意识，培养严谨、细致的作风和团队合作精神。

### 案例分析

泗水县某包装材料有限公司干扰在线监测设施采样、偷排废气案

2020年3月15日，济宁市生态环境保护综合执法支队在浏览在线监测历史数据时，发现重点排污单位泗水县某包装材料有限公司外排废气在线数据异常，氧含量接近21%，二氧化硫、氮氧化物浓度均接近零。



## 第一节 化工废气概况

### 课前小故事

#### 温室效应有何危害

温室有两个特点：温度较比室外高，且不散热。生活中常见的玻璃育花房和蔬菜大棚就是典型的温室。使用玻璃或透明塑料薄膜来做温室，是让太阳光能够直接照射进温室，加热室内空气，而玻璃或透明塑料薄膜又可以不让室内的热空气向外散发，使室内的温度保持高于外界的状态，以提供有利于植物快速生长的条件。



## 一、化工废气的来源

化学工业生产中, 各个部门及各个环节都有废气的产生, 其来源主要有以下几个方面。

- (1) 化学反应中产生的副反应和反应进行不完全所产生的废气;
- (2) 产品加工和使用过程产生的废气以及搬运、破碎、筛分和包装过程中产生的粉尘等;
- (3) 生产技术路线及设备陈旧落后, 造成反应不完全, 生产过程不稳定, 造成产品的不合格和物料的“跑、冒、滴、漏”;
- (4) 化工生产中排放的某些气体, 在光或雨的作用下, 也能产生有害气体;
- (5) 因开停车或操作失误、指挥不当、管理不善造成废气的排放;
- (6) 化工生产中使用煤炭、重油、柴油、燃料油等能源物质, 在燃烧过程中产生二氧化硫、氮的氧化物及烟尘等。

## 二、化工废气的分类

### (一) 按所含污染物性质分类

第一类为含无机污染物的化工废气, 废气中含有  $\text{SO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{Cl}_2$ 、 $\text{HCl}$ 、 $\text{HF}$ 、 $\text{NH}_3$  等无机物, 主要来自氮肥、磷肥(含硫酸)、无机盐等化工企业。

第二类为含有机污染物的废气, 废气中含苯系物、酚、醛、醇、卤代苯、丙烯腈、氯化物、环氧化合物等有机物, 主要来自有机原料及合成材料、农药、染料、涂料等化工企业。

第三类为既含无机污染物又含有机污染物的废气, 来自排放的废气。主要来自石油炼制和石油化工行业, 氯碱、炼焦等化工企业。

### (二) 按污染物的存在状态分类

#### 1. 气溶胶状态污染物

在大气污染中, 气溶胶系指固体粒子、液体粒子或它们在气体介质中的悬浮体。从大气污染控制的角度, 按照气溶胶的来源和物理性质, 可将其分为以下几种。

(1) 粉尘。粉尘指悬浮于气体介质中的小固体粒子, 能因重力作用发生沉降, 但在某一时间内能保持悬浮状态。它通常是由于固体物质的破碎、研磨、输送等机械过程, 或土壤、岩石的风化等自然过程形成的。粒子的形状往往是不规则的。粒子的尺寸范围, 在气体除尘技术中, 一般为  $1 \sim 200 \mu\text{m}$ 。属于粉尘类的大气污染物的种类很多, 如黏土粉尘、石英粉尘、煤粉、水泥粉尘、各种金属粉尘等。

在大气污染控制中, 还根据大气中的粉尘(或烟尘)颗粒的大小将其分为飘尘、降尘和总悬浮微粒。

(2) 烟。烟一般指冶金过程形成的固体粒子的气溶胶。它是由熔融物质挥发后生成的气态物质的冷凝物, 在生成过程中总是伴有诸如氧化之类的化学反应。烟的粒子尺寸很小, 一



一般为  $0.01 \sim 1 \mu\text{m}$ 。产生烟是一种较为普遍的现象，如有色金属冶炼过程中产生的氧化铅烟、氧化锌烟，在核燃料后处理厂中的氧化钙烟等。

(3) 飞灰。飞灰指随燃料燃烧产生的烟气飞出的分散得较细的灰分。

(4) 黑烟。黑烟一般指由燃料燃烧产生的可见气溶胶。

(5) 雾。雾是气体中液滴悬浮体的总称，如水雾、酸雾、碱雾、油雾等。

## 2. 气体状态污染物

气体状态污染物是以分子状态存在的污染物，简称气态污染物。气态污染物的种类很多，大部分为无机气体。常见的有五大类：以二氧化硫为主的含硫化合物，以一氧化氮和二氧化氮为主的含氮化合物，碳氧化物，碳氢化合物，卤素化合物等。

## (三) 按形成方式不同分类

### 1. 一次污染物

一次污染物是直接从各种污染源排放到空气中的有害物质。常见的有二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳、碳氢化合物、颗粒性物质等。颗粒性物质中包含苯并芘等强致癌物质、有毒重金属、多种有机和无机化合物等。

### 2. 二次污染物

二次污染物是一次污染物在空气中相互作用或它们与空气中的正常组分发生反应所产生的新污染物。这些新污染物与一次污染物的化学、物理性质完全不同，多为气溶胶，具有颗粒小、毒性一般比一次污染物大等特点。常见的二次污染物有硫酸盐、硝酸盐、臭氧、醛类（乙醛和丙烯醛等）、过氧乙酰硝酸酯（PAN）等。

## 三、化工废气的特点

### (一) 种类繁多

化工行业多，每个行业所用原料不同，工艺路线也有差异，生产过程化学反应繁杂，因此造成化工废气种类繁多。

### (二) 组成复杂

化工废气中常含有多种有毒成分。例如，农药、染料、氯碱等行业废气中，既含有多种无机化合物，又含有多种有机化合物。此外，从原料到产品，由于经过许多复杂的化学反应，产生多种副产物，致使某些废气的组成非常复杂。

### (三) 污染物含量高

不少化工企业工艺设备陈旧，原材料流失严重，废气中污染物含量高。例如国内常压吸收法生产硝酸，尾气中  $\text{NO}_x$  含量超  $6\ 696 \text{ mg/m}^3$ ，而采用先进的高压吸收法，尾气中  $\text{NO}_2$  含量仅为  $446 \text{ mg/m}^3$ 。此外，由于受生产原料限制，例如硫酸生产主要采用硫铁矿为原料，个别





的甚至使用含砷、氟量较多的矿石，使化工生产中废气排放量大、污染物含量高。

(四) 污染面广，危害性大

我国化工企业遍布全国各地，中小型企业大多工艺落后，设备陈旧，技术力量薄弱，防治污染所需要的技术、设备和资金问题难以解决。中小型企业生产每吨产品的原料、能源消耗较高，排放的污染物亦远超大中型化工企业的排放量，且这些污染物很少能得到治理。化工废气常含有致癌、致畸、致突变、恶臭、强腐蚀性、及易燃、易爆性的组分，对生产装置、人身安全与健康及周围环境造成严重危害。化工行业的废气来源及主要污染物见表 10-1 所列。

表 10-1 常见化工行业的废气来源及主要污染物

| 行 业       | 主要来源                                        | 废气中主要污染物                                                                                                                  |
|-----------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 氮肥        | 合成氨、尿素、碳酸氢氨、硝酸铵、硝酸                          | NO <sub>x</sub> 、尿酸粉尘、CO、Ar、NH <sub>3</sub> 、SO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub>                                             |
| 磷肥        | 磷矿石加工、普通过磷酸钙、钙镁磷肥、重过磷酸钙、磷酸铵类氮磷复合肥、磷酸、硫酸     | 氟化物、粉尘、SO <sub>2</sub> 、酸雾、NH <sub>3</sub>                                                                                |
| 无机盐       | 铬盐、二硫化碳、钡盐、过氧化氢、黄磷                          | SO <sub>2</sub> 、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 、Cl <sub>2</sub> 、HCl、H <sub>2</sub> S、CO、CS <sub>2</sub> 、As、F、S、氯化铬酐、重芳烃 |
| 氯碱        | 烧碱、氯气、氯产品                                   | Cl <sub>2</sub> 、HCl、氯乙烯、汞、乙炔                                                                                             |
| 有机原料及合成材料 | 烯类、苯类、含氧化合物、含氮化合物、卤化物、含硫化合物、芳香烃衍生物、合成树脂     | SO <sub>2</sub> 、Cl <sub>2</sub> 、HCl、H <sub>2</sub> S、NH <sub>3</sub> 、NO <sub>x</sub> 、CO、有机气体、烟尘、烃类化合物                 |
| 农药        | 有机磷类、氨基甲醛酯类、菊酯类、有机氯类等                       | HCl、Cl <sub>2</sub> 、氯乙烷、氯甲烷、有机气体、H <sub>2</sub> S、光气、硫醇、三甲醇、二硫脂、氨、硫代磷酸酯农药                                                |
| 染料        | 染料中间体、原染料、商品染料                              | H <sub>2</sub> S、SO <sub>2</sub> 、NO <sub>x</sub> 、Cl <sub>2</sub> 、HCl、有机气体、苯、苯类、醇类、醛类、烷烃、硫酸雾、SO <sub>3</sub>            |
| 涂料        | 涂料：树脂漆、油脂漆<br>无机颜料：钛白粉、立德粉、铬黄、氧化锌、氧化铁、红丹、黄丹 | 芳烃                                                                                                                        |
| 炼焦        | 炼焦、煤气净化及化学产品加工                              | CO、SO <sub>2</sub> 、NO <sub>x</sub> 、H <sub>2</sub> S、芳烃、苯并芘、CO <sub>2</sub>                                              |

四、主要的废气污染物及危害

(一) 碳氧化物

1. 一氧化碳 (CO)

CO 是一种无色、无臭、无味的气体。人体吸入 CO，CO 会与血红蛋白结合，导致血红蛋白



白无法运载氧气,器官和组织发生缺血、缺氧,大脑功能瘫痪。CO 是城市大气中数量最多的污染物,碳氢化合物燃烧不完全是 CO 的主要来源,还有汽车排放尾气等,其主要危害是能参与光化学烟雾的形成。

目前对 CO 的局部排放源的控制措施主要集中在汽车方面,如使用排气的催化反应器,加入过量空气使 CO 氧化成  $\text{CO}_2$ 。

## 2. 二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ )

$\text{CO}_2$  是含碳物质完全燃烧的产物,也是动物呼吸排出的废气。它本身无毒,对人体无害,但其含量大于 8% 时会令人窒息。近年来研究发现,现代大气中的  $\text{CO}_2$  浓度不断上升,引起地球气候变化,这个变化称为“温室效应”,所以联合国将  $\text{CO}_2$  列为危害全球的六种化学品之一。

## (二) 硫的氧化物

硫的氧化物主要有  $\text{SO}_2$  和  $\text{SO}_3$ 。以  $\text{SO}_2$  为例,  $\text{SO}_2$  具有强烈的刺激性气味,它能刺激眼睛,损伤呼吸器官,引起呼吸道疾病。特别是  $\text{SO}_2$  与大气中的尘粒、水分形成气溶胶颗粒时,这三者的协同作用对人的危害更大,这种污染称为伦敦型烟雾或叫硫酸烟雾。 $\text{SO}_2$  的腐蚀性很大,能导致皮革强度降低,建筑材料变色,塑像及艺术品毁坏。在与植物接触时,会杀死叶组织,引起叶子脱色变黄,农作物产量下降。另外,  $\text{SO}_2$  在大气中含量过高是形成酸雨污染的重要因素。

大气中的  $\text{SO}_2$  主要通过降水清除或氧化成硫酸盐微粒后再干沉降或雨除。除此之外,土壤的微生物降解、化学反应、植被和水体的表面吸收等都是去除  $\text{SO}_2$  的途径。

## (三) 氮氧化物 ( $\text{NO}_x$ )

氮氧化物主要来源于矿物燃料的燃烧过程(包括汽车及一切内燃机的排放)、生产硝酸工厂排放的尾气。氮氧化物浓度高的气体呈棕黄色,从工厂烟囱排出来的氮氧化物气体称为黄龙。氮氧化物的影响有以下几点。

(1) 对人类的影响。当空气中的  $\text{NO}_2$  含量达  $150 \text{ mL/m}^3$  时,对人的呼吸器官有强烈的刺激作用,3 ~ 8 h 会发生肺水肿,可能会引起致命的危险。

(2) 对森林和作物生长的影响。 $\text{NO}_x$  通过叶表面的气孔进入植物活体组织后,干扰了酶的作用,阻碍了各种代谢机能;有毒物质在植物内还会进一步分解或参与合成过程,产生新的有害物质,侵害机体内的细胞和组织,使其坏死。

(3) 对全球气候的影响。氮氧化物和二氧化碳引起“温室效应”,使地球气温上升  $1.5 \sim 4.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,造成全球性气候反常。

## (四) 碳氢化合物

碳氢化合物主要排放源为汽油燃烧(38.5%)、焚烧(28.3%)、溶剂蒸发(11.3%)、石油蒸发和运输消耗(8.8%)、提炼废物(7.1%)。美国排放碳氢化合物占总产量的比例高达 34%,其中半数以上来自交通运输。汽车排放的有机化合物主要有两类:烃类(甲烷、乙烯、乙炔、丙烯、丁烷,少量的芳烃,微量的易致癌的多环芳烃等)和醛类(甲醛、乙醛、丙醛、丙烯醛和苯甲醛等)。

一般碳氢化合物对人的影响不大，主要是醛类物质具有刺激性。碳氢化合物对大气的最大影响是在空气中反应形成危害较大的二次污染物，如光化学烟雾。

大气中去除碳氢化合物的途径主要有土壤微生物活动，植被的化学反应、吸收和消化，对流层和平流层的化学反应，向颗粒物转化，等等。

### （五）粒状污染物（如烟、尘、雾等）

粒状污染物的来源主要有火山爆发的烟气、岩石风化的灰尘、宇宙降尘、海浪飞逸的盐粒、微生物、细菌、植物的花粉等，约占大气颗粒物总量的 89%。由燃料燃烧、开矿、选矿或固体物质的粉碎加工（磨面粉、制水泥等）、火药爆炸、农药喷洒等排放的粒状污染物约占颗粒物总量的 11%。人为排放集中在人类活动的场所，它增加了人类周围环境的大气负担。

## 五、大气污染的综合防治措施

### （一）全面规划，合理布局

大气污染防治的主要任务有两个，一是解决区域的经济和社会发展与环境保护之间的矛盾；二是对已造成的环境污染和环境问题，提出改善和控制污染的优化方案。因此，做好城市和大工业区的环境规划设计工作，采取区域性综合防治措施，是控制环境污染（包括大气污染）的一个重要途径。

### （二）严格环境管理

完整的环境管理体制是由环境立法、环境监测和环境保护管理机构三部分组成的。环境立法是进行环境管理的依据，它以法律、法令、条例、规定、标准等形式构成一个完整的体系。环境监测是环境管理的重要手段，在主要环境领域内没有及时、准确、完善的监测网，要进行有效的环境管理和监督是不可能的。环境保护管理机构是实施环境管理的领导者和组织者。

### （三）技术措施

- （1）改革生产工艺，优先采用无污染的工艺，是防治环境污染的根本途径。
- （2）严格生产工艺操作，选配合适的原材料，减轻污染或对所产生的污染物进行处理。
- （3）合理利用能源，改革能源构成，改进燃烧设备和燃烧条件，是节约能源和控制大气污染的重要途径。
- （4）建立综合性工业基地，开展综合利用，使废气、废水、废渣资源化，减少污染物的总排放量。

### （四）经济政策

- （1）保证必要的环境保护设施的投资。
- （2）对治理环境污染从经济上给予鼓励，如低息长期贷款，对综合利用产品实行利润留



成和减免税政策。

(3) 贯彻“谁污染谁治理”的原则，并把排污收费的制度和行政、法律制裁措施具体化。惩罚一般分三种形式：排污收费、赔偿损失和罚款、追究行政责任及刑事责任。

### (五) 高烟囱扩散稀释

采用高烟囱扩散稀释的方法，可以使大气污染物向更高、更广的范围扩散，减轻局部地区大气污染。因为即使是采用最好的气体净化装置，其排出的气体中总会含有少量有害物质，至少存在惰性气体含量高、氧气含量小的情况，所以不能直接排到地面上。目前世界上很多国家都主要采用高烟囱扩散的方法防止  $\text{SO}_2$  污染。但是，这种高烟囱扩散的方法只能减轻局部地区大气污染，排放污染物绝对量并没有减少，而且烟囱越高造价越高（一般是烟囱的造价与其高度的平方成正比），所以，在实际工作中还应根据各地区大气污染情况，控制污染物的总排放量。

### (六) 绿化造林

绿化造林不仅能美化环境，调节空气温度、湿度及城市小气候，保持水土，防风防沙，而且在净化大气、减低噪声方面也有显著作用。

### (七) 安装废气净化装置

在充分考虑环境规划，合理布局，改革燃料、原料，提高大气和绿地自净能力的情况下，若污染物排放浓度（或排放量）或地面浓度仍达不到大气环境标准时，则必须安装废气净化装置。对污染源进行治理，安装废气净化装置是控制大气环境质量的基础，也是环境规划等综合防治措施的前提。

## 第二节 除尘技术

### 课前小故事

#### 伦敦烟雾事件

1952年12月5日至9日，伦敦上空受反气旋影响，大量工厂生产和居民燃煤取暖排出的废气难以扩散，积聚在城市上空。伦敦被浓厚的迷雾所笼罩，马路上几乎没有车，人们小心翼翼地沿着人行道摸索前进。大街上的电灯在烟雾中若明若暗，犹如黑暗中的点点星光。直至12月9日，一股强劲的西风才吹散了笼罩在伦敦上空的恐怖烟雾。



除尘技术主要是将废气中的颗粒污染物（固体粒子、液体粒子及尘粒吸附水后形成的尘雾）脱除掉。除尘设备根据其原理大致可分为机械式除尘器、湿式除尘器、过滤式除尘器和静电除尘器等。

## 一、机械式除尘器

机械式除尘器是依靠机械力（重力、惯性力、离心力等）将尘粒从气流中去除的装置。特点是结构简单，设备费和运行费均较低，但除尘效率不高。按除尘粒的不同可设计为重力沉降室、惯性除尘器和旋风除尘器。机械式除尘器适用于含尘浓度高和颗粒力度较大的气流，广泛用于除尘要求不高的场合或用作高效除尘装置的前置预除尘器。

### （一）重力沉降室

重力沉降室是利用重力作用使尘粒从气流中自然沉降的除尘装置。其机理为含尘气流进入沉降室后，由于扩大了流动截面积而使气流速度大大降低，使较重颗粒在重力作用下缓慢向灰斗沉降。重力沉降室具有结构简单、投资少、压力损失小的特点，维修管理较容易，而且可以处理高温气体。但是其体积大、效率相对低，一般只作为高效除尘装置的预除尘装置，用来除去较大和较重的粒子。

### （二）惯性除尘器

由于运动气流中尘粒与气体具有不同的惯性力，含尘气体急转弯或者与某种障碍物碰撞时，尘粒的运动轨迹将分离出来使气体得以净化，这种设备称为惯性除尘器或惰性除尘器。惯性除尘器和重力沉降室一样，可以单独使用，也可以作为高效除尘装置的预除尘装置。惯性除尘器的结构如图 10-1 所示。

### （三）旋风除尘器

旋风除尘器是使含尘气流做旋转运动，借助于离心力将尘粒从气流中分离并捕集于器壁，再借助重力作用使尘粒落入灰斗的除尘装置。旋风除尘器结构简单，易于制造、安装和维护管理，设备投资和操作费用都较低，已广泛用于从气流中分离固体和液体粒子，或从液体中分离固体粒子。旋风除尘器的结构如图 10-2 所示。

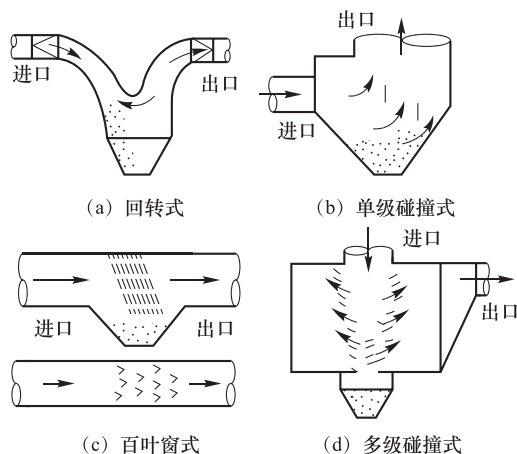


图 10-1 惯性除尘器的结构示意图

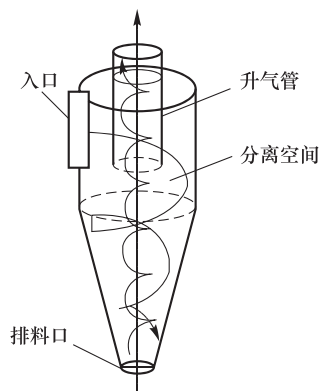


图 10-2 旋风除尘器的结构示意图



## 二、湿式除尘器

湿式除尘器俗称“水除尘器”，它是使含尘气体与水密切接触，利用水滴和颗粒的惯性碰撞或者利用水和粉尘的充分混合作用及其他作用捕集颗粒或使颗粒增大或留于固定容器内达到水和粉尘分离效果的装置。湿式除尘器有喷雾塔式洗涤器、填料塔式洗涤器、离心洗涤器、文丘里洗涤器等多种。常见文丘里洗涤器的结构如图 10-3 所示。

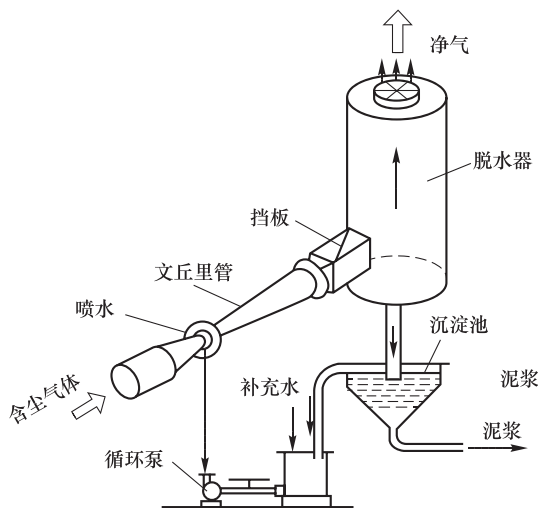


图 10-3 文丘里洗涤器的结构示意图

湿式除尘器的优点是结构简单，占地面积小，投资低，操作及维修方便，净化效率高，能够处理高温、高湿、易燃易爆的气流，将着火、爆炸的可能减至最低。对于化工、喷漆、喷釉、颜料等行业产生的带有水分、黏性和刺激性气味的灰尘来说，湿式除尘器是最理想的除尘装置。因为湿式除尘器不仅可除去灰尘，还可利用水除去一部分异味，如果是有害气体（如少量的二氧化硫、盐酸雾等），可在洗涤液中配制吸收剂吸收。湿式除尘器的缺点是能耗较高。从湿式除尘器中排出的泥浆要进行处理，否则会造成二次污染；净化腐蚀性气体时，化学腐蚀性会转移到水中，因此污水系统要用防腐材料保护；不适合用于疏水性烟尘，易使管道、叶片等发生堵塞；在寒冷的冬季，设备可能冻结，应采用防冻措施等。

## 三、过滤式除尘器

过滤式除尘器是使含尘气体通过多孔滤料，把气体中尘粒截留下来，使气体得到净化的除尘装置。其具有使用寿命长、机械强度高、价格便宜、除尘效率高、易清洗、耐温、耐腐蚀、使用方便、性能稳定的特点。

过滤式除尘器分内部过滤与外部过滤。内部过滤是把松散多孔的滤料填充在框架内作为过滤层，尘粒是在滤层内部被捕集的，如颗粒层过滤器就属于这类过滤器。外部过滤使用纤



维织物、滤纸等作为滤料，通过滤料的表面捕集尘粒故称外部过滤。这种除尘方式的最典型的装置是袋式除尘器，它是过滤式除尘器中应用最为广泛的一种。

袋式除尘器适用捕集细小、干燥、非纤维性粉尘。滤袋采用纺织的滤布或非纺织的毡制成，利用纤维织物的过滤作用对含尘气体进行过滤，当含尘气体进入袋式除尘器后，颗粒大、密度大的粉尘，由于重力的作用沉降下来，落入灰斗，含有较细小粉尘的气体在通过滤料时，粉尘被阻留，气体得到净化。

袋式除尘器中的滤料使用一段时间后，由于筛滤、碰撞、滞留、扩散、静电等效应，滤袋表面积聚了一层粉尘，随着粉尘在滤料表面的积聚，除尘器的阻力相应地增加，当滤料两侧的压力差很大时，会把有些已附着在滤料上的细小尘粒挤压过去，使除尘器效率下降。另外，除尘器的阻力过高会使除尘系统的风量显著下降。因此，除尘器的阻力达到一定数值后，要及时清灰。袋式除尘器的结构如图 10-4 所示。

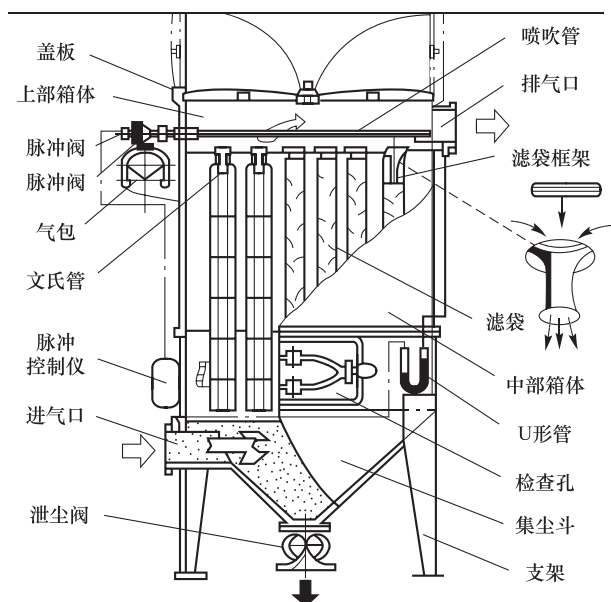


图 10-4 袋式除尘器的结构示意图

## 四、静电除尘器

静电除尘器，简称“电除尘器”，其工作原理是利用高压电场使烟气发生电离，气流中的粉尘荷电在电场作用下与气流分离，要经历荷电、收集和清灰三个阶段。

烟气通过电除尘器主体结构前的烟道时，使其烟尘带正电荷，然后烟气进入设置多层阴极板的电除尘器通道。由于带正电荷烟尘与阴极板的相互吸附作用，使烟气中的颗粒烟尘吸附在阴极上，定时打击阴极板，使具有一定厚度的烟尘在自重和振动的双重作用下落在电除尘器结构下方的灰斗中，从而达到清除烟气中的烟尘的目的。其优点是对粒径很小的尘粒具有较高的去除效率，且不受含尘浓度和烟气流量的影响；缺点是设备投资费用高，技术要求高。



## 第三节 气态污染物处理技术

### 课前小故事

#### 空气也可以做成罐头吗

空气罐头出现，最早可追溯到第一次世界大战时期。有一天，法国著名艺术家马赛尔·杜尚在从法国赴美国的途中，被边检人员拦下，询问鼓鼓的行李包里装有何物？他随口回答：“巴黎空气。”这一句玩笑话，却触动了马赛尔·杜尚的创作灵感。1919年，他把一个玻璃器皿中的液体抽掉，然后将之命名为“巴黎空气”，赠送给两位美国收藏家。



### 一、吸收法

吸收法是利用气体混合物中不同组分在吸收中的溶解度不同，或与吸收剂发生选择性化学反应，将有害组分从气流中分离的过程。

吸收法治理气态污染物按反应类型可分为物理吸收法和化学吸收法。例如水吸收醇和酮类物质、洗油吸收烃类蒸气都是物理吸收法。化学吸收法常用在处理化工废气中，例如碱液吸收烟气中的  $\text{SO}_2$ 、用水吸收  $\text{NO}_x$  等。

吸收法治理化工废气一般采用逆流操作，被吸收的气体由下向上流动，吸收剂由上而下流动，在气、液逆流接触中完成传质过程，去除污染物。

吸收法具有设备简单、捕集效率高、应用范围广、一次性投资低等特点，已被广泛用于有害气体的治理，例如，含  $\text{SO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{HF}$  和  $\text{NO}_x$  等污染物的废气均可用吸收法净化。

但吸收法只是将气体中的有害物质转移到了液相中，因此必须对吸收液进行处理，否则容易引起二次污染。此外，低温操作下吸收效果好，因此在处理高温烟气时，必须对排气进行降温处理，可以采取直接冷却、间接冷却、预置洗涤器等降温手段。

#### （一）吸收设备

吸收的主要设备包括填料塔、筛板塔、喷淋塔、湍球塔、文丘里吸收器。最常用的是填料塔，其次是筛板塔。文丘里吸收器则是近年来使用较多的高效率吸收设备之一。

##### 1. 填料塔

典型填料塔的塔内装有支撑板，板上堆放填料层，喷淋的液体通过安装在填料上部的分布器洒向填料。在吸收塔内，气体和液体经常逆流接触，即吸收剂自塔顶向下喷淋，气体从塔底被送入，沿填料间空隙上升，填料的润湿表面作为气液接触的传质表面。常用的填料有



拉西环、鲍尔环、鞍形和波纹填料等。为保证填料塔运行稳定，一般要求液体喷淋密度在  $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  以上，并力求喷淋均匀。填料塔的空塔车速一般为  $0.3 \sim 1.5 \text{ m/s}$ ，压降通常为  $0.15 \sim 0.60 \text{ kPa/m}$ ，液气比为  $0.5 \sim 2.0 \text{ kg/m}^3$ 。

填料塔具有结构简单、便于制造、气液接触良好、压降较小等优点。其缺点是当烟气中含有悬浮颗粒时，填料容易堵塞，清理检修时填料损耗大。填料塔的结构如图 10-5 所示。

## 2. 筛板塔

筛板塔的结构如图 10-6 所示。在截面为圆形的塔内，沿塔高装有多层筛板。筛板上开有  $2 \sim 15 \text{ mm}$  的小孔，开孔率一般为  $6\% \sim 25\%$ 。操作时，气体从下而上经筛孔进入筛板上的液层，塔板上的液层厚度为  $30 \text{ mm}$  左右，气液在筛板上交错流动，通过气体的鼓泡进行吸收。气液可以进行逐级的多次接触。

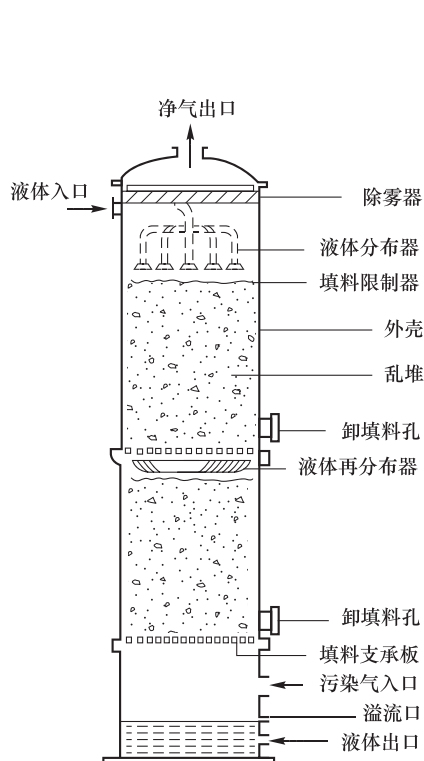


图 10-5 填料塔的结构示意图

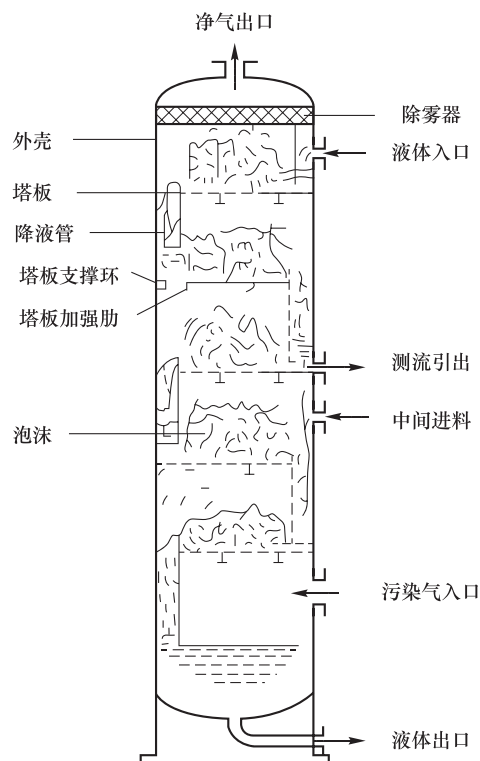


图 10-6 筛板塔和结构示意图

操作时一般控制气体通过筛板塔的空塔速度为  $1.0 \sim 2.5 \text{ m/s}$ ，气体穿过筛孔的气速约为  $4.5 \sim 12.8 \text{ m/s}$ ，每块板的压降为  $0.8 \sim 2.0 \text{ kPa}$ 。

## 3. 喷淋塔

喷淋塔空塔车速一般为  $1.5 \sim 6 \text{ m/s}$ ，塔内压降为  $250 \sim 500 \text{ Pa}$ ，液气比较小，适用于极快或快速反应的化学吸收过程。其特点是结构简单、压降低、不易堵塞、气体处理能力较大、投资费用低，但占地面积大、效率较低，常用于规模较大的锅炉烟气湿法脱硫以及作预冷却器。喷淋塔的结构如图 10-7 所示。

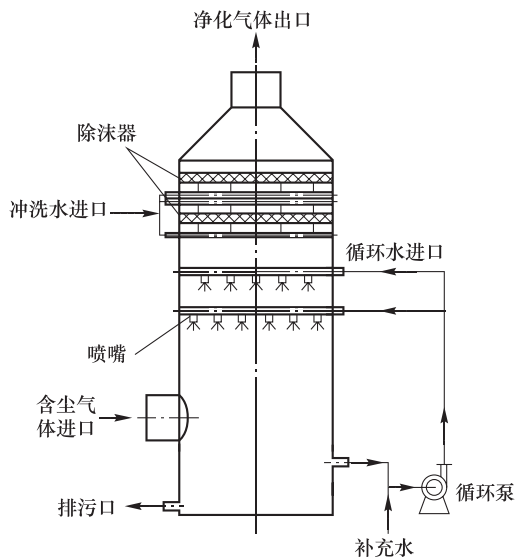


图 10-7 喷淋塔的结构示意图

各种吸收设备均应满足下列基本要求：①气液接触面大，接触时间长；②气液之间扰动强烈，吸收效率高；③流动阻力小，工作稳定；④结构简单，维修方便，投资和运行维修费用低；⑤具有抗腐蚀和防堵塞能力。

## （二）吸收设备的选择原则

吸收设备的选择要把握以下原则。

- (1) 若气液反应速度非常快，可以优先选用喷淋塔、填料塔等。
- (2) 反应极快、热效应大时，也可以考虑采用筛板塔。
- (3) 如果反应物浓度高，可选用文丘里洗涤器。
- (4) 当气液传质速度慢时，需要提供大量的液体，可采用鼓泡塔。
- (5) 在吸收过程产生固体时，宜选用内部构件少、阻力小、压降小的设备，例如拨水轮吸收室等。
- (6) 在达到吸收要求的前提下，尽可能选用结构简单、造价低廉、容易操作的设备。在常见的吸收设备中，结构的复杂程度从低到高依次为喷淋塔、填料塔、筛板塔。

## （三）吸收剂的选择原则和选择方法

### 1. 吸收剂的选择原则

- (1) 吸收剂应对混合气体中被吸收组分具有良好的选择性和较大的吸收能。
- (2) 吸收剂的蒸气压要低，以减少吸收剂损失，避免吸收液成分进入气相，造成新的污染。此外，吸收剂还应具备沸点高、熔点低、黏度低、不易起气泡等特性。
- (3) 化学性质稳定，腐蚀性小、无毒性、难燃烧。
- (4) 价廉易得。
- (5) 易于解吸再生或综合利用。

任何一种吸收剂很难同时满足以上要求，实际上可根据具体情况，权衡各方面因素而定。

## 2. 吸收剂的选择方法

(1) 对于物理吸收，要求溶解度大，可以按照相似相溶规律选择吸收剂，即从与吸收质结构相近物质中筛选吸收剂。

(2) 对于化学吸收过程，可以选择容易与被吸收气体发生反应的物质作吸收剂。

(3) 对于酸性气体，例如  $\text{CO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{HF}$  等，可以优先选用碱或碱性盐溶液吸收。

(4) 水是一种常用的吸收剂，是许多吸收过程的首选对象。用水做吸收剂，主要是利用物质在水中溶解度较大的特性，一般在加压和低温下吸收，在降压和升温下解吸。水的优点是价廉易得，吸收流程、设备和操作都比较简单；缺点是使用的设备庞大、净化效率低、动力消耗大。

(5) 碱金属钠、钾、铵或碱土金属钙、镁等的溶液是另一类常用吸收剂，这一类吸收剂能与被吸收的气态污染物（例如  $\text{SO}_2$ 、 $\text{HCl}$ 、 $\text{HF}$ 、 $\text{NO}_2$  等）发生化学反应，因而使吸收能力大大增加。

(6) 吸收碱性气体常用各种酸进行吸收。

化学吸收的流程较长、设备较多、操作较复杂，吸收剂价格较贵且再生困难，能耗和化学品消耗大。因而在选择吸收剂时，要权衡多方面的因素。

## 二、吸附法

吸附法是指使废气与大表面、多孔性固体物质相接触，将废气中的有害组分吸附在固体表面上，使其与气体混合物分离，达到净化目的。

吸附法可分为物理吸附和化学吸附。

### (一) 物理吸附

物理吸附也称范德华吸附，它是由吸附质和吸附剂分子间作用力所引起的，此力也称作范德华力。由于范德华力存在于任何两分子间，所以物理吸附可以发生在任何固体表面上。吸附剂表面的分子由于作用力没有平衡而保留有自由的力场来吸引吸附质，由于它是分子间的吸力所引起的吸附，所以结合力较弱，吸附热较小，吸附和解析速度也都较快，被吸附物质也较容易解析出来。物理吸附在一定程度上是可逆的，如活性炭对许多气体的吸附，被吸附的气体很容易解脱出来而不发生性质上的变化。

### (二) 化学吸附

化学吸附是吸附质分子与固体表面原子（或分子）发生电子的转移、交换或共有，形成化学键的吸附。其吸附热较大，被吸附的气体需要在很高的温度下才能解脱，而且在性状上有变化，大多是不可逆的。同一物质可能在低温下进行物理吸附，在高温下进行化学吸附，或者两者同时进行。



### （三）吸附剂的选择

气体吸附分离首要问题是选择吸附剂，吸附操作成功与否，主要取决于吸附剂的性能。吸附剂一般具有以下特点：

- ①大的比表面积、适宜的孔结构及表面结构；
- ②对吸附质有强烈的吸附能力；
- ③制造方便，容易再生；
- ④有良好的机械强度；
- ⑤化学稳定和热稳定性好；
- ⑥价廉、易得。

### （四）吸附法的具体种类

吸附法治理气态污染物包括吸附及吸附剂再生的全过程。吸附法按常用的吸附剂可分为分子筛吸附法、活性炭吸附法、硅胶吸附法及泥煤吸附法等。分子筛吸附法主要可用来处理  $\text{NO}$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CS}_2$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{C}_n\text{H}_m$ 、 $\text{HF}$ 、 $\text{SO}_2$  等废气；活性炭吸附法主要可用来处理汽油、醛类、酚类、烯烃、胺类化合物、碱雾、酸性气体、氯、甲醛、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{HF}$ 、 $\text{SO}_2$  等废气；硅胶吸附法主要可用来处理  $\text{NO}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2$ 、 $\text{SO}_2$  等废气；泥煤吸附法主要可用来处理恶臭物质、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{SO}_2$  等废气。化工废气处理中最常用的吸附剂是活性炭，活性炭纤维吸附容量大，耐热，耐酸、碱，它对微生物、细菌也有优良的吸附能力。

### （五）吸附装置

吸附装置有固定床吸附器和移动床吸附器。固定床吸附器结构简单，吸附剂磨损小，其缺点是操作复杂，劳动强度大，设备体积大。移动床吸附器中固体吸附剂在吸附床中不断移动，其优点是处理气量大，设备内吸附剂利用率高，不会出现漏吸的死角，缺点是吸附剂磨损严重。

### （六）吸附法的特点

吸附法的特点是净化效率高，特别是对低浓度气体，具有很强的净化能力。吸附法特别适用排放标准要求严格或有害物浓度低，用其他方法达不到净化要求的气体净化。因此，常作为深度净化手段或联合运用几种净化方法时的最终控制手段。由于一般吸附剂的吸附容量有限，对高浓度废气的净化，不宜采用吸附法。

## 三、催化转化法

催化转化法是在催化剂的作用下，使有害气体转化为无害或易于回收气体的方法。该转化法效率高、操作简便，但是催化剂价格较高，废气的预热还需要一定的能量。采用这种方法的关键是选择合适的催化剂，并延长催化剂的使用寿命。气体净化过程中所用的催化剂一

一般为金属盐类或金属，主要有铂、钯、钨、铑等贵金属，锰、铁、钴、镍、铜、钒等的氧化物。

催化转化法与吸收法、吸附法不同，催化转化法无须将有害气体与主气流分离，可直接将有害气体转化为无害气体，避免了二次污染的产生。目前，此法已成为一项重要的大气污染治理技术，处理的主要污染物有  $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_x$  等。

催化转化法分为催化氧化法和催化还原法。

### （一）催化氧化法

催化氧化法是使有害气体在催化剂作用下，与空气中的氧发生化学反应，转化为无害气体的方法。例如，含碳氢化合物的废气，经催化氧化，碳氢化合物能变成无害的二氧化碳和水。

### （二）催化还原法

催化还原法是使有害气体在催化剂的作用下和还原气体发生化学反应，变为无害气体的方法。例如，氮氧化物能在催化剂（铜铬）作用下与氨反应生成无害的氮气和水。

在化工废气处理中，常用的催化剂一般为金属盐类或金属，例如钒、铂、铅、镉、氧化铜、氧化锰等。催化剂载在具有巨大表面积的情性载体上，典型的载体为氧化铝、铁矾土、石棉、陶土、活性炭和金属丝等。

催化转化法的特点是净化效率较高，净化效率受废气中污染物浓度影响较小，而且在治理过程中无须将污染物与主气流分离，可直接将主气流中的有害物转化为无害物，避免了二次污染，但是价格较贵，操作要求较高，废气中有害物质很难作为有用物质进行回收。

## 四、燃烧法

燃烧法是利用工业废气中污染物可以燃烧氧化的特性，将其燃烧转变为无害物质的方法。燃烧法可分为三种：直接燃烧、热力燃烧、催化燃烧。

### （一）直接燃烧

直接燃烧是将可燃有害废气当作燃料来燃烧的方法。能采用直接燃烧法来处理的废气应当是可燃组分含量较高，或燃烧氧化放出热量较高，能维持持续燃烧的气体混合物。因此，可采用直接燃烧的方法处理的废气有两类：一类是既不需要补充燃料又不需要提供空气便可维持燃烧的废气；另一类是不需要辅助燃料，但需要补充空气才可维持燃烧的废气。直接燃烧通常在  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上进行，燃烧完全的产物应是二氧化碳、氮和水蒸气等。

直接燃烧的设备可以是一般的炉、窑，也可以是火炬。火炬是一种敞开式的直接燃烧器，它适用于只需要补充空气、不需要补充燃料的废气。例如，炼油厂氧化沥青产生的废气经冷却后，可送入生产用加热炉直接燃烧净化，并回收热量；溶剂厂的甲醛尾气经吸收处理后，仍含有甲醛、氢和甲烷，可送入锅炉直接燃烧。

火炬燃烧法的优点是安全，很少要从外部向系统供给能量，成本低，结构简单，但它的



最大缺点是资源不能回收,且往往由于燃烧不全造成大量污染物排向大气。因而各炼油厂、石油化工厂提出要消灭火炬,设法将火炬气用于生产,以回收热值或返回生产系统作原料,只在废气流量过大影响生产平衡时,自动控制排入火炬燃烧排空。

火炬常常高出地面几十米。由工厂各处排出的可燃废气汇于主管,经分离器、阻火水封槽及其他阻火器后导入火炬顶部燃烧排放,顶部设有气体分布装置、火焰稳定装置以及采用普通燃料并借用电火花点火的点火器,便于火炬顶部安全、稳定、可靠地燃烧。

## (二) 热力燃烧

热力燃烧是指把废气温度提高到可燃气态污染物的温度,使其进行完全氧化分解的过程。通常对于可燃物含量低、不能维持燃烧的废气,就要用热力燃烧法处理。

在热力燃烧中,被处理的废气不直接作为燃料,只能作为燃烧过程中的助燃气体(在废气含氧足够多时)或燃烧对象(废气含氧很低时),依靠燃烧产生的热力,提高废气的温度,使废气中烃及其他污染物迅速氧化,转变为无害的二氧化碳和水蒸气。

热力燃烧过程包括辅助燃料燃烧以提供热量;废气与高温燃气混合达到反应温度;保持废气在反应温度下有足够的停留时间以使其中的可燃气态污染物氧化分解等三个步骤。在供氧充分的情况下,热力燃烧能否燃烧完全的必要条件是反应温度、停留时间和湍流混合等三个要素,即“三T”条件。

## (三) 催化燃烧

催化燃烧是利用催化剂使废气中气态污染物在较低的温度(250 ~ 450 ℃)下氧化分解的方法,即可燃物在催化剂作用下燃烧。催化燃烧所用的催化剂为具有大比表面的贵金属和金属氧化物多组分物质。如化工厂的烟雾在负载型铂和钯催化剂的作用下,将NO转化为N<sub>2</sub>。

催化燃烧法的优点是,与直接燃烧相比其催化燃烧温度较低,能在较低温度下迅速、完全氧化分解成CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O,能耗小,甚至在有些情况下还能回收净化后废气带走的热量;燃烧比较完全;适用于几乎所有含烃类有机废气及恶臭气体的治理,例如有机硫化物、氮化物、烃类、有机溶剂、酮类、醇类、醛类和脂肪酸类等;基本上不会造成二次污染,有机物氧化后分解成CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O,且净化率一般都在95%以上;所需要的辅助燃料仅为热力燃烧的40% ~ 60%。

## 五、冷凝法

冷凝法是利用物质在不同温度下具有不同饱和蒸气压这一物理性质,采用降低系统温度或提高系统压力的方法,使处于蒸气状态的污染物冷凝并从废气中分离出来的气态污染物处理方法。冷凝法设备简单,操作方便,并容易回收较纯产品,用于去除高浓度有害气体更有效,但该法不宜用于净化低浓度有害气体。

冷凝法对有害气体的去除程度与冷却温度和有害成分的饱和蒸气压有关。冷却温度越低,有害成分越接近饱和,其去除程度越高。冷凝法可分为接触冷凝和表面冷凝。

(1) 接触冷凝。接触冷凝是被冷却的气体与冷却液或冷冻液直接接触。其优点是有利于



强化传热，但冷凝液需要进一步处理。

(2) 表面冷凝。表面冷凝也称间接冷却，冷却壁把废气与冷却液分开，因而被冷凝的液体很纯，可以直接回收利用。所用装置有列管式冷凝器、淋洒式冷凝器以及螺旋板式冷凝器。

另外，冷凝法也有一次冷凝法和多次冷凝法之分。前者多用于净化含单一有害成分的废气，后者多用于净化含多种有害成分的废气或用于提高废气的净化效率。冷凝法处理废气的过程中所用的冷源可以是地下水、大气或特制冷源。

## 六、其他生态污染物处理技术

除以上介绍的五种气态污染物处理技术之外，还有生物法、膜分离法、电子辐射化学净化法等。生物法主要依靠微生物的生化降解作用分解污染物；膜分离法利用不同气体透过特殊薄膜的不同速度，使某种气体组分得以分离；电子辐射化学净化法则是利用高能电子射线激活、电离、裂解废气中的各组分，从而发生氧化等一系列化学反应，将污染物转化为非污染物。气态污染物的处理可采用一种处理方法或多种处理方法联合使用。

## 第四节 含二氧化硫的废气的防治

### 课前小故事

#### 酸雨有什么危害

酸雨是指 pH 值小于 5.6 的雨、雪、雾、雹等大气降水。酸雨是酸性沉降中的湿沉降，酸性沉降分为湿沉降与干沉降两大类，前者指的是所有气状污染物或粒状污染物，随着雨、雪、雾、雹等降水形态而落到地面；后者是指在不降雨的日子，从空中降下来的灰尘所带的一些酸性物质。



含二氧化硫的废气的治理技术包括燃料脱硫（燃烧前）、燃烧脱硫（燃烧中）、烟气脱硫（燃烧后）。

### 一、燃料脱硫

燃料脱硫是指在燃烧前脱去燃料中所含的硫分。煤和燃料油的含硫量为 0.5% ~ 5%（质量分数），燃烧时大部分转化为二氧化硫气体排入大气。其中约有 5% 的  $\text{SO}_2$  在大气中又氧化成  $\text{SO}_3$ 。因此，燃料脱硫是防止硫氧化物对大气污染的主要环节之一。

#### （一）煤脱硫

硫在煤中主要以无机的硫化铁和有机的硫化物两种形式存在。其中以硫化铁（黄铁矿）形



式存在的硫约占 2/3。煤脱硫技术可分为物理法、化学法、气化法和液化法。

(1) 物理法。物理法利用黄铁矿密度比煤大,且黄铁矿是顺磁性,煤是反磁性物质的性质,将煤破碎,然后用重力分离法或高梯度磁分离法去除黄铁矿。物理法的脱硫率达到 50% 左右。

(2) 化学法。煤经破碎后与硫酸铁水溶液混合,在反应器中加热至  $100 \sim 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,硫酸铁与黄铁矿反应转化为硫酸亚铁和单体硫。同时通入氧气,使硫酸亚铁再生为硫酸铁,在工艺系统中循环使用。煤通过过滤器和溶液分离,硫成为副产品。

(3) 气化法。煤在  $1\,000 \sim 1\,300\text{ }^{\circ}\text{C}$  高温下,通过气化剂发生不完全氧化,从而成为煤气。煤中的硫分在气化时大部分成为硫化氢,进入煤气,再用液体吸收或固体吸附等方法脱除。

(4) 液化法。液化法是指在高压、高温、加氢、催化剂作用下使煤液化。煤的液化有合成法、直接裂解加氢法和热溶加氢法等。在液化过程中,硫分与氢反应生成硫化氢逸出,因此得到的是高热值、低硫、低灰分燃料。

## (二) 燃料油脱硫

燃料油脱硫主要指重油脱硫。原油中的大部分 ( $80\% \sim 90\%$ ) 硫分以苯环状的有机硫化物残留在重油中。

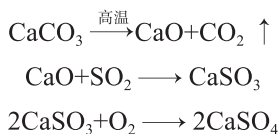
重油脱硫采用加氢脱硫。在催化剂作用下,用高压加氢反应,切断碳与硫的化合键,以氢置换出碳,同时,氢与硫作用成为硫化氢,从重油中分离出来,再用吸收法除去。也可将重油用蒸汽、氧气部分燃烧气化,硫转化成为硫化氢和少量二氧化硫,再进行处理。为避免催化剂中毒,失去催化作用,加氢脱硫有直接脱硫和间接脱硫两种工艺。

(1) 直接脱硫。直接脱硫是选用抗中毒性能较好的催化剂,直接加氢脱硫,同时采取适当防护措施,如有的工艺在反应塔前加防护塔,填充其他廉价的催化剂,尽可能除去不纯物和金属成分。

(2) 间接脱硫。间接脱硫是把重油减压蒸馏,分成馏出油和残油。单独将馏出油加氢脱硫,然后与残油进行混合。或将残油以液化丙烷(或丁烷)作溶剂,对残油进行处理,分离出沥青后,再与馏出油混合进行加氢处理。

## 二、燃烧脱硫

在燃烧过程中,向炉内加入石灰石( $\text{CaCO}_3$ )或白云石( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ )粉作脱硫剂,它们在燃烧过程中受热分解生成  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ ,与烟气中  $\text{SO}_2$  结合生成硫酸盐,随炉渣排出。其基本原理如下:





### 三、烟气脱硫

烟气脱硫是目前技术最成熟、最能大规模商业化应用的脱硫方式。目前，烟气脱硫技术种类达几十种，按脱硫产物是否回收利用，烟气脱硫可分为抛弃法和回收法。

#### (一) 抛弃法

抛弃法是将  $\text{SO}_2$  转化为固体产物抛弃掉，存在残渣污染与处理问题。

#### (二) 回收法

回收法是由反应产物制取硫酸、液体二氧化硫、化肥或石膏等有用物质，还可将反应后的脱硫剂再生循环使用，各种资源可以综合利用，避免产生固体废物。回收法费用普遍高于抛弃法，经济效益低。按脱硫剂和脱硫产物是固态还是液态，烟气脱硫分为湿法、半干法、干法。湿法脱硫技术较为成熟，效率高，操作简单，但投资较大，脱硫产物的处理较难，烟气不利于扩散，设备及管道防腐蚀问题较为突出。半干法、干法脱硫技术的脱硫率较低，脱硫剂的利用率也较低，但脱硫产物（干粉状）容易处理，工艺较简单，投资一般低于湿法脱硫技术，有利于烟气的排放和扩散。

##### 1. 湿法脱硫

湿法脱硫是把烟气中的  $\text{SO}_2$  和  $\text{SO}_3$  转化为液体或固体化合物，从而把它们从烟气中分离出来。湿法脱硫主要包括石灰（石灰石）-石膏法、双碱法、氨吸收法、磷铵复肥法、稀硫酸吸收法、海水脱硫、氧化镁法等十多种。下面主要介绍石灰（石灰石）-石膏法、亚硫酸钾（钠）吸收法、双碱法、氨吸收法。

（1）石灰（石灰石）-石膏法。石灰（石灰石）-石膏法脱硫是目前应用最广泛的技术，最早是由英国皇家化学工业公司提出的。该方法脱硫的基本原理是用石灰（ $\text{CaO}$ ）或石灰石（ $\text{CaCO}_3$ ）浆液吸收烟气中的二氧化硫，生成亚硫酸钙，然后将亚硫酸钙氧化为硫酸钙，分为吸收和氧化两个过程。副产品石膏可抛弃也可以回收利用，脱硫率达到 95% 以上。石灰（石灰石）-石膏法脱硫工艺流程如图 10-8 所示。

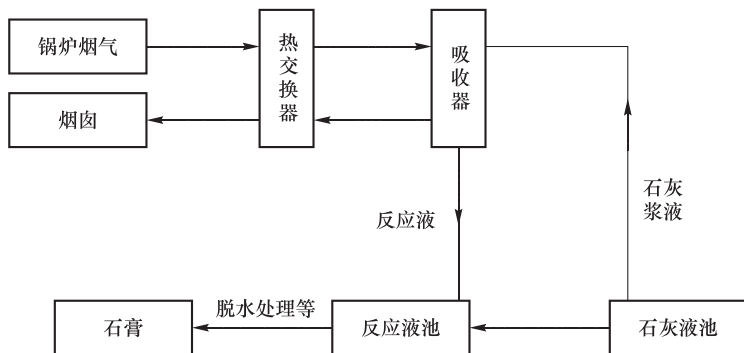
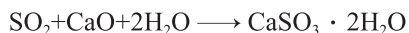


图 10-8 石灰（石灰石）-石膏法脱硫工艺流程

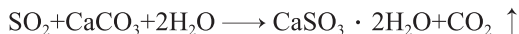


吸收过程在吸收塔内进行，主要反应如下。

石灰浆液作吸收剂：



石灰石浆液吸收剂：



烟气先经热交换器处理后，进入吸收塔，在吸收塔里  $\text{SO}_2$  直接与石灰浆液接触并被吸收去除。治理后烟气通过除雾器及热交换器处理后经烟囱排放。吸收产生的反应液部分循环使用，另一部分进行脱水及进一步处理后制成石膏。

此法的主要优点是吸收剂的资源丰富，成本低廉，废渣既可抛弃也可作为商品石膏回收。对高硫煤，脱硫率在 90% 以上；对低硫煤，脱硫率在 95% 以上。

在运用石灰（石灰石）-石膏法时应注意石灰储藏的防潮，石灰储量需要满足运行要求；石灰系统容易堵塞，注意检查石灰浆液是否达到设计要求；定期检查吸收塔及其他处理设施运行是否正常，确保脱硫除尘效率。现代石灰（石灰石）-石膏法工艺流程主要有原料运输、石灰石浆液制备、烟气脱硫、石膏制备和污水处理等。

（2）亚硫酸钾（钠）吸收法。以亚硫酸钾（ $\text{K}_2\text{SO}_3$ ）或亚硫酸钠（ $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ）为吸收剂，二氧化硫的脱除率达 90% 以上。吸收母液经冷却、结晶、分离出  $\text{KHSO}_3$ （ $\text{NaHSO}_3$ ），再用蒸汽将其加热分解生成  $\text{K}_2\text{SO}_3$ （ $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ）和  $\text{SO}_2$ 。 $\text{K}_2\text{SO}_3$ （ $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ）可以循环使用， $\text{SO}_2$  回收去制硫酸，工艺流程如图 10-9 与图 10-10 所示。

反应过程如下：



亚硫酸钾（钠）吸收法的主要优点：吸收液可循环使用，吸收剂损失少；吸收液对  $\text{SO}_2$  的吸收能力高，液体循环量少，泵的容量少；副产品  $\text{SO}_2$  的纯度高；操作负荷范围大，可以连续运转；基建投资和操作费用较低，可实现自动化操作。

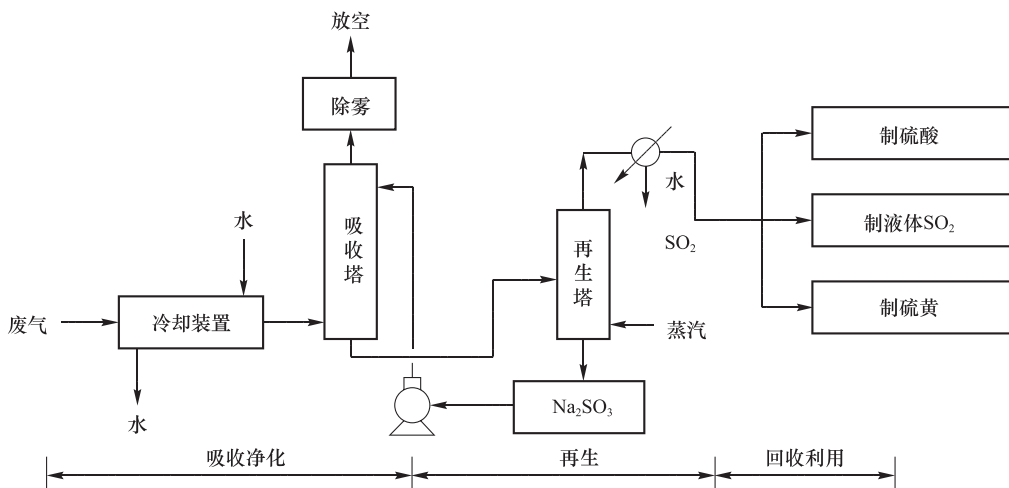


图 10-9 亚硫酸钠吸收法工艺流程

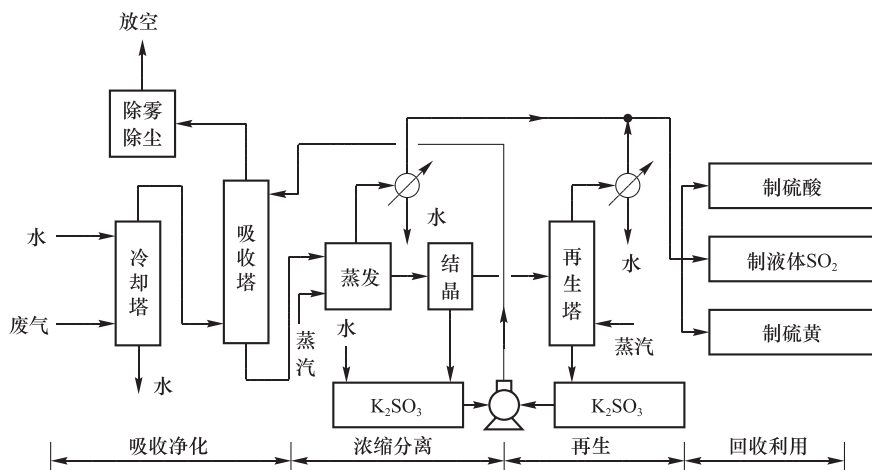
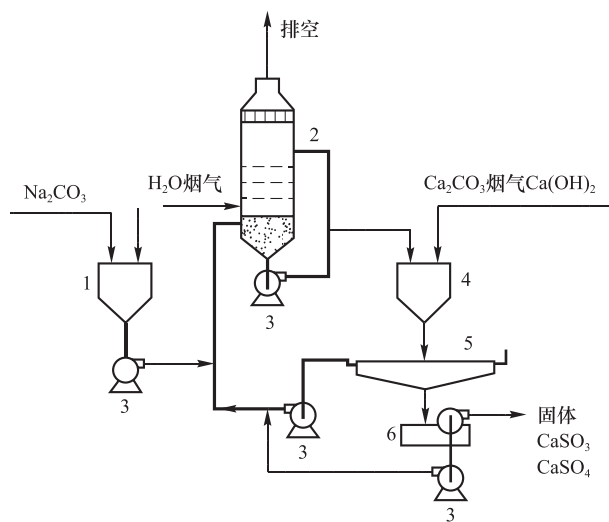


图 10-10 亚硫酸钾吸收法工艺流程

亚硫酸钾（钠）吸收法的主要缺点：必须将吸收液中可能含有的  $K_2SO_4$  ( $Na_2SO_4$ ) 去除掉，否则会影响吸收速率；吸收过程中会有结晶析出而造成设备堵塞。

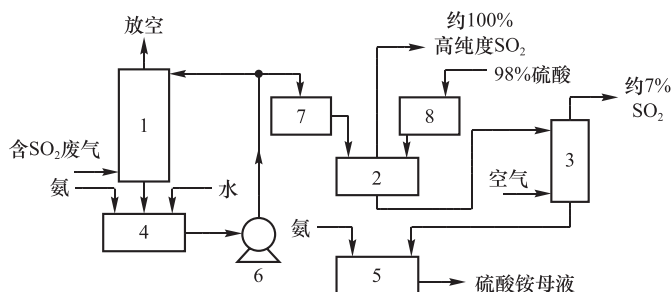
(3) 双碱法。双碱法采用钠基脱硫剂进行塔内脱硫，由于钠基脱硫剂碱性强，吸收二氧化硫后反应产物溶解度大，不会造成过饱和和结晶而结垢堵塞问题。另外，脱硫产物被排入再生池内用氢氧化钙进行还原再生，再生出的钠基脱硫剂被打回脱硫塔循环使用，分脱硫和再生两个部分。双碱法脱硫工艺解决了石灰（石灰石）-石膏法易结垢和堵塞的问题，降低了投资及运行费用，脱硫效率 90% 以上。双碱法工艺流程如图 10-11 所示。



1—配碱槽；2—洗涤器；3—液泵；4—再生槽；  
5—增稠器；6—过滤器。

图 10-11 双碱法工艺流程

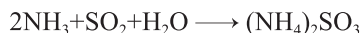
(4) 氨吸收法。氨吸收法是用氨水吸收  $SO_2$  的烟气脱硫技术。其主要优点是脱硫费用低，氨可留在产品内作为化肥使用。但氨易挥发，使吸收剂耗量增大。氨吸收法脱硫主要包括  $SO_2$  吸收和吸收后溶液的处理两大部分，工艺流程如图 10-12 所示。



1—吸收塔；2—混合器；3—分解塔；4—循环槽；5—中和器；6—泵；7—母液；8—硫酸。

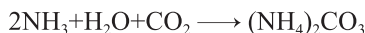
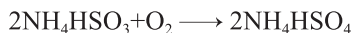
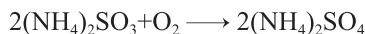
图 10-12 氨吸收法脱硫工艺流程示意图

氨溶液吸收  $\text{SO}_2$  时，其化学反应迅速，质量传递主要受气相阻力控制。吸收塔内发生的主要反应如下：



$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$  对  $\text{SO}_2$  有很强的吸收能力，它是氨吸收法中的主要采用的吸收剂。随着  $\text{SO}_2$  的吸收，溶液中  $\text{NH}_4\text{HSO}_3$  的比例增大，吸收能力降低，这时需要补充氨水将  $\text{NH}_4\text{HSO}_3$  转化为  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ ；含  $\text{NH}_4\text{HSO}_3$  量高的溶液，可以从吸收系统中引出，以各种方法再生得到  $\text{SO}_2$  或其他产品。

由于尾气中含有  $\text{O}_2$  和  $\text{CO}_2$ ，在吸收过程中还会发生下列副反应：



用氨吸收  $\text{SO}_2$  与其他碱类的不同之处在于，阳离子和阴离子都是挥发性的，因此设计洗涤吸收器时必须考虑两者的回收。

对吸收  $\text{SO}_2$  后的吸收液采用不同的处理方法形成了不同的脱硫工艺，其中以氨—硫酸铵法、氨亚硫酸铵法和氨—酸法应用较为广泛。

## 2. 半干法脱硫

半干法脱硫技术是指脱硫剂在干燥状态下脱硫、在湿状态下再生，或者在湿状态下脱硫、在干状态下处理脱硫产物的烟气脱硫技术。其中后者既具有湿法脱硫反应速度快、脱硫效率高的优点，又有干法无污水废酸排出、脱硫后产物易于处理的优势。半干法工艺较简单，反应产物易于处理，无废水产生，但脱硫效率和脱硫剂的利用率低。目前常见的半干法脱硫技术有喷雾干燥脱硫技术、循环流化床烟气脱硫技术等。

## 3. 干法脱硫

干法脱硫是指用粉状或粒状吸收剂、吸附剂或催化剂来进行烟气脱硫。它的优点是工艺过程简单，无污水、污酸处理问题，能耗低，特别是净化后烟气温度较高，有利于烟囱排气扩散，不会产生“白烟”现象，净化后的烟气不需要二次加热，腐蚀性小，等等；其缺点是脱硫效率较低，设备庞大，投资大，占地面积大，操作技术要求高，等等。

干法脱硫技术包括电子束法、脉冲电晕法、荷电干粉喷射法、催化氧化法、活性炭吸附

法和流化床氧化铜法等。下面简要介绍电子束法和催化氧化法。

①电子束法是一种物理与化学方法相结合的高新技术，它利用电子加速器产生的等离子体氧化烟气中的  $\text{SO}_2$  ( $\text{NO}_x$ ) 与注入的  $\text{NH}_3$  反应，生成硫铵和硝铵化肥，实现硫、脱硝目的。

②催化氧化法。在催化剂 ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ) 接触表面上，烟气中的  $\text{SO}_2$  直接氧化为  $\text{SO}_3$ ，继而转化为硫酸加以收集。此法广泛用于处理硫酸尾气。

## 第五节 含氮氧化物的废气的防治

### 课前小故事

#### 洛杉矶光化学烟雾

洛杉矶在 20 世纪 40 年代就已拥有 250 万辆汽车，每天大约消耗 1 100 吨汽油，排出 1 000 多吨碳氢化合物，300 多吨氮氧化合物，700 多吨一氧化碳。另外，还有炼油厂、供油站等其他石油燃烧排放，这些化合物被排放到阳光明媚的洛杉矶上空，制造了一个毒烟雾工厂。

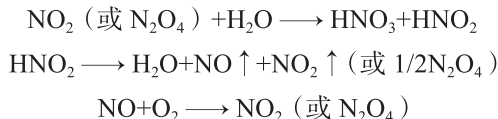


氮氧化物是一类化合物的总称，分子式为  $\text{NO}_x$ 。它包括  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}_3$ 、 $\text{N}_2\text{O}_4$  及  $\text{N}_2\text{O}_5$  等，主要是  $\text{NO}$  和  $\text{NO}_2$ ，它们是常见的大气污染物。

大气中的氮氧化物包括天然的和人类活动所产生的两种。人类活动所产生的氮氧化物比天然产生的要少得多，但是由于其分布较为集中，与人类活动的关系较为密切，所以危害较大。如  $\text{NO}$  对血液中的血红蛋白的亲合力较强，可生成亚硝基血红蛋白或亚硝基高铁血红蛋白，使血液输氧能力下降，出现缺氧发绀症状； $\text{NO}_2$  对呼吸器官有强烈的刺激作用； $\text{NO}_2$  在自然环境中可形成酸，而在阳光照射下，可与磷氢化合物生成有致癌作用的光化学烟雾等。

### 一、水吸收法

$\text{NO}_2$  或  $\text{N}_2\text{O}_4$  与水接触，发生以下反应：



水对氮氧化物的吸收率很低，主要是由一氧化氮被氧化成二氧化氮的速率决定的。当一氧化氮浓度高时，吸收速率有所提高，一般水吸收法的效率为 30% ~ 50%。此法制得浓度为 5% ~ 10% 的稀硝酸，可用于中和碱性污水，作为废水处理的中和剂，也可用于生产化肥等。另外，此法是在 588 ~ 686 kPa 的高压下操作的，操作费及设备费均较高。



## 二、稀硝酸吸收法

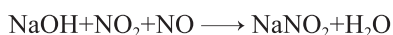
稀硝酸吸收法是用 30% 左右的稀硝酸作为吸收剂，其过程如下： $\text{NO}_x$  先在 20 ℃ 和  $1.5 \times 10^5$  Pa 的压力下被稀硝酸物理吸收，生成少量硝酸；然后将吸收液在 30 ℃ 下用空气进行吹脱，吹出  $\text{NO}_x$  后，硝酸被漂白；漂白酸经冷却后再用于吸收  $\text{NO}_x$ 。

由于氧化物在漂白稀硝酸中的溶解度要比水中的溶解度高，采用此法， $\text{NO}_x$  的去除率可达 80% ~ 90%。

## 三、碱性溶液吸收法

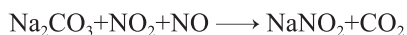
碱性溶液吸收法的原理是利用碱性物质来中和所生成的硝酸和亚硝酸，使之变为硝酸盐和亚硝酸盐。使用的吸收剂主要有氢氧化钠（烧碱）、碳酸钠（纯碱）和氨水等。

（1）烧碱作吸收剂：



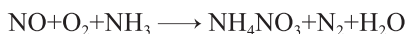
采用此法， $\text{NO}_x$  的去除率可以达到 80% ~ 90%。

（2）纯碱作吸收剂：



采用此法， $\text{NO}_x$  的去除率为 70% ~ 80%。

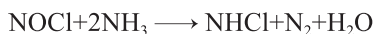
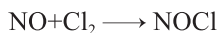
（3）氨水作吸收剂：



采用此法， $\text{NO}_x$  的去除率可达 90%。

## 四、还原吸收法

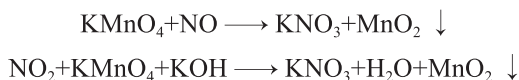
还原吸收法是利用氯的氧化能力与氨的中和还原能力治理氮氧化物，称氯-氨法，其反应式如下：



采用此法， $\text{NO}_x$  的去除率比较高，可达 80% ~ 90%，产生的  $\text{N}_2$  对环境也不存在污染问题。但是，由于还有氯化铵及硝酸铵产生，呈白色烟雾，需要进行电除尘分离，使本方法的推广使用受到限制。

## 五、氧化吸收法

氧化吸收法是用氧化剂先将 NO 氧化成 NO<sub>2</sub>，然后再用吸收液加以吸收。例如可采用碱性高锰酸钾溶液作为吸收剂，其反应如下：



采用此法，NO<sub>x</sub> 的去除率达 93% ~ 98%。这种方法效率高，但运转费用也比较高。

总之，尽管有许多物质可以作为吸收 NO<sub>x</sub> 的吸收剂，使含 NO<sub>x</sub> 废气的治理可以采用多种不同的吸收方法，但从工艺、投资及操作费用等方面综合考虑，目前较多的还是碱性溶液吸收和氧化吸收这两种方法。

### 知识拓展



挥发性有机化合物 (VOC) 废气的危害及处理技术

## 学习检测

### 在线测试



扫一扫 测一测

### 课后思考

1. 化工废气的来源有哪些？有什么特点？
2. 主要的大气污染物有哪些危害？化工废气如何分类？
3. 简述常见除尘器的除尘机理。
4. 简述含二氧化硫的废气的处理方法。
5. 简述含氮氧化物的废气的处理方法。





## 综合实训

1. 对某化工厂废气处理工艺进行参观学习，熟悉该化工废气治理的工艺。
2. 针对冶炼烟气制硫酸生产工艺，设计具体的废气处理方案。

## 学习评价

| 评价方式 | 评价内容         |                  |                  |                     |                   |
|------|--------------|------------------|------------------|---------------------|-------------------|
|      | 评价分项         | 评价等级             |                  |                     |                   |
|      |              | A                | B                | C                   | D                 |
| 学生自评 | 对本章内容的兴趣     | 浓厚               | 较浓厚              | 一般                  | 很弱                |
|      | 知识、方法、能力获取程度 | 很高               | 较高               | 一般                  | 很少                |
|      | 课堂发言与提问情况    | 积极举手发言、提问，有自己的见解 | 偶尔举手发言、提问，有自己的见解 | 几乎没有举手发言、提问，没有自己的见解 | 没有举手发言、提问，没有自己的见解 |
|      | 学习合作情况       | 善于与人合作，虚心听取别人的意见 | 能与人合作，能接受别人的意见   | 几乎缺乏与人合作，不能接受别人的意见  | 缺乏与人合作，不能接受别人的意见  |
| 教师评价 | 教学过程学生参与程度   | 很高               | 较高               | 一般                  | 很少                |
|      | 学生在线测试结果     | 很好               | 较好               | 一般                  | 很差                |
|      | 实训项目完成情况     | 很好               | 较好               | 一般                  | 很差                |
|      | 本章学习的整体情况    | 很好               | 较好               | 一般                  | 很差                |

反思与改进：