

2025/08/07

废气污染物及处理 设施

汇报人：丁启宝

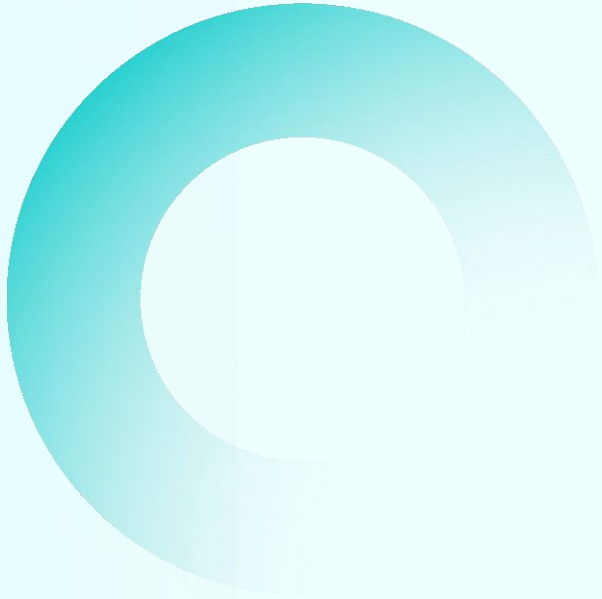
CONTENTS

目录

01 | 废气污染物种类

02 | 废气处理设施及其特点

03 | 废气处理设施选型



废气污染物种类

常见废气污染物

颗粒物 (PM)

包括灰尘、烟尘、雾滴等，由燃烧不完全或工业过程产生。

氮氧化物 (NO_x)

燃烧过程中，空气中的氮气与氧气反应生成。

硫氧化物 (SO_x)

主要来源于燃烧含硫燃料，如煤和石油。

挥发性有机物 (VOCs)

指常温下饱和蒸气压大于 70 Pa、常压下沸点在 260℃ 以下的有机化合物，或在 20℃ 条件下蒸气压于或等于 10Pa 具有相应挥发性的全部有机化合物。



AIR POLLUTION

常见废气污染物

颗粒物(PM)

(1) 粉尘。是指微小固体颗粒，如黏土粉尘、石英粉尘、粉煤、水泥粉尘、各种金属粉尘等。通常产生于固体物质的破碎、研磨、分和输送等机械过程，或土壤和岩石的风化过程。此类固体颗粒的形状往往不规则，尺寸范围为 $1\sim 200\mu\text{m}$ 。

(2) 烟。通常是指高温冶炼过程产生的固体颗粒，是由熔融物质挥发后再冷凝形成的颗粒物，如有色金属冶炼产生的氧化铅烟、氧化锌烟，核燃料后处理产生的氧化钙烟等。在烟的形成过程中，总是伴有诸如氧化之类的化学反应。烟的尺寸很小，一般为 $0.01\sim 1\mu\text{m}$ 。

(3) 飞灰。是指随燃料(主要是煤)燃烧产生的烟气排出的灰分，原因是燃料含有灰分。其粒径大多为 $1\sim 100\mu\text{m}$ 。

(4) 黑烟。是指由燃料燃烧产生的能见气溶胶，是燃料不完全燃烧的产物，除炭粒外，还有碳、氢、氧和硫等组成的化合物。

工程中，烟、飞灰和黑烟使用比较混乱，一般将高温冶金和化学过程形成的固体气溶胶称为烟尘，将燃料燃烧产生的固体气溶胶称为飞灰和黑烟，不仔细区分时，也统称为烟尘。

(5) 雾。是空气中液滴悬浮体的总称，在气象学上是指造成能见度小于 1km 的小水滴悬浮体。在工程中，雾一般泛指小液体粒子悬浮体，它可能是由液体蒸气的凝结、液体的雾化及化学反应等过程形成的，如水雾、酸雾、碱雾、油雾等。

常见废气污染物

硫氧化物(SO_x)

硫氧化物(SO)。包括SO₂和 SO₃，主要是 SO₂，是目前大气污染物中数量较大、影响范围广的一种气态污染物。大气中SO₂主要来源于化石燃料燃烧，其次是硫化物矿石焙烧、冶炼等热过程。火力发电厂、有色金属冶炼厂、硫酸厂、炼油厂以及所有燃煤或燃油的工业炉窑等都排放含 SO₂的烟气。

氮氧化物(NO_x)

氮氧化物(NO)。包括 NO、NO₂、N₂O、N₂O₃、N₂O₄和 N₂O₅，主要是 NO、NO₂。燃料高温燃烧主要生成NO，进入大气后，NO可以缓慢地氧化成NO₂，当大气中有O₃等强氧化剂存在或在催化剂的作用下，其氧化速度会加快。人类活动产生的 NO_x主要来自火力发电厂、各种窑炉和机动车排气，其次是硝酸生产、硝化过程、炸药生产及金属表面处理等过程。

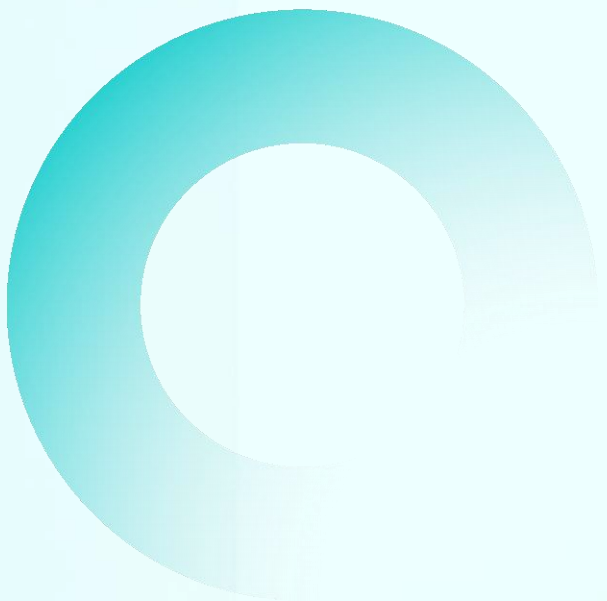
常见废气污染物

挥发性有机物（VOCs）

无统一定义。

- ◆ 世界卫生组织：挥发性有机物是指沸点为 $50\sim 250^{\circ}\text{C}$ ，室温下饱和蒸气压超过 133.32Pa ，在常温下以蒸气形式存在于空气中的一类有机化合物。
- ◆ 《挥发性有机物无组织排放控制标准》：参与大气光化学反应的有机化合物，或者根据有关规定确定的有机化合物。
- ◆ 环境保护部（2008年）：指常压下沸点低于 250°C ，或者能够以气态分子的形态排放到空气中的所有有机化合物（不包括甲烷），简写作VOCs。（《合成革与人造革工业污染物排放标准》（GB 21902-2008）第3.10条）
- ◆ 美国联邦环保署（EPA）：“除 CO 、 CO_2 、 H_2CO_3 、金属碳化物、金属碳酸盐和碳酸铵外，任何参加大气光化学反应的碳化合物”。

根据其化学结构，可以进一步分为烷类、炔类、烯类、卤烃类、酯类、醛类、酮类和其他8种类型。挥发性有机化合物主要来源于石油冶炼、有机化工、油品储运和燃料燃烧等生产和交通运输过程，以及油漆、涂料、胶剂和有机产品所含有有机溶剂的挥发。



废气处理设施

废气处理设施类别

颗粒物 (PM)
废气处理设施

硫氧化物 (SO_x)
废气处理设施

氮氧化物 (NO_x)
废气处理设施

挥发性有机物 (VOCs)
废气处理设施



★ 颗粒物(PM)废气处理设施

- ◆ 按捕集粉尘的机理，可分为机械式除尘器、洗涤式除尘器、过滤式除尘器(袋式除尘器)和电除尘器四种类型；
- ◆ 根据除尘过程中是否采用液体除尘和清灰，可分为干式除尘器和湿式除尘器两大类；
- ◆ 根据除尘器的压力损失，可分为低阻除尘器(500Pa)、中阻除尘器(500~2000Pa)和高阻除尘器(2000~20000Pa)；
- ◆ 根据除尘效率，除尘器可分为低效除尘器、中效除尘器和高效除尘器。重力除尘器和惯性除尘器为典型的低效除尘器，袋式除尘器、电除尘器和文丘里除尘器为高效除尘器，其他为中效除尘器。

不同除尘器的工作原理与适用性

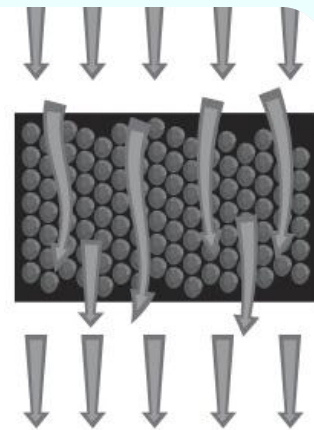
机械式除尘器

利用重力或惯性分离粉尘，结构简单，适合大颗粒物处理，但对微细颗粒效果不佳。



洗涤式除尘器

借助液滴捕捉粉尘，兼具降温功能，适用于高温高湿气体处理，但需解决污水问题。



过滤式除尘器的优势

通过滤袋捕集微细颗粒，效率高达99.9%，是工业烟气治理的核心设备，但滤袋更换成本较高。



电除尘器的特点

利用电场使粉尘带电后沉积，特别适合高温、高压环境，但初始投资和维护费用较高。



除尘装置的分类与特点

按捕集粉尘机理分类

机械式、洗涤式、过滤式和电除尘器各有独特工作原理，其中袋式除尘器和电除尘器以高效捕集微细颗粒著称，广泛应用于工业领域。

压力损失决定能耗水平

根据压力损失，除尘器分为低阻、中阻和高阻三类，低阻设备节能但效率有限，高阻设备虽效率高但运行成本较高，需权衡选择。

干湿分类的应用场景

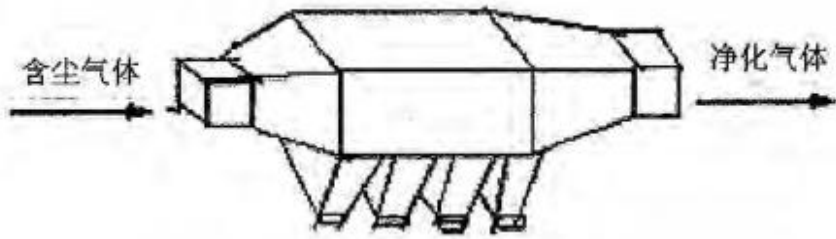
干式除尘器适用于无液体参与的环境，避免二次污染；湿式除尘器则通过液体吸附粉尘，适合高湿度或易燃易爆场景。

除尘效率影响应用范围

高效除尘器如袋式和电除尘器可达99%以上效率，适用于严格排放标准；低效设备如重力除尘器主要用于初步处理，经济性更优。



2.1.1 机械式除尘 沉降室



含尘气体流速降低的关键作用

含尘气体进入沉降室后，横断面扩大使流速显著降低，为颗粒沉降创造了必要条件。流速的减缓直接延长了气流在沉降室内的停留时间，从而使较重颗粒得以克服气流阻力，在重力作用下缓慢下沉至灰斗，实现初步分离。

重力沉降的核心分离过程

在沉降室内，较大、较重的颗粒因重力作用逐渐脱离气流轨迹，向灰斗方向沉降。这一过程依赖颗粒自身的质量和重力加速度，同时受气体流速和沉降室几何结构的影响，最终实现颗粒与净化气体的有效分离。

净化气体排放的高效保障

经过沉降室处理的气体，因重颗粒被分离而得到净化，随后从出口排出。该过程不仅确保了排放气体的质量，还为后续工艺提供了清洁气源，从而提升整体系统的运行效率和环保性能。

机械除尘——沉降室

横断面面积的影响

沉降室的横断面面积决定了气体流速的降低程度。面积越大，流速越低，颗粒沉降时间越长，从而提高除尘效果。设计时需综合考虑空间限制和工艺需求，以实现最佳平衡。

沉降时间的计算

颗粒完全沉降到灰斗所需的时间是设计沉降室的重要参数。通过理论计算结合实际测试，可以确定沉降室的长度与高度，确保颗粒在有限时间内完成沉降。

灰斗的设计优化

灰斗作为收集颗粒的核心部件，其形状和倾角对排灰效率有重要影响。合理的灰斗设计可以防止颗粒堆积，减少二次扬尘，同时便于维护和清理。

重力沉降室的优势

01

结构简单，成本优势显著

无运动部件，主要由室体、进气口、出气口和集灰斗组成，制造和维护成本低

02

低能耗

阻力损失极小（通常为50~150Pa），无需额外动力设备，运行能耗低

03

耐高温高压，适应多种工况

可处理高温气体（最高达350~550℃），且对腐蚀性气体适应性较强

04

低维护需求，运维经济性突出

材料可用砖砌或钢板焊接，施工便捷，适合小型企业或预处理场景，无复杂机械部件，故障率低，日常管理简单

重力沉降室的缺点

01

细颗粒效率不足

仅能有效捕集粒径大于 $50\ \mu\text{m}$ 的粗颗粒，对细小颗粒（如 $<20\ \mu\text{m}$ ）的去除效率几乎为零，整体效率约30%~50%

03

二次扬尘风险

若气流速度过高（通常需控制在 $0.2\sim 0.8\text{m/s}$ ），已沉降粉尘可能被重新卷起

02

占地空间大

为延长气流停留时间以提高效率，需设计较大的空间，不适用于场地受限的项目

04

功能局限

通常仅作为多级除尘系统的预处理设备，需搭配高效除尘器（如布袋或静电除尘器）使用

沉降室的应用场景

工业废气处理

沉降室广泛应用于工业废气处理领域，特别是对于含大颗粒粉尘的气体。例如，在矿山、水泥厂等场所，沉降室作为初级除尘设备，有效降低了后续处理设备的负荷。

高温烟气预处理

在高温烟气处理中，沉降室常用于预处理阶段。通过降低气体流速和温度，沉降室不仅能去除大颗粒粉尘，还能保护下游设备免受高温和磨损的影响。

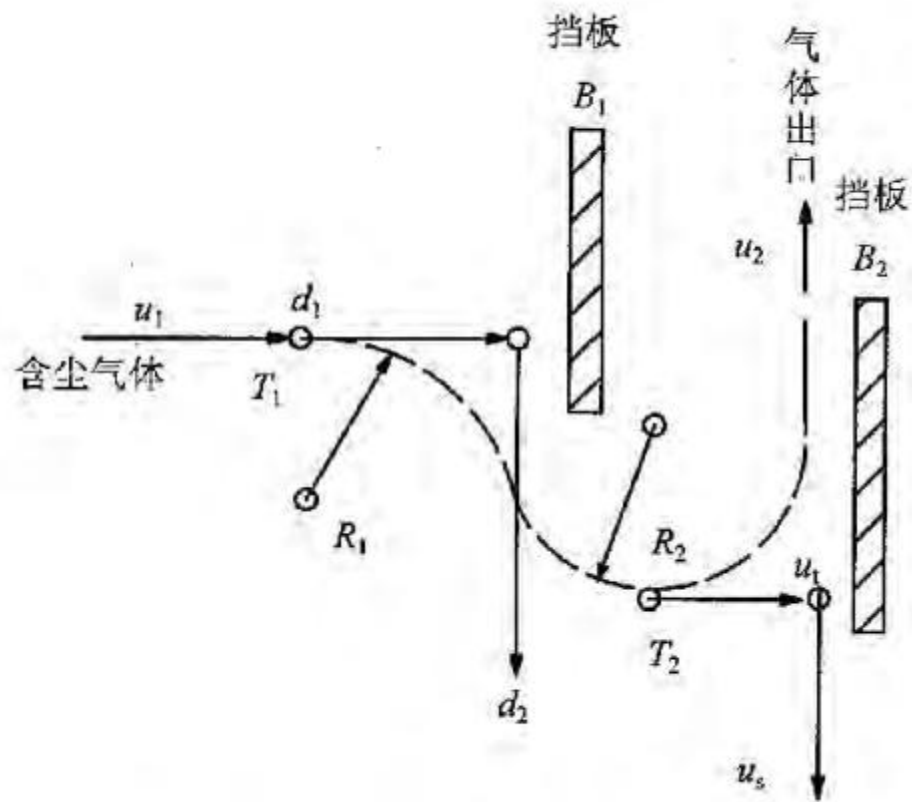
环保达标排放

沉降室与其他除尘设备联合使用，可满足严格的环保排放要求。其简单可靠的设计使其成为许多行业实现绿色生产的重要环节。

2.1.2机械式除尘 惯性除尘器

工作原理简述

惯性除尘器通过惯性力使颗粒从气流中分离，借助冲击挡板或叶片引发气流急速转向，实现颗粒捕集。其核心在于利用气流速度越高、惯性效应越大的特点，从而缩小设备体积。对于10微米以上的颗粒，惯性除尘器的分离效率显著高于重力除尘器，适用于高效处理较大颗粒物场景。



惯性除尘器的特性

耐磨性能优化

惯性除尘器的优势在于高效的颗粒分离能力，但其不足也较为明显。高速撞击易造成挡板和壳体严重磨损，需加装耐磨内衬以延长寿命。此外，黏结性和纤维性粉尘因容易堵塞且惯性力作用有限，不适合使用此类设备。这些局限性决定了其适用范围需严格筛选。

应用场景拓展

为克服惯性除尘器不适用于黏结性粉尘的限制，可结合其他除尘技术（如湿式除尘）形成复合系统，扩大适用范围。此外，在工业生产中针对高温、高压等特殊环境优化设计，可进一步提升惯性除尘器的应用价值，满足多样化需求。

惯性除尘器的优势

01

无活动部件设计，仅通过挡板或百叶结构实现气流转折，显著降低设备故障率。日常维护无需复杂操作，成本极低，尤其适合长时间运行的工业场景，有效减少停机时间和人工投入。

02

压力损失控制在200 - 1000 Pa之间，远低于袋式除尘器的1000 - 2000 Pa，大幅降低风机能耗。这一特性使其在连续运行中节省大量能源成本，同时提升系统整体效率，为绿色生产提供有力支持。

03

设备无滤材或电子元件，可处理高达800℃的高温烟气，并适应粉尘浓度达100 g/m³的恶劣工况。无论是冶金还是建材行业，其稳定性和耐用性均表现出色，满足极端环境下的高效除尘需求。

惯性除尘器的缺点

01 对粒径小于 $10\ \mu\text{m}$ 的细粉尘，惯性除尘器的捕集效率仅为30 - 50%，难以满足排放标准。为弥补这一不足，可搭配高效除尘设备（如袋式或电除尘器），通过多级过滤提升整体性能，确保环保合规。

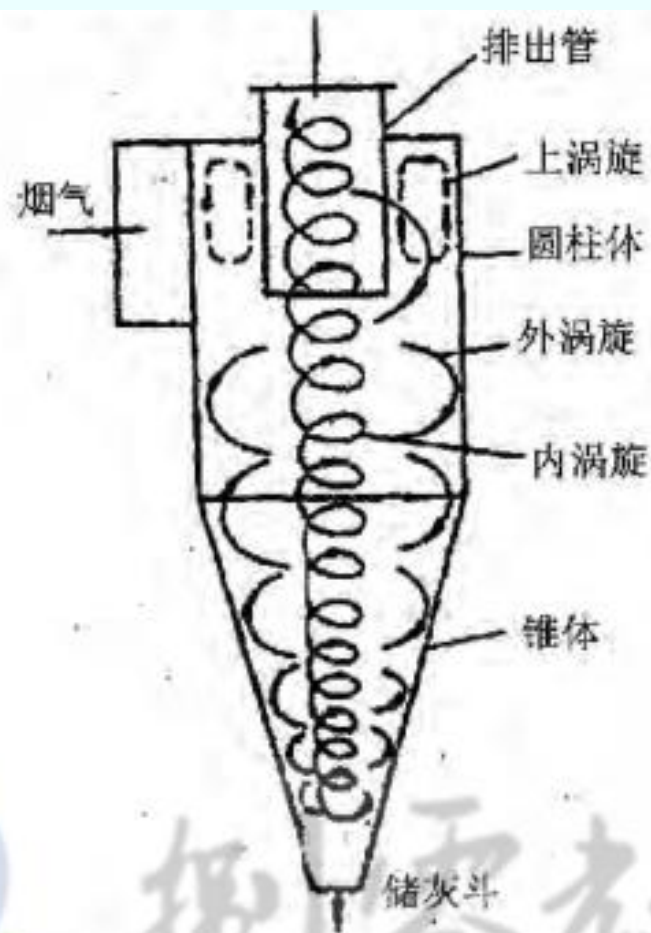
02 粘性或纤维性粉尘易黏附挡板，导致堵塞问题频发；憎水性粉尘则因难以被惯性分离而不适用。针对不同粉尘类型，需优化设备设计并加强维护，以减少运行中断和清理频率。

03 高速气流冲击挡板易引发金属疲劳磨损，建议采用耐磨钢材（如NM360）延长使用寿命。同时，壳体密封不良会导致漏风率超过5%，使除尘效率下降20%以上，因此需严格控制密封性和气流参数。

2.1.3 机械式除尘 旋风除尘器

工作原理简述

旋风除尘器是一种利用旋转气流的离心力分离粉尘的高效机械除尘设备。



旋风除尘器的优势

01

结构简单，成本优势显著

无运动部件设计使其制造、安装和维护便捷，初始投资仅为高效除尘器的10%-30%。干法清灰技术可直接回收粉尘（如金属矿粉），无需额外能耗，极大降低运行成本，适合预算有限但追求高性价比的场景。

03

耐高温高压，适应多种工况

采用碳钢材质可处理100℃烟气，内衬耐火材料后可耐受500-1000℃高温，广泛应用于锅炉、冶金等高温场景，同时耐磨内衬（如陶瓷）可应对高磨蚀性粉尘，确保设备长期稳定运行。

02

高效捕集粗颗粒粉尘

对 $>10\ \mu\text{m}$ 粉尘的捕集效率高达80%以上，离心力可达重力的2500倍，性能远超传统重力沉降室，是处理粗颗粒粉尘的理想选择，尤其适用于矿业和建材行业的大颗粒污染物控制。

04

低维护需求，运维经济性突出

无需更换滤材，仅需定期检查卸灰阀和磨损部位，大幅减少维护频率与成本，适合长时间连续运行的工业环境，为企业节省大量人力与物力资源。

旋风除尘器的缺点

01

细颗粒效率不足

对 $<5\ \mu\text{m}$ 粉尘捕集效率仅30%-50%，需搭配袋式或电除尘器才能满足严苛排放标准（如 $\text{PM}_{2.5} < 10\text{mg}/\text{m}^3$ ）

03

适用粉尘类型受限

不适用于粘性（如木屑）、纤维性（如棉絮）或高湿度粉尘，易堵塞挡板

02

磨损与漏风风险

入口和锥体易被高浓度粉尘（如石英砂）磨损，需采用NM360耐磨钢或陶瓷内衬
卸灰阀漏风率 $>5\%$ 时，效率下降20%以上

04

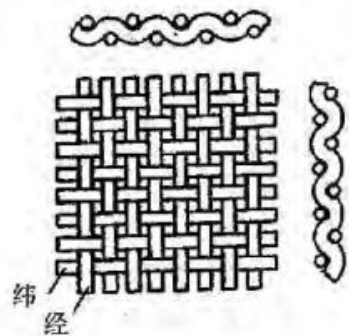
系统能耗与空间限制

中阻设计（500-2000Pa）增加风机能耗，处理大风量需多台并联，占地较大

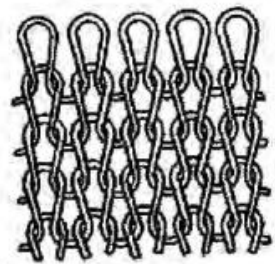
2.1.4袋式除尘器

袋式除尘器工作原理

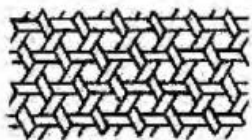
袋式除尘器是利用织物材料制作的袋状过滤元件(即滤袋)捕集含尘气体中固体颗粒的设备。袋式除尘器与电除尘器、文丘里洗涤器并列为三大高效除尘器。与电除尘器相比,其优点是结构简单、投资省、运行稳定,可以处理高电阻率粉尘。与文丘里洗涤器相比,其优点是动力消耗小,回收的干颗粒物便于综合利用。



(a) 机织物



(b) 针织物



(c) 三向织物



(d) 编辫织物

袋式除尘器工作原理

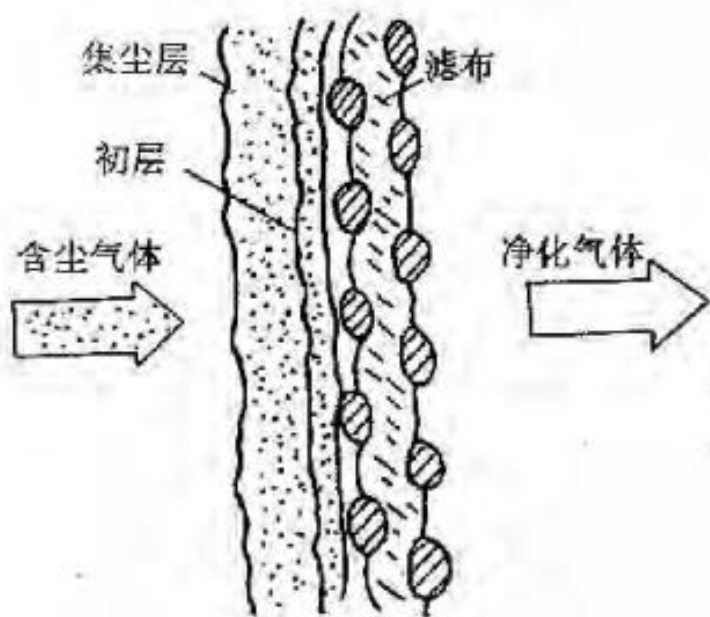
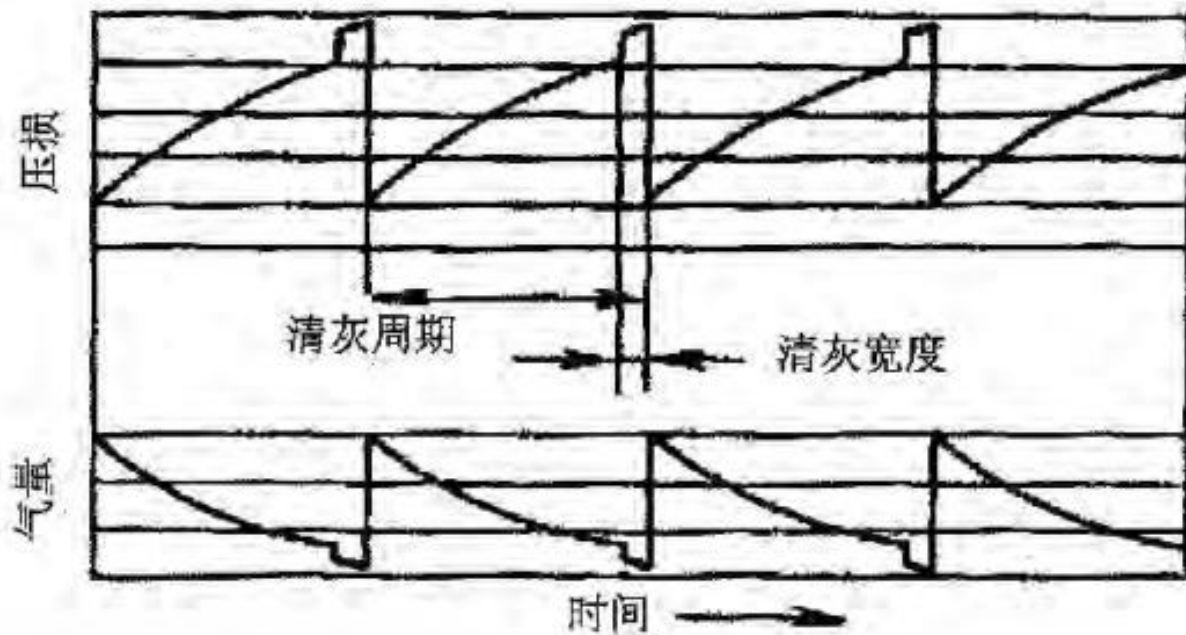


图 2-44 滤布捕集粉尘的过程



2-45 袋式电除尘器运行阻力和效率随时间的变化规律

袋式除尘器分类

清灰效果是影响袋式除尘器长期持续工作的决定性因素。清灰的基本要求是迅速而均匀地剥落沉积于滤袋表面的粉尘，同时通常要求能保持一定的粉尘初层，不损伤滤袋，而且动力消耗低。按清灰方式的不同，袋式除尘器可分为机械振打式、逆气流清灰式和脉冲喷吹式等。

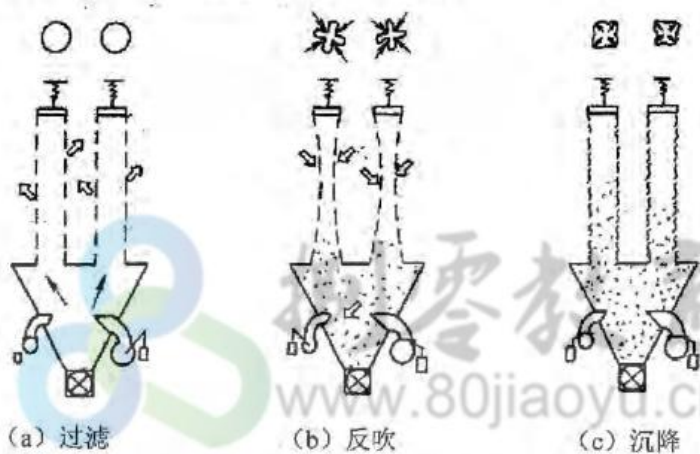
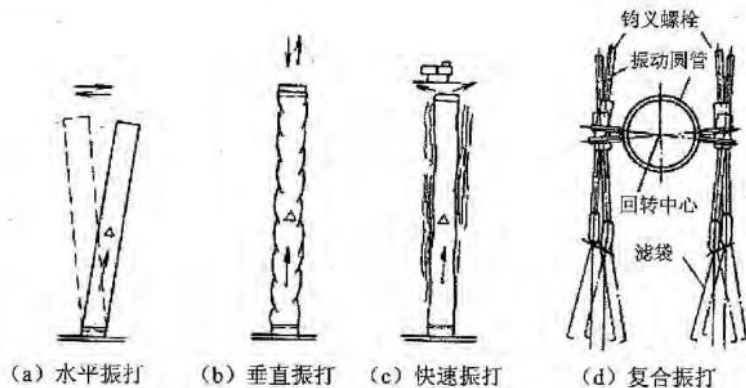
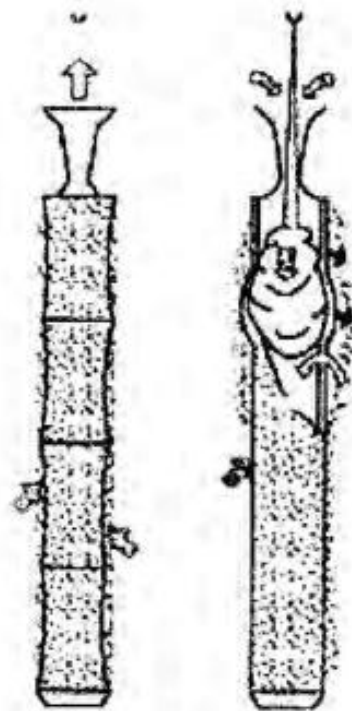


图 2-48 逆气流清灰方式



(a) 过滤 (b) 喷吹

图 2-49 脉冲喷吹清灰方式

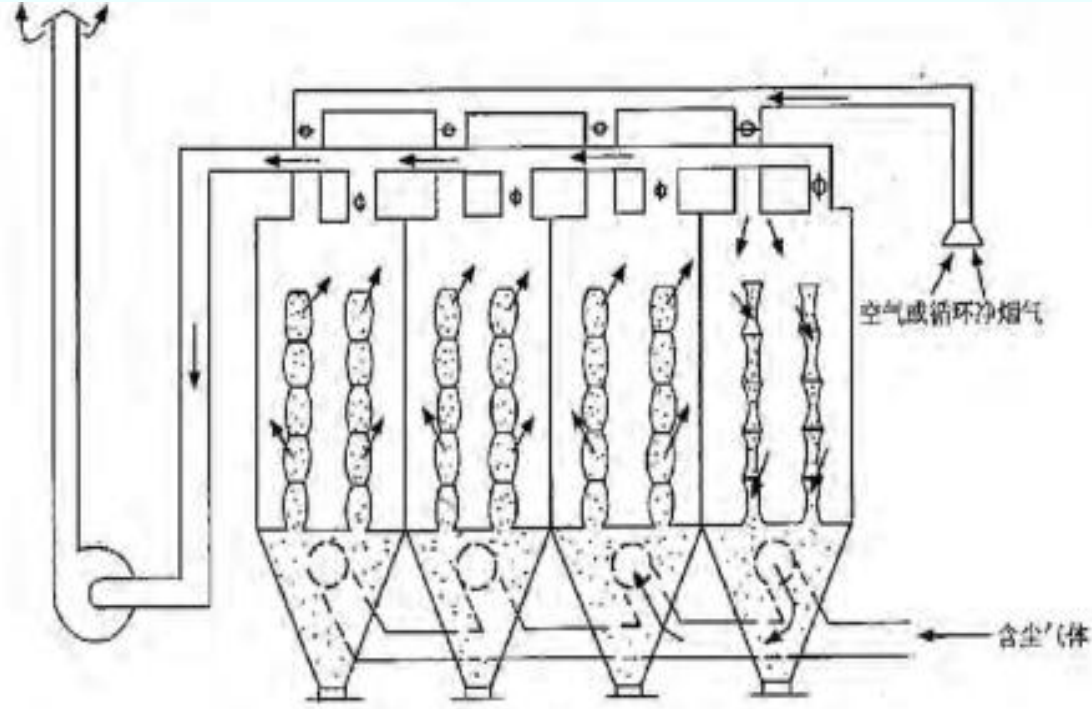


图 2-51 负压式反吹风袋式除尘器

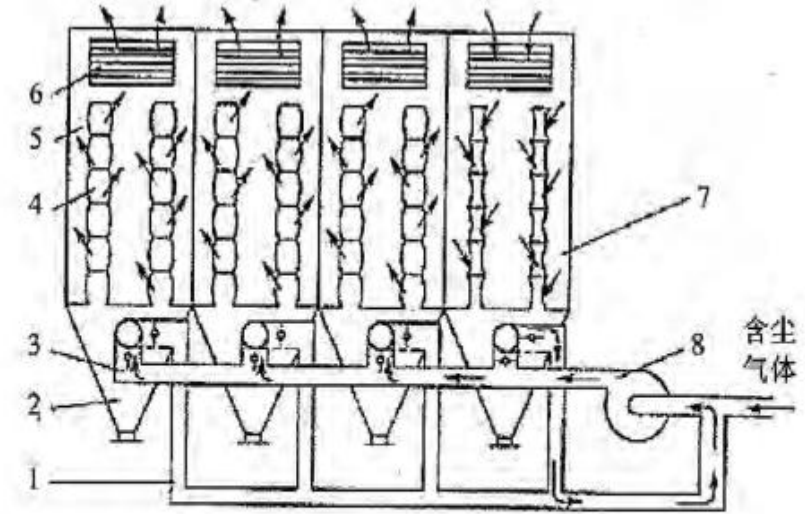


图 2-52 正压式反吹风袋式除尘器

- 1-反吹风管; 2-灰斗; 3-含尘气体管道; 4-滤袋;
5-过滤状态的袋滤室; 6-百叶窗; 7-清灰状态的袋滤室; 8-主风机

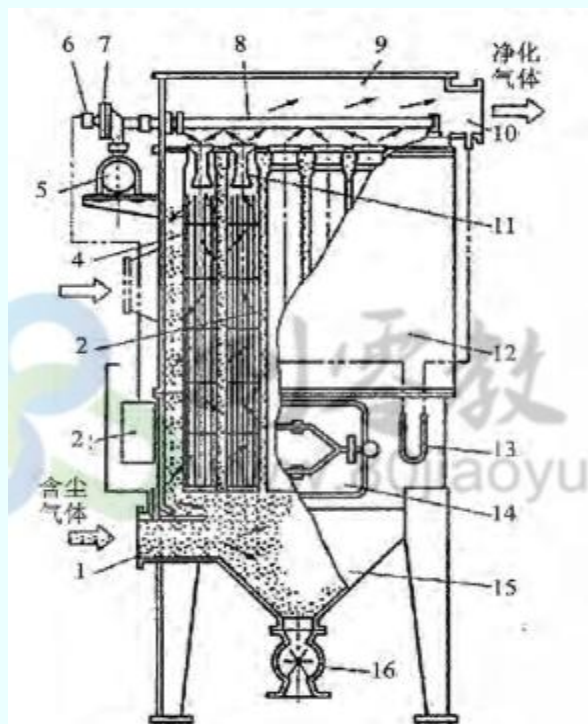


图 2-50 脉冲喷吹袋式除尘器结构



图 2-54 滤筒式除尘器滤筒在除尘器内的布置

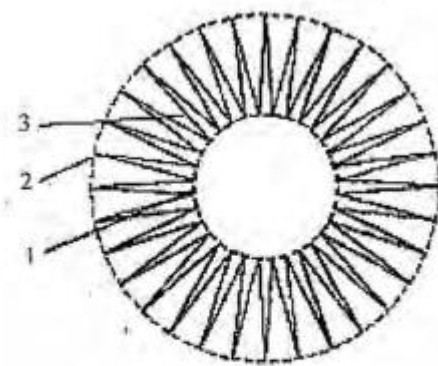


图 2-55 滤筒的断面形状

1—内金属网；2—外金属网；3—滤料

布袋除尘器的优势

01

高效过滤

对0.1微米以上的粉尘捕集效率可达99%以上，尤其适合细小颗粒物。

02

有一定的温度耐受性

采用特殊滤料（如玻璃纤维）可耐280℃高温

03

适应多种工况

可处理不同风量和粉尘浓度，且能回收干粉，便于综合利用

04

安全可靠

适用于易燃易爆粉尘，可配备防爆设计

布袋除尘器的缺点

01

温度限制

多数滤料对烟气温度敏感，需控制温度（通常 $\leq 160^{\circ}\text{C}$ ）

03

维护成本高

滤袋易破损，更换费用高；

02

对烟气湿度有要求

烟气相对湿度通常建议控制在 30%~80% 之间。湿度过低（ $< 30\%$ ）易产生静电，导致粉尘附着难清灰；湿度过高（ $> 80\%$ ）则可能引发结露、糊袋等问题

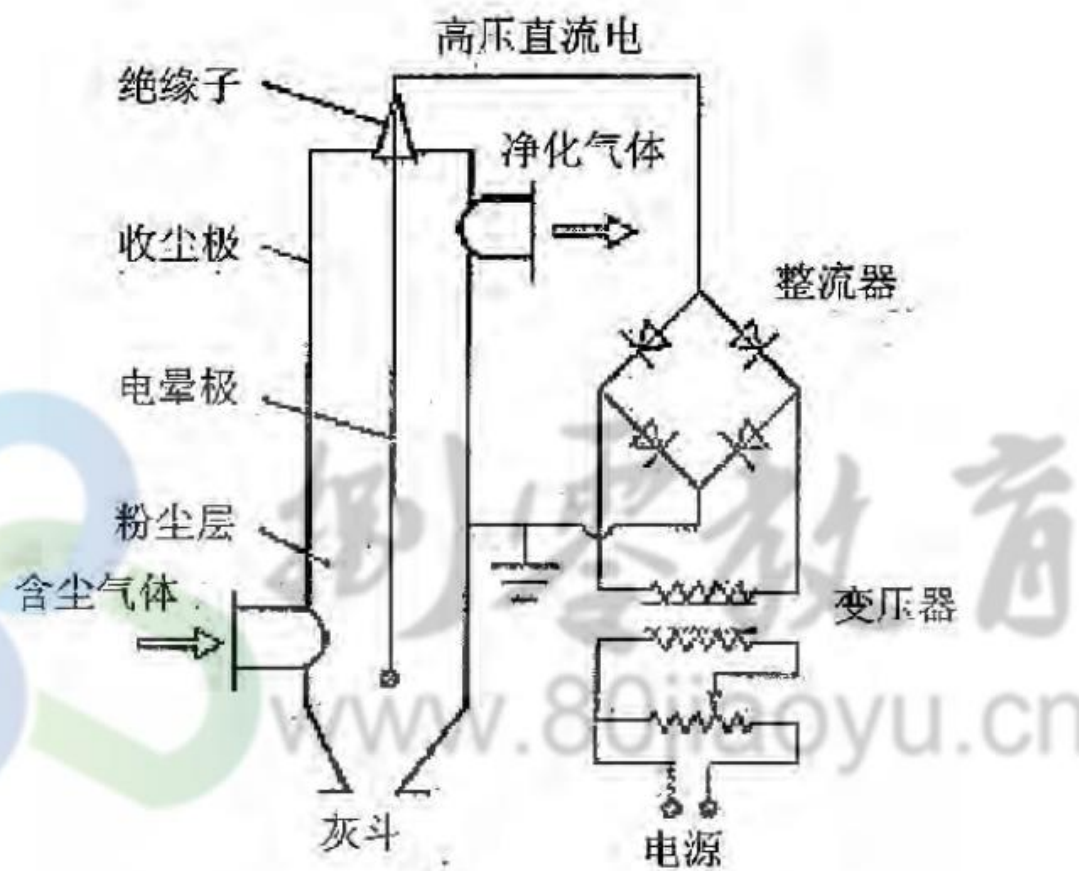
04

系统能耗与空间限制

运行阻力高，本体阻力达1200 - 1500Pa，需大功率风机，能耗较高

2.1.5 电除尘器

电除尘器工作原理



电除尘器的种类和结构形式很多，但都基于相同的工作原理。电除尘器主要由高压供电系统和电除尘器本体两大部分构成，其中电除尘器本体包括电晕极(又称电晕极)和收尘极(又称接地极或集尘极)等。电除器的电晕极和收尘极与高压电源相连接，当含尘气体通过两极间的非均匀高压电场时，在电晕极周围强电场力的作用下气体首先被电离，并使颗粒荷电，荷电的颗粒在电场力的作用下向收尘极迁移并沉积在收尘极上，得以从气体中分离并被收集，从而达到除尘目的。

常见种类：单区双区、立式卧式、板式管式、干式湿式等

电除尘器的技术优势

1

高效的粉尘捕集能力

电除尘器利用电晕放电产生的电场，可捕集0.01微米以上的细颗粒物，其捕集效率可达到99%以上，尤其适用于处理微米级的粉尘颗粒。

2

低能耗运行特性

电除尘器在运行过程中能耗较低，阻力损失小（通常150~300Pa），主要功耗来自于电晕放电和振打清灰，总能耗仅为袋式除尘器的1/5。

3

广泛的适用范围

电除尘器适用于各种工业领域，包括冶金、电力、建材、化工等行业，能够处理从高温（250~400℃）到低温、从干燥到潮湿的各种不同工况下的烟气。入口含尘浓度范围广（几克至几百克/立方米）

4

稳定的运行性能

电除尘器结构简单，维护方便，运行稳定，能够长期连续工作，即使在粉尘浓度和烟气量波动较大的情况下，也能保持良好的除尘效果。

电除尘器的缺点

1

初始投资与占地面积大

设备造价高，大型电除尘器投资可达数百万元；卧式设计需较大安装空间

2

对粉尘性质敏感

最佳比电阻范围为 $10^6 \sim 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ ，过高易导致反电晕，过低则荷电困难，影响效率。黏性粉尘（如焦油）易黏附电极，难以清理

3

操作条件限制

效率受烟气温度、湿度影响显著，同一粉尘在不同条件下效果差异大

4

维护要求高

需专业技术人员定期清理电极和检查系统，维护复杂

2.1.6 湿式除尘器

湿式除尘器按照水气接触方式、能耗或除尘器构造，有多种分类。

(1) 按结构形式分类。如图 2-61 所示，按照结构形式湿式除尘器可分为 7 种类型：
(a) 重力喷雾除尘器，如喷淋塔。
(b) 旋风式除尘器，如旋风水膜除尘器。
(c) 贮水式水浴除尘器，如自激喷雾除尘器。
(d) 板式塔除尘器，如泡沫洗涤塔。
(e) 填料塔除尘器，如填料塔、湍球塔等。
(f) 文丘里除尘器。
(g) 机械动力洗涤除尘器。

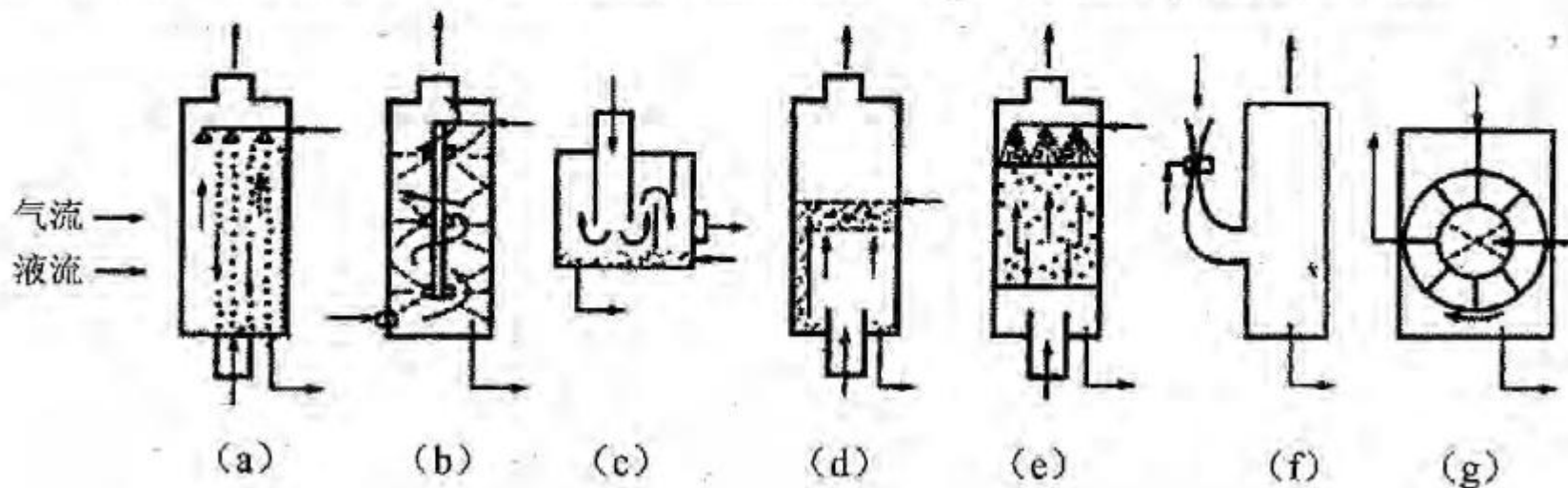


图 2-61 基于结构形式分类的湿式除尘器示意

表 2-19 按水气接触方式的湿式除尘器分类

分类	主要特性	典型除尘器
贮水式	使含尘气体冲入洗涤液中，转折一定角度后冲出液面。在此过程中，激起水花、水雾，使含尘气体得到净化。压降为 $(1\sim5)\times 10^3$ Pa，可清除几微米的颗粒	水浴式除尘器 卧式水膜除尘器自激式除尘器
喷淋式	用雾化喷嘴将液体雾化成细小液滴，气体是连续相，与之逆流运动或同向流动，气液接触完成除尘过程。压降低，液量消耗较大。可除去大于几个微米的颗粒。也可以将离心分离与湿法捕集结合，可捕集大于 $1\ \mu\text{m}$ 的颗粒。压降为 $750\sim 1\ 500$ Pa	喷雾塔洗涤器 旋风洗涤器 旋流板塔除尘器
压水式	利用文氏管将气体速度升高到 $60\sim 120$ m/s，吸入液体，使之雾化成细小液滴，它与气体间相对速度很高。高压文氏管 (10^4 Pa) 可清除粒径小于 $1\ \mu\text{m}$ 的亚微米颗粒，很适于处理黏性粉体	文丘里除尘器 喷射式除尘器 引射式除尘器

湿式除尘器的四大优点



设备简单，制造容易

湿式除尘器的优点之一是设备结构简单，制造过程容易，因此在安装和维护上相对方便，且占地面积较小，**特别适合用于处理高湿度和易燃易爆的气体环境。**



高效除尘效率

湿式除尘器相较于具有类似结构的干式除尘器，其除尘效率更高，能够更有效地捕捉和清除空气中的微小颗粒物。



除尘、降温、增湿效果

此类除尘器不仅能有效去除空气中的尘埃，还具备**降温与增湿**的功能，能够同步处理气态污染物，从而改善工作环境的质量。



工作稳定且可靠

只要保证有稳定的水源供应，湿式除尘器就可以连续运转，**工作表现稳定可靠**，这对于连续生产过程中的工业应用尤为重要。

湿式除尘器的主要不足

耗水量大及配套设备需求

湿式除尘器的主要不足之一是耗水量较大，这要求必须配备相应的给水、排水和污水处理设备，以确保系统的正常运行和环境保护。

泥浆处理与二次污染问题

泥浆处理不当可能导致收集和输送管道或设备黏结、堵塞，同时，若处理不当，还可能造成二次污染。

防腐要求高及冻结隐患

在处理有腐蚀性的含尘气体时，湿式除尘器的设备和管道防腐要求较高，特别是在寒冷地区使用时，存在设备冻结的隐患，这增加了运行和维护的复杂性。

不适用于特定粉尘分离

湿式除尘器不适用于憎水性粉尘和水硬性粉尘的分离，这限制了其在某些工业应用中的使用范围。

排气温度低影响扩散

湿式除尘器的排气温度较低，这不利于烟气的抬升和扩散，可能对周围环境造成影响。

2.2 硫氧化物(SO_x)废气处理设施

控制 SO_x 排放可通过使用无硫低硫燃料、燃烧前脱硫、燃烧过程固硫和燃烧后脱硫（即烟气脱硫）等途径实现。其中，烟气脱硫是控制 SO_x 排放的最后一道屏障，也是控制 SO_x 排放的主要手段。

脱硫原理	方法分类	脱硫剂	脱硫方法
吸收	石灰石/石灰法	$Ca(OH)_2$ $CaCO_3$ CaO	湿式石灰石/石灰—石膏法
			炉内喷钙—炉后活化法
			喷雾干燥法
			烟气循环流化床脱硫法
			直接喷射法
			石灰—亚硫酸钙法
	氨法	NH_3 $(NH_4)_2SO_3$	氨—酸法
			氨—亚硫酸铵法
			氨—硫酸铵法
			新氨法
	钠碱法	Na_2SO_3 $NaOH$ Na_2CO_3	亚硫酸钠循环法
			亚硫酸钠法
			钠盐—酸分解法
			钠盐—石膏法

脱硫原理	方法分类	脱硫剂	脱硫方法
吸收	铝法	碱性硫酸铝	碱式硫酸铝—石膏法
			碱式硫酸铝—二氧化硫法
	海水脱硫法	海水中 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 等碱性物质	海水脱硫法
	间接 石灰石/石灰法	Na_2SO_3 或 NaOH	双碱法
		$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	碱性硫酸铝—石膏法
	金属氧化物法	MgO	氧化镁法
ZnO		氧化锌法	
MnO		氧化锰法	
吸附	活性炭吸附法	活性炭	活性炭制酸法
		活性炭、 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	磷铵肥法
	分子筛吸附法	分子筛	分子筛吸附法
氧化	催化氧化法	O_2 及钒催化剂	干式氧化法
		稀 H_2SO_4 及 Fe^{3+} 催化剂	液相氧化法（千代田法）
	高能电子氧化法	自由基	电子束照射法
		等离子体	脉冲电晕等离子体法

石灰石/石灰—石膏湿式烟气脱硫技术

1 SO₂ 的吸收与溶解

烟气中的SO₂ 进入吸收塔后，首先溶于水形成亚硫酸（H₂SO₃），并进一步电离为亚硫酸氢根（HSO₃⁻）和亚硫酸根（SO₃²⁻）

3 亚硫酸盐的氧化

在强制氧化条件下（通过氧化风机鼓入空气），HSO₃⁻ 和SO₃²⁻ 被氧化为硫酸根（SO₄²⁻）

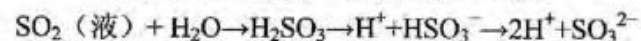
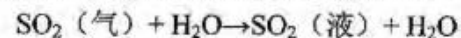
2 石灰石的溶解与中和

石灰石浆液中的CaCO₃ 在酸性环境中溶解，释放出Ca²⁺ 和CO₃²⁻，随后CO₃²⁻ 与H⁺ 反应生成HCO₃⁻ 和CO₂

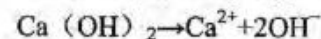
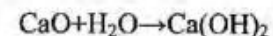
4 石膏的结晶

生成的SO₄²⁻ 与溶液中的Ca²⁺ 结合，形成二水硫酸钙（石膏）结晶

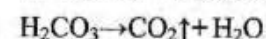
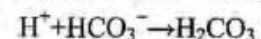
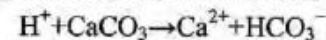
①SO₂ 溶解和电离。气相中SO₂ 首先溶解于水，并在水中发生电离反应：



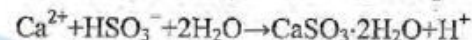
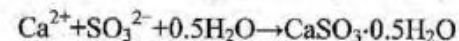
②Ca²⁺的生成。对于石灰工艺，CaO 首先水合生成Ca(OH)₂，然后生成的Ca(OH)₂ 发生电离生成Ca²⁺：



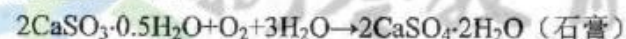
对于石灰石工艺，CaCO₃ 首先在偏酸性条件下电离生成Ca²⁺：



③CaSO₃的生成。溶液中的Ca²⁺与SO₃²⁻和HSO₃⁻结合生成CaSO₃：



④CaSO₄的生成。对于回收工艺，通常在脱硫塔底部设浆液循环池，并通入空气将生成的亚硫酸钙氧化为硫酸钙（石膏）：



工艺流程示意图

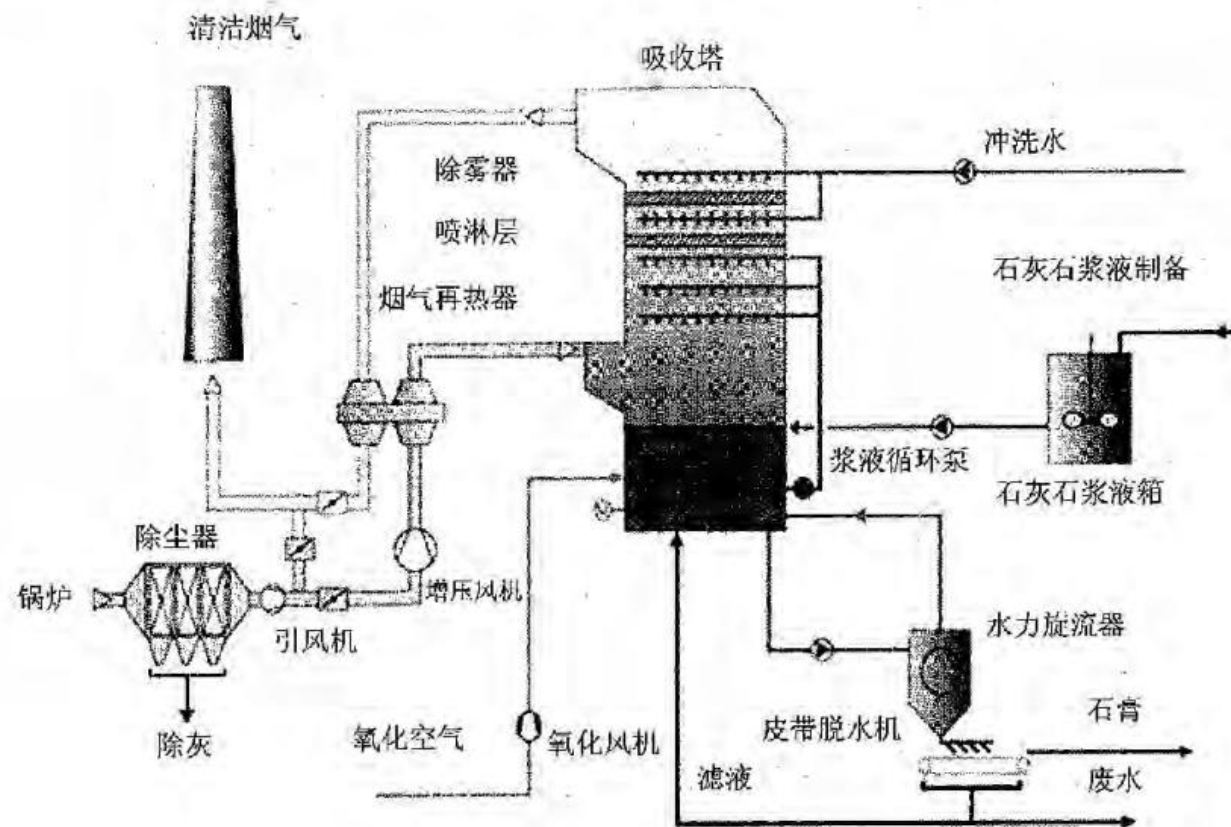


图 4-1 石灰石/石灰石膏法烟气脱硫工艺流程示意

2.3 氮氧化物(NO_x)废气处理设施



源头控制技术

源头控制技术主要针对 NO_x 排放的初始生成进行干预，通过优化燃烧过程、改进燃烧设备或使用低 NO_x 排放的燃料，减少 NO_x 的生成量。



烟气脱硝技术

干法脱硝技术

干法脱硝技术包括选择性催化还原法(SCR)、选择性非催化还原法(SNCR)和吸附法等。SCR通过催化剂促进还原剂与 NO_x 反应，SNCR则在没有催化剂的情况下进行反应，而吸附法利用特定材料吸附烟气中的 NO_x 。

湿法脱硝技术

湿法脱硝技术包括水吸收法、酸吸收法、碱吸收法、氧化吸收法和络合吸收法等，这些方法通过化学反应将 NO_x 转化为可溶于水的物质，从而实现从烟气中的去除。

低 NO_x 燃烧技术虽然简便易行，但控制能力有限。随着 NO_x 排放控制要求的不断提高，烟气脱硝成为 NO_x 达标排放的主要出路。

传统的低 NO_x 燃烧技术



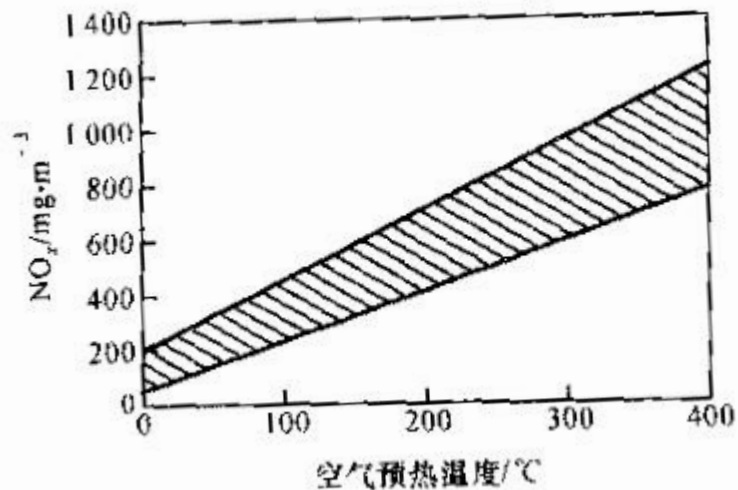
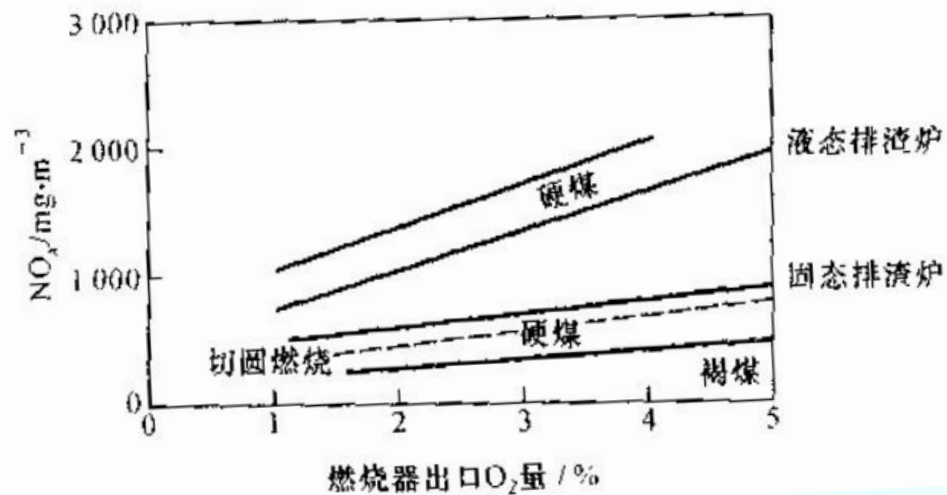
低空气过剩系数运行技术

NO_x 排放量随着炉内空气量的增加而增加, 为了降低 NO_x 的排放量, 锅炉成在炉内空气量较低的工况下运行



降低助燃空气预热温度

在工业实际操作中, 经常利用尾气的余热预热进入燃烧器的空气。虽然这样有助于节约能源和提高火焰温度, 但也导致 NO_x 排放量增加。



传统的低 NO_x 燃烧技术



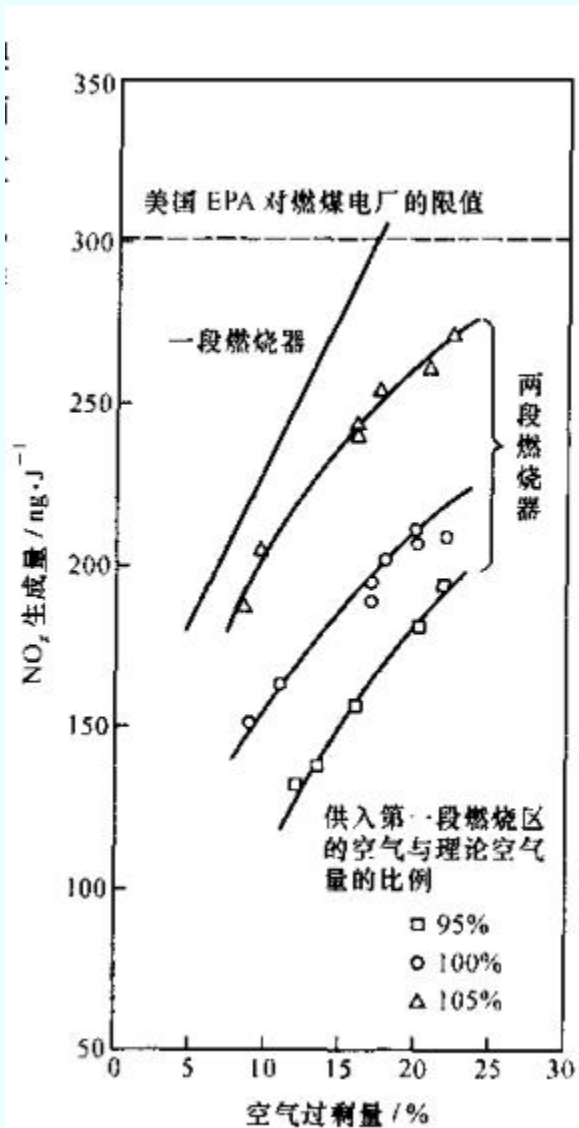
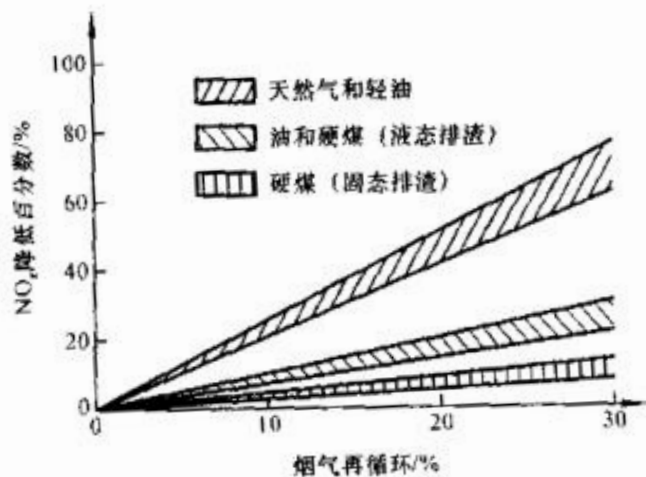
烟气循环燃烧

烟气循环燃烧法是采用燃烧产生的部分烟气冷却后,再循环送燃烧区,起到降低氧浓度和燃烧区温度的作用,以达到减少 NO_x 生成。



两段燃烧技术

在工业实际操作中,经常利用尾气的余热预热进入燃烧器的空气。虽然这样有助于节约能源和提高火焰温度,但也导致 NO_x 排放量增加。



先进的低 NO_x 燃烧技术

炉膛内整体空气分级的低 NO 直流燃烧器

设置了一层或两层所谓的燃尽风overfireair, OFA) 喷口, 一部分助燃空气通过这些喷口进入炉膛

空气/燃料分级低 NO_x 燃烧器

这种燃烧器的主要特征是空气和燃料都是分级送入炉膛, 燃料分级送入可在一次火焰区的下游形成一个富集 NH_3 、 CH 、 HCN 的低氧还原区, 燃烧产物通过此区时, 已经生成的 NO_x 会部分的被还原为 N_2 。

空气分级的低 NO_x 旋流烧器

在这种燃烧器的出口助燃空气便逐渐混入煤粉-空气射流。该种燃烧器的技术关键是准确地控制燃烧器区域燃料与助燃空气的混合过程, 以便能有效地同时控制燃料型 NO_x 和热力型 NO_x 的生成, 同时又要具有较高的燃烧效率。

烟气脱硝技术——SCR



SCR脱硝技术概述

SCR脱硝技术是一种广泛应用于工业烟气处理的技术，其主要目的是减少烟气中的氮氧化物（NO_x）排放，以达到环保标准。该技术通过在特定温度下利用催化剂，将NO_x转化为无害的氮气（N₂）和水蒸气（H₂O）。



常用还原剂介绍

在SCR脱硝过程中，常用的还原剂包括氨水、液氨和尿素。这些还原剂在反应中释放出NH₃，NH₃是实际参与反应并转化NO_x的关键组分。不同的还原剂有其特定的使用场景和优势，但它们都旨在提供足够的NH₃来实现高效的NO_x还原。



SCR脱硝工作原理

SCR脱硝技术的核心在于选择性催化还原（Selective Catalytic Reduction），它依赖于还原剂在催化剂的作用下选择性地与烟气中的NO_x反应。这个过程主要发生在催化剂表面，通过化学反应将NO_x转化为N₂和H₂O，从而减少对环境的污染。



SCR催化剂类型及特点

SCR脱硝技术中使用的催化剂通常以TiO₂作为载体，活性成分则多为V₂O₅或者V₂O₅与W₂O₃、MoO₃的混合物。这些催化剂的特点是具有较高的选择性和转化效率，能够在较低的温度下就开始工作，且对催化剂的毒化作用较小，从而保证了SCR系统的稳定运行和长期耐用性。

SCR 脱硝工作原理

SCR 过程是以氨作还原剂,通常在空气预热器的上游注入含 NO_x 的烟气。此处烟气温度约 $290\sim 400\text{ }^\circ\text{C}$,是还原反应的最佳温度。在含有催化剂的反应器内 NO_x 被还原为 N_2 和水,催化剂的活性材料通常由贵金属、碱性金属氧化物和/或沸石等组成,如下所示, NO_x 被选择性的还原:



与氨有关的潜在氧化反应包括:



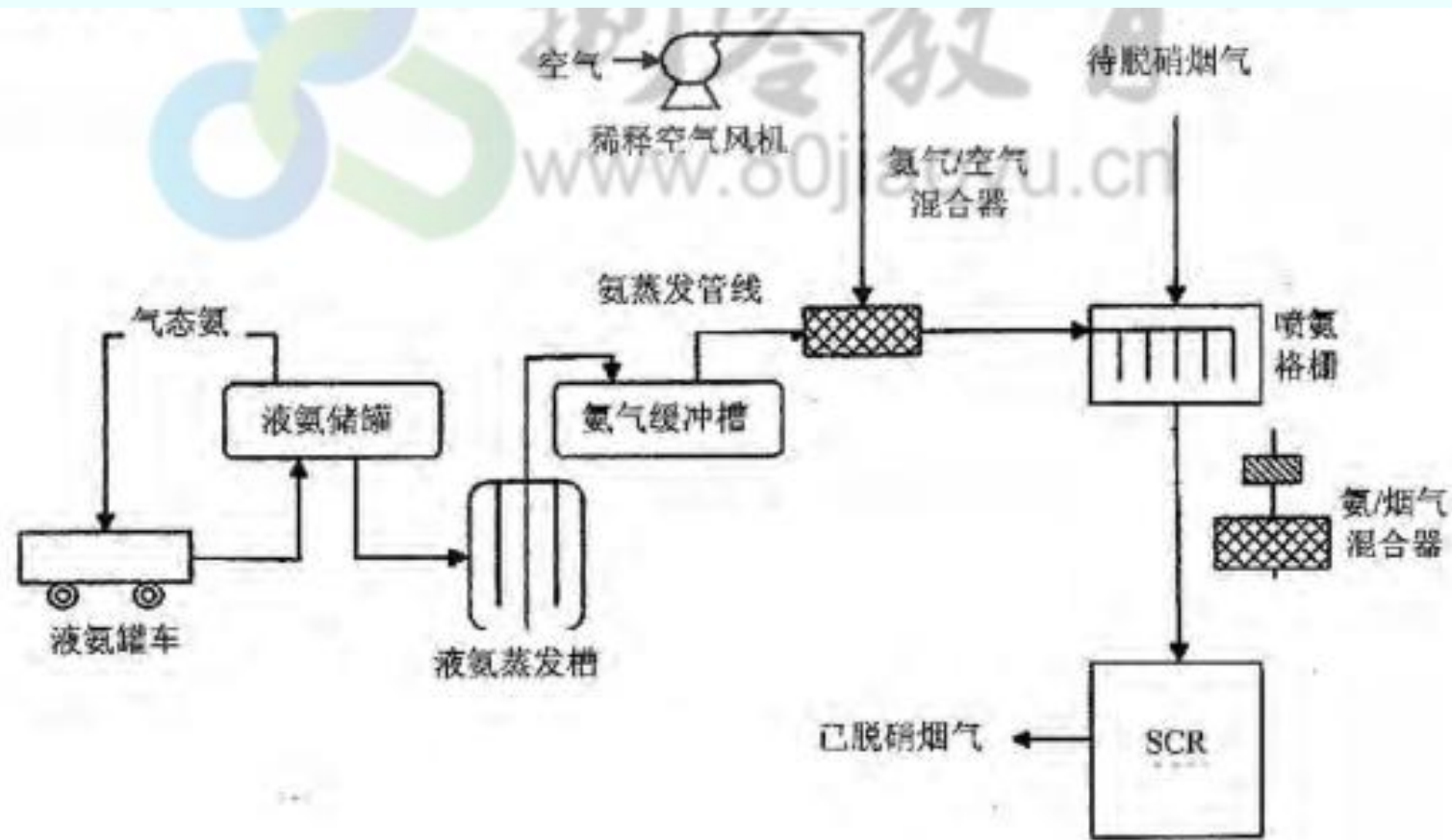


图 4-14 以液氨为还原剂的 SCR 系统

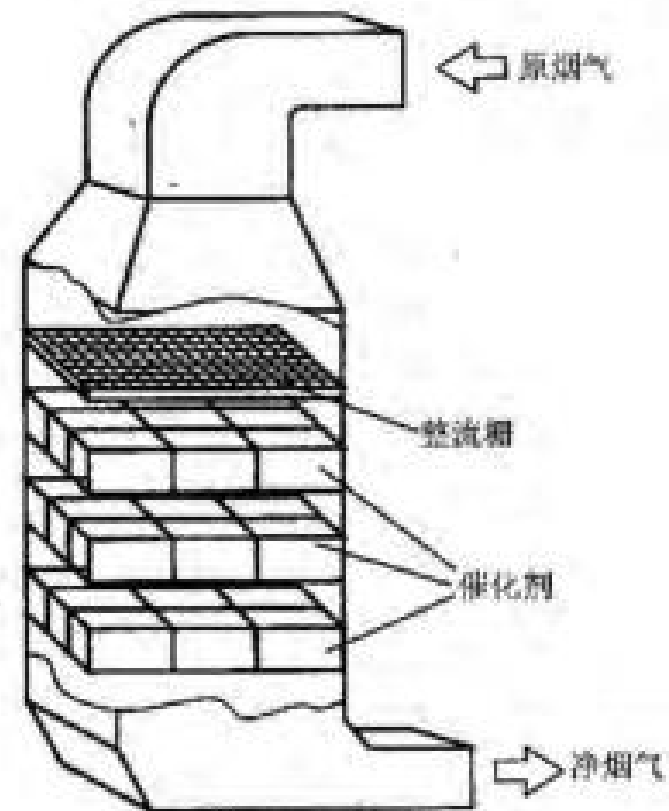


图 4-23 SCR 反应器的结构

烟气脱硝技术——SNCR

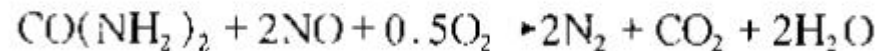
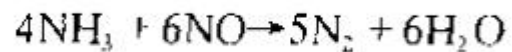


SNCR脱硝技术概述

SNCR脱硝技术是一种广泛应用于工业烟气处理的技术，其主要目的是减少烟气中的氮氧化物（NO_x）排放，以达到环保标准。该技术通过在特定温度下利用催化剂，将NO_x转化为无害的氮气（N₂）和水蒸气（H₂O）。



还原剂



SNCR脱硝工作原理

在选择性非催化还原法（SNCR）脱硝工艺中，尿素或氨基化合物作为还原剂将NO_x还原为N₂。因为需要较高的反应温度（930~1090摄氏度），还原剂通常注进炉膛或者紧靠炉膛出口的烟道。



SNCR特点

- 1、反应温度
- 2、无须催化剂（贵金属）
- 3、反应效率30%-60%，低于SCR的60%-90%

2.4 VOCs 废气处理设施



源头控制技术



末端治理技术



图 4-32 VOCs 控制技术途径

2.4.1 冷凝法



技术概述

物质的饱和蒸气压取决于温度和压力，冷凝法正是利用这一性质，采用降低温度、提高压力，或既降低温度又提高压力的方法，使处于蒸气状态的 VOCs 凝结，继而从气相分离。



示意图

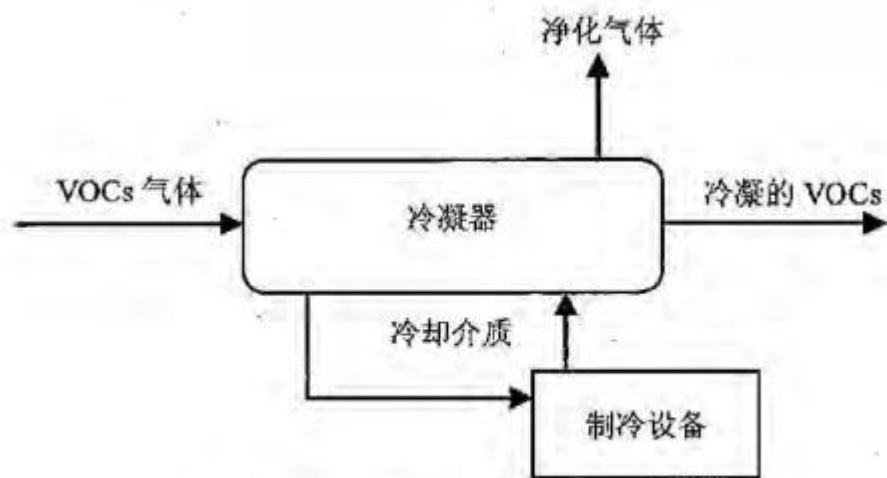


图 4-36 冷凝法回收 VOCs 系统示意



表面冷凝

表面冷凝用壳管式换热方式，典型情况下，冷却介质通过管子流动，而待处理气体在管子外壳冷凝，被冷凝的 VOCs 物质在冷却管上形成液层后被排到收集系统进行储存或处理。



接触冷凝

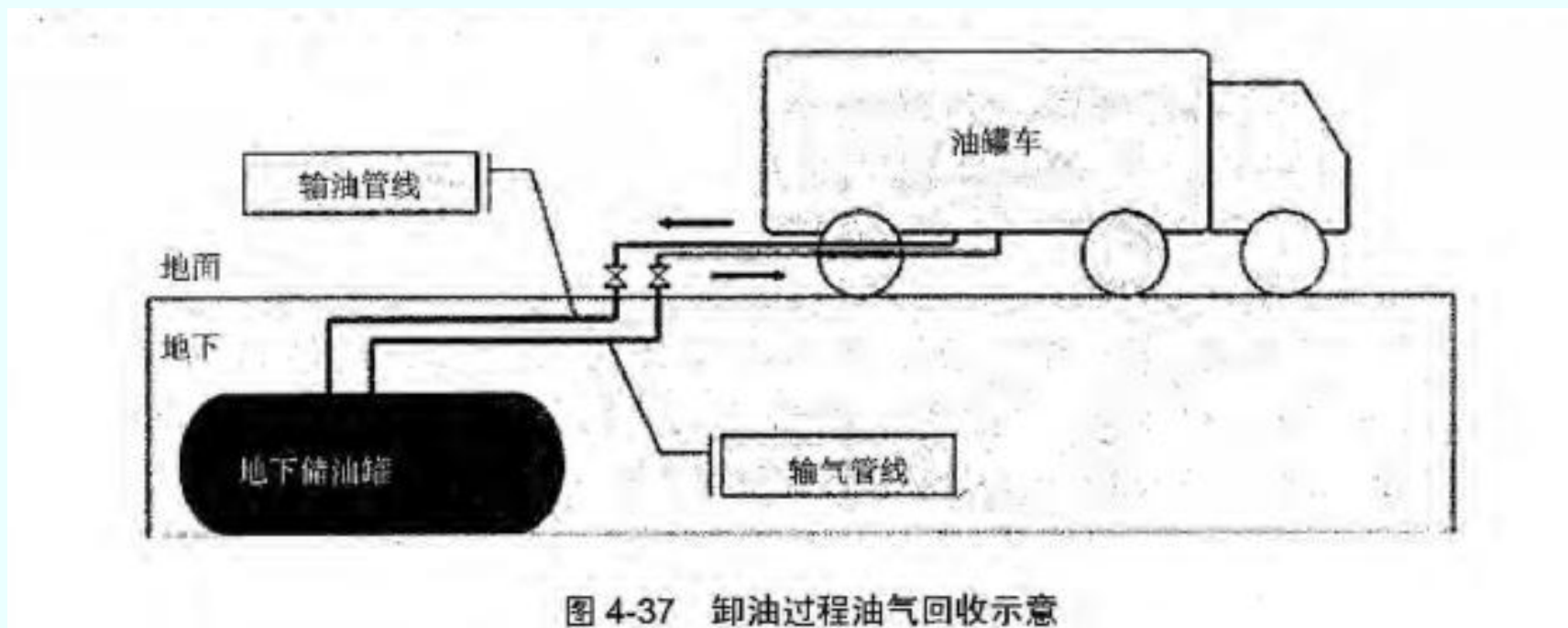
接触冷凝是指待处理气体与冷却介质(通常采用冷水)直接接触，从而使气体中的 VOCs 组分冷凝出来，冷凝液与冷却介质以废液的形式排出冷却器。

2.4.1 冷凝法



应用场景

- ◆ 作为其他方法净化高浓度废气的前处理, 以降低有机负荷, 同收有机物。如焦化厂用冷凝法回收沥青烟;
- ◆ 炼油厂、油毡厂氧化沥青尾气先用冷凝法回收油, 然后再送去燃烧净化;
- ◆ 加油站、油罐车工作时的油气回收;
- ◆ 高湿度废气也可用冷凝法使水蒸气冷凝, 以减少气体量。



2.4.2 膜分离法



技术概述

膜分离法是一种基于选择性渗透膜的物理分离技术，通过膜材料对VOCs（挥发性有机物）与空气的差异化渗透性实现分离。



典型流程：

1. 预处理：废气经冷凝或过滤去除颗粒物、水分，避免膜污染。
2. 膜分离：气体进入膜组件，VOCs透过膜后被真空泵抽吸富集，净化气达标排放。
3. 后处理：富集的VOCs可返回生产流程或通过冷凝液化回收



技术原理

- ◆ 选择性渗透：VOCs分子因与高分子膜（如聚二甲基硅氧烷PDMS）的亲水性更高，优先溶解并扩散透过膜，而氮气、氧气等难以透过，从而实现分离
- ◆ 推动力：膜两侧的压力差（通常通过加压或渗透侧真空抽吸形成）是传质的主要动力。VOCs在高压侧被浓缩，净化空气在低压侧排放
- ◆ 溶解-扩散模型：VOCs分子先在膜表面溶解，随后在浓度梯度下向膜另一侧扩散，最终在渗透侧富集回收。

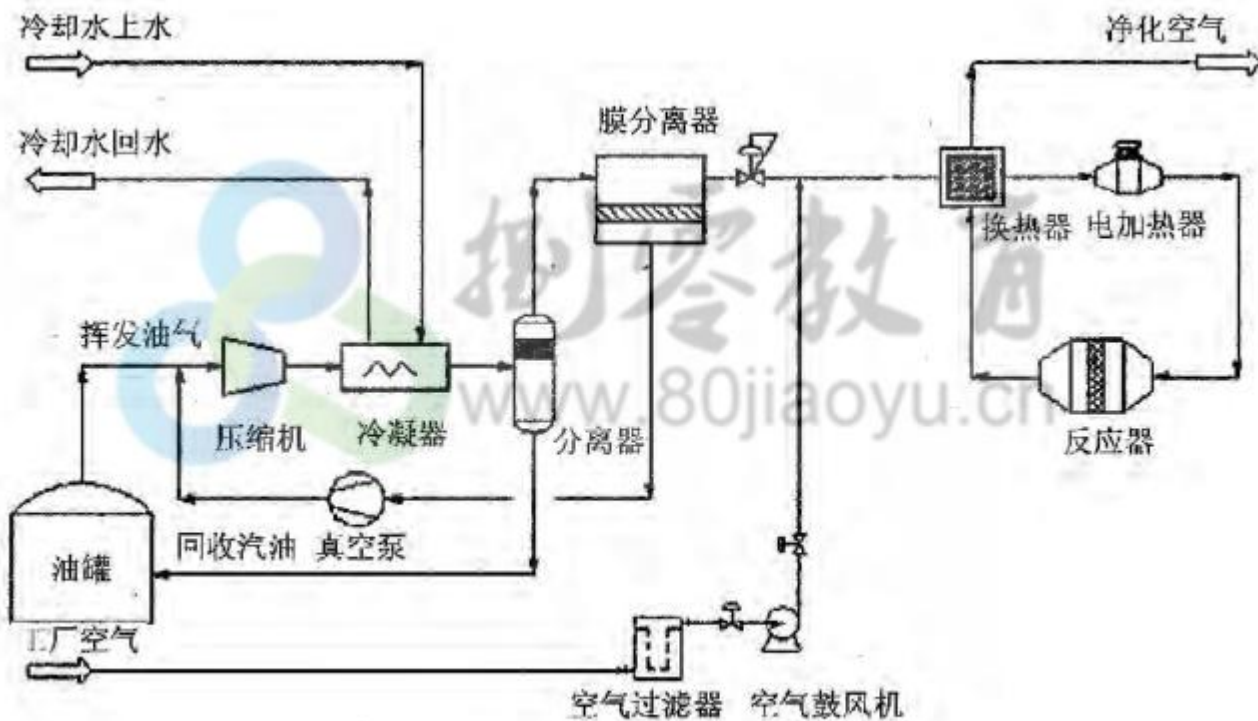


图 4-41 油库膜分离法油气回收系统示意

膜分离法主要应用于浓度在 $1000\text{mg}/\text{m}^3$ 以上的 VOCs 气体回收处理，回收率能够达到 $90\% \sim 99.9\%$ 。膜分离法最大的优点是净化效果好，无二次污染物形成，回收的 VOCs 无须后续处理。但是，膜处理技术投资运行费用高，且污染的膜抛弃后会造成污染。膜分离的效率可能会受到诸如**腐蚀性气体、含尘气体或气体接近露点**等的不利影响。膜分离法主要应用于**炼油厂、油库、加油站**的油气回收等。

2.4.3 吸收法

技术概述

溶剂吸收法采用低挥发或不挥发性溶剂对VOCs进行吸收,再利用VOCs分子和吸收剂物理性质的差异进行分离(通常采用精(蒸)馏或汽提进行分离)。吸收效果主要取决于吸收剂的吸收性能和吸收设备的结构特征。

典型流程:

废气从吸收塔底部进入,与塔顶喷淋的吸收剂逆流接触,净化气体从塔顶排出;饱和吸收剂经解吸(加热或减压)后回收VOCs,吸收剂循环使用

关键设备与吸收剂选择

◆ 设备类型:

填料塔/喷淋塔:气相连续相,适用于大流量、低阻力的场景

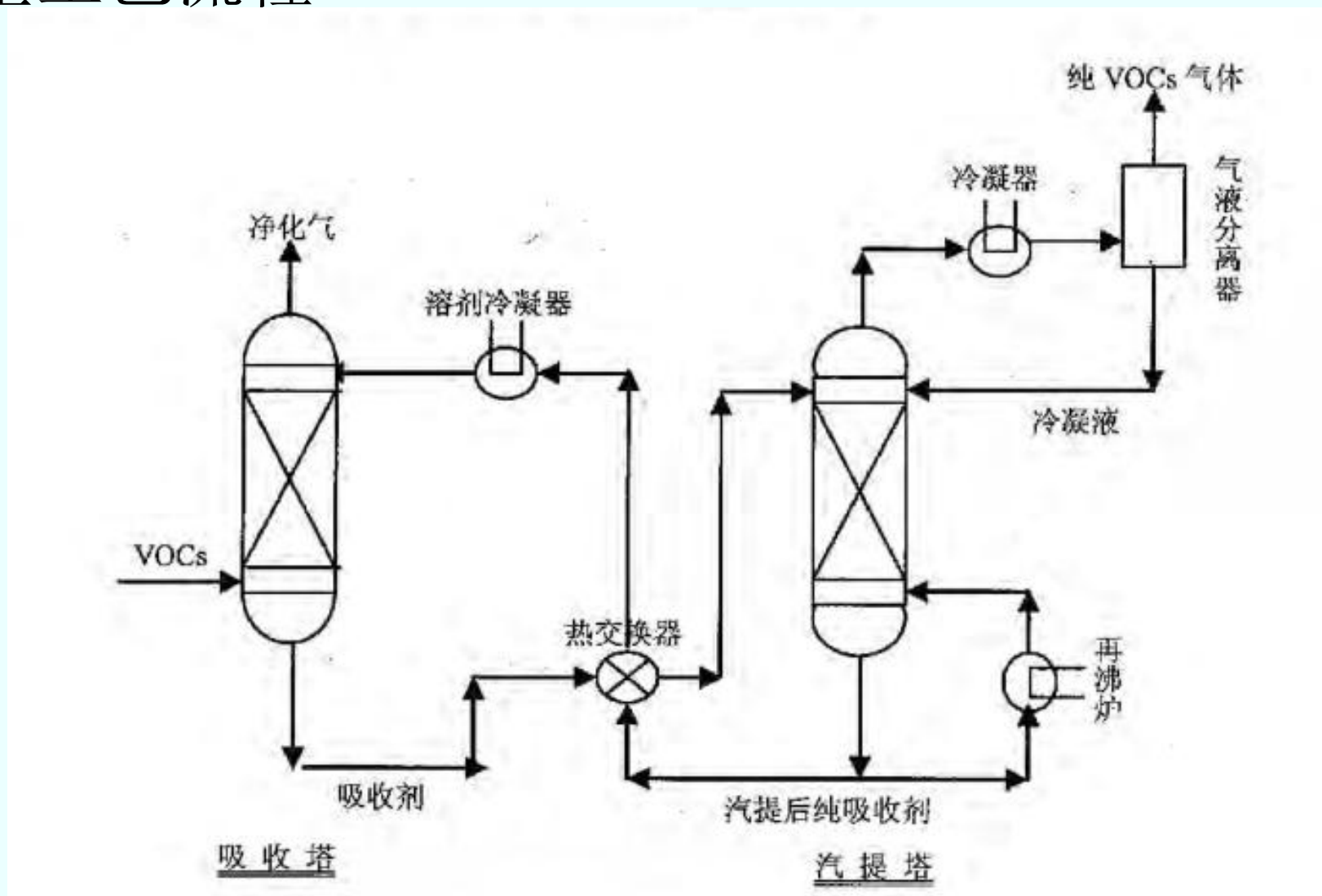
板式塔/鼓泡塔:液相连续相,用于高浓度废气或需强化传质的工况

◆ 吸收剂要求:

高沸点、低蒸气压(如煤油、白油),减少挥发损失。

对目标VOCs溶解度高,化学稳定性好(如耐腐蚀玻璃钢材质用于酸性废气)

吸收法典型工艺流程



2.4.4 吸附法

技术概述

含VOCs的气态混合物与多孔性固体接触时,利用固体表面存在的未平衡的分子吸引力或化学键力,把混合气体中VOCs组分吸附留在固体表面,这种分离过程称为吸附法。

吸附操作已广泛应用于石油化工、有机化工的生产部门,成为一种重要的操作单元。在大气污染控制领域,因为吸附剂的选择性强,能有效分离其他过程难以分离的混合物,能有效地去除低浓度有毒有害物质而得以广泛应用。

吸附剂

- ◆ 活性炭
- ◆ 活性炭纤维
- ◆ 沸石分子筛
- ◆ 膨润土

活性炭种类

颗粒活性炭

以生物质(木材、木屑、竹、果壳等)、煤为主要原材料, 经过炭化、活化后制成的颗粒状吸附材料。

蜂窝活性炭

指把粉末状活性炭、水溶性粘合剂、润滑剂和水等经过配料、捏合后挤出成型, 再经过干燥、炭化、活化后制成的蜂窝状吸附材料。

蜂窝分子筛

指将粉末状分子筛、水溶性粘合剂、润滑剂和水等经过配料、捏合后挤出成型, 再经过干燥、活化后制成的蜂窝状吸附材料; 或将粉末状分子筛、水溶性粘合剂和水等配制的浆料涂敷在纤维材料上, 经过折叠、干燥后制成的类似蜂窝状的吸附材料。

活性炭纤维毡

指利用粘胶、聚丙烯腈或沥青纤维等加工的纤维毡经过炭化、活化后所制备的多孔材料。

活性炭吸附条件

进气要求

颗粒物含量宜低于 $1\text{mg}/\text{m}^3$,

废气温度宜低于 40 摄氏度;

有机废气的浓度应低于爆炸极限下限的 25%

活性炭吸附工艺适用于间歇式生产、风量不大（小于 $30000\text{m}^3/\text{h}$ 以下）、挥发性有机物进口浓度不高（ $300\text{mg}/\text{m}^3$ 左右，不超过 $600\text{mg}/\text{m}^3$ ）且不含低沸点、易溶于水等物质组分的废气处理

解决方案

应先采用过滤或洗涤等方式进行预处理;

采用换热或稀释等方式调节温度

稀释至 25% 以下方可进行吸附净化

更换其他工艺或增加前置工艺

优点

1. 初设成本低;
2. 能源需求低;
3. 适合多种污染物;
4. 臭味去除有很高的效率

缺点

1. 无再生系统时吸附剂更换频繁;
2. 不适合高浓度废气;
3. 废气湿度大时吸附效率低;
4. 不适合含颗粒物状废气, 对废气预处理要求高;
5. 热空气再生时有火灾危险;
6. 对某些化合物(如酮类、苯乙烯)吸附时受限

2.4.5 燃烧法

直接燃烧技术

TO (Thermal Oxidizer, 直燃式废气燃烧炉)

直接燃烧也称直接火焰燃烧, 是将废气中VOCs组分当作燃料的处理方式, 因此该法只适用于 VOCs 浓度或热值较高的废气, 其燃烧温度通常维持在1100℃左右。

TNV (Thermische Nachverbrennung, 回收式热力焚烧系统)

热力燃烧技术

与直接燃烧法不同, 在热力燃烧中, 尽管废气所含VOCs参与燃烧过程, 但废气本身不能维持燃烧, 并不是燃烧所用的主要燃料组分, 需通过外加燃料(如煤气、天然气、油等)的燃烧, 使温度提高到 VOCs气体足以完全氧化为CO、H₂O、N₂等无害组分对应的温度, 通常为540~820℃。

蓄热燃烧技术

蓄热燃烧也叫蓄热热力燃烧(Regenerative Thermal Oxidation, RTO), 是一种配有蓄热床层的热力燃烧方式。蓄热燃烧系统主要由燃烧装置、蓄热床(内有蓄热体)、换向系统、排烟系统和连接管道五部分组成。

催化燃烧技术

CO (Catalytic Oxidation, 催化燃烧法)

RCO (Regenerative Catalytic Oxidation, 蓄热式催化燃烧)

催化燃烧法是在催化剂作用下, 使废气中的 VOCs组分氧化为CO₂和 H₂O。由于绝大部分 VOCs组分均具有可燃性, 因此催化燃烧法已成为净化 VOCs 废气的有效手段之一。

直接燃烧技术——*π*

特点

需维持高温环境确保完全燃烧

缺点

能耗高（需持续供热），运行成本高，可能产生NO_x二次污染

优点

处理效率高（可达99.5%），结构简单，适应高浓度（ $>2\text{g}/\text{m}^3$ ）、含颗粒物或粘性物质的废气

适用场景

石油化工、制药等高浓度、小风量废气
例如：石化企业的火炬

直接燃烧技术——*FM2*

特点

高温烟气通过多级换热器回收热量，用于预热进气或生产用热（如烘干工艺），实现能源循环利用

优点

热能回收率高，适合需大量热能的连续生产过程（如涂装烘干线），综合能耗低

缺点

设备复杂，初期投资高，需配套换热系统

适用场景

汽车涂装、印刷等需同步供热的高浓度废气处理

热力燃烧技术

特点

废气本身热值不足，需额外燃料（如天然气）加热至反应温度

缺点

需要辅助燃料

优点

二次污染风险较低（温度较低，NO_x生成少）

适用场景

适用于中低浓度、大风量废气（如涂装、印刷行业）

催化燃烧技术——

特点

与直接燃烧和热力燃烧不同，催化燃烧为无火焰燃烧，安全性好，要求的燃烧温度低(大部分烃类和CO在300~500℃即可完成反应)

优点

能耗低（无需高温），无明火安全性高，适合中低浓度（2000~6000mg/m³）废气
辅助燃料消耗少
对废气中可燃组分浓度和热值限制较小
燃烧过程几乎不生成NO

缺点

催化剂Pt Pd昂贵
催化剂对废气中的粉尘、液滴、有害组分要求高，否则易中毒
开车时需要将废气温度提升至起燃温度，催化反应才能进行

适用场景

电子、印刷等行业成分稳定的废气

蓄热催化燃烧技术——RCO

特点

结合RTO与CO技术，废气经蓄热体预热后，在催化剂床层300~500℃低温催化氧化，进一步降低能耗

优点

热回收率95%以上，反应温度更低，能耗比RTO节省30%~50%

缺点

催化剂成本高且易失效，维护复杂，处理效率略低

适用场景

电子、印刷等行业成分稳定的废气

蓄热热力燃烧技术——*RTC*

特点

废气通过陶瓷蓄热体预热至接近800℃，氧化分解后高温烟气加热另一蓄热体，交替蓄热-放热，热回收率>95%

优点

处理效率99%以上，运行能耗低（自持燃烧后无需辅助燃料），适合中低浓度（100~3500mg/m³）大风量废气

缺点

设备体积大，蓄热体需定期清理，投资成本高

适用场景

涂装、化工等连续排放源

燃烧技术汇总对比

工艺对比总结

工艺	反应温度	适用浓度	效率	能耗	二次污染风险
TO	760~820°C	高浓度	99%+	高	NO _x 生成
TNV	~750°C	高浓度	95%+	中	低 (热能回收)
CO	200~400°C	中低浓度	90%+	低	催化剂中毒
RTO	~800°C	中低浓度	99%+	低	低
RCO	300~500°C	低浓度	90%+	极低	催化剂失效

2.4.6 生物法

生物洗涤塔

目前常用的洗涤塔有多孔板式塔和鼓泡塔。洗涤塔的主要作用是为气液两相提供充分接触的机会，使两相间的作用能够有效地进行。使气相中的有机物和氧气转入液相，进入再生器（活性污泥池），被微生物氧化分解，得以降解。

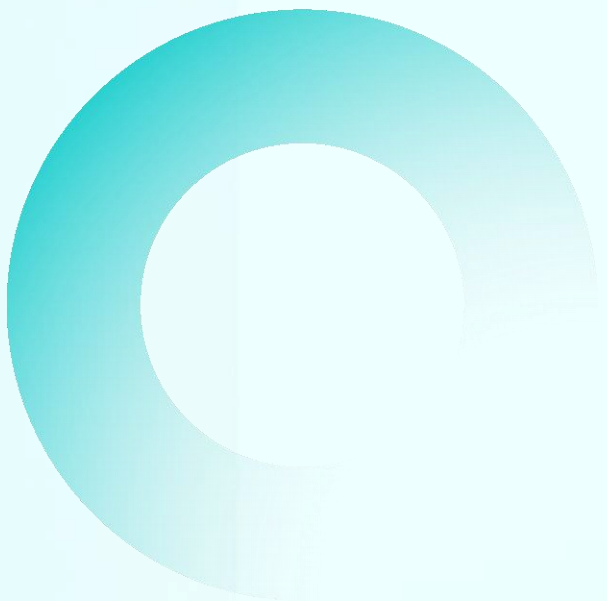
生物过滤塔

废气通过湿润的有机滤料层（如堆肥、泥炭），滤料中的微生物将污染物吸附并降解。无需循环液，仅需定期喷淋水分和营养

生物滴滤塔

废气通过惰性填料层（如陶瓷、聚氨酯），填料表面附着生物膜。循环液从顶部喷淋，提供微生物所需的营养和水分，污染物在生物膜中直接被降解

参数	生物洗涤塔	生物滴滤塔	生物过滤塔
传质介质	液相 (洗涤液)	生物膜+循环液	有机滤料
适用浓度	高浓度 (> 1000 ppm)	中高浓度 (100-1000 ppm)	低浓度 (< 100 ppm)
水溶性要求	高 (需易溶于水)	中等	低 (依赖滤料吸附)
能耗	中 (需泵送洗涤液)	中 (循环液系统)	低 (仅喷淋)
维护难度	高 (污泥处理)	中 (填料清洗)	低 (滤料更换)



处理设施选型

3.1 除尘器选型的关键因素

工况条件的匹配

根据气体**温度、湿度、粉尘特性**等工况选择合适类型，确保设备长期稳定运行并降低故障率。



经济性与效率平衡

高效设备虽性能优越，但初始投资和运行成本较高，需结合实际需求进行综合评估。



环保政策的影响

随着排放标准趋严，企业需优先考虑满足法规要求的设备，且满足**可行技术**的要求。



运行维护便利性

选择易于维护、配件供应充足的设备，减少停机时间，提升整体运营效率。



除尘设备选型

对比项	重力沉降室	旋风除尘器	布袋除尘器	电除尘器
工作原理	利用重力使大颗粒自然沉降	离心力分离粉尘（外旋流下沉）	滤袋筛分、惯性碰撞、扩散吸附	高压电场使粉尘荷电并吸附至集尘极
除尘效率	30%~50%（仅>50 μm 颗粒）	80%~90%（>5 μm 颗粒）	99%~99.9%（可捕集 $\geq 0.1\mu\text{m}$ 颗粒）	99%~99.9%（可捕集 $\geq 0.01\mu\text{m}$ 颗粒）
阻力/能耗	50~150Pa（能耗极低）	500~1500Pa（中等能耗）	1000~2000Pa（能耗较高）	150~300Pa（运行能耗低）
适用颗粒范围	>50 μm	>5 μm （对<5 μm 效率低）	$\geq 0.1\mu\text{m}$ （对亚微米级有效）	$\geq 0.01\mu\text{m}$ （对高比电阻粉尘敏感）
温度适应性	350~550 $^{\circ}\text{C}$ （耐高温）	$\leq 400^{\circ}\text{C}$ （耐高温）	$\leq 280^{\circ}\text{C}$ （需耐高温滤料）	$\leq 400^{\circ}\text{C}$ （部分型号可达更高）
湿度敏感	无要求	高湿易结块堵塞	需控制湿度（30%~80%防糊袋）	高湿易爬电，影响效率
设备成本	极低（结构简单）	低（无运动部件）	中高（滤袋更换成本高）	高（设备复杂，维护专业）
维护难度	无需维护	定期排灰，防磨损	需定期更换滤袋，清灰系统复杂	需清理电极，维护绝缘系统
二次污染	无	无（干法收集）	无（干法收集）	无（干法收集）
典型应用	矿山、冶金粗颗粒预处理	化工、建材预除尘	水泥、电力、钢铁精细除尘	电厂、建材大烟气量处理
主要缺点	效率低，占地面积大	细颗粒效率低，入口易磨损	怕湿怕高温，滤袋寿命短	粉尘比电阻要求严格，投资高

3.2 *2023*设备选型

各类技术都有其一定的适用范围，其对废气**组分及浓度、温度、湿度、风量**等因素有不同要求，因此企业在选用治理技术时，应从技术可行性和经济性多方面进行考虑。

工况条件的匹配

根据气体**温度、湿度、特征污染物及其浓度**等工况选择合适类型，确保设备长期稳定运行并降低故障率。



环保政策的影响

随着排放标准趋严，企业需优先考虑满足法规要求的设备，且满足**可行技术**的要求。



经济性与效率平衡

高效设备虽性能优越，但初始投资和运行成本较高，需结合实际需求进行综合评估。

运行维护便利性

选择易于维护、配件供应充足的设备，减少停机时间，提升整体运营效率。



浓度对选型的影响

> 高浓度的 VOCs

（通常高于 1%，即 10000 ppm）一般需要进行有机物的回收。通常首先采用冷凝技术将废气中大部分的有机物进行回收，降浓后的有机物再采用其他技术进行处理。

> 低浓度的 VOCs

对于低浓度的 VOCs（通常为小于 1 000 ppm），目前有很多的治理技术可以选择，如吸附浓缩后处理技术、吸收技术、生物技术等

> 中等浓度的 VOCs

当无回收价值时，一般采用催化燃烧（CO/RCO）和高温燃烧（TO/TNV/RT0）技术进行治理

> 中等浓度的 VOCs

当废气中的有机物具有回收价值时，通常选用活性炭 / 活性炭纤维吸附 + 水蒸气 / 高温氮气再生 + 冷凝工艺对废气中的有机物进行回收

风量对选型的影响

大风量

吸附浓缩 + 脱附排气高温焚烧 / 催化燃烧组合技术适用于大风量低浓度 VOCs 废气的治理；可以采用多套设备分开进行处理

中等风量

生物法适用于中等风量较低浓度 VOCs 废气的治理；
活性炭 / 活性炭纤维吸附溶剂回收适用于中大风量中低浓度VOCs 废气的治理；

中小风量

催化燃烧法、高温燃烧治理技术适用于中小风量中高浓度 VOCs 废气的治理；
冷凝回收法适用于中低风量高浓度 VOCs 废气的治理。

小风量

吸附法（更换活性炭）适用于小风量低浓度 VOCs废气的治理；

温度、湿度对选型的影响

低温

吸附法要求气体温度一般低于 40℃，如果废气温度比较高时，吸附效果会显著降低，因此应该首先对废气进行降温处理或不采用此技术。

高温

燃烧法中当气体温度比较高，接近或达到催化剂的起燃温度时，由于不再需要对废气进行加热，即使有机物浓度较低，采用催化燃烧技术是最为经济的。（当废气温度达到或超过催化剂的起燃温度时，可以采用直接催化燃烧技术进行治理，如漆包线生产尾气的治理等）

高湿

废气的湿度对某些技术的治理效果的影响非常大，如吸附回收技术，活性炭、沸石和活性炭纤维在高湿度条件下（如高于 70%）对有机物的吸附效果会明显降低，因此应该首先对废气进行除湿处理或不采用此技术。

2023 各类废气治理设备特点对比

控制技术装备		优点	缺点
吸附技术	固定床吸附系统	<ol style="list-style-type: none">1. 初设成本低;2. 能源需求低;3. 适合多种污染物;4. 臭味去除有很高的效率	<ol style="list-style-type: none">1. 无再生系统时吸附剂更换频繁;2. 不适合高浓度废气;3. 废气湿度大时吸附效率低;4. 不适合含颗粒物状废气, 对废气预处理要求高;5. 热空气再生时有火灾危险;6. 对某些化合物(如酮类、苯乙烯)吸附时受限
	旋转式吸附系统	<ol style="list-style-type: none">1. 结构紧凑, 占地面积小;2. 连续操作、运行稳定;3. 床层阻力小;4. 适用于低浓度、大风量的废气处理;5. 脱附后废气浓度浮动范围小	<ol style="list-style-type: none">1. 对密封件要求高, 设备制造难度大、成本高;2. 无法独立完全处理废气, 需要与其他废气处理装置组合使用;3. 不适合含颗粒物状废气, 对废气预处理要求高

控制技术装备		优点	缺点
吸收技术	吸收塔	<ol style="list-style-type: none">1. 工艺简单，设备费低；2. 对水溶性有机废气处理效果佳；3. 不受高沸点物质影响；4. 无耗材处理问题	<ol style="list-style-type: none">1. 净化效率较低；2. 耗水量较大，排放大量废水，造成污染转移；3. 填料吸收塔易阻塞；4. 存在设备腐蚀问题

控制技术装备		优点	缺点
燃烧技术	TO/TNV	<ol style="list-style-type: none"> 1. 污染物适用范围广; 2. 处理效率高 (可达 95% 以上); 3. 设备简单 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 操作温度高, 处理低浓度废气时运行成本高; 2. 处理含氮化合物时可能造成烟气中 NO_x 超标; 3. 不适合含硫、卤素等化合物的治理; 4. 处理低浓度 VOCs 时燃料费用高
燃烧技术	CO	<ol style="list-style-type: none"> 1. 操作温度较直接燃烧低, 运行费用低; 2. 相较于 TO, 燃料消耗量少; 3. 处理效率高 (可达 95% 以上) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 催化剂易失活 (烧结、中毒、结焦), 不适合含有 S、卤素等化合物的净化; 2. 常用贵金属催化剂价格高; 3. 有废弃催化剂处理问题; 4. 处理低浓度 VOCs 时燃料费用高

控制技术装备		优点	缺点
燃烧技术	RTO	<ol style="list-style-type: none"> 1. 热回收效率高 (>90%), 运行费用低; 2. 净化效率高 (95%~99%) 3. 适用于高温气体 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 陶瓷蓄热体床层压损大且易阻塞; 2. 低 VOCs 浓度时燃料费用高; 3. 处理含氮化合物时可能造成烟气中 NO_x 超标; 4. 不适合处理易自聚化合物 (苯乙烯等), 其会发生自聚现象, 产生高沸点交联物质, 造成蓄热体堵塞; 5. 不适合处理硅烷类物质, 燃烧生成固体尘灰会堵塞蓄热陶瓷或切换阀密封面
	RCO	<ol style="list-style-type: none"> 1. 操作温度低, 热回收效率高 (>90%), 运行成本较 RTO 低; 2. 高去除率 (95~99%) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 催化剂易失活 (烧结、中毒、结焦), 不适合含有 S、卤素等化合物的净化; 2. 陶瓷蓄热体床层压损大且易阻塞; 3. 处理含氮化合物时可能造成烟气中 NO_x 超标; 4. 常用贵金属催化剂成本高; 5. 有废弃催化剂处理问题; 6. 不适合处理易自聚、易反应等物质 (苯乙烯), 其会发生自聚现象, 产生高沸点交联物质, 造成蓄热体堵塞; 7. 不适合处理硅烷类物质, 燃烧生成固体尘灰会堵塞蓄热陶瓷或切换阀密封面

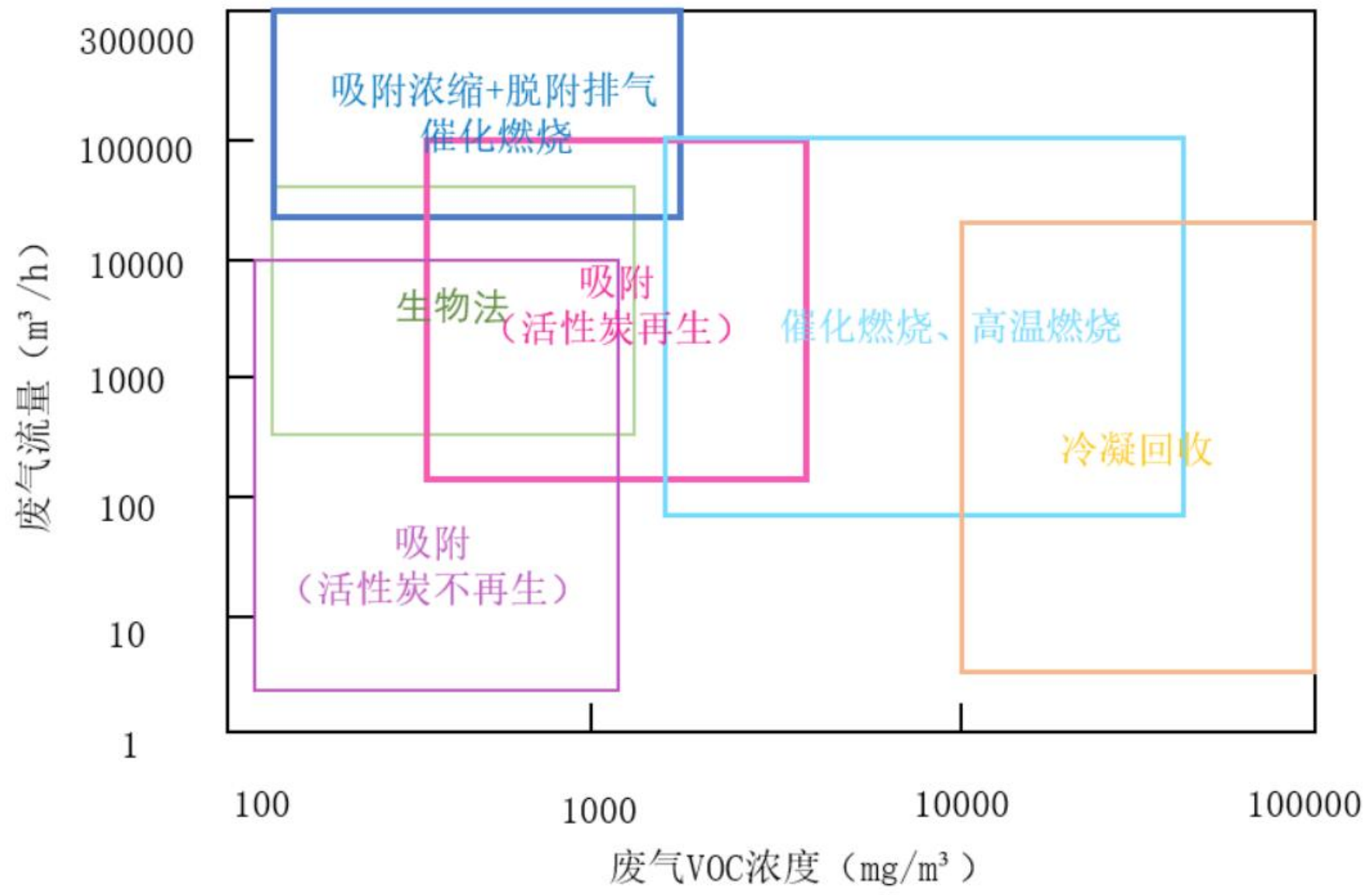


图 3-2 VOCs 治理技术适用范围（浓度、风量）

各行业排污许可证申请与核发技术规范

表2 重点管理排污单位废气产污环节、污染物种类、排放形式及污染防治设施一览表

排污单位类别	生产单元	生产设施	废气产污环节	污染物种类	执行标准	排放形式	污染防治设施		排放口类型
							污染防治设施名称及工艺	是否为可行技术	
塑料人造革与合成革制造	塑料人造革与合成革制造配料	搅拌机、研磨机、高速混合机	配料废气	二甲基甲酰胺 (DMF) ^a 、苯 ^a 、甲苯 ^a 、二甲苯 ^a 、VOCs、颗粒物、臭气浓度 ^b 、恶臭特征污染物 ^b	GB 21902 GB 14554	有组织	除尘、喷淋、吸附、热力燃烧、催化燃烧、低温等离子体、UV 光氧化/光催化、生物法、以上组合技术	<input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 如采用不属于“4.3 污染防治可行技术要求”中的技术，应提供相关证明材料	主要排放口 一般排放口 ^c
	塑料人造革生产线（直接涂刮法、转移法、压延法、流延法等）	涂刮机、上浆机、贴合机、密炼机、塑炼机、混炼挤出机、压延机、挤出机、T型头、烘箱、冷却辊	挥发废气	苯 ^a 、甲苯 ^a 、二甲苯 ^a 、VOCs、颗粒物、臭气浓度 ^b 、恶臭特征污染物 ^b			除尘、喷淋、吸附、热力燃烧、催化燃烧、低温等离子体、UV 光氧化/光催化、生物法、以上组合技术		主要排放口 一般排放口 ^c
	塑料合成革干法工艺生产线	储料罐、反应器、涂刮机、贴合机、烘箱	挥发废气	二甲基甲酰胺 (DMF) ^a 、苯 ^a 、甲苯 ^a 、二甲苯 ^a 、VOCs、臭气浓度 ^b 、恶臭特征污染物 ^b			喷淋、吸附、热力燃烧、催化燃烧、低温等离子体、UV 光氧化/光催化、生物法、以上组合技术		主要排放口 一般排放口 ^c
	塑料合成革湿法工艺生产线	含浸槽、涂刮机、凝固槽、水洗槽、烘箱、冷却辊	挥发废气	二甲基甲酰胺 (DMF) ^a 、臭气浓度 ^b 、恶臭特征污染物 ^b			喷淋、吸附、热力燃烧、催化燃烧、低温等离子体、UV 光氧化/光催化、生物法、以上组合技术		主要排放口 一般排放口 ^c
	塑料合成革超细纤维工艺生产线	含浸槽、凝固槽、水洗槽、抽出机、干燥机	挥发废气	二甲基甲酰胺 (DMF) ^a 、苯 ^a 、甲苯 ^a 、二甲苯 ^a 、VOCs、臭气浓度 ^b 、恶臭特征污染物 ^b			喷淋、吸附、热力燃烧、催化燃烧、低温等离子体、UV 光氧化/光催化、生物法、以上组合技术		主要排放口 一般排放口 ^c
	后处理	压花机、印花机、磨皮机、揉纹机、抛光机、烫光机、喷涂机、复合机、植绒机	挥发废气	苯 ^a 、甲苯 ^a 、二甲苯 ^a 、VOCs、臭气浓度 ^b 、恶臭特征污染物 ^b			喷淋、吸附、热力燃烧、催化燃烧、低温等离子体、UV 光氧化/光催化、生物法、以上组合技术		主要排放口 一般排放口 ^c
	二甲基甲酰胺回收	喷淋吸收塔、精馏回收塔	喷淋废气	二甲基甲酰胺 (DMF)、臭气浓度 ^b			喷淋、精馏回收、低温等离子体、UV 光氧化/光催化、生物法、以上组合技术		主要排放口

各行业污染防治可行技术指南

- 1. 电子工业水污染防治可行技术指南
- 2. 农药制造工业污染防治可行技术指南
- 3. 铸造工业大气污染防治可行技术指南
- 4. 屠宰及肉类加工业污染防治可行技术指南
- 5. 汽车工业污染防治可行技术指南
- 6. 家具制造工业污染防治可行技术指南
- 7. 涂料油墨工业污染防治可行技术指南
- 8. 工业锅炉污染防治可行技术指南
- 9. 纺织工业污染防治可行技术指南
- 10. 制浆造纸工业污染防治可行技术指南
- 11. 火电厂污染防治可行技术指南
- 12. 铜冶炼污染防治可行技术指南（试行）
- 13. 钴冶炼污染防治可行技术指南（试行）
- 14. 镍冶炼污染防治可行技术指南（试行）
- 15. 再生铅冶炼污染防治可行技术指南
- 16. 电解锰行业污染防治可行技术指南（试...）
- 17. 钢铁行业烧结、球团工艺污染防治可行...
- 18. 水泥工业污染防治可行技术指南（试行）
- 19. 造纸行业木材制浆工艺污染防治可行技...
- 20. 造纸行业非木材制浆工艺污染防治可行...
- 21. 造纸行业废纸制浆及造纸工艺污染防治...
- 22. 医疗废物处理处置污染防治最佳可行技...
- 23. 铅冶炼污染防治最佳可行技术指南（试...）
- 24. 钢铁行业轧钢工艺污染防治最佳可行技...
- 25. 钢铁行业炼钢工艺污染防治最佳可行技...
- 26. 钢铁行业焦化工艺污染防治最佳可行技...
- 27. 钢铁行业采选矿工艺污染防治最佳可行...
- 28. 城镇污水处理厂污泥处理处置污染防治...

浙江省发布的各行业可行技术指南



当地政府发布的相关政策要求

永康市“蓝天保卫”工作领导小组办公室文件

永蓝天办发〔2021〕3号

关于印发《永康市五金涂装行业挥发性有机物深度治理三年行动方案》的通知

（五）建设高效处理设施

现有五金涂装企业应逐步淘汰低温等离子、光催化、光氧化等低效治理技术，逐步采用“吸附浓缩+燃烧”等高效治理工艺或源头替代。

年使用溶剂型（油性）涂料5吨及以上（含稀释剂、固化剂等）的涂装企业，废气处理必须使用“吸附浓缩+燃烧”等高效治理工艺，以确保废气稳定达标排放，2022年年底前完成设施高效治理提升改造或源头替代工作。

年使用溶剂型（油性）涂料5吨以下（含稀释剂、固化剂等）的涂装企业，在确保活性炭更换符合监管要求的前提下，可暂时保留“光氧+活性炭吸附”等组合工艺，根据实际情况逐步淘汰，到2024年年底前完成源头替代或设施高效治理提升改造工作。（责任单位：生态环境分局、各镇（街道、区））



THE END

谢谢