



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 47183—2026

## 化学工业炉脱硝装备

Denitration equipment of chemical industrial furnace

2026-02-27 发布

2026-09-01 实施

国家市场监督管理总局  
国家标准化管理委员会 发布



## 目 次

前言 .....	III
引言 .....	IV
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 分类及选用原则 .....	3
5 性能要求 .....	3
6 低氮燃烧脱硝装备 .....	4
7 SNCR 脱硝装备 .....	6
8 SCR 脱硝装备 .....	7
9 制造 .....	9
10 系统验收与试验方法 .....	9
附录 A (资料性) 低氮燃烧 NO <sub>x</sub> 形成的化学过程及燃烧装备结构原理 .....	11
附录 B (资料性) SNCR 脱硝工艺 .....	18
附录 C (资料性) SCR 脱硝工艺 .....	23
附录 D (资料性) SCR 脱硝反应器系统压力降计算方法 .....	25
参考文献 .....	29



## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国石油和化学工业联合会提出。

本文件由全国化工机械与设备标准化技术委员会(SAC/TC 429)归口。

本文件起草单位：中国特种设备检测研究院、四川大学、天华化工机械及自动化研究设计院有限公司、江苏焱鑫科技股份有限公司、中石化广州工程有限公司、中国石化工程建设有限公司、清华大学山西清洁能源研究院、中国科学院过程工程研究所、中石化(大连)石油化工研究院有限公司、四川轻化工大学、华东理工大学、山西新唐工程设计股份有限公司、国能龙源环保有限公司、美斯顿(天津)催化剂有限公司。

本文件主要起草人：刘岑凡、张冲冲、舒松、李建军、杨振华、周渊博、李葳、李涛、杜俊涛、胡敏、袁成志、张杨鑫、李昌力、张扬、郭旻旻、王宽岭、刘艳鹏、窦祖旺、刘少北、贾丽娟、王邦达、罗雷、张志强、朱廷钰、陈训强、王学海、付鹏波、曲云翔、海娇、闫东生、袁军。

## 引 言

化学工业炉排放的氮氧化物对大气污染等方面的影响不容忽视,考虑到化学工业炉脱硝技术装备的特殊性,依据 GB 31570《石油炼制工业污染物排放标准》和 GB 31571《石油化学工业污染物排放标准》的规定,特编制本文件。



# 化学工业炉脱硝装备

## 1 范围

本文件规定了化学工业炉脱硝装备的分类及选用原则、性能要求、低氮燃烧脱硝装备、SNCR 脱硝装备、SCR 脱硝装备、制造以及系统验收与试验方法。

本文件适用于化学工业生产中使用的加热炉、转化炉、裂解炉、气化炉、焚烧炉、煅烧炉等工业炉脱硝装备(以下简称“脱硝装备”)。以燃煤为加热方式的化学工业炉脱硝装备见 GB/T 21509。

本文件不适用于厂界外的焚烧炉、煅烧炉等化学工业炉的脱硝装备。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 150.4 压力容器 第4部分:制造、检验和验收

GB/T 536—2017 液体无水氨

GB/T 2440—2017 尿素

GB/T 3768 声学 声压法测定噪声源声功率级和声能量级 采用反射面上方包络测量面的简易法

GB/T 16157 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法

GB/T 20801.4 压力管道规范 工业管道 第4部分:制作与安装

GB 31570 石油炼制工业污染物排放标准

GB 31571 石油化学工业污染物排放标准

GB/T 41664—2022 低 NO<sub>x</sub> 燃油燃气燃烧器评价方法与试验规则

HG/T 5353 工业氨水

JB/T 12534 选择性催化还原法(SCR)烟气脱硝气态氨喷射装置

NB/T 47003.1 压力容器 第1部分:钢制焊接压力容器

SH/T 3010 石油化工设备和管道绝热工程设计规范

SH/T 3070 石油化工管式炉钢结构设计规范

SH/T 3602 炼油装置火焰加热炉燃烧器标准

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**化学工业炉** **chemical industrial furnace**

化工生产过程中所使用的工业炉。

注:依据工艺用途分为加热炉、转化炉、裂解炉、气化炉、焚烧炉和煅烧炉等。

3.2

**脱硝 denitration**

在源头(燃烧前)、过程(燃烧中)、末端(燃烧后)等环节采取的降低烟气中氮氧化物(NO<sub>x</sub>)含量的技术措施。

3.3

**低氮燃烧 low nitrogen oxides burning**

在燃料燃烧的过程中,采取减少氮氧化物生成和氮氧化物还原成氮气的燃烧方法。

3.4

**扩散式低氮燃烧脱硝装备 diffusion low nitrogen combustion denitration equipment**

燃料气从喷头处喷出后与空气混合同时开始燃烧的燃烧形式,且在正常工况下,能使氮氧化物生成量低于常规的燃烧器。

3.5

**预混式低氮燃烧脱硝装备 premix low nitrogen combustion denitration equipment**

燃料气和空气在进入初步燃烧区域之前进行混合后再开始燃烧的燃烧形式,且在正常工况下,能使氮氧化物生成量低于常规的燃烧器。

3.6

**选择性非催化还原法 selective non-catalytic reduction;SNCR**

利用还原剂在不需要催化剂的情况下有选择性地与烟气中的氮氧化物发生化学反应,生成氮气和水的方法。

3.7

**选择性催化还原法 selective catalytic reduction;SCR**

利用还原剂在催化剂作用下有选择性地与烟气中的氮氧化物发生化学反应,生成氮气和水的方法。

3.8

**烟气再循环 flue gas recirculation**

将燃烧后产生的烟气与助燃空气混合,再参与燃烧的低氮燃烧技术。

注:烟气热容较大,燃烧器内火焰会加热掺入的烟气,降低火焰温度和氧气浓度,进而降低热力型 NO<sub>x</sub> 生成。

3.9

**喷氨混合装置 ammonia injection and mixing system**

在 SCR 脱硝装备中将稀释后的氨气喷入并与烟气均匀混合的装置。

3.10

**氨氮比 ammonia-to-nitrogen ratio**

喷射进入的氨气与烟气中的氮氧化物的摩尔比。

注:氨气(NH<sub>3</sub>)、氮氧化物(NO<sub>x</sub>)。

3.11

**基准排放浓度 datum emission concentration**

将实测污染物排放浓度换算成在标准状态、干烟气基准氧含量为 3%下的排放浓度。

基准排放浓度按公式(1)计算。

$$\rho_{\text{base}} = \frac{21 - \phi_{(\text{O}_{\text{base}})}}{21 - \phi_{(\text{O}_{\text{MV}})}} \times \rho_{\text{MV}} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$\rho_{\text{base}}$  ——基准排放浓度,单位为毫克每立方米(mg/m<sup>3</sup>);

$\phi_{(\text{O}_{\text{base}})}$  ——干烟气基准含氧量,%;

$\phi_{(\text{O}_{\text{MV}})}$  ——实测干烟气含氧量,%;

$\rho_{MV}$  ——实测排放浓度,单位为毫克每立方米( $\text{mg}/\text{m}^3$ )。

注:标准状态为 273.15 K、101.325 kPa。

### 3.12

#### 氨逃逸浓度 ammonia slip rate

脱硝反应后烟气中氨气的质量与烟气体积(标准状态下)之比。

注:单位为毫克每立方米( $\text{mg}/\text{m}^3$ )。

### 3.13

#### 辐射段 radiant section

化学工业炉中通过辐射传递将燃烧产生的热量传递给炉管的部分。

### 3.14

#### 调节比 turndown ratio

燃烧器保持稳定燃烧时最大燃料量与最小燃料量的比值。

## 4 分类及选用原则

### 4.1 分类

脱硝装备分为低氮燃烧脱硝装备、选择性非催化还原法(SNCR)脱硝装备和选择性催化还原法(SCR)脱硝装备。

### 4.2 选用原则

4.2.1 应根据炉型特点、运行条件、排放要求和经济性等选用脱硝装备。

4.2.2 低氮燃烧脱硝装备作为源头控制氮氧化物生成的主要手段适用于所有化学工业炉,宜优先采用。

4.2.3 当氮氧化物排放限值低于  $50 \text{ mg}/\text{m}^3$  时,宜采用低氮燃烧脱硝装备与 SCR 脱硝装备组合方式。

4.2.4 当氮氧化物排放限值为  $50 \text{ mg}/\text{m}^3 \sim 100 \text{ mg}/\text{m}^3$  时,根据燃料特性,可单独使用低氮燃烧脱硝装备、SCR 脱硝装备,也可采用组合方式:低氮燃烧脱硝装备与 SCR 脱硝装备组合方式、SNCR 脱硝装备与 SCR 脱硝装备组合方式等。

## 5 性能要求

### 5.1 低氮燃烧脱硝装备性能

5.1.1 低氮燃烧脱硝装备性能应符合下列规定:

——以燃气为燃料的低氮燃烧脱硝装备的氮氧化物初始基准排放浓度不大于  $100 \text{ mg}/\text{m}^3$ ;

——以燃油(轻质燃料油,不含氮)为燃料的低氮燃烧脱硝装备的氮氧化物初始基准排放浓度不大于  $180 \text{ mg}/\text{m}^3$ ;

——噪声不大于  $85 \text{ dB(A)}$ 。

5.1.2 在低氮燃烧脱硝装备与其他脱硝装备联合使用时,为保证化学工业炉的燃烧效率,低氮燃烧脱硝装备生成的烟气中一氧化碳(CO)应符合下列规定:

a) 当低氮燃烧脱硝装备燃用气体燃料时,生成的烟气中一氧化碳(CO)基准排放浓度不大于  $100 \text{ mg}/\text{m}^3$ ;

b) 当低氮燃烧脱硝装备燃用轻油燃料时,生成的烟气中一氧化碳(CO)基准排放浓度不大于  $200 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。

## 5.2 SNCR 脱硝装备性能

SNCR 脱硝装备性能应符合下列规定：

- 氨逃逸浓度不大于  $9.6 \text{ mg/m}^3$ ；
- 氮氧化物基准排放浓度按照所属工业范围分别符合 GB 31570 或 GB 31571 的规定；
- 噪声不大于  $85 \text{ dB(A)}$ 。

## 5.3 SCR 脱硝装备性能

SCR 脱硝装备性能应符合下列规定：

- 氨逃逸浓度不大于  $2.5 \text{ mg/m}^3$ ；
- 氮氧化物基准排放浓度不大于  $50 \text{ mg/m}^3$ ；
- 噪声不大于  $85 \text{ dB(A)}$ 。

## 6 低氮燃烧脱硝装备

### 6.1 通则

6.1.1 低氮燃烧脱硝装备可独立使用，也可与其他脱硝装备联合使用。低氮燃烧  $\text{NO}_x$  形成的化学过程及燃烧装备结构原理见附录 A。

6.1.2 低氮燃烧脱硝装备点火前应对炉膛进行吹扫，低氮燃烧脱硝装备故障停机后应查明故障原因并且排除故障后，才能继续操作。

### 6.2 低氮燃烧脱硝装备组成及分类

化学工业炉的低氮燃烧脱硝装备由燃烧器本体、供风系统、燃料供给系统、点火装置、安全保护系统和负荷调节系统组成。

低氮燃烧脱硝装备按燃烧方式分为扩散式低氮燃烧脱硝装备和预混式低氮燃烧脱硝装备。

### 6.3 低氮燃烧脱硝装备选型

6.3.1 低氮燃烧脱硝装备功率负荷的选择宜根据化学工业炉的炉型、炉体结构、燃烧脱硝装备与炉管的中心距离等确定。

6.3.2 单台扩散式燃气燃烧脱硝装备功率宜符合下列规定：

- a) 自然通风外混式燃气燃烧脱硝装备的功率为  $0.3 \text{ MW} \sim 3.5 \text{ MW}$ ；
- b) 强制通风外混式燃气燃烧脱硝装备的功率为  $1.2 \text{ MW} \sim 20.5 \text{ MW}$ 。

6.3.3 单台预混式燃气燃烧脱硝装备的功率宜为  $0.15 \text{ MW} \sim 4.4 \text{ MW}$ 。

6.3.4 单台燃油燃烧脱硝装备功率宜符合下列规定：

- a) 自然通风的燃油燃烧装备功率为  $0.9 \text{ MW} \sim 5.0 \text{ MW}$ ；
- b) 强制通风的燃油燃烧装备功率为  $1.5 \text{ MW} \sim 21.0 \text{ MW}$ 。

### 6.4 低氮燃烧脱硝装备设计

6.4.1 应确保在所有正常设计条件下，火焰不应偏烧、接触炉管和管架。

6.4.2 安装位置和操作负荷区间应确保燃烧在辐射段完成，火焰不应从化学工业炉辐射段窜出。

6.4.3 多台低氮燃烧脱硝装备最小间距宜符合表 1 和表 2 的规定。

表 1 自然通风低氮燃烧脱硝装备的最小间距

装备类型	单台装备最大功率 MW	装备中心线至顶部炉管中心线或耐火材料的最小垂直距离 (仅对于垂直燃烧) m	装备中心线至靠墙炉管中心线的最小水平距离 m	装备中心线至无遮蔽耐火材料的最小水平距离 m	多台装备中心线间的最小水平距离 (水平安装时) m
燃油	1.0	4.3	0.8	0.6	6.5
	1.5	5.6	0.9	0.7	8.8
	2.0	7.0	1.1	0.8	11.2
	2.5	8.3	1.2	1.0	13.3
	3.0	9.7	1.3	1.1	14.8
	3.5	11.0	1.4	1.2	16.4
	4.0	12.4	1.6	1.4	18.0
燃气	0.5	2.6	0.6	0.4	3.4
	1.0	3.6	0.7	0.6	4.9
	1.5	4.6	0.8	0.7	6.5
	2.0	5.6	1.0	0.8	8.1
	2.5	6.7	1.1	1.0	9.6
	3.0	7.7	1.2	1.1	11.1
	3.5	8.7	1.4	1.2	11.9
	4.0	9.7	1.5	1.4	12.6
	4.5	10.7	1.6	1.5	13.4
	5.0	11.7	1.8	1.6	14.2

表 2 强制通风低氮燃烧脱硝装备的最小间距

装备类型	单台装备最大功率 MW	装备中心线至靠墙炉管中心线的最小水平距离 m
燃油	2.0	0.94
	3.0	1.19
	4.0	1.36
	5.0	1.52
	6.0	1.67
	8.0	1.92
	10.0	2.15
	12.0	2.35

表 2 强制通风低氮燃烧脱硝装备的最小间距（续）

装备类型	单台装备最大功率 MW	装备中心线至靠墙炉管中心线的最小水平距离 m
燃气	2.0	0.94
	3.0	1.19
	4.0	1.36
	5.0	1.52
	6.0	1.67
	8.0	1.79
	10.0	1.93
	12.0	2.04
<p>对于水平安装的低氮燃烧脱硝装备:低氮燃烧脱硝装备中心线与顶部炉管中心或耐火材料间的距离可比表中“装备中心线至靠墙炉管中心线的最小水平距离”大 50%。</p> <p>对于油-气联合低氮燃烧脱硝装备:低氮燃烧脱硝装备间距可参考烧油燃烧脱硝装备;仅在炉子启动时烧油的燃烧脱硝装备可除外。</p> <p>当表中所列功率处在所列数据的中间时,其对应的低氮燃烧脱硝装备最小间距可通过内插法计算得出</p>		

6.4.4 确定燃烧脱硝装备数量和功率时应确保火焰长度不超过辐射段高度的 2/3,且注意燃料的组成变化对火焰长度的影响。

6.4.5 低氮燃烧脱硝装备应配有气体长明灯,任何操作条件下(包括低氮燃烧脱硝装备停烧),均应连续地向长明灯提供空气。长明灯的火焰应清楚易见。

6.4.6 助燃空气调风器应满足低氮燃烧脱硝装备最大设计功率所需空气流量,且最大功率时可完全打开。

6.4.7 燃料气组成相对稳定的扩散式低氮燃烧脱硝装备的调节比宜不小于 5:1,单一燃料气的预混式低氮燃烧脱硝装备调节比宜为 3:1。

6.4.8 低氮燃烧脱硝装备合格技术等级应不低于 GB/T 41664—2022 中的 4 级。

## 7 SNCR 脱硝装备

### 7.1 通则

7.1.1 SNCR 脱硝装备可独立使用,也可与其他脱硝装备联合使用。SNCR 脱硝工艺见附录 B。

7.1.2 还原剂主要有尿素、液氨、氨水。氨水雾化粒径范围宜为 30  $\mu\text{m}$ ~120  $\mu\text{m}$ 。

7.1.3 尿素溶液应与稀释水混合稀释,稀释后的尿素溶液质量分数应不大于 10%。

7.1.4 SNCR 系统还原剂消耗量宜根据氮氧化物浓度、脱硝装备性能要求、氨氮比等因素综合确定。

7.1.5 还原剂宜采用雾化喷射的方式送入高温烟气区域,应避开火焰处,宜采用双流体雾化喷枪,喷枪的位置应根据还原剂的类型、温度窗口、燃烧状况等因素确定,还原剂在温度窗口的停留时间应大于 0.5 s。

7.1.6 喷枪选型需根据还原剂用量选择,包括喷枪流量、喷雾粒径、喷雾角度等参数,喷枪的喷嘴宜采用实心圆锥形,喷枪参数宜符合表 3 的规定。

表 3 喷枪参数

流量 $Q$ L/min	喷雾粒径 $\mu\text{m}$	喷雾角度 ( $^{\circ}$ )	喷射距离 m	液体压力 MPa	空气压力 MPa
$Q \leq 1$	30~50	20~90	0.5~3.0	0.10~0.50	0.14~0.65
$1 < Q \leq 2$	30~60	20~90	0.5~3.0	0.10~0.55	0.14~0.65
$2 < Q \leq 6$	40~70	20~90	0.5~3.0	0.10~0.55	0.14~0.65
$6 < Q \leq 30$	70~120	30~90	0.9~6.0	0.10~0.80	0.10~0.70

注：表中所述压力均为表压。

7.1.7 喷枪布置数量及位置宜考虑烟气温场、流场等因素的影响，保障出口氮氧化物和氨逃逸浓度达标，喷嘴位置可通过计算流体力学(CFD)仿真计算或温度传感器测试温度场分布来综合确定。

## 7.2 还原剂制备

7.2.1 当采用液氨作为氨气来源时，液氨的品质应不低于 GB/T 536—2017 中合格品的规定。

7.2.2 当采用尿素作为氨气来源时，尿素的品质应不低于 GB/T 2440—2017 中合格品的规定。

7.2.3 当采用氨水作为氨气来源时，氨水质量分数宜为 20%~30%，氨水质量应符合 HG/T 5353 的规定。

7.2.4 系统应设置有紧急停止供氨的设施，当氨气稀释后体积分数大于 8%时，应停止供氨。

## 7.3 脱硝系统主要设备

7.3.1 以液氨制备的氨水为还原剂时，脱硝系统的主要设备有卸氨压缩机、液氨储罐、液氨输送泵、吸氨器、氨水储罐、氨水输送泵、稀释水罐、稀释水泵、顶喷淋系统、氨气泄漏检测报警系统、计量与分配系统和喷枪。

7.3.2 以液氨制备的氨气为还原剂时，脱硝系统的主要设备有卸氨压缩机、液氨储罐、液氨输送泵、液氨蒸发器、氨气缓冲罐、氨气稀释罐、稀释风机、罐顶喷淋系统、氨气泄漏检测报警系统、氨气空气混合器、计量与分配系统、喷射系统和废水收集系统。

7.3.3 以尿素为还原剂时，脱硝系统的主要设备有尿素卸料机、尿素溶解罐、尿素溶液输送泵、尿素溶液储罐、尿素溶液输送循环泵、稀释水罐、稀释水泵、计量与分配系统、喷枪和伴热系统。

7.3.4 以氨水为还原剂时，脱硝系统的主要设备有氨水卸载泵、氨水储罐、氨水输送泵、稀释水罐、稀释水泵、罐顶喷淋系统、氨气泄漏检测报警系统、计量与分配系统和喷枪。

## 8 SCR 脱硝装备

### 8.1 通则

8.1.1 SCR 脱硝装备可单独使用，也可与其他脱硝装备联合使用。SCR 脱硝工艺概况见附录 C。

8.1.2 SCR 脱硝装备由输送设施、喷氨混合装置和 SCR 脱硝反应器等部分组成。

8.1.3 应根据烟气温区选择催化剂，根据温度区间，将催化剂划分为高温 SCR 脱硝催化剂、中温 SCR 脱硝催化剂和低温 SCR 脱硝催化剂，SCR 脱硝工艺催化剂分类及运行温度区间宜符合表 4 的规定。

表 4 SCR 脱硝工艺催化剂分类及运行温度区间

单位为摄氏度

催化剂分类	运行温度 $T$
低温催化剂 ( $T < 250$ )	$130 \leq T < 250$
中温催化剂 ( $250 \leq T < 450$ )	$250 \leq T < 450$
高温催化剂 ( $T \geq 450$ )	$450 \leq T < 600$

8.1.4 通过烟气停留时间、空塔气速、氨氮比和窗口温度的配合以提高氮氧化物脱除效率。在 SCR 脱硝系统中,氨氮比宜不大于 1.0。

8.1.5 喷氨混合装置应布置在催化剂之前,喷氨混合装置的设计应符合 JB/T 12534 的规定。

8.1.6 喷氨混合装置与催化剂之间的距离应保证烟气与氨的均匀混合,催化剂与喷氨系统之间的流场分析宜根据 DL/T 1418、JB/T 12131 规定的方法进行计算机仿真模拟或物理模型试验。

反应器内第一层催化剂入口符合下列规定。

- a) 烟道截面流速相对标准偏差(RSD,也称变异系数 CV)应不大于 15%,相对标准偏差 RSD、标准偏差  $S$  应按公式(2)和公式(3)计算。

$$RSD = \frac{S}{X_0} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - X_0)^2 / (N - 1)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

- RSD —— 相对标准偏差;
- $S$  —— 标准偏差;
- $X_0$  —— 所有测点的算术平均值;
- $X_i$  —— 单点测量值;
- $N$  —— 测量点数量。

- b) 烟气速度方向偏角宜不大于  $15^\circ$ 。
- c) 氨氮比相对标准偏差应不大于 5%。

8.2 还原剂制备

8.2.1 系统应设有供氨紧急停止设施,当出现下列情况之一时,应停止供氨:

- SCR 脱硝反应器的入口烟气温度高于催化剂耐受温度时;
- 氨气稀释后体积分数大于 8%时。

8.2.2 还原剂制备其他要求应符合 7.2 的规定。

8.3 喷氨混合装置

8.3.1 SCR 脱硝气态氨喷氨混合装置的喷射流量应根据烟气中氮氧化物脱除量确定。在确定喷嘴孔径时,氨的喷射速率宜取所处烟道中烟气流速的 1 倍~3 倍。

8.3.2 喷氨格栅中的氨母管道介质流速宜不大于 10 m/s,喷嘴介质流速宜为对应母管道流速的 3 倍~4 倍。

## 8.4 SCR 脱硝反应器

8.4.1 催化剂种类以及催化剂用量应根据具体工艺确定。SCR 催化剂模块可选择蜂窝式、板式、波纹式或其他形式。催化剂模块应布置紧凑,并留有膨胀间隙。催化剂模块间应设计有效防止烟气短路的密封装置。

8.4.2 工艺设计应根据烟气条件、压力降要求、脱硝要求和系统可靠性等确定。

8.4.3 系统压力降应符合设计文件的规定,系统压力降计算方法见附录 D。

8.4.4 结构设计宜考虑催化剂的堵塞、磨损等情况,宜设置在线吹灰装置,应能适应化学工业炉各种工况以及负荷变化和启停的要求。

8.4.5 宜设置催化剂更换设施和检修门。

8.4.6 烟气进、出口宜设置烟气采样口。

## 9 制造

9.1 低氮燃烧脱硝装备的制造应符合 SH/T 3602 的规定。

9.2 SNCR 脱硝装备和 SCR 脱硝装备中压力容器的制造应符合 GB/T 150.4 的规定,常压容器制造应符合 NB/T 47003.1 的规定。

9.3 压力管道制作应符合 GB/T 20801.4 的规定。

9.4 钢结构应符合 SH/T 3070 的规定。

9.5 氨水或尿素溶液管道的保温要求应符合 SH/T 3010 及设计文件的规定。

## 10 系统验收与试验方法

### 10.1 系统验收

化学工业炉脱硝装备系统验收连续试运行时间应不少于 72 h,性能要求应符合第 5 章的规定。

### 10.2 试验方法

#### 10.2.1 氮氧化物排放浓度

氮氧化物排放浓度试验应按 GB/T 16157 规定的方法进行。

#### 10.2.2 一氧化碳排放浓度

一氧化碳排放浓度试验应按 GB/T 16157 规定的方法进行。

#### 10.2.3 噪声

噪声试验应按 GB/T 3768 规定的方法进行。

#### 10.2.4 氨逃逸浓度

氨逃逸浓度试验应按 GB/T 16157 规定的方法进行。

#### 10.2.5 低氮燃烧脱硝装备的评价

低氮燃烧脱硝装备的评价应按 GB/T 41664—2022、SH/T 3602 规定的方法进行。

#### 10.2.6 氨水质量分数

氨水质量分数试验应按 HG/T 5353 规定的方法进行。

#### 10.2.7 系统压力降

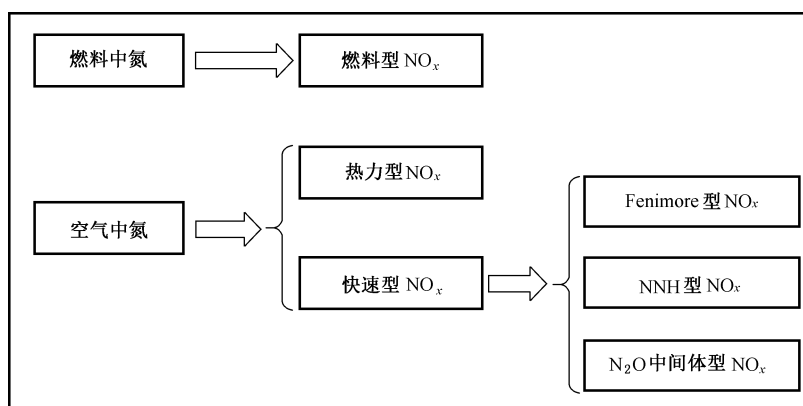
系统压力降的试验应按 GB/T 16157 规定的方法进行,测量脱硝装备运行时进、出口的静压和动压,并计算全压(静压与动压之和)。进、出口的全压差值即系统压力降。

## 附录 A

(资料性)

低氮燃烧 NO<sub>x</sub> 形成的化学过程及燃烧装备结构原理A.1 NO<sub>x</sub> 形成的化学过程A.1.1 NO<sub>x</sub> 生成分类

NO<sub>x</sub> 生成分类见图 A.1, 燃烧过程中生成的 NO<sub>x</sub> 可由燃料中的氮元素转化生成, 也可由空气中的氮元素转化生成。由燃料中氮元素转化生成的 NO<sub>x</sub> 被称为燃料型 NO<sub>x</sub>。空气中的氮元素可生成热力学 NO<sub>x</sub>, 也可生成快速型 NO<sub>x</sub>。按照路径的不同, 快速型 NO<sub>x</sub> 又可被分为 Fenimore 型 NO<sub>x</sub>、NNH 型 NO<sub>x</sub> 和 N<sub>2</sub>O 中间体型 NO<sub>x</sub>。

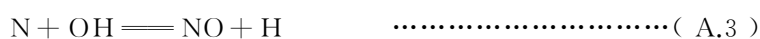
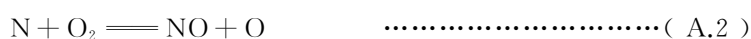
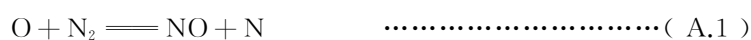
图 A.1 NO<sub>x</sub> 生成分类图A.1.2 燃料型 NO<sub>x</sub>

燃料型 NO<sub>x</sub> 指燃料中的氮在燃烧过程中经过一系列的氧化-还原反应而生成的 NO<sub>x</sub>。

燃料中的含氮化合物, 由于其 C—N 键能相比 N<sub>2</sub> 的氮氮三键更低, 因此受热后燃料中氮元素倾向于被释放, 在释放过程中遇到其他自由基, 将发生反应转化为含氮小分子化合物, 并进一步被氧化为 NO<sub>x</sub>, 通过该种路径生成的 NO<sub>x</sub> 被称为燃料型 NO<sub>x</sub>。

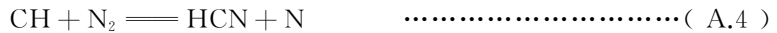
A.1.3 热力型 NO<sub>x</sub>

空气中的 N<sub>2</sub> 会在高温下与 O 自由基发生反应氧化形成热力型 NO<sub>x</sub>, 热力型 NO<sub>x</sub> 的浓度随温度和氧浓度的增大而增大, 由于 N<sub>2</sub> 的化学惰性, 其与 O 自由基反应速率较慢, 主要是在火焰带的下游的高温区生成, 反应时间约为几十微秒。目前常用扩展的 Zeldovich 机理来描述热力型 NO<sub>x</sub> 的生成机制 [见化学反应式(A.1)~化学反应式(A.3)], 因此热力型 NO<sub>x</sub> 也被称为 Zeldovich 型 NO<sub>x</sub>。化学反应式(A.1)的活化能相当大, 即这一反应与温度有很大的关系。作为一个经验的估计, 热力型 NO<sub>x</sub> 生成速率近似与温度呈指数型关系, 当燃烧温度低于 1 800 K 时, 热力型 NO<sub>x</sub> 路径通常是不重要的。



### A.1.4 快速型 NO<sub>x</sub>

快速型 NO<sub>x</sub> 是碳氢类燃料在火焰面内快速生成的 NO<sub>x</sub>。按照反应生成路径,可将快速型 NO<sub>x</sub> 进一步划分为 Fenimore 型 NO<sub>x</sub>、NNH 型 NO<sub>x</sub> 和 N<sub>2</sub>O 中间体型 NO<sub>x</sub>。Fenimore 型 NO<sub>x</sub> 是大气中氮气与碳氢燃料 CH<sub>x</sub> 自由基在弱还原性燃烧环境中进行反应形成 HCN、NCN 等前驱物,并被进一步氧化形成的 NO<sub>x</sub>。Fenimore 反应路径是以生成 HCN、NCN 自由基作为重要的起始基元反应,其生成条件就是碳氢燃料分解产生比较多 CH<sub>x</sub> 自由基,与 N<sub>2</sub> 反应生成中间产物 HCN 和 CN,进一步通过一系列反应生成 N,N 被氧化生成 NO<sub>x</sub>。反应机理见化学反应式(A.4)~化学反应式(A.9)。



NNH 型 NO<sub>x</sub> 是 N<sub>2</sub> 与 H 等自由基反应形成 NH 及 NNH 等前驱物从而生成 NO<sub>x</sub>,反应见化学反应式(A.10)。



N<sub>2</sub>O 中间体型 NO<sub>x</sub> 在贫燃料、低温条件下,N<sub>2</sub> 与火焰区中 O 及 OH 自由基反应生成 N<sub>2</sub>O 分子,并进一步反应生成 NO<sub>x</sub>。反应机理见化学反应式(A.11)~化学反应式(A.13)。



## A.2 技术路线实现方法

通过燃料脱氮处理、富氧燃烧等方式降低燃烧反应物中的氮含量或改变燃烧组织(空气分级、燃料分级、烟气再循环、预混燃烧等)以降低氮氧化物生成。

影响燃烧过程中 NO<sub>x</sub> 生成的主要因素是燃料含氮量、燃烧温度、停留时间、燃烧区氧浓度以及混合程度等。

低氮燃烧技术宜通过下列方法实现减少 NO<sub>x</sub> 的排放:

- 降低燃烧温度;
- 降低燃烧区氧浓度;
- 减少燃料在高温区停留时间等。

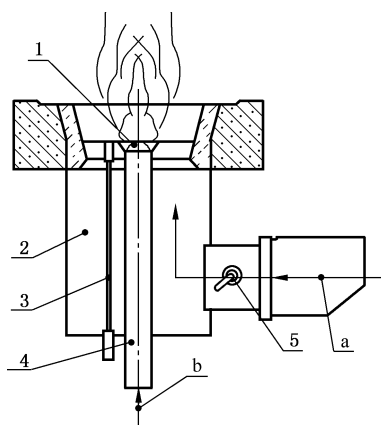
## A.3 低氮燃烧脱硝装备结构原理

### A.3.1 扩散式低氮燃烧脱硝装备

#### A.3.1.1 常见的扩散式低氮燃烧脱硝装备结构形式及原理

扩散式低氮燃烧脱硝装备结构原理(见图 A.2):将燃气和空气通过不同管线分别通入燃烧区,空气由调节风门控制进入低氮燃烧脱硝装备燃烧区域,天然气通过长明灯管线通入,手动或者自动点火装置点燃长明灯,待长明灯火焰稳定后,然后打开主火燃料气阀门并点燃低氮燃烧脱硝装备主火嘴,调整燃料气和空气量的供应使得燃料在燃烧区内稳定燃烧。

扩散式低氮燃烧脱硝装备可通过空气分级、燃料分级、烟气再循环中的一种或多种组合的形式来实现脱硝。



标引序号和符号说明：

1——燃料喷头及稳焰器；

2——筒体；

3——长明灯；

不同品牌、类型的低氮燃烧脱硝装备特点不同。



4——气体燃料中心管及入口；

5——进风口及调节风门；

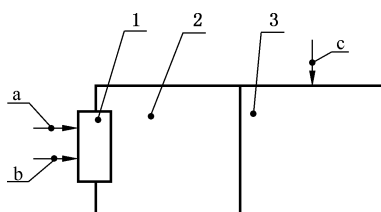
a——助燃空气；

b——气体燃料。

图 A.2 扩散式低氮燃烧脱硝装备结构原理图

### A.3.1.2 空气分级燃烧原理

空气分级燃烧技术(原理见图 A.3)是将燃烧所需的空气分级送入燃烧区,第一级为主燃烧区,在此区域内过量空气系数小于 1,属于富燃料燃烧;第二级为再燃区,在此区域中加入剩余空气,使得第一级燃烧区烟气中的可燃成分在此完成燃尽,确保燃烧效率不变。通过空气分级,第一级主燃烧区呈还原性气氛, $O_2$  不足, $NO_x$  生成量减少;第二级再燃区补充的空气可以保证燃气完全燃烧,并且燃烧温度相对较低,使得整体  $NO_x$  生成较少。



标引序号和符号说明：

1——燃烧装备；

2——炉膛主燃区(还原区)；

3——炉膛再燃区(氧化区)；

a——燃料；

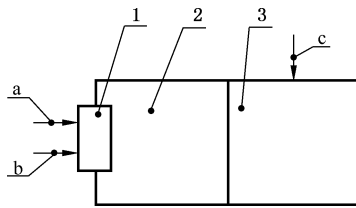
b——第一级空气；

c——第二级空气。

图 A.3 空气分级燃烧原理图

### A.3.1.3 燃料分级燃烧原理

燃料分级燃烧技术的原理为:将燃料分级送入燃烧区,控制燃烧为贫燃燃烧状态,其原理如图 A.4。由于燃料分级给入,第一级燃烧区为主燃区,先送入一定量的燃料,此时空气过量,燃烧温度较低, $NO_x$  生成有限;第二级再燃区中将剩余燃料作为再燃燃料继续送入炉膛,此时燃烧温度虽然升高,但高温区停留时间较短,且燃料本身的还原性也能够使一部分  $NO_x$  被还原,从而整体降低  $NO_x$  的生成。



标引序号和符号说明：

- |                |           |
|----------------|-----------|
| 1——燃烧装备；       | a——空气；    |
| 2——炉膛主燃区(氧化区)； | b——第一级燃料； |
| 3——炉膛再燃区(还原区)； | c——第二级燃料。 |

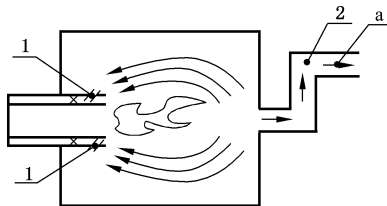
图 A.4 燃料分级燃烧原理图

#### A.3.1.4 烟气再循环原理

烟气再循环包括内部烟气再循环和外部烟气再循环两种形式。

内部烟气再循环原理见图 A.5, 结合燃烧装备与燃烧室结构, 通过烟气的压力和引射器的动力使燃烧后的烟气回流到主燃区, 烟气与燃料混合后降低了火焰温度和氧气浓度, 进而使  $\text{NO}_x$  下降。

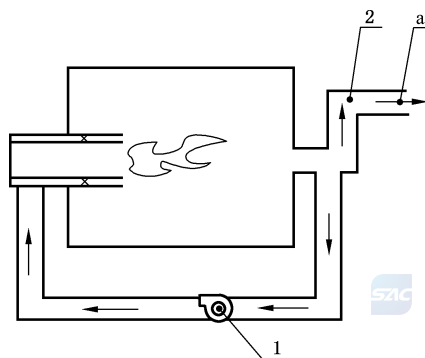
外部烟气再循环原理见图 A.6, 烟气可以从化学工业炉外部烟道引出并送回燃烧装备。该过程需要一个动力将烟气引到烟气再循环管道并返回到燃烧装备。同样, 烟气与燃料混合后降低了火焰温度和氧气浓度, 进而使  $\text{NO}_x$  下降。



标引序号和符号说明：

- |         |
|---------|
| 1——引射器； |
| 2——烟道；  |
| a——烟气。  |

图 A.5 内部烟气再循环原理图



标引序号和符号说明：

- |        |
|--------|
| 1——风机； |
| 2——烟道； |
| a——烟气。 |

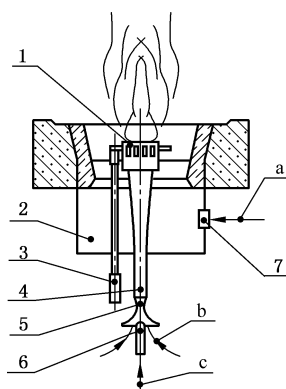
图 A.6 外部烟气再循环原理图

### A.3.2 预混式低氮燃烧脱硝装备

#### A.3.2.1 常见的预混式低氮燃烧脱硝装备结构及原理

预混式低氮燃烧脱硝装备特点是燃气和空气在进入燃烧区之前,已经按照特定的比例提前进行了混合,混合后的燃气再送入燃烧区燃烧,其结构原理见图 A.7。首先长明灯管线通入天然气与空气,通过手动或者自动点火装置点燃长明灯,待长明灯火焰稳定后,先打开进风口,再打开预混主火燃料气阀门,点燃预混火嘴,调整燃料气和空气量的供应,使得燃料在燃烧区内稳定燃烧。

预混式低氮燃烧脱硝装备可通过贫燃预混式燃烧与水冷预混式燃烧的形式来实现脱硝。



标引序号和符号说明:

- 1——预混燃料喷头;
- 2——筒体;
- 3——长明灯;
- 4——混合腔;
- 5——一次风入口;

- 6——气体燃料入口;
- 7——二次风入口;
- a——助燃空气(二次风);
- b——助燃空气(一次风);
- c——气体燃料。

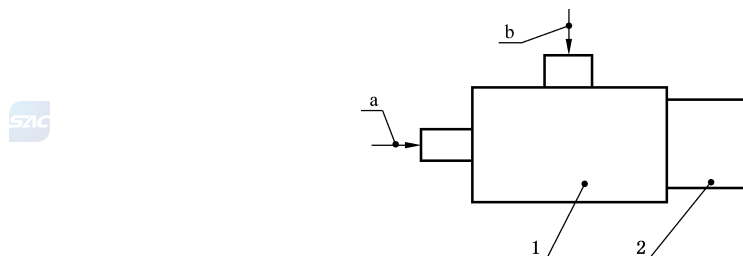
不同品牌、类型的低氮燃烧脱硝装备特点不同。

图 A.7 预混式低氮燃烧脱硝装备结构原理图

#### A.3.2.2 贫燃预混式燃烧原理

贫燃预混式燃烧技术是将燃料和过量空气按当量比小于 1 的比例进行掺混,待混合均匀再通入燃烧区进行燃烧的方式。

贫燃预混式燃烧技术原理见图 A.8。通过掺混过量空气,控制燃烧当量比,降低火焰温度,使燃烧处于  $\text{NO}_x$  生成较低的状态,从而减少热力型  $\text{NO}_x$  生成。



标引序号和符号说明:

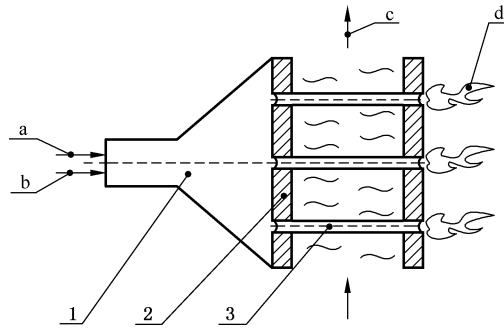
- 1——预混腔;
- 2——燃烧室;

- a——过量空气;
- b——燃料。

图 A.8 贫燃预混式燃烧技术原理图

### A.3.2.3 水冷预混式燃烧原理

水冷预混式燃烧技术主要在预混燃烧的基础上,增加水冷装置,进一步降低火焰温度,从而减少  $\text{NO}_x$  生成,其技术原理见图 A.9。该类燃烧装备通常由预混腔、水冷壁面、水冷管构成,燃气和空气进入预混腔充分混合后,通过布置在水冷壁面中的水冷管进入炉膛燃烧,布置于火焰根部的高效传热水冷管将火焰燃烧释放的部分热量吸收带走,降低了火焰温度,减少  $\text{NO}_x$  生成。



标引序号和符号说明:

- |          |          |
|----------|----------|
| 1——预混腔;  | b——燃气;   |
| 2——水冷壁面; | c——冷媒水;  |
| 3——水冷管;  | d——燃烧火焰。 |
| a——空气;   |          |

图 A.9 水冷预混式燃烧技术原理图

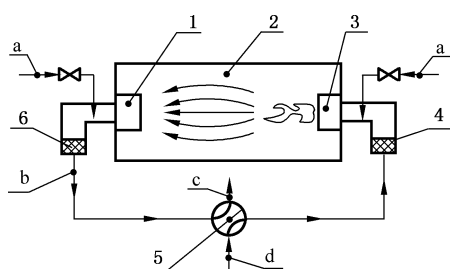
### A.3.3 低氮燃烧技术

#### A.3.3.1 无焰燃烧技术

无焰燃烧技术是在低氧稀释条件下进行的温和燃烧方式,燃烧温度一般在  $1\ 027\ ^\circ\text{C} \sim 1\ 327\ ^\circ\text{C}$  范围内,其燃烧过程缓慢,无明显的局部高温且燃烧温度低。无焰燃烧技术的应用主要有换热式和蓄热式。换热式无焰燃烧系统的典型代表是无焰燃烧辐射管,蓄热式无焰燃烧系统一般由蓄热器、换向阀组成。

其中蓄热式无焰燃烧系统较为成熟,其原理是冷空气流经蓄热器被预热后进入炉内与燃料混合燃烧,而另一个蓄热器处于蓄热状态,当一个周期过后,换向阀切换管路,另一个处于蓄热状态的蓄热器开始工作,上一个工作的蓄热器开始进入蓄热状态,实现交替循环运行。

蓄热式无焰燃烧技术原理见图 A.10。图中冷空气通过换向阀被导入到蓄热器 B 中,空气被蓄热器 B 加热到接近燃烧所需的温度后通过 B 燃烧装备进入燃烧室,与燃料混合燃烧,由于空气提前预热,炉内燃烧可以稳定维持在较低当量比状态下,使得燃烧室内保持相对较低的燃烧温度和缓慢的反应速率,从而减少  $\text{NO}_x$  的生成。燃烧后的烟气通过 A 燃烧装备进入蓄热器 A,此时蓄热器 A 处于蓄热状态,换热后的被净化的烟气由换向阀出口排出。蓄热器 A 吸收热量后,可以用来预热下一批进入燃烧室的空气,从而实现能量的回收和循环使用。当一个周期过后,换向阀切换管路改变气流方向,蓄热器 A 开始预热冷空气,蓄热器 B 进入蓄热状态,如此往复。



标引序号和符号说明：

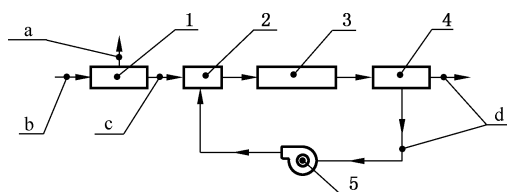
- |            |           |
|------------|-----------|
| 1——A 燃烧装备； | 6——蓄热器 A； |
| 2——炉膛；     | a——燃料；    |
| 3——B 燃烧装备； | b——烟气；    |
| 4——蓄热器 B；  | c——排烟；    |
| 5——换向阀；    | d——冷空气。   |

图 A.10 蓄热式无焰燃烧技术原理图

### A.3.3.2 富氧燃烧技术

富氧燃烧技术是以氧体积分数大于 21% 的富氧空气或纯氧代替空气作为助燃气体的一种高效强化燃烧技术。

富氧燃烧技术原理见图 A.11。首先将空气送入空气分离器 1，分离后氮气排空，氧气继续送入燃烧装备 2，燃料与氧气在化学工业炉 3 内燃烧。燃烧后的烟气一部分经烟道 4 排空，一部分经动力风机 5 送入循环烟道，进入燃烧装备 2，降低燃烧温度，此时燃烧主要生成物为  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ ，解决了  $\text{NO}_x$  排放过高问题。



标引序号和符号说明：

- |           |        |
|-----------|--------|
| 1——空气分离器； | a——氮气； |
| 2——燃烧装备；  | b——空气； |
| 3——化学工业炉； | c——氧气； |
| 4——烟道；    | d——烟气。 |
| 5——风机；    |        |

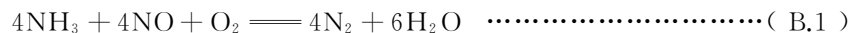
图 A.11 富氧燃烧技术原理图

**附 录 B**  
(资料性)  
**SNCR 脱硝工艺**

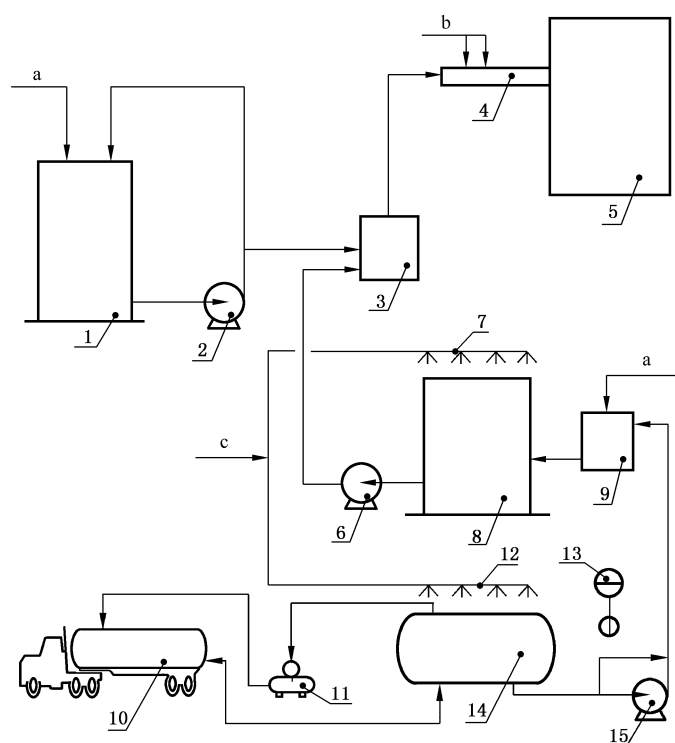
**B.1 SNCR 脱硝装备概况**

SNCR 法是在 SCR 的基础上不使用催化剂,但是反应需要在高温的条件下才能起到脱硝的作用。SNCR 法脱硝最理想的温度范围为 850 ℃~1 100 ℃,并随炉子类型的变化而有所不同。当脱硝反应温度低于温度窗口时,由于停留时间的限制,往往使化学反应进行不够充分,造成 NO 的还原率较低,导致氨逃逸,会与烟气中的硫氧化物(SO<sub>x</sub>) 发生反应形成具有腐蚀性和黏性的硫酸氢铵(NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub>),可能造成后续空气预热器的堵塞和腐蚀;而当脱硝反应温度高于温度窗口时,NH<sub>3</sub> 的氧化反应将起主导作用,NH<sub>3</sub> 被氧化生成 NO,而不是将 NO 还原为 N<sub>2</sub>,即同等还原剂喷量下将导致 SNCR 脱硝效率的降低。SNCR 还原剂包括氨水、尿素溶液及其他含氨基化合物等,还原剂的温度窗口指 SNCR 在这一温度范围内,具有较高的还原剂与氮氧化物的反应效率和较低的还原剂通过烟气逃逸至大气的水平。氨水的温度窗口范围是 850 ℃~1 000 ℃,尿素溶液的温度窗口范围是 950 ℃~1 100 ℃,无机铵盐温度窗口范围是 800 ℃~950 ℃。

SNCR 脱硝工艺比较常用的还原剂是氨和尿素。采用氨为还原剂时,SNCR 脱硝工艺的主要化学反应见化学反应式(B.1)~化学反应式(B.3);采用尿素作为还原剂时,SNCR 脱硝工艺的主要化学反应见化学反应式(B.4)~化学反应式(B.6)。

**B.2 SNCR 典型工艺流程****B.2.1 采用液氨制备氨水作为还原剂时的脱硝系统典型工艺流程**

采用液氨制备氨水作为还原剂时的脱硝系统典型工艺流程图见图 B.1。液氨经过卸氨压缩机输送至液氨储罐,经液氨输送泵输送或自流至吸氨器,与定量除盐水混合配置为设定质量分数的氨水并储存在氨水储罐。氨水通过氨水输送泵送至喷射层的计量与分配系统,与来自稀释水罐和稀释水泵的除盐水混合稀释成 10%(质量分数)的氨水溶液,分配到每支喷枪,经雾化后喷入烟道或炉膛,进行脱硝反应。



标引序号和符号说明：

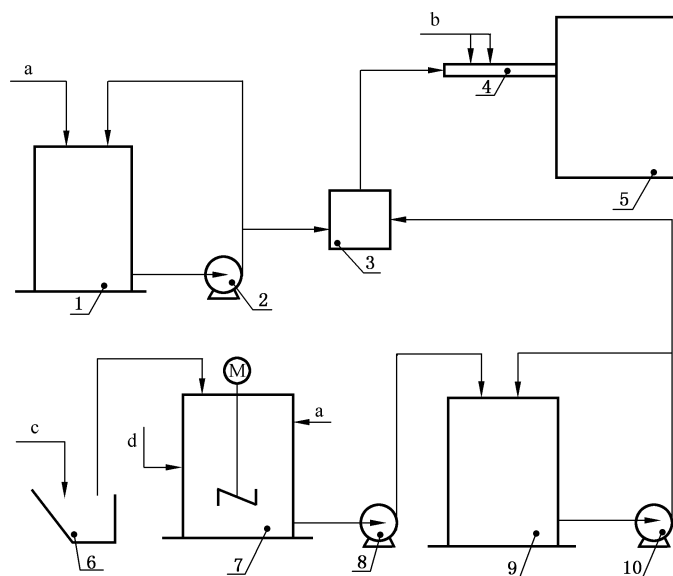
- |             |                 |
|-------------|-----------------|
| 1——稀释水罐；    | 10——液氨罐车；       |
| 2——稀释水泵；    | 11——卸氨压缩机；      |
| 3——计量与分配系统； | 12——灌顶喷淋装置；     |
| 4——喷枪；      | 13——氨气泄漏检测报警系统； |
| 5——烟道或炉膛；   | 14——液氨储罐；       |
| 6——氨水输送泵；   | 15——液氨输送泵；      |
| 7——灌顶喷淋系统；  | a —— 除盐水；       |
| 8——氨水储罐；    | b —— 压缩空气；      |
| 9——高位吸氨器系统； | c —— 工业水或消防水。   |

图 B.1 采用液氨制备氨水作为还原剂时的脱硝系统典型工艺流程图

### B.2.2 采用液氨制备氨气作为还原剂时脱硝系统典型工艺流程

采用液氨制备氨气作为还原剂时脱硝系统典型工艺流程图见图 B.2。液氨经卸氨压缩机输送至液氨储罐内，通过液氨输送泵输送或自流至液氨蒸发器并蒸发为氨气后，通过氨气调节阀调节压力后进入氨气缓冲罐。氨气缓冲罐的氨气通过流量调节阀调节并输送至氨气空气混合器，与来自稀释风机的空气在氨气空气混合器内充分混合后，通过喷射系统喷入烟道或炉内，进行脱硝反应。





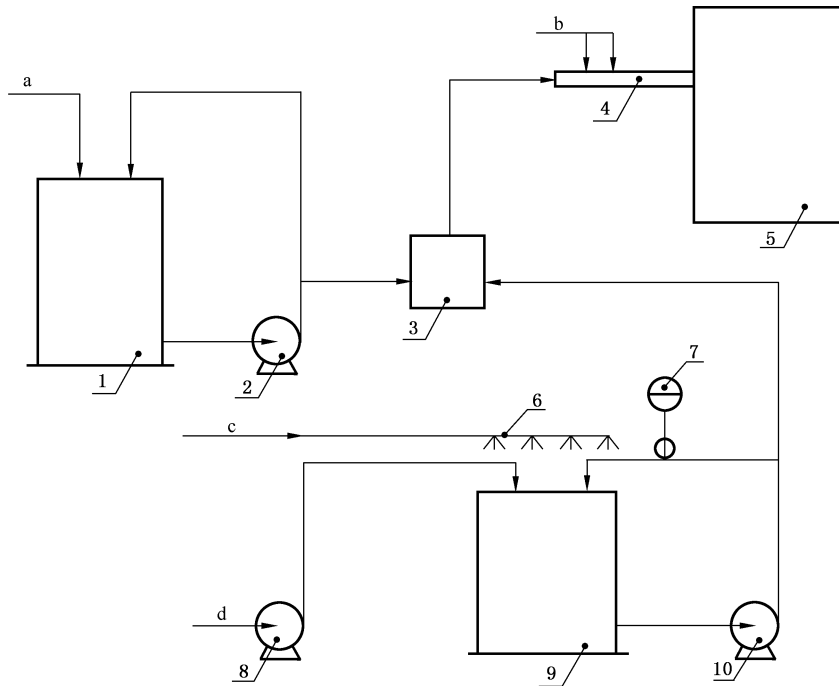
标引序号和符号说明：

- |             |                |
|-------------|----------------|
| 1——稀释水罐；    | 8——尿素溶液输送泵；    |
| 2——稀释水泵；    | 9——尿素溶液储罐；     |
| 3——计量与分配系统； | 10——尿素溶液输送循环泵； |
| 4——喷枪；      | a——除盐水；        |
| 5——烟道或炉膛；   | b——压缩空气；       |
| 6——尿素斗提机；   | c——尿素；         |
| 7——尿素溶解罐；   | d——伴热系统。       |

图 B.3 采用尿素作为还原剂时的脱硝系统典型工艺流程图

#### B.2.4 采用氨水作为还原剂时脱硝系统典型工艺流程

采用氨水作为还原剂时脱硝系统典型工艺流程图见图 B.4。将一定质量分数的氨水经氨水卸载泵送入氨水储罐，通过氨水输送泵送至计量与分配系统，与来自稀释水罐和稀释水泵的除盐水混合稀释为 5%~10% (质量分数) 的氨水溶液，分配到每支喷枪，经雾化后喷入烟道或炉膛，进行脱硝反应。



标引序号和符号说明：

- |                |               |
|----------------|---------------|
| 1——稀释水罐；       | 8 —— 氨水卸载泵；   |
| 2——稀释水泵；       | 9 —— 氨水储罐；    |
| 3——量与分配系统；     | 10——氨水输送泵；    |
| 4——喷枪；         | a —— 除盐水；     |
| 5——烟道或炉膛；      | b —— 压缩空气；    |
| 6——灌顶喷淋系统；     | c —— 工业水或消防水； |
| 7——氨气泄漏检测报警系统； | d —— 氨水。      |

图 B.4 采用氨水为还原剂时脱硝系统典型工艺流程图

附 录 C  
(资料性)  
SCR 脱硝工艺

### C.1 SCR 脱硝概况

SCR 脱硝工艺是化学工业炉较理想的烟气脱硝工艺,一般安装在对流段工业炉适合的温度段内,可以做到  $\text{NO}_x$  的去除率达到 80%~95%,同时氨逃逸水平较低。SCR 脱硝系统在工业界的应用可以追溯到 20 世纪 70 年代,该工艺需使用催化剂,通过喷氨系统(包括氨水喷枪和格栅系统)把氨水汽化喷入烟气中,并保证在到达催化剂前充分均匀混合,在适当的窗口温度下经过催化剂后  $\text{NO}_x$  被转化为  $\text{N}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ 。

主要的化学反应步骤见化学反应式(C.1)~化学反应式(C.5)。

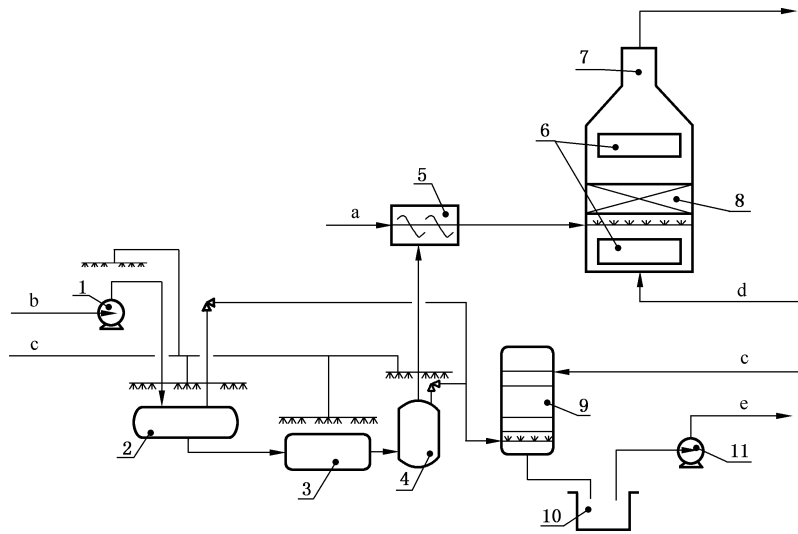


注:化学工业生产排放烟气中主要的氮氧化物是  $\text{NO}$ (占比超 90%),因此,脱硝基本以化学反应式(C.1)的反应为主。

### C.2 SCR 工艺流程



化学工业炉 SCR 脱硝工艺系统主要包括氨储存制备系统和 SCR 反应控制系统,以裂解炉为例,SCR 脱硝工艺流程图见图 C.1。



标引序号和符号说明：

- |                |          |
|----------------|----------|
| 1——液氨泵；        | 9——稀释罐；  |
| 2——液氨储罐；       | 10——废水池； |
| 3——液氨蒸发器；      | 11——废水泵； |
| 4——氨气缓冲罐；      | a——压缩空气； |
| 5——氨气/压缩空气混合器； | b——液氨；   |
| 6——对流段换热盘管；    | c——工业水；  |
| 7——炉子对流段；      | d——烟气；   |
| 8——SCR 催化剂床层；  | e——废氨水。  |

使用氨气/压缩空气混合器将氨气和压缩空气混合,再通过氨气输送管线送到炉子对流段的 SCR 反应控制系统,与烟气均匀混合后,在 SCR 反应器内与烟气中的氮氧化物在催化剂床层发生化学反应,生成  $N_2$  和水,从而去除了烟气中的大部分  $NO_x$ 。

图 C.1 SCR 脱硝工艺流程图

## 附录 D

(资料性)

## SCR 脱硝反应器系统压力降计算方法

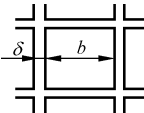
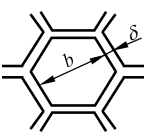
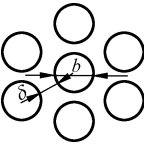
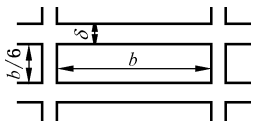
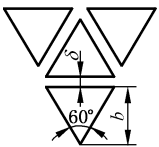
## D.1 规整催化剂模块

## D.1.1 蜂窝状催化剂模块

## D.1.1.1 表面几何特性

常见的蜂窝状催化剂模块,根据孔的形状,可分为 5 类(见表 D.1),蜂窝催化剂的表面几何特性见表 D.1。

表 D.1 蜂窝催化剂的表面几何特性

孔的形状	多孔率 $\rho_{ow}$	当量水力半径 $R/m$
	$\frac{b^2}{(b+\delta)^2}$	$\frac{b}{4}$
	$\frac{b^2}{(b+\delta)^2}$	$\frac{b}{4}$
	$\frac{\pi b^2}{(b+\delta)^2\sqrt{3}}$	$\frac{b}{4}$
	$\frac{b^2/6}{(b/6+\delta)(b+\delta)}$	$\frac{b}{14}$
	$\frac{4b^2}{(2b+3\delta)^2}$	$\frac{b}{6}$
<p>注 1: <math>b</math>——孔径或孔边长;  <math>\delta</math>——孔间距。</p> <p>注 2: 本表来源于参考文献[5]。</p>		

D.1.1.2 蜂窝陶瓷催化剂模块床层阻力压降

当采用蜂窝陶瓷催化剂模块时,催化剂床层阻力压降计算见公式(D.1)、公式(D.2)和公式(D.3)。

$$\Delta p_s = \frac{G^2}{2g_c} \frac{1}{\rho_i} \left[ f \frac{h}{R} \rho_i \left( \frac{1}{\rho_m} \right) + 2 \left( \frac{\rho_i}{\rho_o} - 1 \right) \right] \dots\dots\dots (D.1)$$

$$f = \frac{\rho_m \tau_0}{G^2 / 2g_c} \dots\dots\dots (D.2)$$

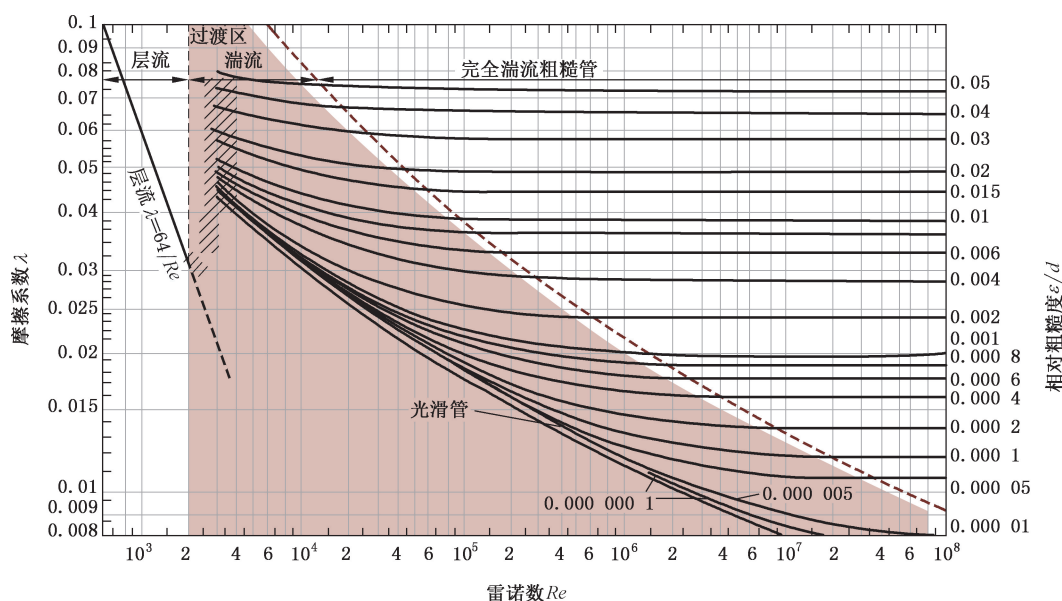
$$G = W_0 / A_c \dots\dots\dots (D.3)$$

式中:

- $\Delta p_s$  —— 催化剂床层阻力压降,单位为帕斯卡(Pa);
- $G$  —— 气体质量速率,单位为千克每平方米秒[ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ];
- $g_c$  —— 牛顿第二定律中的比例常数, $g_c = 1$ ;
- $\rho_i$  —— 流体入口密度,单位为千克每立方米( $\text{kg}/\text{m}^3$ );
- $f$  —— 对单管范宁摩擦系数 $\lambda$ (见图 D.1)修正后的管束模型范宁摩擦系数;
- $h$  —— 孔道长度,单位为米(m);
- $R$  —— 当量水力半径(见表 D.1),单位为米(m);
- $\rho_m$  —— 流体平均密度,单位为千克每立方米( $\text{kg}/\text{m}^3$ );
- $\rho_o$  —— 流体出口密度,单位为千克每立方米( $\text{kg}/\text{m}^3$ );
- $\tau_0$  —— 单位表面剪切应力,单位为帕(Pa);
- $W_0$  —— 质量流量,单位为千克每秒( $\text{kg}/\text{s}$ );
- $A_c$  —— 最小自由流动面积,单位为平方米( $\text{m}^2$ )。

注 1: 公式(D.1)来源于参考文献[6]中“4.6.2 RTO 装置系统的压降计算”。  
 注 2: 公式(D.2)来源于参考文献[10]。  
 注 3: 公式(D.3)来源于参考文献[11]。





标引符号说明：

ε —— 表面粗糙度值,单位为毫米(mm)；

d —— 当量直径,单位为毫米(mm)。

注：本图来源于参考文献[4]中图 1-32。

图 D.1 单管范宁摩擦系数 λ 与雷诺数 Re 及相对粗糙度 ε 的关系图

### D.1.2 波纹筛板

当采用波纹筛板式规整催化剂时,催化剂床层阻力压降计算见公式(D.4)和公式(D.5)。

$$\Delta p_s = \zeta_G \frac{\rho_2 u_G^2}{2} \dots\dots\dots (D.4)$$

$$\zeta_G = 18.324 \ 8\alpha^{1.8976} \left(1 + \frac{\delta^2}{4t^2}\right)^{6.3279} \dots\dots\dots (D.5)$$

式中：

$\Delta p_s$  —— 催化剂床层阻力压降,单位为帕斯卡(Pa)；

$\zeta_G$  —— 干板局部阻力系数；

$\rho_2$  —— 气体密度,单位为千克每立方米(kg/m<sup>3</sup>)；

$u_G$  —— 筛孔表观气速,单位为米每秒(m/s)；

$\alpha$  —— 开孔率；

$\delta$  —— 孔间距,单位为毫米(mm)；

$t$  —— 板间距,单位为毫米(mm)。

注：公式(D.4)、公式(D.5)来源于参考文献[7]中“2.1.2 压降关联式”。

### D.1.3 陶瓷滤管

当采用陶瓷滤管式规整催化剂时,催化剂床层阻力压降计算见公式(D.6)。

$$\frac{\Delta p_s}{l} = \frac{\mu u_{in}}{K} = \frac{\rho_2 \nu u_{in}}{K} \dots\dots\dots (D.6)$$

式中：

$\Delta p_s$  —— 催化剂床层阻力压降,单位为帕斯卡(Pa)；

- $l$  ——滤管长度,单位为微米( $\mu\text{m}$ );
- $\mu$  ——气体动力黏度,单位为帕秒( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ );
- $u_{\text{in}}$  ——表观过滤速度,单位为米每秒( $\text{m}/\text{s}$ );
- $K$  ——滤管的渗透率,单位为平方微米( $\mu\text{m}^2$ );
- $\rho_2$  ——气体密度,单位为千克每立方米( $\text{kg}/\text{m}^3$ );
- $\nu$  ——气体的运动黏度,单位为二次方米每秒( $\text{m}^2/\text{s}$ )。

注 1: 公式(D.6)来源于参考文献[8]中“2.2.2 计算值与理论公式对比”。

注 2: 渗透率是表示流体在孔隙介质的孔隙中流动难易程度的量,渗透率  $K$  具有面积的量纲,但是  $\text{m}^2$  显得过大,通常以  $\mu\text{m}^2$  作为单位。因渗透率具有面积的量纲,也能将其理解为介质中孔隙通道面积的大小。

## D.2 颗粒催化剂模块

当采用陶瓷颗粒催化剂时,催化剂床层阻力压降计算见公式(D.7)。

$$\frac{\Delta p_s}{L} = \frac{150\mu(1-\epsilon_b)^2 U_s}{\epsilon_b^3 d_p^2} + \frac{1.75(1-\epsilon_b)\rho_2 U_s^2}{\epsilon_b^3 d_p} \dots\dots\dots (D.7)$$

式中:

- $\Delta p_s$  ——催化剂床层阻力压降,单位为帕斯卡(Pa);
- $L$  ——催化剂层厚度,单位为米(m);
- $\mu$  ——气体动力黏度,单位为帕秒( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ );
- $\epsilon_b$  ——空隙率;
- $U_s$  ——物料流速,单位为米每秒( $\text{m}/\text{s}$ );
- $d_p$  ——颗粒直径,单位为米(m);
- $\rho_2$  ——气体密度,单位为千克每立方米( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

注: 公式(D.7)来源于参考文献[9]中“2.3 不同流速下堆积床内的压降与半经验公式对比”。



## 参 考 文 献

- [1] GB/T 21509 燃煤烟气脱硝技术装备
- [2] DL/T 1418 燃煤电厂 SCR 烟气脱硝流场模拟技术规范
- [3] JB/T 12131 燃煤烟气净化 SCR 脱硝流场模拟试验技术规范
- [4] 陈敏恒,丛德滋,齐鸣斋,等.化工原理(第五版)[M].北京:化学工业出版社,2023.
- [5] T.Kuppan.换热器设计手册[M].钱颂文、廖景娱、邓先等,译.北京:中国石化出版社,2004.
- [6] 陆震维.有机废气的净化技术[M].北京:化学工业出版社,2011.
- [7] 黄卫星,王松年,潘大伟,等.气液并流通过波纹筛板填料的流体力学性能[J].工程科学与技术,2023(3):186.
- [8] 孙梅玉,姬忠礼.陶瓷过滤管管壁内气体流动的 LBM 并行模拟[J].化工学报,2010(6):1423-1430.
- [9] 潘效军,赵雪杉.陶瓷颗粒堆积床内的流动特性数值模拟分析[J].工业催化,2021(2):42-47.
- [10] KAYS W M, LONDON A L. Compact Heat Exchangers [M]. Third Edition. Malabar: Krieger Publishing Company, 2018.
- [11] LONDON A L, YOUNG M B O, STANG I H. Glass-ceramic surfaces, straight triangular passages-Heat transfer and flow friction characteristics[J]. Journal of Engineering for Power, 1970, 92A:381-389.
-