

最新工业炉窑

设计、改造及节能环保 治理新工艺新技术

实用手册

ZUIXIN GONGYE YAOLU SHEJI GAIZAO JI JIENENG
HUANBAO ZHILI XINGONGYI XINJISHU SHIYONG SHOUC

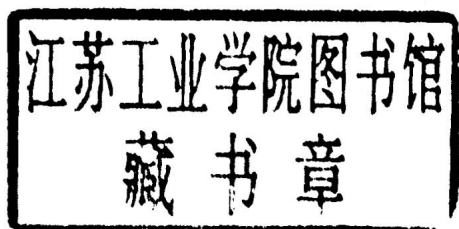


安徽文化音像出版社

最新工业炉窑设计改造及节能 环保治理新工艺新技术 实用手册

主编 周 伟

(三)



安徽文化音像出版社

第二章 工业炉窑烟气净化 新工艺新技术

第一节 有毒有害气体

工业炉烟气中的有害气体主要有二氧化硫(SO_2)、一氧化碳(CO)、氮氧化物(NO_x)、氟化氢(HF)和光化学烟雾。

一、二氧化硫

固体和液体燃料中均含有一定量的硫,东北地区煤的含硫量在1%以下,其它地区则较高,达2%~3%。原油精炼后,90%以上的硫分浓缩在重油中。我国重油标准规定,重油的最大含硫量不能大于3%。

含硫燃料燃烧时,大部分硫氧化成 SO_2 ,1%~5%硫氧化成 SO_3 排入大气。 SO_3 与水汽相遇便成 H_2SO_4 ,有很大腐蚀性。重油燃烧时,烟气中硫氧化物的浓度与重油中硫分的关系虽然因重油的元素组成不同会有若干差异,但大致如图6-2-1所示的关系。

大气中 SO_2 浓度达 $2.85\text{mg}/\text{Nm}^3$ 时,对植物和器具已有损伤,达 $1140\text{mg}/\text{Nm}^3$ 时,人类会窒息死亡。

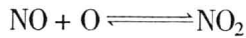
二、氮氧化物

大气中有7种氮的氧化物: N_2O 、 NO 、 NO_2 、 NO_3 、 N_2O_3 、 N_2O_4 、 N_2O_5 ,统称 NO_x 。但主要是 NO 和 NO_2 ,多来源于燃料的燃烧。

工业炉燃烧装置所产生的 NO_x ，有从空气中的 N_2 生成的高温 NO_x 和从燃料中的氮化物生成的燃料 NO_x 。

1. 高温 NO_x

在 1600°C 以上的高温火焰里，空气中的氮与氧反应生成。



燃烧生成气中 NO_x 浓度一般为 200ppm 左右。

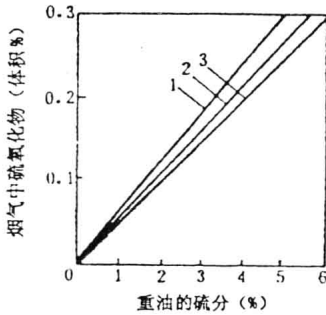


图 6-2-1 重油硫分与烟气中硫氧化物的关系

1- $\alpha=1.1$ 2- $\alpha=1.2$ 3- $\alpha=1.3$ α -空气系数

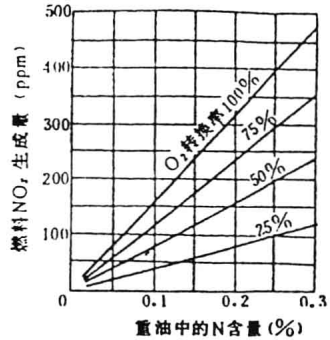


图 6-2-2 重油中氮含量与燃料 NO_x 生成量的关系

2. 燃料 NO_x

含在石油燃料或煤炭中的氮萘、氮苯和气体燃料中的 HCN 、 HN_3 等氮化物中所含 N 称为燃料氮，这类 N 比空气中的 N_2 更容易生成 NO ，把燃料 N 生成的 NO_x 称燃料 NO_x 。图 6-2-2 表示重油中 N 含量与燃料 NO_x 生成量的关系。

NO_x 对人体和植物有很大危害，达 $5\text{mg}/\text{Nm}^3$ 时一些农作物的叶会逐渐变白；达 $200\text{mg}/\text{Nm}^3$ 时人在 1h 内会死亡。

三、一氧化碳

CO 是一种剧毒气体,来源于燃料的不完全燃烧和输气管道的泄漏。烟气中含有一定量的 CO 将对大气造成污染,大气中 CO 浓度达 $37.5\text{mg}/\text{Nm}^3$ 时,人的感光机能变迟钝且影响体内氧的输送,达 $62\text{mg}/\text{Nm}^3$ 时,严重心脏病人会窒息死亡。对一些还原性气氛炉,如少无氧化加热炉,应特别注意炉膛的密封并对还原性气体应燃尽。

四、光化学烟雾

光化学烟雾主要来自石油和天然气在加工、运输和燃烧过程中进入大气的碳氢化合物,在阳光照射下与氮氧化物相互作用而形成的烟雾,其中包括乙醛、臭氧和一些有毒的有机化合物。烟雾中所含毒性有机化合物可使人患头痛、胸痛、全身麻痹等病,浓度达 $100\text{mg}/\text{Nm}^3$ 时能使人致死。防治途径是降低 NO_x 和碳氢化合物对大气的污染,尽量使碳氢化合物充分燃烧,使之生成 CO_2 和 H_2O 。

五、氟化氢

含氟矿石冶炼、陶瓷焙烧、磷肥生产和加热介质的挥发是氟化氢气体和含氟粉尘的主要来源,平炉和冲天炉烟气中会含有少量氟化氢。氟化氢易溶于水,不仅对人体骨质和牙齿危害很大,而且对机器设备的腐蚀也很严重。防治方法以水洗法最为有效,效率可达 97% 以上。如有气体氟存在,可用 NaOH 溶液处理。

第二节 烟气中氮氧化物的防治与控制

燃料燃烧过程中生成的氮氧化物中,NO 占 90% (体积分数),其余为 NO_2 。燃料燃烧生成的氮氧化物的来源有两部分:一是燃料中含有的氮的有机物,在一定温度下放出大量氮原子而生成大量的 NO,通常称为燃料型 NO,二是空气中的氮在高温下氧化为氮氧化物,称为温度型 NO_x 。燃料含氮量的多少对烟气中氮氧化

物浓度的高低影响较大,而温度是影响温度型氮氧化物生成量大小的主要因素。

从烟气中去除氮氧化物的过程与烟气脱硫相似,也是应用液态或固态吸收剂或吸附剂来吸收吸附 NO_x ,以达到脱氮目的。以化工过程可分为:催化还原法、吸收法和固体吸附法,见表 6-2-1。

表 6-2-1 排烟脱氮氧化物方法

分类	处理方法	原理	处理效果
催化还原法	非选择率催化还原法	利用还原剂 H_2 、 CH_4 (天然气),在催化剂的作用下,将 NO_x 还原成 N_2 。在反应中不仅与 NO_x 反应,还要与尾气里的 O_2 反应而没有选择性	NO_x 去除率达 90% 以上,但处理成本较高
	选择性催化还原法	此法消除 NO_x 是在催化剂(Pt、Cu、V、Mo、Co、Mn 等氧化物,以铝钒土为载体的催化剂)存在下,用氨、过氧化氢、一氧化碳等为还原剂,将 NO_x 选择性地还原成 N_2 ,而不与尾气里的 O_2 反应	此法工艺简单,处理效果好,转化率达 90% 以上,但仅能化有害为无害,尚未达到变废为宝、综合利用的目的
吸收法	碱液吸收法	氮氧化物是酸性气体。所以用一种碱性溶液来中和吸收。如 NaOH 、 KOH 、 NH_4OH 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等都可用作吸收剂	此法在消除烟气中 NO_x 的同时也可除去 SO_2 ,得到硝酸盐产品,达到综合利用变废为利的目的,但投资大,成本高
	硫酸吸收法	此法是以铅室法的化学过程为基础,基本上与铅室法制硫酸的反应相似,其总反应为: $\text{NO} + \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \longrightarrow \text{NOHSO}_4 + \text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	此法生成的亚硝酸基硫酸,可供浓缩稀硝酸用。在消除 NO 的同时,可除去烟气中的 SO_2

分类	处理方法	原理	处理效果
固体吸附法	分子筛吸附	分子筛具有筛分大小不同分子的能力,如用氢型丝光沸石,13X型等分子筛,在有氧存在时,不仅能吸附 NO_x 还能将NO氧化成 NO_2 。用它处理硝酸尾气,可回收 HNO_3 或 NO_2	用分子筛处理硝酸尾气。氮氧化物的消除率达95%以上,可达到消除污染又综合利用的目的,但设备庞大、流程长、投资高
	泥煤-碱法	泥煤对氮氧化物的吸附效率很高。泥煤加熟石灰制成的吸附剂,既经济又易于制取	泥煤-碱法对氮氧化物的脱除率可达97%~99%,排出口的 $\text{NO}_x < 0.01\% \sim 0.02\%$ (体积分数)

一、燃料燃烧时 NO_x 的生成机理

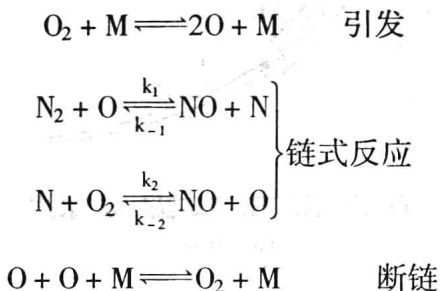
燃料燃烧过程中生成的氮氧化物会严重危害生态环境,已成为大气污染三害之一。氮的氧化物包括 NO 、 NO_2 、 N_2O 、 N_2O_3 、 N_2O_4 、 N_2O_5 等,燃烧装置中生成的氮氧化物主要为 NO 和 NO_2 ,一般统称为 NO_x 。城市大气中的 NO_x 大约有90%来自燃烧产物,其中火电站锅炉机组的排放量约占50%。

锅炉燃烧产物中氮的氧化物大部分为 NO ,约占 NO_x 总量的90%以上。在大气中 NO 会迅速地被氧化为 NO_2 ,经紫外线照射与排烟中的碳氢化合物接触,便生成一种浅蓝色的有毒烟雾——光化学烟雾。光化学烟雾对人的眼、鼻、心、肺、肝及造血组织等均有强烈的刺激和损害作用。此外,对植物也会造成严重的损害。氧化亚氮 N_2O 不是燃烧过程的主要产物,但由于 N_2O 是形成温室效应的气体并且会破坏臭氧层,因而近年来也成为人们严重关注的一个问题。其他氮氧化物的生成量很小可忽略不计。

燃烧过程中氮氧化物的生成源,可以是作为氧化剂的空气中的氮分子,或者是燃料中的氮组分。因此,在理论上 NO_x 有三种不同的生成机理:热力 NO_x 由燃烧空气中的气体氮氧化而成;燃料 NO_x 由燃料中的化学氮转换而成;快速 NO_x 由碳氢基同分子氮发生反应以及随后原子氮又与氢氧基相互作用而形成的,在一般的燃烧装置中其生成量很少。

1. 热力 NO_x 生成机理

1947年前苏联学者捷里道维奇(Зертв II OBI)等人在其著作中描述了分子氮氧化反应的热力本质,即按链式反应生成氮氧化物:



其中起决定作用的是原子氧。同时得到了氮氧化物生成与分解反应速度的动态方程

$$\frac{d\text{NO}}{dt} = \frac{5 \times 10^{11}}{\sqrt{\text{O}^2}} \exp\left(-\frac{360 \times 10^3}{RT}\right) \left[\frac{64}{3} \text{O}_2 \text{N}_2 \exp\left(-\frac{180 \times 10^3}{RT}\right) - (\text{NO})^2 \right] \quad (6-2-1)$$

式中 O₂, N₂, NO——烟气中过剩氧、氮、氧化氮的瞬时浓度, mol/L;

t——时间, s;

T——反应区的温度, K;

R——气体常数, J/(K·mol);

活化能的单位为 J/mol。

方括号内的第一项是氧化氮平衡浓度的平方,平衡浓度为

$$[\text{NO}]_p = 8 \sqrt{\frac{\text{O}_2 \cdot \text{N}_2}{3}} \exp\left(-\frac{180 \times 10^3}{2RT}\right) \quad (6-2-2)$$

达到氧化氮平衡浓度的时间可按式估算

$$t_p = \frac{2.06 \times 10^{-12}}{\sqrt{\text{N}_2}} \exp\left(\frac{53750}{T}\right) \quad (6-2-3)$$

按该式计算表明,在 1800~1900K 温度范围内,达到 NO 平衡浓度所需时间约为 2.3~4s。烟气在锅炉炉膛内的停留时间远小于它。图 6-2-3 示出停留时间

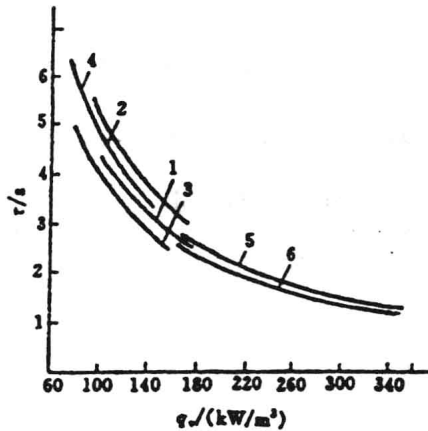


图 6-2-3 烟气在炉内的最大
停留时间与 q_v 的关系

- 1—烟煤, 液态排渣炉; 2—烟煤, 固态排渣炉;
3—褐煤, 液态排渣炉; 4—褐煤, 固态排渣炉;
5—燃油炉; 6—燃气炉

τ 与炉膛体积热负荷 q_v 的关系。由图 6-2-3 可见, 烟气在炉内的停留时间很短, 如果考虑到热力 NO 主要是在一个较窄的高温区内生成, 那么烟气在这个区域内的停留时间还要短, 这意味着: 在锅炉炉膛内热力 NO 的生成反应还没有达到化学平衡, NO 的生成量将随烟气在高温内停留时间的增长而增大。

从捷里道维奇的链式反应机理还可以看出, 除停留时间外, 热力 NO 生成量与燃烧反应温度和氧的浓度有关。温度的影响是最强烈的, 超过了氧浓度 O_2 和停留时间的影响, 一旦达到某个界限温度, NO 生成量将随温度呈指数关系上升。在煤粉燃烧装置常规氧量运行条件下, 这个边界温度大约为 1300°C 。图 6-2-4 示出煤粉炉中 NO_x 生成量与炉膛温度的关系。过量空气系数(氧浓度 O_2)对 NO_x 生成量的影响示于图 6-2-5。

综上所述, 为降低实际锅炉中热力 NO_x 的生成, 可以采取如下措施: 降低燃烧温度的峰值; 降低最高温度区域的局部氧浓度; 降低在最高温度区域的停留时间。

2. 燃料 NO_x 生成机理

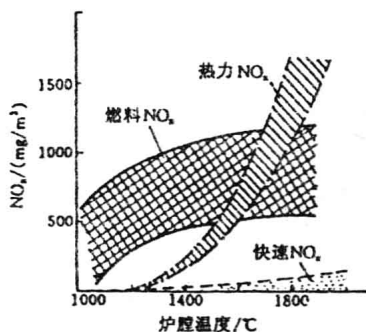


图 6-2-4 热力、燃料、快速 NO_x

生成量与炉膛温度的关系

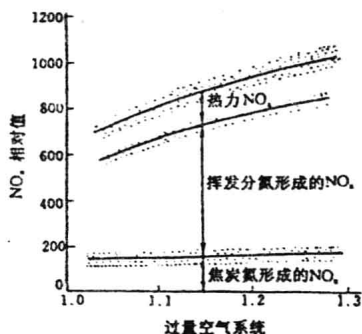


图 6-2-5 过量空气系数对

NO_x 生成量的影响

燃料 NO_x 生成于燃料本身所含有的氮。燃料所含氮多见于煤和燃料油。煤中氮含量一般在 0.2% ~ 3.5% (干燥无灰基), 电厂燃料油含氮量一般在 0.5% (收到基) 以下, 超过 0.5% 的很少。燃料 N 通常以原子状态与各种碳氢化合物相结合, 主要以吡啶 ($\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$) 和喹啉 ($\text{C}_9\text{H}_7\text{N}$) 或者胺类的形式存在于芳香族结构中, 其结合键能量较小, 在锅炉燃烧过程中分解出来, 经氧化反应而生成 NO_x , 称为燃料 NO_x 。

锅炉燃烧过程中, 燃料 N 一部分随同挥发分以中间产物的形式析出, 其中代表性成分为 NH_i 、 HCN 等, 这些中间产物在挥发分燃烧过程中生成部分 NO ; 另一部分燃料 N 则残留在焦炭内, 在焦炭的燃烧过程生成部分 NO 。煤和液体燃料燃烧过程中, 燃料 NO 的生成机理示意于图 6-2-6。

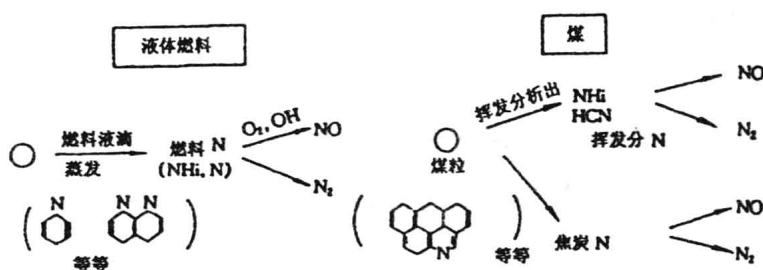


图 6-2-6 煤和液体燃料

燃烧时燃料 NO 的生成机理

研究表明,挥发分中的氮化合物有 NH, NH₂, NH₃, CN 和 HCN 等,主要是 HCN 和 NH₃。HCN 和 NH₃ 的含量比例不仅取决于煤的挥发分,而且与 N 和碳氢化合物的结合状态等化学性质有关。对于烟煤,HCN 比 NH₃ 多;劣质煤以 NH₃ 为主;无烟煤的 HCN 与 NH₃ 均很少。这些氮化合物既是 NO 的生成源,又是 NO 的还原剂,它们与已生成的 NO 进行还原反应,使 NO 衰变成 N₂。总之,挥发分 NO 的生成是经过复杂的反应过程,到目前为止尚不能做出足够清楚的定量评价。

热力 NO 和燃料 NO 之间的分配与煤种、火焰温度(它对热力 NO 有决定性影响)及煤和空气的混合情况有关,而且这种关系比较复杂,但对典型的单面墙或两面墙布置旋流燃烧器、燃料含氮为 1% 的情况,燃料 NO 大约占 NO 总量的 75%,如图 6-2-5 所示。在典型的煤粉燃烧条件下(燃氧当量比为 0.7,温度 $T = 1670 \sim 1770\text{K}$)下,挥发分 NO 约占燃料 NO 的 60% ~ 80%。

燃料燃烧时,燃料 N 只有一部分转变为 NO。通常把实际生成的燃料[NO]与燃料 N 全部转变为 NO 而得的 NO 最大值[NO]_{max}之比,定义为燃料 N 的转变率(或转换率) η_N ,即:

$$\eta_N = \frac{\text{NO}}{[\text{NO}]_{\max}} \times 100\% \quad (6-2-4)$$

或

$$\eta_N = \frac{\text{转变 NO 的燃料 N}}{\text{原始燃料 N}} \times 100\% \quad (6-2-5)$$

影响转换率的主要因素如下。

(1)燃料的氮含量 试验研究和现场测试结果表明,随着燃料氮含量的增加,燃料 N 的转换率 N 呈下降趋势。重油和煤中燃料 N 的转换率示于图 6-2-7。尽管随着氮含量的增加燃料氮的转换率降低,转化率降低的主要原因在于逆反应起重要作用。但燃料 NO 排放总量还受其他因素的影响,烟气中 NO 含量仍随燃料 N 的增加而增加。

(2)燃料的氧氮比(O/N) 煤中的氧氮比是影响转换率的另一个重要因素,见图 6-2-8。一般情况,氧与氮之比随挥发分的增加而增加,因此,NO 的转换量同样也随挥发分的增加而增加。

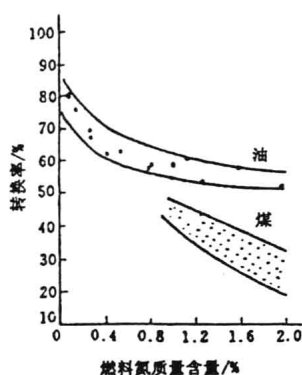


图 6-2-7 重油和煤中燃料
N 的转换率

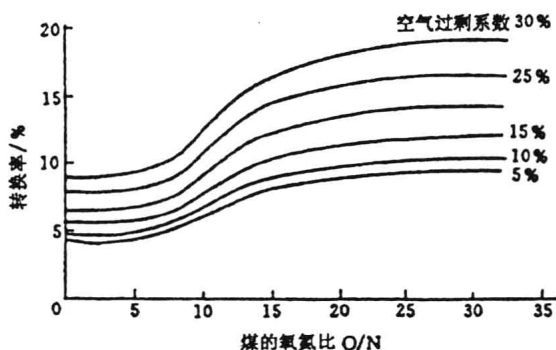


图 6-2-8 在切圆煤粉燃烧装置
上燃料 N 转换率与煤的 O/N 关系

(3)燃烧过程温度 煤粉燃烧过程中,火焰最高温度对燃料 N 的转换率有显著影响。试验研究证实,火焰温度越高转换率就越大,而且过量空气系数(即氧/燃化学当量比 λ)越大这种效果就越显著。这种倾向与煤质特性有密切关系,如图 6-2-9(a)。

燃料 NO 中主要是挥发分 NO,因而减少燃料 NO 主要措施应该是降低挥发分 NO。燃料氮在挥发分和焦炭中的份额对燃料 NO 的生成量有明显影响。挥发分中的氮化物就是燃料氮的气化部分。随着加热温度的提高,各种煤中氮的气化率都明显增大,见图 6-2-9(b)。燃料氮气化率越高,挥发分 NO 生成量越多。与热力 NO 不同,挥发分中氮化合物氧化反应的活化能较低,因此,在较低温度下已生成较多 NO,一般是在挥发分释出与煤粉着火区大量生成燃料 NO。开始时温度影响较大,在高温条件下,燃料 NO 的生成趋于稳定,如图 6-2-10 所示。

(4)着火阶段氧浓度 氮化合物只有经过氧化反应才能生成 NO。因此,着火阶段中氧浓度增加,则挥发分 NO 增加。前苏联 BTH(全苏热工研究院)曾进行过一系列试验,目的在于考察煤粉气流火焰初始氧浓度对燃料 NO 生成量的影响。烟煤的试验结果示于图 6-2-10。随着初始氧浓度(氧的分压力)的提高,燃料 NO 生成量明显增加。因此,降低氧浓度对于降低燃料 NO 有重要影响,降低燃烧器出口气流的氧浓度和燃烧区平均氧浓度同样重要。在过量空气系数 < 1.4 的条件下所进行的煤粉燃烧试验结果表明,转换率随氧浓度的平方而增加。

不同燃料在不同燃烧方式下,由于燃料与空气的混合和燃烧情况不同,影响到 NO 生成的热力与化学环境,如温度、氧浓度等,因而会影响燃料 N 向 NO 的转化。但直到目前为止,燃料 NO 生成的全部机理尚未清楚。表 6-2-2 给出了在不同燃烧条件下,燃料氮转换率的粗略估计值。

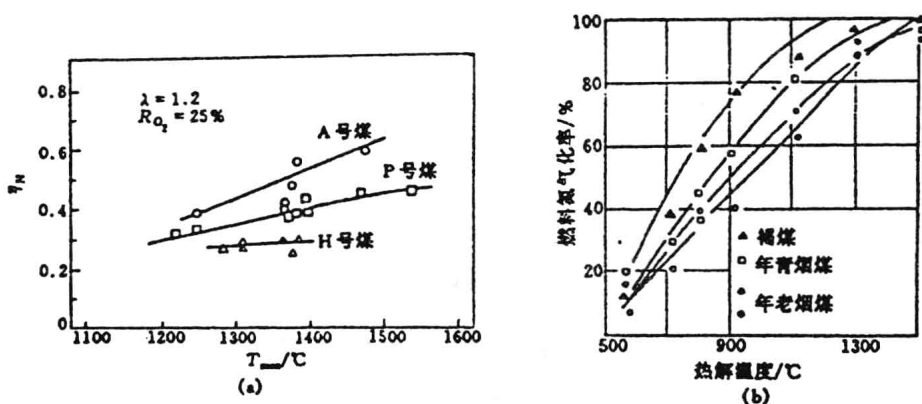


图 6-2-9 火焰温度对燃料 N 转换率的影响

(a) A 煤: $V_{daf} = 42\%$, $N_d = 0.79$

P 煤: $V_{daf} = 38.6\%$, $N_d = 1.50$

H 煤: $V_{daf} = 25.5\%$, $N_d = 1.64$

(b) 燃料 N 的气化率

表 6-2-2

转换率 η_N 的粗略估计

燃料及燃烧装置	转换率 γ
硬煤 煤粉燃烧装置	0.1 ~ 0.6
链条炉	0.08 ~ 0.2
褐煤 煤粉燃烧装置	0.1 ~ 0.3
链条炉	
城市垃圾 流化床燃烧装置	0.07 ~ 0.12
沸腾床	0.1 ~ 0.3
循环床	~ 0.025 ^①
油 重油 S, 欧洲	0.4 ~ 0.5
气油 EL, 煤油	0.85 ~ 1

①通过改进燃烧方式。

3. 快速 NO

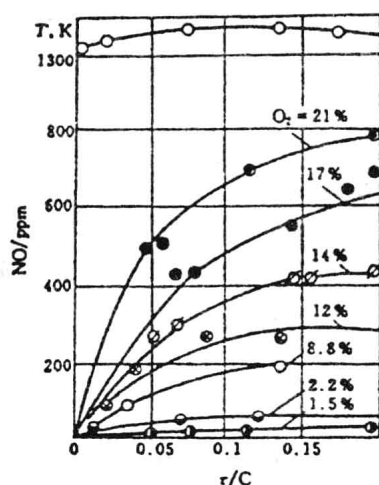


图 6-2-10 燃料 NO 生成量与
煤粉气流初始氧浓度的关系

快速 NO 的生成是分子氮在火焰前沿的早期阶段,在碳氢化合物的参与下通过中间产物转换为 NO。转换率取决于过量空气条件和温度。在大型燃烧设备上,快速 NO 的影响是微不足道的。

二、锅炉结构特性对 NO_x 生成的影响

1. 燃烧器型式

切圆燃烧锅炉的直流燃烧器,二次风和风粉混合物通过上下布置各自独立的喷口进入炉膛。煤中挥发分的析出和着火以及部分燃烧是在与二次风混合前的缺氧煤粉气流中进行,从而抑制了燃料 NO_x 的生成;未完全燃烧的挥发分和焦炭与二次风混合后,是在一个很长的温度较低的火焰中完成燃尽过程,从而抑制了热力 NO_x 的生成。所以在直流燃烧器的着火和燃尽过程中,NO_x 的生成量较低。

旋流燃烧器采用同心的空气和燃料喷口。火焰的传播和与二次风的混合,由于其结构的特点,不同于直流燃烧器。由于二次风的旋流形成了内回流区,火焰生成于煤粉和高温烟气混合物的中心,并扩展进入二次风区域。细小的煤粉颗粒一开始便快速向外侧移动。当大颗粒煤粉进入内回流区与高温烟气和空气接触时,为其提供了良好的着火条件。因为二次风混入较早,燃烧区过量空气系数较

高,形成了高温紊流火焰,促进 NO_x 的生成。因此,旋流燃烧器 NO_x 生成量高于直流燃烧器。

2. 锅炉的结构型式

(1)液态排渣锅炉(包括旋风炉,U型火焰液态排渣锅)由于需要在高于灰熔点温度下运行,单位体积释放热量大,产生的 NO_x 量最高。

(2)固态排渣锅炉(墙式布置燃烧器),单面墙燃烧锅炉 NO_x 生成量大于前后墙燃烧的锅炉。

(3)固态排渣切圆燃烧锅炉的 NO_x 生成量是煤粉锅炉中最低的。

(4)流化床燃烧锅炉 NO_x 生成量低于煤粉锅炉

不同燃烧装置 NO_x 排放值列于表 6-2-3 和图 6-2-11,电力部西安热工研究院近年来对中国数十台电站锅炉的普查结果,燃油锅炉 NO_x 排放量为 $(380 \sim 820) \times 10^{-6} (\text{O}_2 = 3\%)$;燃煤粉锅炉 $(370 \sim 720) \times 10^{-6}$ 。

表 6-2-3 未改造条件下不同燃烧装置 NO_x 排放值

燃烧系统	NO_x 排放值		燃烧系统	NO_x 排放值	
	$\text{NO}_2/(\text{mg}/\text{m}^3)$	参考氧量 $\text{O}_2/\%$		$\text{NO}_2/(\text{mg}/\text{m}^3)$	参考氧量 $\text{O}_2/\%$
流化床锅炉	20~70	7	液态渣锅炉		
炉排锅炉	30~80	7	采用旋风炉	900~2000	5
固态排渣锅炉			采用直流燃烧器	900~1300	5
采用直流燃烧器	500~1100	6	采用旋流燃烧器	1300~2000	5
采用旋流燃烧器	800~1700	6			

3. 锅炉的热力参数

当多只燃烧器(墙式布置)同时运行时,对 NO_x 生成有影响的一个敏感参数是燃烧器区域壁面热负荷。相邻燃烧器,特别是多只燃烧器运行的中部位置,相邻燃烧器之间的相互影响会增加该区域的火焰温度。缩小燃烧器间距,趋向于增加 NO_x 排放。图 6-2-12 示出 NO_x 排放量与燃烧器区域壁面热负荷之间的关系。锅炉设计中可以采用改变燃烧器间距、改变炉膛尺寸和几何形状等措施来调节燃

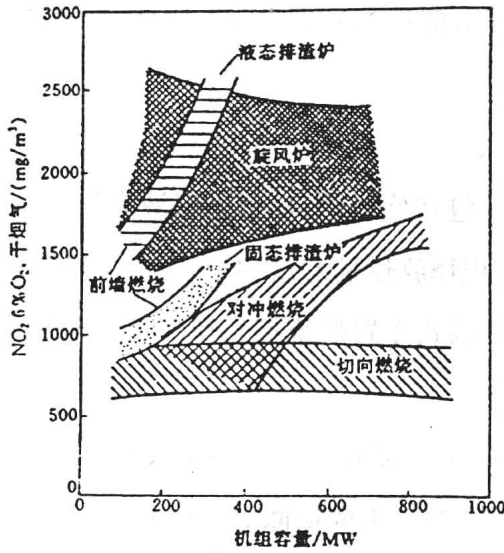


图 6-2-11 不同燃烧方式

NO_x 的排放值

烧器区域壁面热负荷。

随着机组容量的增加,锅炉的(体积/断面积)比值会增大。即是说,锅炉体积的增加大于冷却烟气的水冷壁面积的增加。因此,随锅炉容量的增大,炉膛容积热负荷降低,而断面热负荷增大,见图 6-2-13。所以,大容量锅炉火焰区温度相对较高,因而促进了 NO_x 的生成。但燃料 NO_x 在 NO_x 总量中占主要份额,在低氧浓度下停留时间长可以减少燃料 NO_x 的生成,这在采用大型燃烧器的大容量锅炉上是比较容易实现的。另外,由于褐煤燃烧生成的烟气量相对较大,所以褐煤锅炉比燃用其他煤种的锅炉尺寸大,加之由于水分高、发热值低造成的低燃烧温度,有利于通过燃烧控制来抑制 NO_x 的生成。