

4. 燃煤污染控制

4.1. 除尘技术

4.2. 脱硫技术

4.3. 脱硝技术

4.3. 脱硝技术

4.3.1 低NO_x燃烧技术

4.3.2 炉膛喷射脱硝

4.3.3 烟气脱硝

4.3.1 低NO_x燃烧技术

用改变燃烧条件的方法来降低NO_x的排放，统称为低NO_x燃烧技术。在各种降低NO_x排放的技术中，低NO_x燃烧技术是采用最广、相对简单、经济并且是有效的方法。

低NO_x燃烧技术

★低过量空气燃烧

★空气分级燃烧

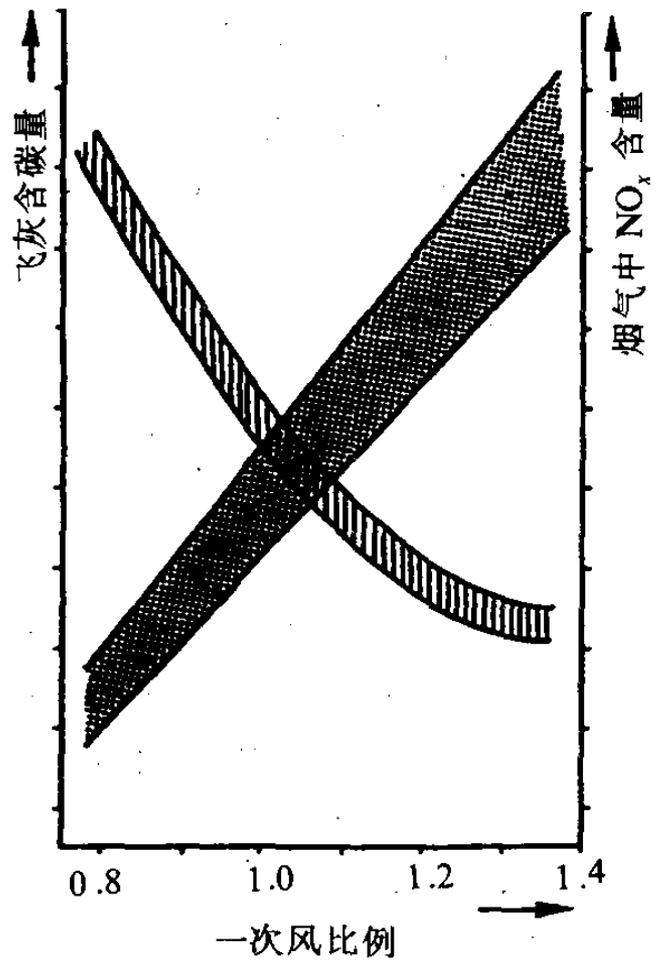
★燃料分级燃烧

★烟气再循环

★低过量空气燃烧

使燃烧过程尽可能地在接近理论空气量的条件下进行，随着烟气中过量氧的减少，可以抑制NO_x的生成，采用低过量空气燃烧可以降低NO_x排放15%-20%。

炉内氧的浓度过低，低于3%以下时，会造成CO浓度的急剧增加，从而大大增加化学未完全燃烧热损失。同时，也会引起飞灰含碳量的增加，燃烧效率将会降低。



煤粉燃烧时一次风比例和烟气中飞灰含碳量与NO_x含量的关系

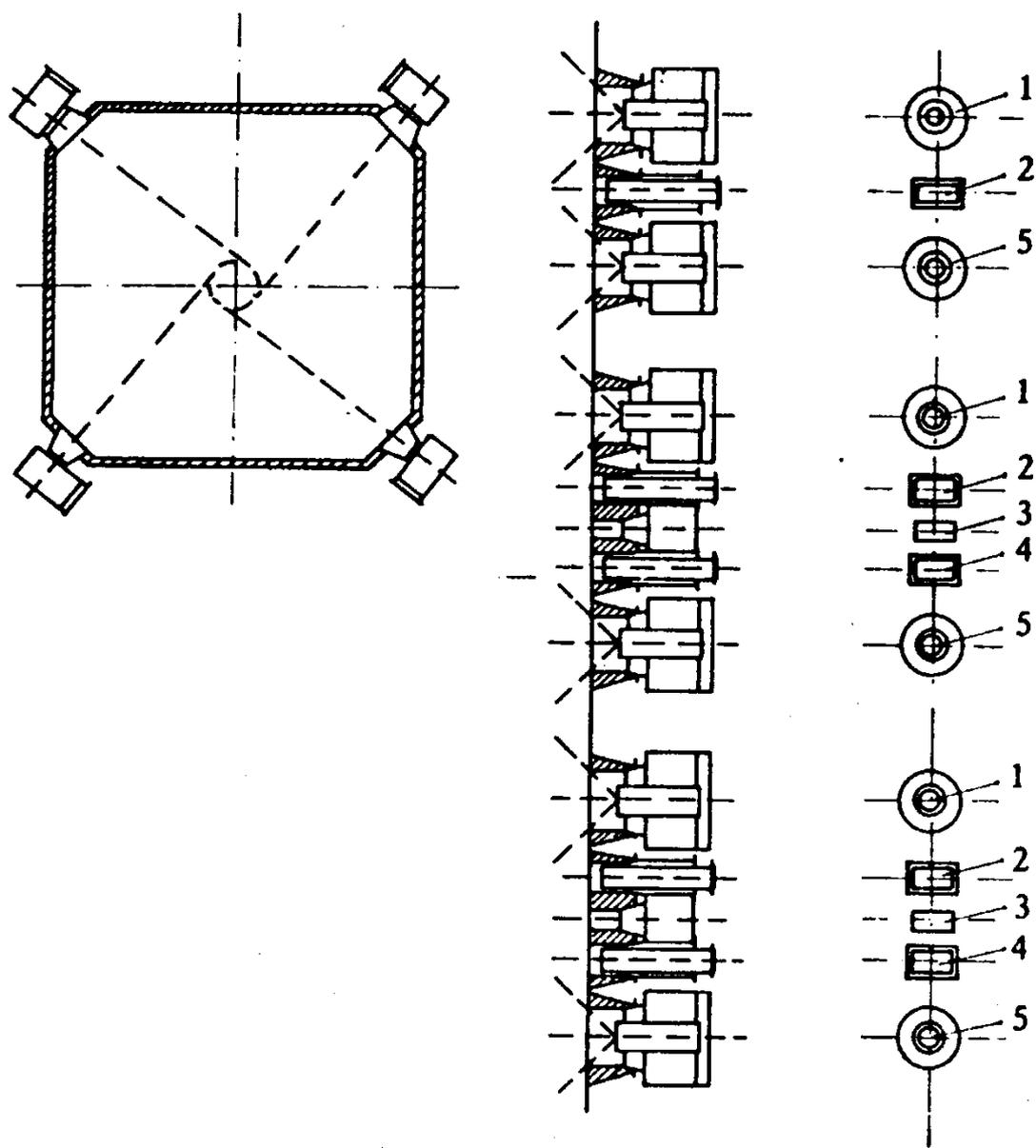
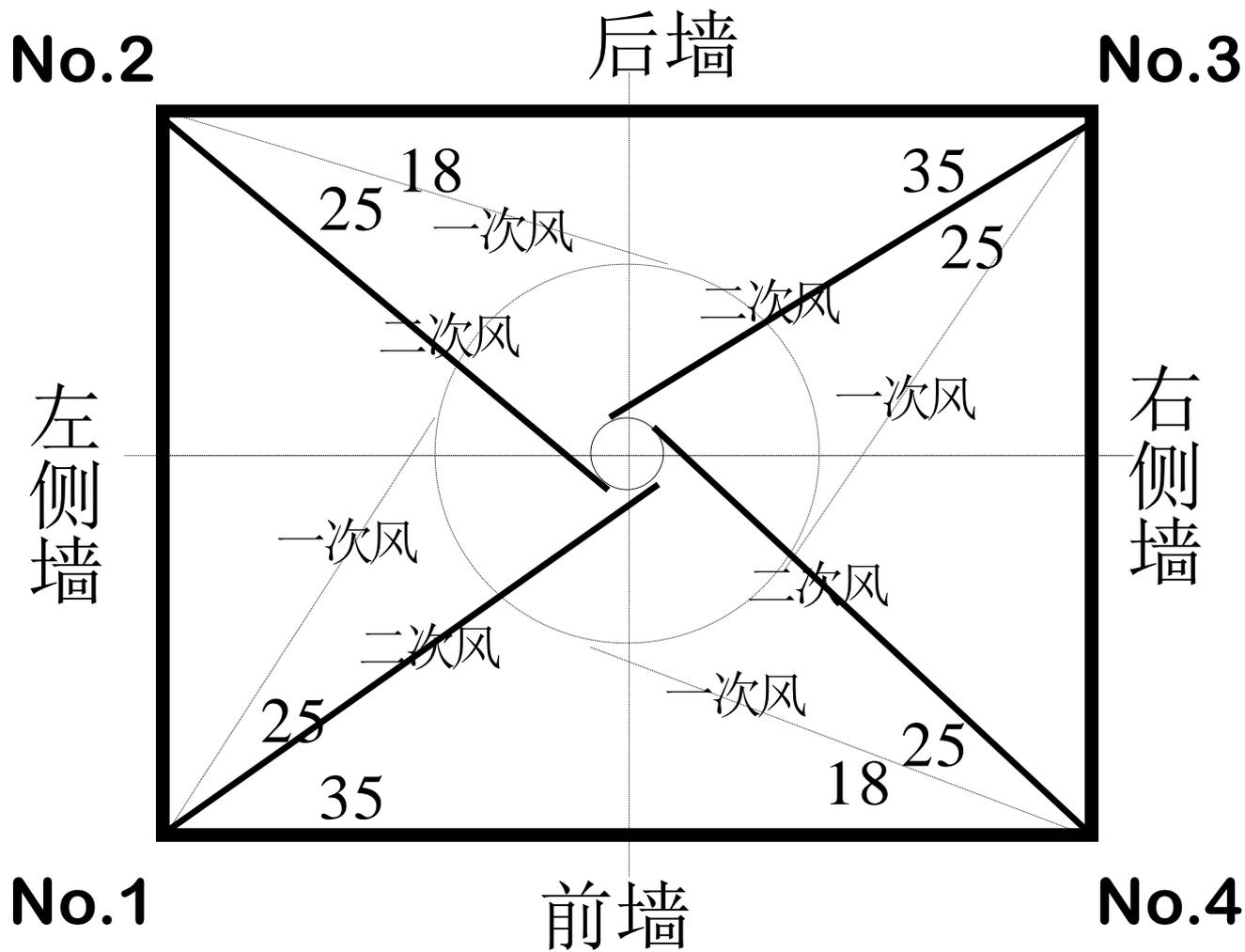
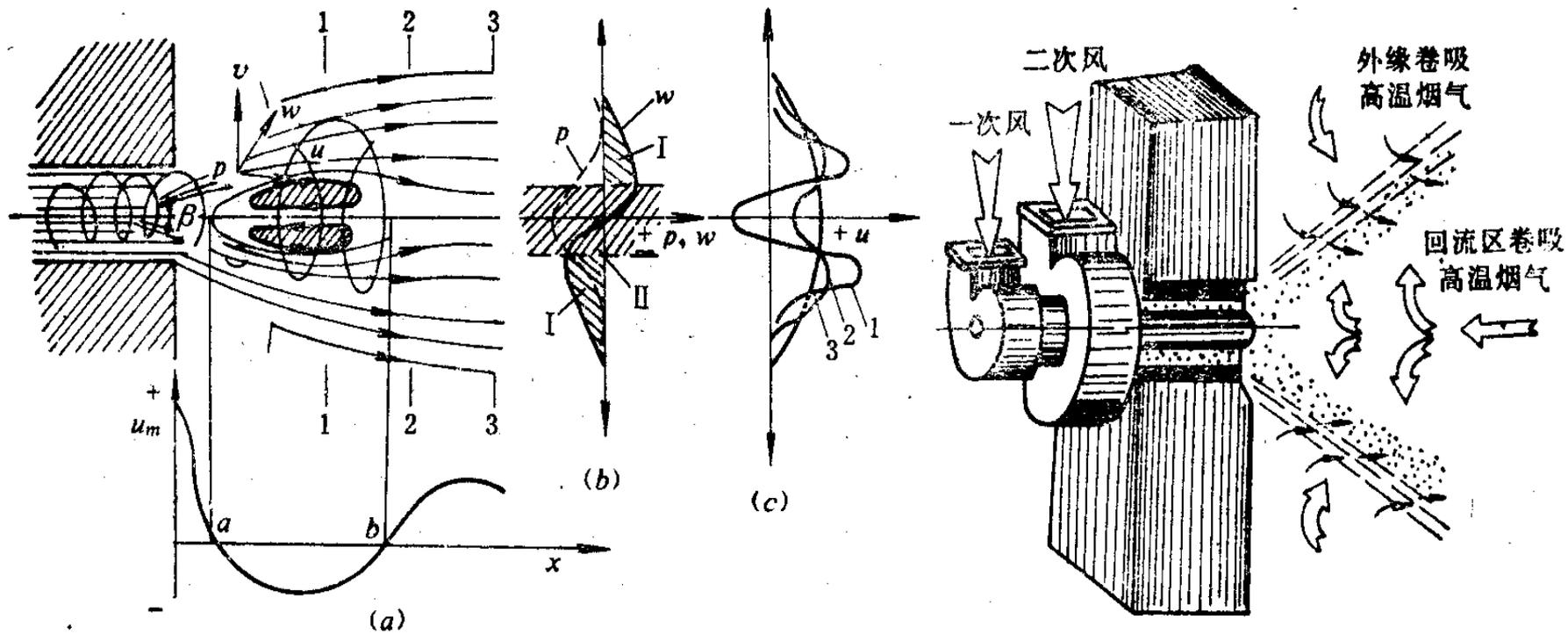


图 5-3 一台300MW硬煤锅炉切圆燃烧炉膛的直流燃烧器布置形式

1—带煤气（或油）燃烧器喷口的上二次风喷嘴；2—带周界风缝隙喷口的上煤粉喷嘴；3—中间风喷嘴；4—带周界风缝隙喷口的下煤粉喷嘴；5—带煤气（或油）燃烧器喷口的下二次风喷嘴

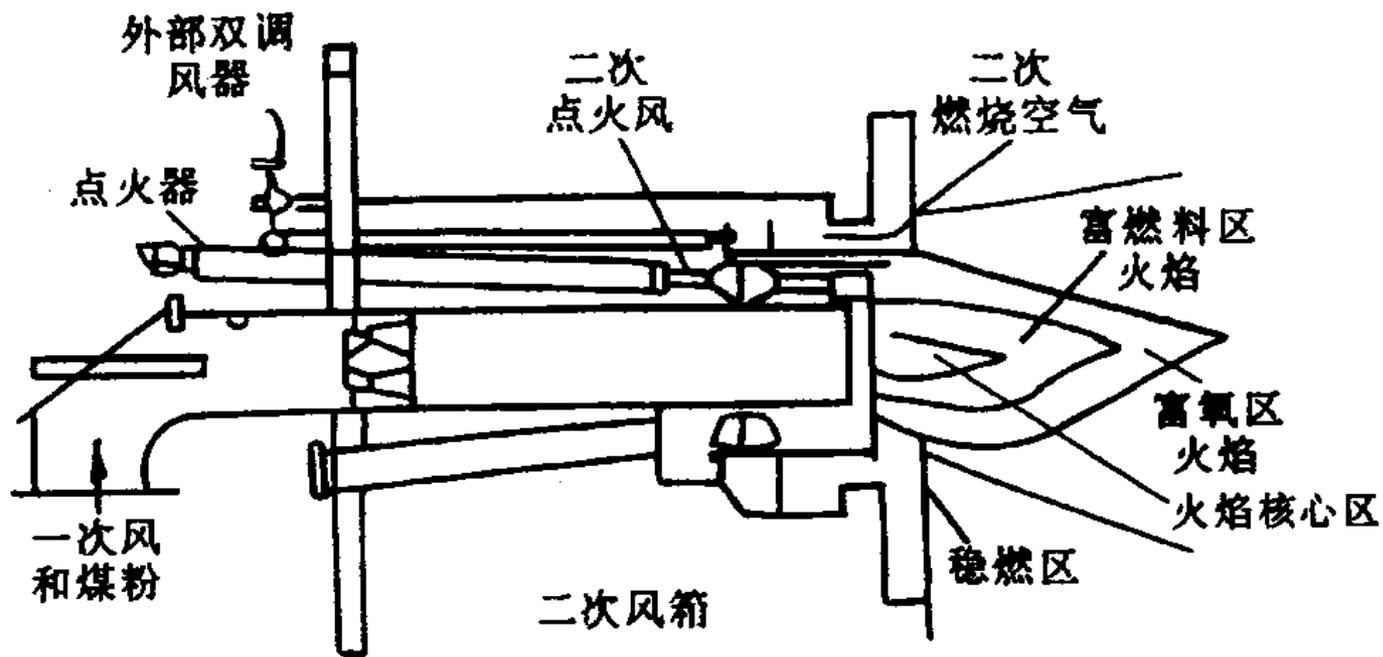
一次风反切时炉内流动特性



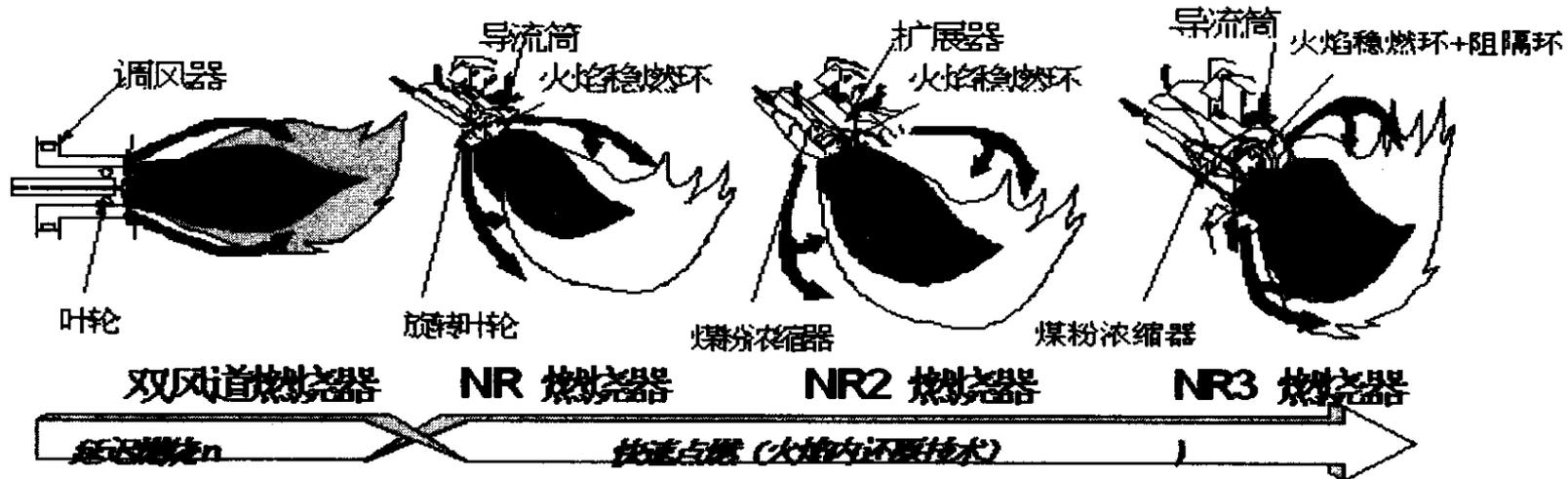


旋转射流各流动参数沿射程变化图

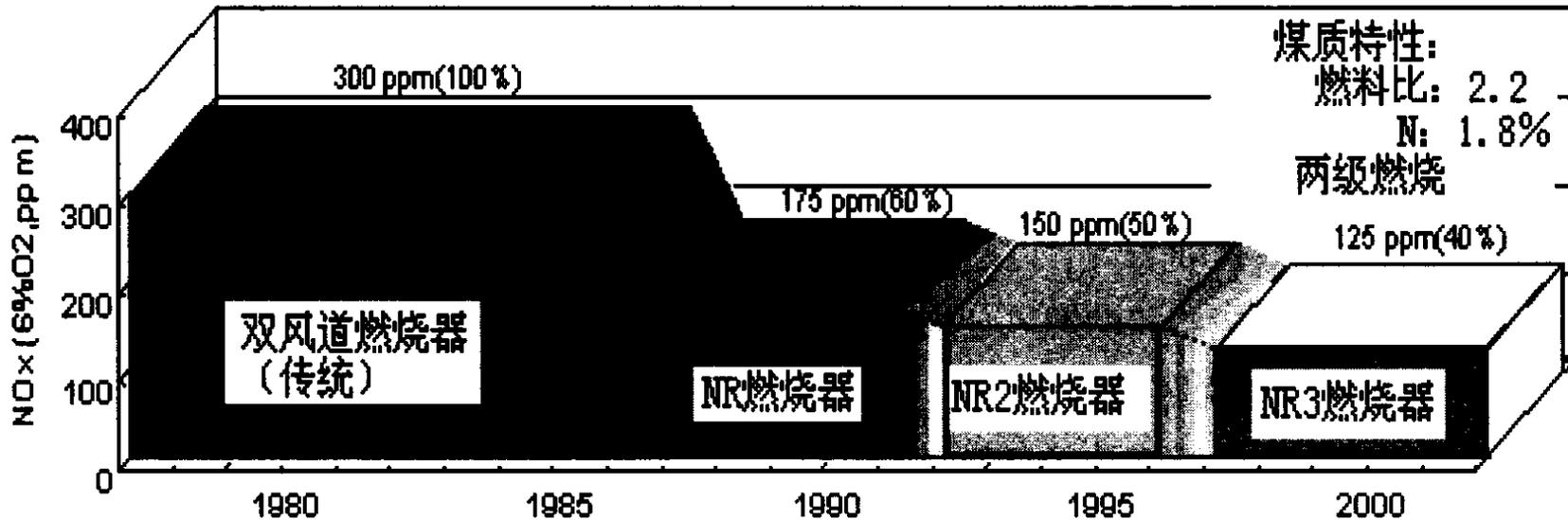
(a)射流轴心速度；(b)切向速度和压力；(c)在横截面1, 2, 3上的轴向流动速度；(d)旋流器示意图



双调风燃烧器燃烧过程



普通燃烧器与HT—NR燃烧器之间的比较



HT—NR系列燃烧器的发展示意图

★空气分级燃烧

基本原理

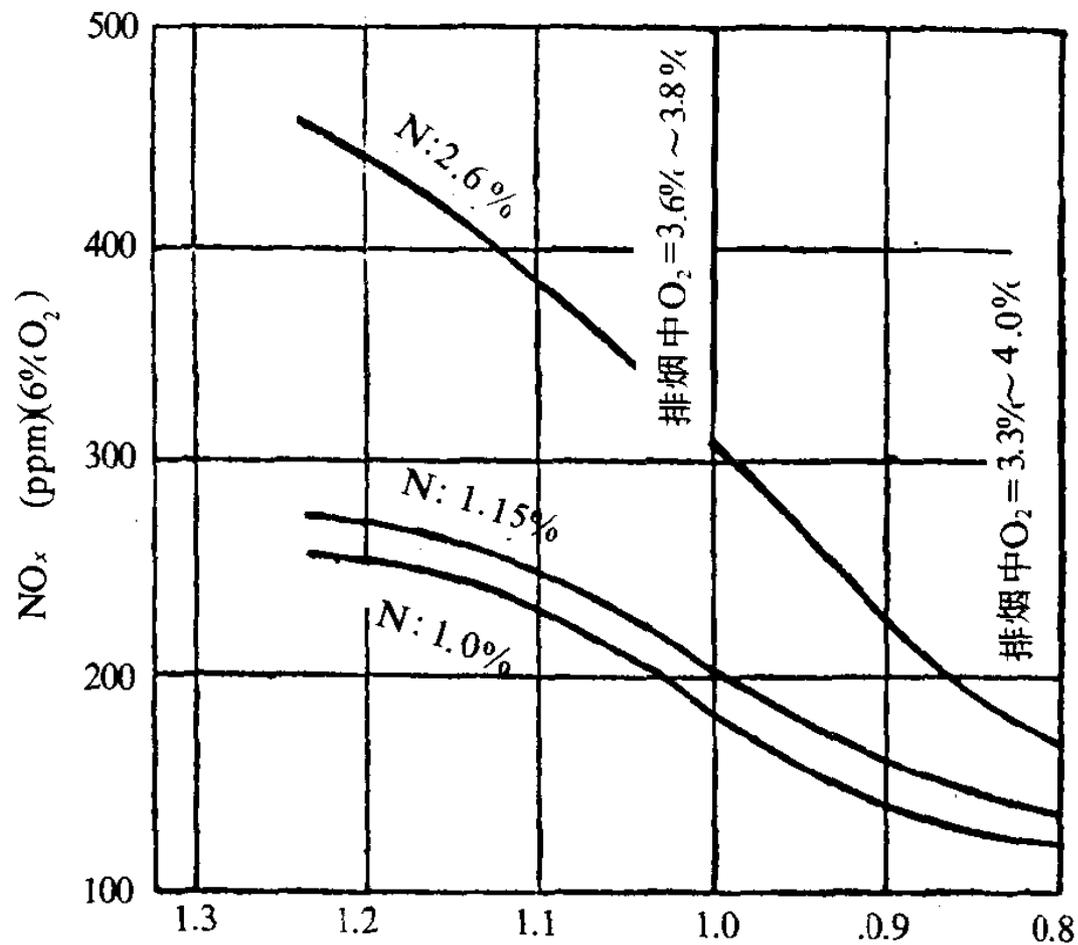
一级燃烧:

将供入炉膛的空气量减少到总燃烧空气量的70%—75%，使燃料先在缺氧的富燃料燃烧条件下燃烧。过量空气系数 $\alpha < 1$ ，降低了燃烧区内的燃烧速度和温度水平，而且在还原性气氛中降低了生成 NO_x 的反应率，抑制了 NO_x 的生成量。

二级燃烧:

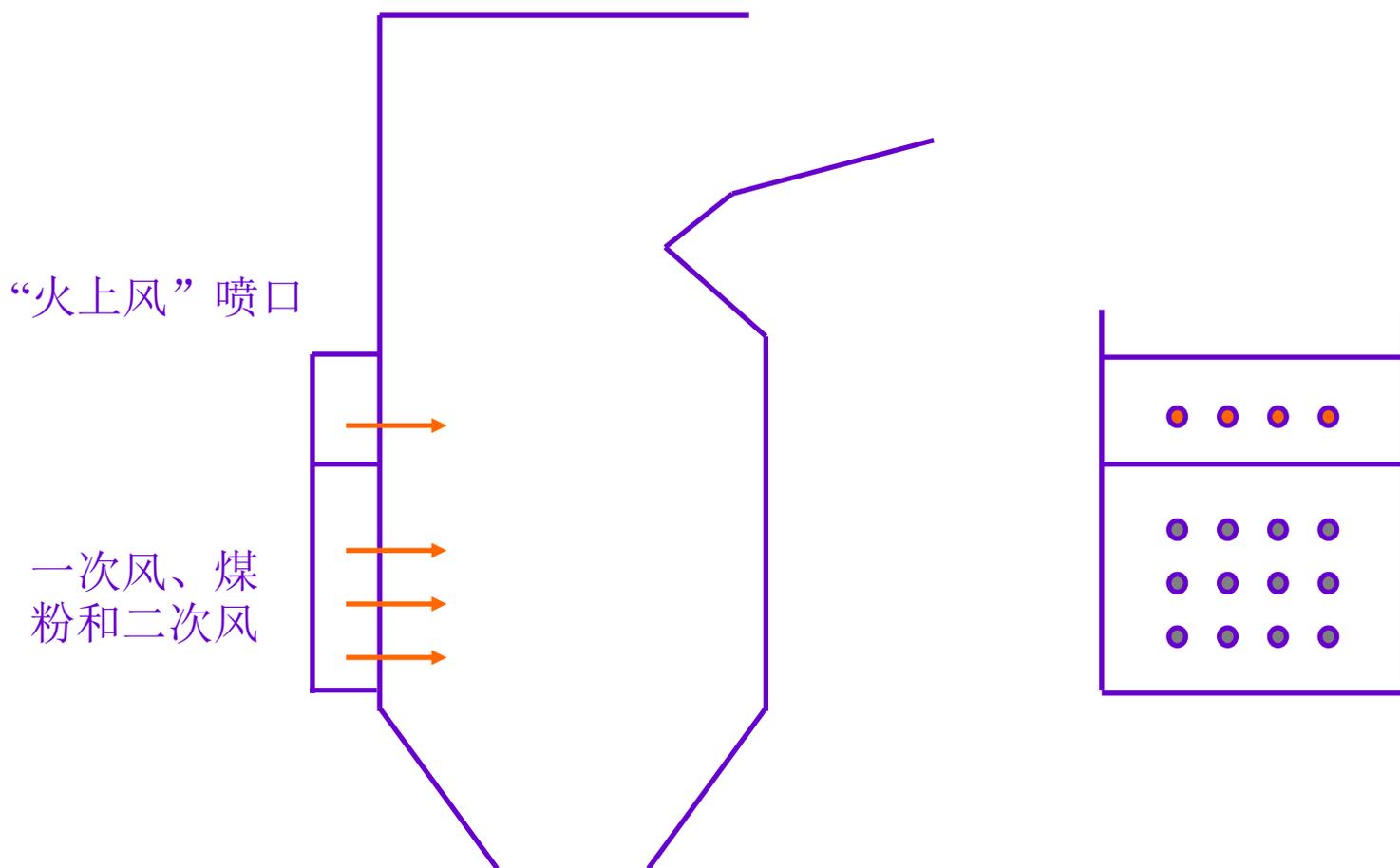
其余空气与一级燃烧区产生的烟气混合，在 $\alpha > 1$ 的条件下完成全部燃烧过程。

空气分级燃烧弥补了低过量空气燃烧的缺点。但若第一级和第二级的空气比例分配不当，必然会增加不完全燃烧的损失。同时，在煤粉炉第一级燃烧区内的还原性气氛也存在着使灰熔点降低而引起结渣，或引起受热面腐蚀的问题。



一级燃烧区内过量空气系数、燃料中氮含量与NO_x生成量的关系

煤粉炉燃烧器前墙布置时“火上风” (OFA) 喷口在炉膛上布置的示意图



大型煤粉锅炉空气分级燃烧效果举例

燃 烧 方 式	容 量 (MW _e)	原来 NO _x 排放浓度 (ppm)	分级燃烧 排放浓度 (ppm)	NO _x 的 降低率 (%)
前墙布置燃烧器液态排渣煤粉炉	300	912	584	36
二排前墙布置的固态排渣煤粉炉	500	676	323(425MW _e)	52
燃烧器前墙布置固态排渣煤粉炉 (S=4.5%,N=1.2%)	200	380	283	25
二排前墙布置的固态排渣煤粉炉 (S=6%,N=0.9%)	350	476	183	62

NO在遇到烃根 CH_i 和未完全燃烧产物CO, H_2 , C和 C_nH_m 时, 会发生NO的还原反应。



一次燃烧区：

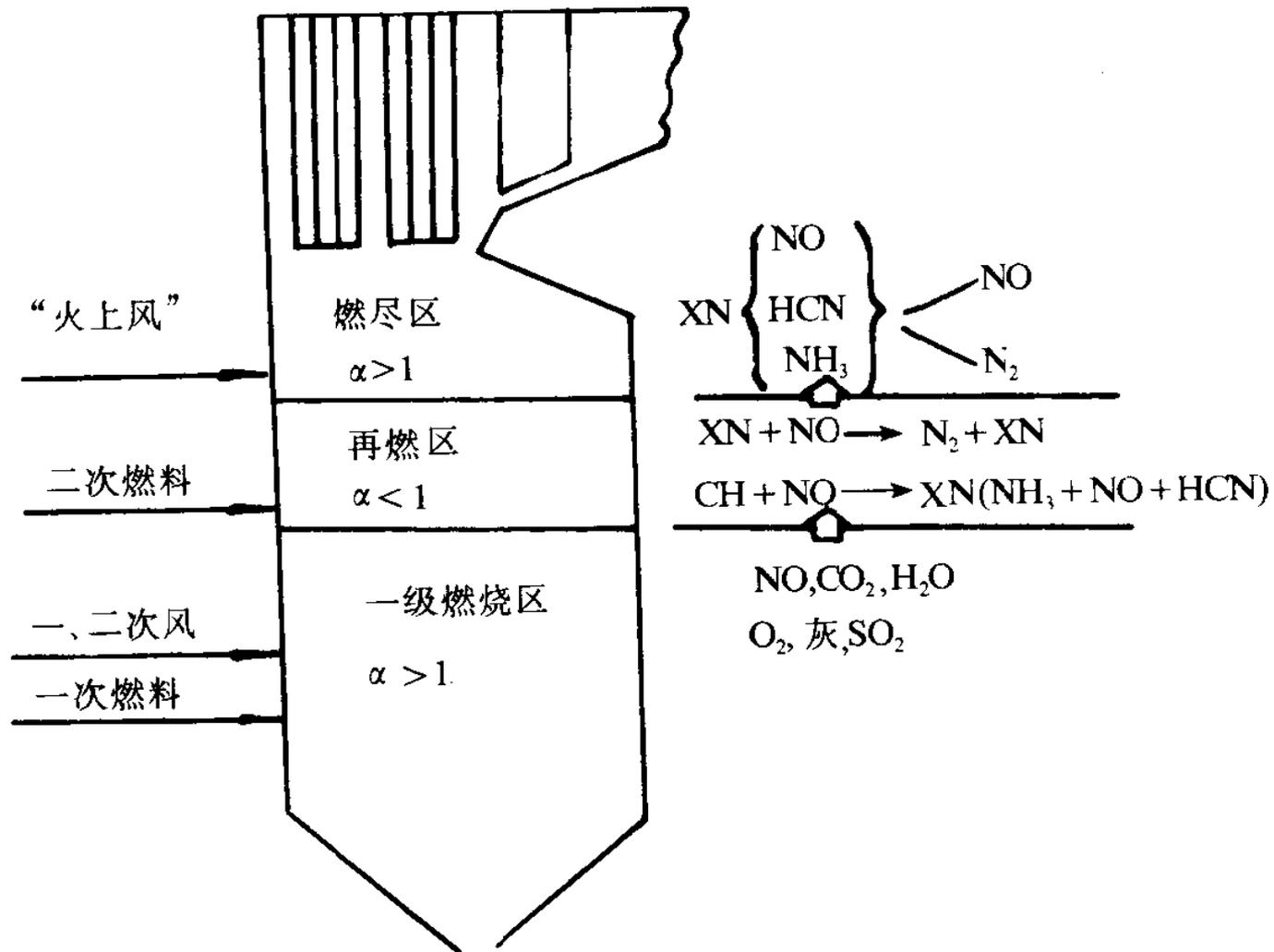
一次燃料，在 $\alpha > 1$ 的条件下燃烧并生成 NO_x 。

再燃烧区：

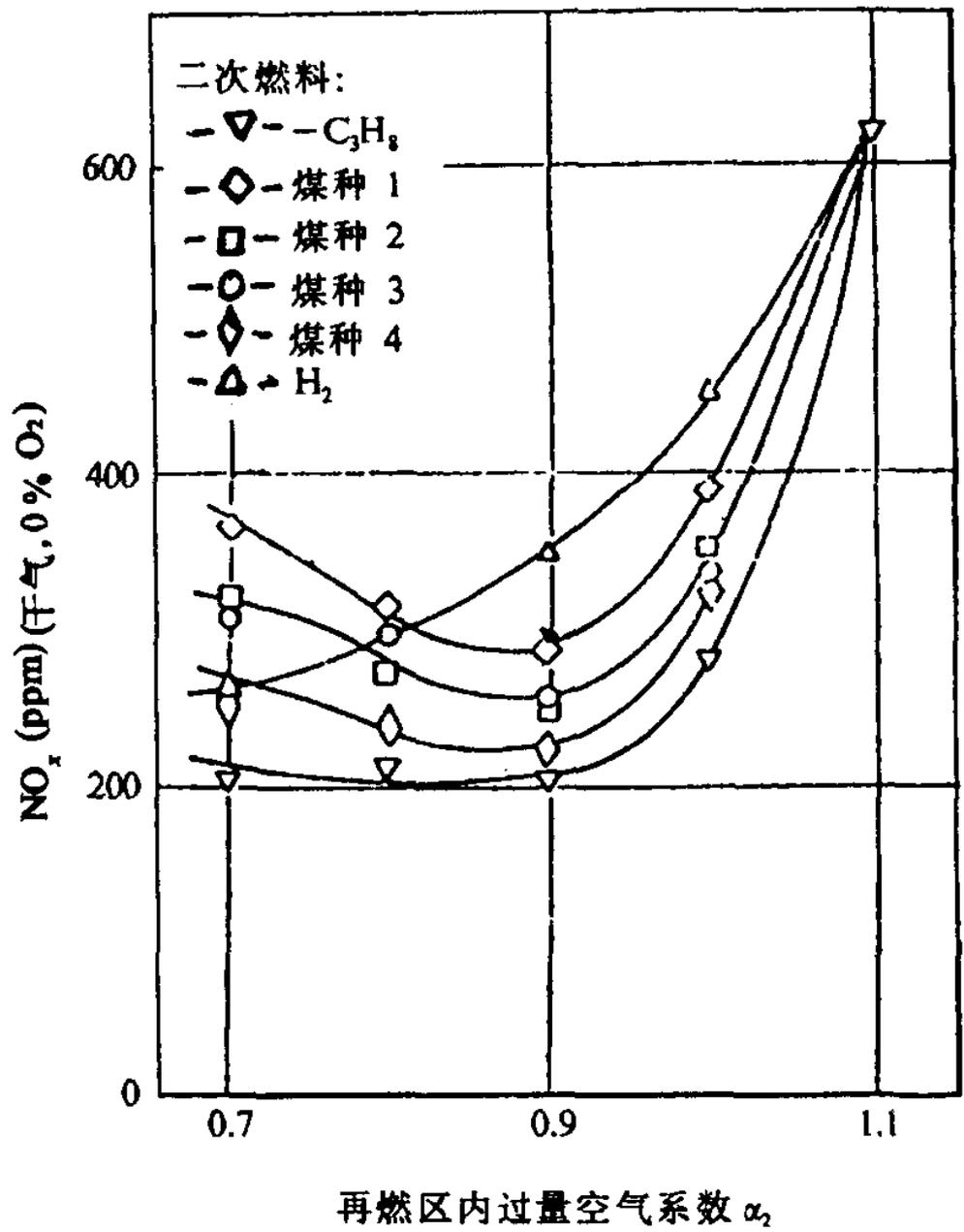
二次燃料，在 $\alpha < 1$ 的条件下形成很强的还原性气氛，使得在一级燃烧区中生成的 NO_x 被还原成氮分子 (N_2)。

燃尽区：

最后再送入二次风，在 $\alpha > 1$ 的条件下将未完全燃烧产物的燃尽。



燃料分级燃烧原理示意图



不同种类的二次燃料和再燃区内过量空气系数 α_2 及 NO_x 浓度的关系

★烟气再循环

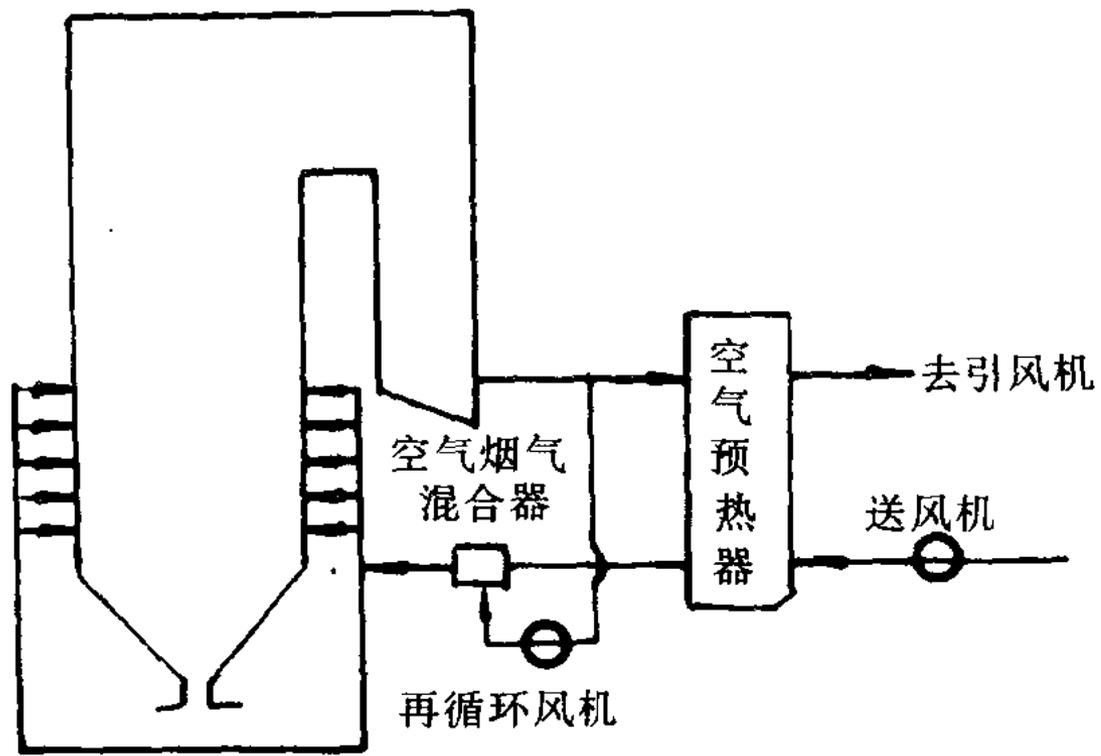
将锅炉尾部烟气再送入炉内，降低了氧气浓度，降低燃烧温度，从而降低NO_x的排放浓度。

$$\text{再循环率} = \frac{\text{再循环烟气量}}{\text{无再循环时烟气量}} \times 100\%$$

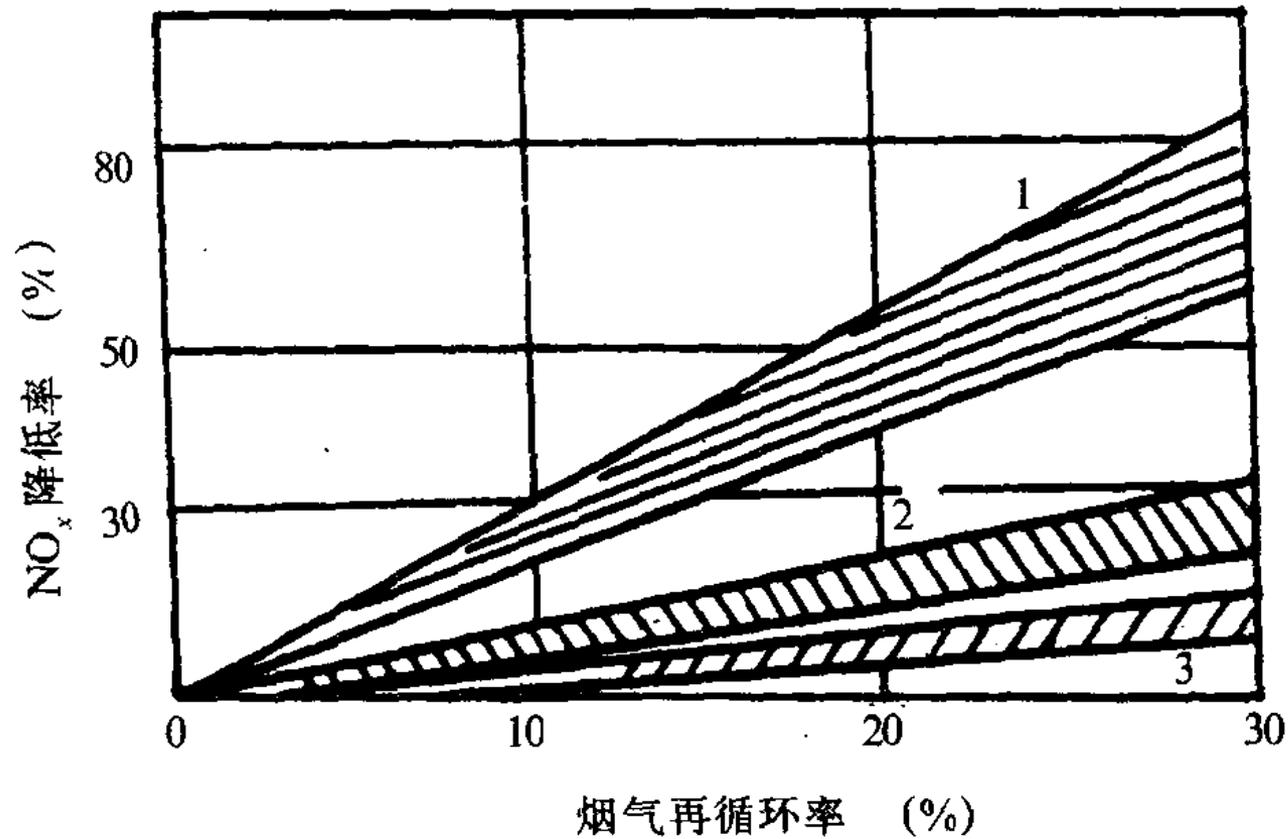
不足：

由于循环烟气量的增加，燃烧会趋于不稳定，而且未完全燃烧热损失会增加。

增加循环风机、烟道，增大投资，系统也较复杂。



锅炉烟气再循环系统示意图



烟气再循环率与NO_x降低率的关系

- 1—燃料为煤气或轻油； 2—重油锅炉和液态排渣煤粉炉
3——固态排渣煤粉炉

不同煤燃烧设备的低NO_x燃烧技术比较

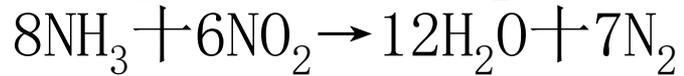
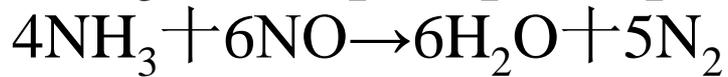
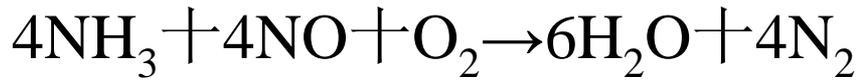
低 NO _x 燃烧技术		降低 NO _x 排放的百分数	优 点	缺 点
煤 粉 炉	低过量空气系数	根据原来的运行条件,最多降低 20%	投资最少,有运行经验	导致飞灰含碳量增加
	降低投入运行的燃烧器数目	15~30%	投资低,易于锅炉改装,有运行经验	有引起炉内腐蚀和结渣的可能,并导致飞灰含碳量增加
	空气分级燃烧(OFA)	最多 30%	投资低,有运行经验	并不对所有已有锅炉都适用,有可能引起炉膛腐蚀和结渣,并降低燃烧效率
	低 NO _x 燃烧器	与 OFA 合用时可达 60%	适用于新的和改装的锅炉,中等投资,有运行经验	结构比常规燃烧器复杂,有可能引起炉膛腐蚀和结渣,并降低燃烧效率
	烟气再循环(FGR)	最多 20%	能改善混合和燃烧,中等投资	增加再循环风机,使用不广泛

	燃料分级燃烧 (再燃)	最多 50%	适用于新的和现有的锅炉改装,可减少已形成的 NO_x , 中等投资	可能需第二种燃料,运行控制要求高,没有工业运行经验
常链 条 规炉	烟气再循环 燃料分级燃烧 低过量空气系数	最多 20% 最多 50% 最多 20%	同上	同上
流 化 床 锅 炉	烟气再循环 燃料分级燃烧 低过量空气系数	最多 20% 最多 50% 最多 20%	同上	同上
	降低流化床 燃烧温度	最多 20%		可能影响用石灰石在床内脱硫,运行控制要求高,使用不广泛
	空气分级燃烧	最多 50%	投资低,适用于新的和现有的流化床锅炉改装	有可能降低燃烧效率和引起炉膛腐蚀

4.3.2 炉膛喷射脱硝

向炉膛喷射某种物质来还原已生成的NO_x，从而降低NO_x的排放量。包括喷水、喷射二次燃料和喷氨等。

喷氨：



优缺点：

非催化喷氨脱硝法投资少，运行费用也低。

但反应温度范围狭窄；

要有良好的混合及反应空间和反应时间的条件；

NH₃泄漏量过大等问题。

4.3.3 烟气脱硝

干法烟气脱硝

选择性催化还原法 SCR (Selective Catalytic Reduction)
选择性非催化还原法 SNCR (Selective Non-Catalytic Reduction)

湿法烟气脱硝

同时脱硫脱硝的湿式系统

臭氧氧化吸收

高锰酸钾氧化吸收

ClO_2 氧化吸收

选择性非催化还原法（SNCR, Selective Non-Catalytic Reduction）

应用该技术时，应在燃烧器区域以上合适的烟温处（ $900\sim 1000^{\circ}\text{C}$ ）向炉内喷入氨或尿素与烟气中的NO进行反应，将NO还原成 N_2 。该方法要求氨或尿素必须在合适的烟温段中喷入，否则NOX排放量非但不下降，反而会升高。另外，氨或尿素与烟气的混合情况也对NO的还原量有极大的影响。

选择性催化还原法 (SCR, Selective Catalytic Reduction)

该方法的工作温度为 $100\sim 400^{\circ}\text{C}$ 。烟气在通过装有催化剂的反应容器时，NO与氨进行反应从而被还原为 N_2 。常用的催化剂有：氧化铁、氧化钒、氧化钛和活性炭等。与SNCR方法相比，**SCR法没有副作用**（如烟温偏高时， NH_3 不会转化为NO），**NO向 N_2 的转化效率高**（ $80\sim 90\%$ ），反应物 NH_3 消耗量小。

节能与环保



西安交通大学

XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

能源与动力工程学院

刘朝晖

博士，副教授

研究领域：吸热型碳氢燃料技术，高温高压
两相流动与换热，流体热物性

动力工程多相流国家重点实验室

中国·陕西·西安市咸宁西路28号 (710049)

电话：029-82665287

传真：029-82665287

手机：13772495182

邮箱：zh_liu@mail.xjtu.edu.cn

XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

http://gr.xjtu.edu.cn/web/zh_liu

结语

我已倾囊相授，
难免误人子弟。
如觉乏味无聊，无所进益，
实乃个人水平所限。
敬请大家原谅。
谢谢！