第一章 绪论

§1.1 当今我国的煤炭利用和人类面临的环境问题

我国是世界上最大的煤炭生产国和消费国，在全国一次能源的消费量中，煤炭占到 75%。

在煤炭资源的利用过程中，会产生大量的污染物，导致生态环境的恶化，进而影响到人们的正常生活，由煤炭燃烧所产生的大气污染、水污染、酸雨等现象已经引起了人们的高度重视。

由于我国煤炭 84%用于直接燃烧，因而全国范围内 90%的二氧化硫排放量、70%的烟尘排放量都是由煤炭造成的。二氧化碳等温室性气体会对臭氧层产生极大的破坏，而氮氧化物又是造成酸雨的重要因素，因而如何控制煤炭燃烧产生的有害物质，并进而创造良好的人类社会与自然并存的和谐状况，已经摆到了我们面前。

我国目前经济高速增长，能源耗用量也越来越大，唯有可持续发展的道路才是首选，而煤炭的清洁燃烧，对减少二氧化碳、NOx 排放物、烟尘和酸雨的产生有着显而易见的作用，也是实现可持续发展的重要因素。

目前人类正面临着能源、环境与人口三大问题。能源是发展生产力的基本保证，它关系着人民生活和国民经济的各个方面。当前世界上正面临能源紧张的困境，据美国有关资料统计：按世界上目前矿物能源的现有储量和各国年平均开采能力估算，全世界的石油只能开采 40 年，天然气可开采 60 年，煤炭可开采 240 年。同时随着这些常规能源的过度甚至是低效的被滥用，随着工农业的不断发展和城市化进程的进一步深化，带来了一系列非常严重的环境问题，影响着人类的健康和安全，也制约着经济的进一步发展。

§1.2 解决环境问题任重道远

面对严重的能源与环境问题，人类开始了十分严肃的思考，终于逐步警觉到，不恰当的发展模式是形成人类与自然中不良关系的根源，如对目前的恶性循环不加控制，则必将危及地球的命运和人类的前途。1972 年联合国召开了全球人类与环境大会，发表了著名的斯德哥尔摩宣言。很多有识之士提出：“人类只有一个地球赖以生存”，“这个地球不是我们从上一代人手里继承下来的，而是我们从下一代人手里借来的”。1992 年联合国又召开了全球环境与发展大会，一百多个国家的首脑共同签署了著名的地球宣言，一致提出要遵循可持续发展的模式。从目前来看可持续发展战略的确是解决这些问题的唯一出路。所谓可持续发展，就是既符合当代人的需求，又不致损害未来人类满足其需求的发展。只有这种发展才可能持续永久，才可以保障人类在地球上世世代代繁衍生息下去。可持续发展包含了两层意思：一方面开发新的能源品种，例如生物质，缓和个别品种的资源枯竭问题；另一方面要尽可能的减少污染物的排放，给子孙后代留下一个清洁的环境。

§1.3 氮氧化物的生成、危害与排放现状

环境污染中越来越引起人们的关注的一个方面是氮氧化物现在及将来可能对全球造成的危害。在能源利用的过程中，化石燃料的燃烧要排放出各种污染，99%的氮氧化物（NO_x）是由化石燃料燃烧排放的。其中煤燃烧所产生的污染物又占大多数，我国能源以煤为主，燃煤生成的氮氧化物占 67%，燃煤是我国的主要大气污染。煤粉燃烧所生成的 NOx 主要有一氧化氮（NO）和二氧化氮（NO_2），还有少量的一氧化二氮（N_2O），它们和三氧化二氮（N_2O_3）、五氧化三氮（N_3O_5）统称为 NOx。

通常温度下，煤粉燃烧中，生成 NO 占 90%，NO_2 占 5~10%，N_2O 仅占 1%左右，NOx 的控制主要是 NO 和 NO_2 的控制。 NO（一氧化氮）是一种无色、不活泼的气体，在有烃类气体存在，并且有阳光照射的情况下，可以迅速的被氧化成 NO_2（二氧化氮）。NO_2 在阳光照射下，又会分解生成 NO 和 O，而 NO 和 NO_2 在大气中也能反应生成 N_2O_3，所以，大气中得 NOx 产物互相之间可以相互转化，形成一个有机的循环系统。

应该说人们对氮氧化物的认识比硫氧化物晚得多，直到最近 40 年才重视起来。但氧化物的危害性则是绝不可忽略的，主要有如下几点：

1．在空气中，NO 浓度越大，毒性明显增加，而 NO_2 的毒性更大，约为 NO 的 4 到 5 倍。其主要表现在，它们很容易和动物血液中的血色素结合，使血液缺氧，引起中枢神经麻痹；

2． 光化学烟雾毒性更强，对人的眼睛和呼吸道有强烈的刺激性。

NO 破坏了平流层（同温层）中的臭氧层，使之失去了对紫外光辐射的屏蔽作用对地面生物造成伤害。根据哈根 • 斯密的光化学烟雾理论，光化学烟雾是由大气中的 NOx、HC 以及 CO 等污染物在强太阳光下，发生光化学反应生成的。反应方程式如下：

NO_2+hv（290~430）——>$NO+O$（3p） （1－1）

O（3p）+O_2+M——>O_3+M （1－2）

O_3+NO——>NO_2+O_2 （1－3）

3． 当大气中含有碳氢化合物时，其中的烯烃和芳烃等经过一系列反应，就生成复杂的光化学气体，其中包括臭氧和过氧乙酰基硝酸脂等，可引起支气管炎和肺水肿，对人的生命造成威胁。

4． NOx 与 SO_2 和粉尘共存，可生成毒性更大的硝酸或硝酸盐气溶液，最终形成酸雨。

毫无疑问，NOx 给我国造成的危害同样是非常严重的。我国一次能源以煤为主，在其燃烧利用过程中排放了大量的 NOx，特别是在我国城市中其造成的大气污染非常严重。根据电力部西安热工研究所 1989 年发表的全国电力普查报告，我国燃煤电站锅炉的实际 NOx 排放水平如下：

表 1-1 我国燃煤电站锅炉 NOx 排放水平

排渣方式	炉型或燃烧器类型	测定值 mg/m^3
固态排渣	直流燃烧器	600—1000
	旋流燃烧器	1000—1200
液态排渣	单室炉	850—1150
	旋风炉	650—950

由于我国电站锅炉中液态排渣鹿容量份额较小，而固态排渣炉中又广泛使用直流燃烧器，以此根据炉型和燃烧器型式区分，全国电站锅炉按容量全书平均的 NOx 排放水平应该在（700—900）mg/m^3。

欧美等发达国家对电站污染物的排放向来严格，因此对于 NOx 也不例外。这些国家或国际组织制订的大型燃烧装置大气污染武排放都毫无例外的采用了限制排放浓度或绝对排放量的显性标准。下表列出了欧共体大 500MW 的电站 NOx 排放标准。

表 1-2 欧共体大于 500MW 电站 NOx 排放标准

	燃料	mg/nm^3	ppm
NOx	固体	650	317
	液体	450	219
	瓦斯	350	170

我国于 1991 年颁布的《燃煤电厂大气污染物排放标准》（GB13223-91）中，按照大气扩散模型、根据电厂容量、烟囱高度、当地气象条件等计算出排放限制的隐性标准。总的来说其排放标准还较为落后。

第二章 NOx的生成机理和控制方法

§2.1 NOx的生成机理

在煤粉燃烧过程中，生成 NOx 的通经主要由三个：热力型、燃料型和快速型。

(1) 热力型 NOx (Thermal NOx)，它是空气中的氮气在高温下直接氧化而生成的 NOx；

(2) 燃料型 NOx (Fuel NOx)，它是燃料中含有的氮化合物在燃烧过程中热分解而又接着氧化而生成的 NOx；

(3) 快速型 NOx (Prompt NOx)，它是燃烧时空气中的氮和燃料中的碳氢离子团如 CH 等反应生成的 NOx。

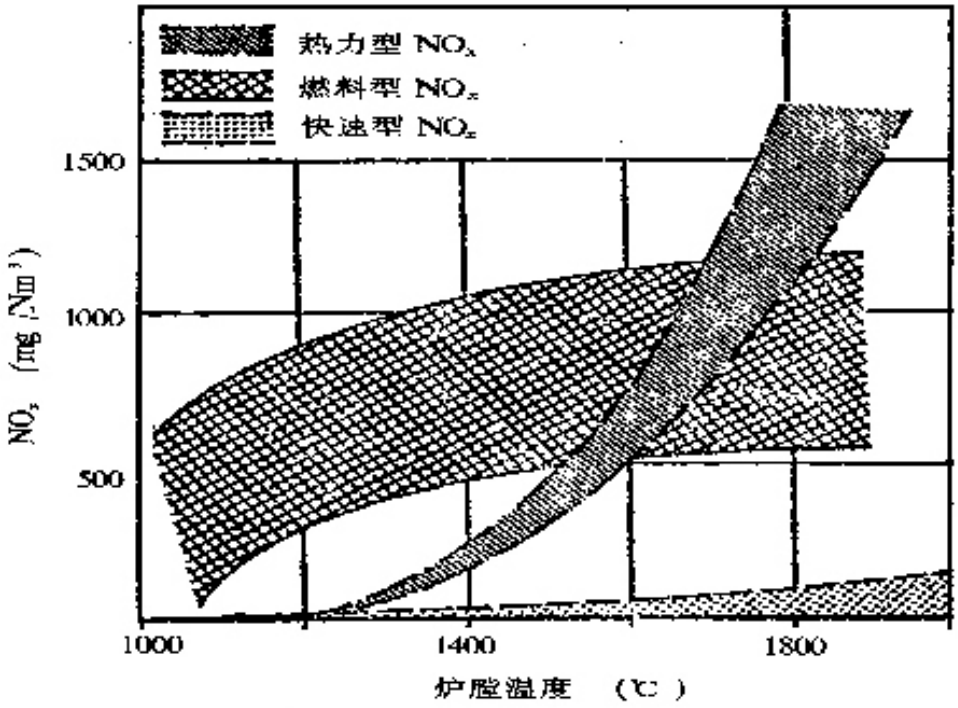

图 2-1 NOx 的各种生成方式的生成量的范围以及与温度的关系

图 2-1 是煤分炉中三种类型的 NOx，各自的生成量的范围以及与炉膛温度的关系。由图可见，燃料型 NOx 是主要的，占 NOx 生成总量的 60~80%以上；热力型 NOx 的生成与温度关系很大，在炉膛温度高于 1500 度时不可忽略，可占到 NOx 生成总量的 20%以上。快速型 NOx 在煤粉燃烧中生成较少。

煤粉炉中生成的 NOx 主要是 NO 和 NO_2，生成的 NOx 中，NO 约占到 90%以上，NO_2 占 5~10%，N_2O 约占 1%左右，研究煤粉燃烧过程中产生的 NOx 的生成机理，主要是研究 NO 的生成和控制。NOx 的生成和排放与煤的种类、燃烧方式、炉膛温度以及空气过量系数等因素有关。例如：液体排渣炉炉膛燃烧温度较高，有大量热力型的 NOx 生成，所以液体排渣炉要比同条件下的固体排渣炉 NOx 的浓度大；即使是固体排渣炉，由于燃烧器的布置方式不同，NOx 的排放也有很大差别。所以

研究煤粉炉中 NOx 的生成机理有重要意义。

§2.1.1 热力型

热力型 NOx 时燃烧时空气中的氮(N_2)和氧气(O_2)在高温下直接反应产生的,有一氧化氮(NO)和二氧化氮(NO_2)，其生成机理可用以下反应式表示：

$$O_2+M<==>2O+M \quad (2\text{-}1)$$

$$O+N_2<==>NO+N \quad (2\text{-}2)$$

$$N+O_2<==>NO+O \quad (2\text{-}3)$$

$$N_2+O_2<==>2NO \quad (2\text{-}4)$$

$$NO+1/2\ O_2<==>NO_2 \quad (2\text{-}5)$$

反应式 2-4 的压力平衡常数与温度关系密切，当温度低于 1000K 时，此平衡常数的值非常小，也就是说 NO 的生成浓度非常小，当温度为 1300~1500℃时，会有 500~1000ppm 的 NOx 生成，NOx 的生成几乎是随温度指数增加的,燃烧温度低于 1500℃时，几乎观测不到 NOx 的生成,当温度高于 1500℃时,温度每升高 100℃,热力型 NOx 的生成就会增加 6~7 倍，温度对热力型 NOx 的生成是起决定作用的。除温度因素外，热力型 NOx 的生成还与烟气中的 O_2、N_2 浓度有关，浓度大时，有较多的 NOx 生成。表 1-2 列出了在 N_2、O_2 4：1 和 40：1 两种情况下，NOx 生成的浓度值。在 4：1 时大致相当于空气，忽略 CO_2 和水蒸气等气体；40：1 时相当于在过量空气系数为 1 时生成的烟气。

表 2-1 (N_2/O_2 初始浓度为 4：1 和 40：1)NOx 的生成浓度与温度的关系表

T（K）	$4N_2/O_2$ (ppm)	$40\ N_2/O_2$ (ppm)
1200	210	80
1500	1300	500
1800	4400	1650
2000	8000	2950
2200	13100	4800
2400	19800	7000

反应式 2-4 的压力平衡常数随温度的升高而减小，因此低温更有利于生成 NO_2，当温度高于 1000℃时，NO_2 大量分解为 NO，此时 NO_2 的生成量比 NO 小得多。

在燃烧温度大于 1200℃的常规燃烧器中，不采取控制措施时，会有数百至一千个 ppm 的 NO 生成，NO_2 的生成却可忽略不计；理论上当烟气温度降低到排烟水平时，几乎所有的 NO 都将转变为 NO_2，实际上由于反应 1-5 速度很慢，在高温下仍将以 NO 的形式排入大气，排放到大气的 NO 浓度很低时，它将在大气中存在很长时间。

在实际燃烧中，热力型 NOx 不是由反应式 2-4 直接产生的，而是由式 2-1、2-2、2-3 不分组的连锁反应产生的，空气中 N_2 种的三键的键能很大，在煤粉燃烧条件下是很难打破的，所以温度对热力型的 NOx 生成具有决定的意义。NOx 的生成随温度增加几乎是成指数的，在小于 1500℃时，几乎观测不到 NOx 的生成反应，只有在高于 1500℃时，NO 的生成反应才明显起来，温度高于 2000℃时，将会有大量的 NO 生成。温度达到 1500℃时，每升高 100℃，反应速度将增加 6~7 倍。

热力型 NOx 的生成除与温度有关外，还与 N2、O_2 浓度的平方根以及停留时间有关。空气过量

系数和煤粉的停留时间对 NOx 的生成有很大的影响。

因此，为了控制热力型 NOx 的生成，就需要：降低局部温度，避免产生局部高温区；缩短烟气在炉内高温区的停留时间；降低烟气中氧的浓度；使燃烧尽量在偏离理论空气量的条件下进行。具体措施在后章介绍。

§2.1.2 燃料型

煤粉中都含有氮元素，大约在 0.5~2.5%左右，它们以氮原子的状态与各种碳氢化合物结合成氮的环状化合物或链状化合物，如喹啉（C_5H_5N）和芳香胺（$C_5H_5NH_2$）等，其中的 C-N 键能比空气中的 N-N 键能小的多，燃烧时更容易分解出来，更容易生成 NO。这种从燃料中的氮化合物经热分解和氧化反应而生成的 NOx 称为燃料型 NOx。当燃料中的氮元素含量超过 0.1%时，生成的 NO 在烟气中的浓度会超过 130ppm，

煤粉燃烧时约有 75~90% 的 NOx 是燃料型的 NOx，燃料型的 NOx 是燃烧时产生 NOx 的主要来源。研究燃料型 NOx 的生成和破坏机理，对有效的控制 NOx 的排放是非常重要的。燃料型 NOx 的生成机理比较复杂，大致有以下的规律。

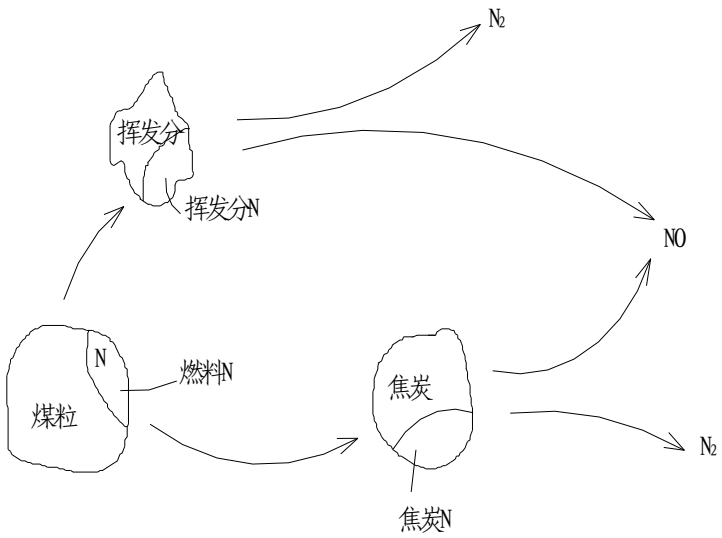

图 2-2 燃料中氮分解为挥发分 N 和焦炭 N 的示意图

煤粉中有部分的N元素在挥发分中，生成氢氢酸（HCN）、氨（NH_3）和 NH 等中间产物，随挥发分一起析出上边两种中间产物的比例与煤种、热解温度和加热速度等有关。煤种的挥发分增加、热解温度加热速度提高时，挥发分 N 的比例增加，反之，焦炭 N 的比例增加。

挥发分 N 中的中间产物主要由 HCN 和 NH_3，二者的比例与煤种的好坏、煤中氮的化合物形式以及燃烧温度等有关。挥发分 N 的生成产物 HCN 和 NH_3 在进一步氧化时，都有两条路可走，如下表反应式所示：

表 2-2 N 的各种中间产物在不同气氛下的反应表

中间产物	氧化气氛	还原气氛

HCN	HCN+O——>NCO+H NCO+O——>NO+CO NCO+OH——>NO+CO+H	HCN+O——>NCO+H NCO+H——>NH+H2
NH	NH+ O_2——>NO+OH NH+O——>NO+H NH+OH——>NO+H_2	NH+H——>N+ H_2 NH+NO——> N_2+OH
NH_3	NH_3+OH——>NH_2+H_2O NH_3+O——>NH_2+OH NH_3+H——>NH_2+ H_2	NH+NO——>N_2+OH NH+H——>N_2+ H_2 NH+OH——>N_2+H_2O

焦炭 N 的反应活性比碳的反应活性大，所以焦炭 N 的 NOx 是在火焰尾部焦炭燃烧区生成的，因为此处的氧浓度较低，焦炭具有还原性，所以焦炭 N 生成 NOx 的量较少，大部分生成的是 N_2。反应的方程式如下：

NO+C——>CN+O (2-6)

NO+NH——>N_2+OH (2-7)

NO+CH——>HCN+H_2O (2-8)

NO+CH_3——>N_2+OH (2-9)

2NO+2C——>N_2+2CO (2-10)

2NO+2CO——>N_2+CO_2 (2-11)

2NO+2H_2——>N_2+2H_2O (2-12)

在一般的燃烧条件下，煤粉燃烧生成的 NOx 主要是由挥发分 N 反应生成的。要求在氧化性气氛条件下才生成 NOx，当遇到还原性气氛（富燃料燃烧或欠氧燃烧）时，还会还原成 N_2，所以可以在燃烧过程中通过控制燃烧条件来控制 NOx 的生成，后面具体分析 NOx 的破坏过程和低 NOx 燃烧技术。

§2.1.3 快速型

快速型 NOx 是碳氢化合物燃料燃烧在燃料过浓时，在反应区附近会快速生成 NOx，它是燃料燃烧产生的烃（CHi）等撞击空气中的 N_2 分子而生成的。如空气过量系数为 0.7~0.8 的天然气燃烧时，生成的几乎全部是快速型的 NOx。1971 年，费尼莫尔（Fenimore）发现了快速型的 NOx，并提出了反应的生成机理。快速型的 NOx 的生成机理可由图 2-3 所示：

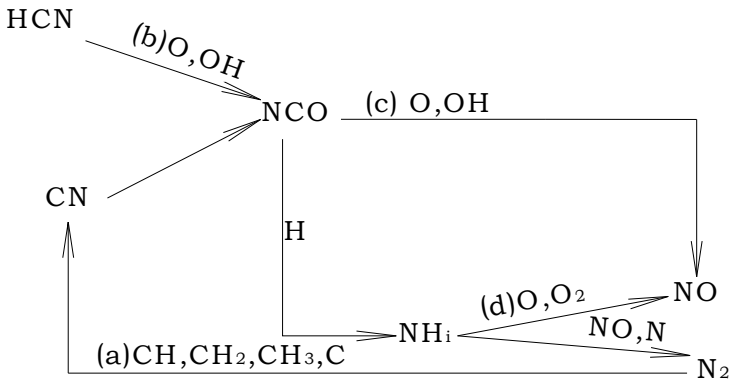

图 2-3 快速型 NOx 的生成途径示意图

快速型 NOx 是由空气中的氮（N_2）经氧化生成的，它的来源类似于热力型，但是它的产生过程类似于燃料型的 NOx。快速型的 NOx 多产生于氧气浓度较低的富燃料燃烧情况，对于煤粉来说，这种条件不是很明显，所以快速型 NOx 生成不多。而且快速型的 NOx 对温度的依赖性弱，所以只有低温时才考虑，高温时热力型 NOx 较多，而快速型可以忽略。由于热力型 NOx 的反应过程与燃料型类似，故也可通过破坏过程来降低 NOx。NOx 的破坏过程如 § 2.1.4 节。

§ 2.1.4 NOx的破坏反应

由上所述，NOx 在还原性气氛下，会还原成 N_2。这称为 NOx 的还原或 NOx 的破坏。所以炉膛中最初生成的 NOx 并非最终排放浓度，还有一部分将破坏而生成 N_2，N_2 是组成大气的基本气体，无害无污染，所以降低 NOx 排放的一个重要方法就是将生成 NOx 还原为 N_2。NOx 的最终排放浓度是烟气中生成的 NOx 和破坏的 NOx 的综合效果。

NO 的破坏反应过程可由下图表示，共有三种途径：

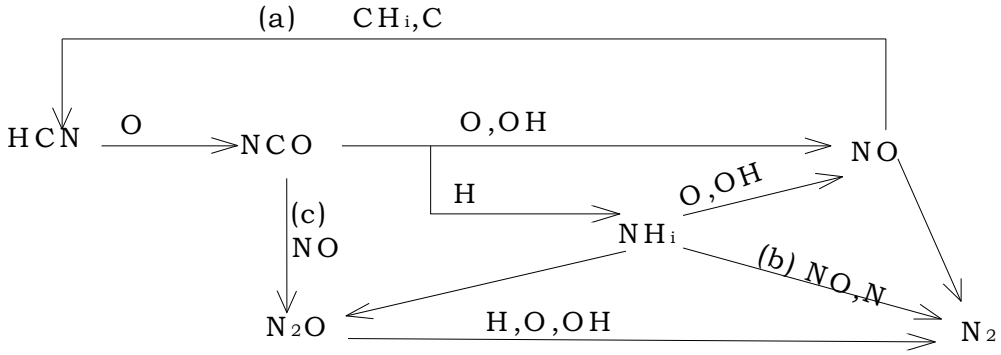

图 2-4 NOx 破坏的反应途径

↓、NCO、CN、NH_i 等，然后经进一步还原生成 N_2，图 2-4 的这种反应过程称为 NO 的再燃烧或分级燃烧，根

据这一原理可发展出天然气或其它烃类或细煤粉喷入含有NOx的燃烧产物中进行分级燃烧或称为再燃烧的技术，可有效的控制 NOx 的排放浓度。

§2.2 NOx的控制技术

由上所述，NOx 与 SO_2 的控制不同，NOx 的生成与温度、燃烧气氛、浓度以及停留时间等因素有关，NOx 在燃烧过程中可以破坏，还原成 NOx，所以可以在燃烧过程中控制 NOx 的生成。NOx 的产生过程有燃料型、热力型以及快速型三种机理，其生成条件和生成途径都不同。在煤粉的燃烧过程中，快速型 NOx 所占比例不到 5%；热力型与温度密切相关，温度低于 1500℃时相比可以忽略。对于常规的煤粉燃烧，NOx 主要是通过燃料型生成的，因此，控制和减少 NOx 的排放，主要是控制燃料型的 NOx 的生成。由燃料型 NOx 的生成和破坏机理可知，为了减少燃料型 NOx，有两种方法：要尽可能地抑制 NOx 的生成；对已生成的 NOx，还要创造条件尽可能地促使它们的破坏和还原。两种方法可以互相补充。

控制 NOx 排放的技术措施也可分为两大类：一类是一次措施，即通过各种技术手段，控制燃烧过程中 NOx 的生成量。另一类是二次措施，即将已经生成的 NOx 通过某种手段从烟气中脱除掉，从而降低 NOx 的排放量，称为烟气脱销。由于烟气脱硝装置投资和运行费用都十分昂贵，常采用的方法是低 NOx 燃烧技术。

低 NOx 燃烧技术的发展过程，可大致划分为三代：第一代低 NOx 燃烧技术不要求对燃烧系统做大的改动，只是对燃烧设备的运行方式或部分运行方式做调整或改进，如浓淡燃烧技术。第二代低 NOx 燃烧技术的特征是燃烧空气分级送入燃烧设备，从而降低初始燃烧区的氧浓度，通过焦炭等将已生成的 NOx 部分还原成 N_2，如 OFA 技术。第三代低 NOx 燃烧技术的主要特征是空气和燃料都分级送入炉膛，燃料分级送入可在燃烧器区的下游形成一个富集 NH_3、C_nH_m、HCN 的低氧还原区，燃烧产物通过此区域时， 已生成的 NOx 会部分地被还原为 N_2，如三级燃烧技术，可使 NOx 排放降低 60％以上。

为了 NOx 排放最小，在燃烧区必须将燃料氮转化为氮分子，并且空气过量系数小于 1。这些措施有：空气分级（配有或不配有可分离的还原室），燃料分级和烟气再循环。如果能满足以下条件：空气过量系数 0.7~0.8、还原室的温度 1100~1200℃，停留时间 0.3~0.5S，那么配有分离还原室的空气分级法可使 NOx 降低 40%~75%。燃料分级也显示出类似的降低 NOx 的潜力。对于空气分级来说，NOx 的减少主要受还原燃烧室中空气过量系数的影响。燃料分级只能用于大型的燃烧装置，而空气分级应用规模较大。

如果以上措施还不行，可以采用通过注入氨盐，氨或尿素的选择性催化或选择性非催化方式（SCR，SNCR）减少 NOx 的二次辅助方法。NOx 的选择性催化还原过程受氨漏泄量的限制，对于温度要求较高，保证温度介于 840~920℃是很必要的。为了在低空气过量系数下燃烧，而且控制温度不超过限制条件，在选择性非催化还原过程之前，局部热量的抽取是必要的。通过 SNCR 过程，NOx 可还原 60%~80%，这有赖于燃料的组分和燃烧时的条件。SCR 方式可使 NOx 还原超过 80%，甚至可达到 95%。

本实验台的设计即为研究分级燃烧技术，包括空气分级和燃料分级，因此，本文将主要介绍空气分级燃烧技术和燃料分级燃烧技术。

§2.2.1 空气分级燃烧技术

空气分级低 NOx 燃烧技术是基于第二代低 NOx 燃烧技术发展起来的先进低 NOx 燃烧技术，图

2-5 所示为空气分段燃烧的示意图。采用空气分段燃烧降低 NOx 的原理是：在煤粉的主燃区中缺氧燃烧，使燃烧空气量减少到总燃烧空气量的 70%~75%左右，此时主燃区的过量空气系数小于 1，因而降低了燃烧区内的燃烧速度和温度水平，不但延迟了燃烧过程，还在还原性气氛中降低了生成 NOx 的反应率，抑制了 NOx 的生成。热力型和燃料型 NOx 的生成都与氧浓度有关，降低 NOx 效果很明显。主燃区的空气量不够，所以在主燃烧区上方布置了其余空气通过的专门空气喷口 OFA（over fire air），称为“火上风”或燃尽风喷口，空气与主燃区贫氧燃烧产生的烟气混合，在过量空气系数>1 的条件下完成全部燃烧。在此区域内，虽然空气有剩余，但是温度已经有所降低，因此也能抑制 NOx 的生成。整个燃烧过程是分为两级进行的，所以称为空气分级燃烧，弥补了简单的低过量空气系数燃烧的缺点。

空气分级燃烧如果布置不当，也会产生很多问题。第一级和第二级风的分配要恰当，如果分配不当，或炉内空气混合条件不好，煤粉的燃烧不够均匀，仍会增加不完全燃烧损失。另外，由于炉内有局部为还原性气氛，也使煤粉的灰熔点降低，容易引起受热面的结渣腐蚀等问题。在主燃烧区内，空气过量系数<1，燃烧是在低于理论空气量的情况下进行，十分有利于抑制 NOx 的生成，主燃烧区内的空气过量系数越小，越有利于抑制 NOx 的生成，但是产生的不完全燃烧产物也越多，也越容易引起结渣和腐蚀。因此，为了保证燃烧的经济性和可靠性，又要降低 NOx 的排放，必须正确的组织空气分级燃烧过程。

首先要保证主燃烧区的空气过量系数，在主燃烧区内形成“富燃料燃烧”（贫氧燃烧），尽可能地减少 NOx 的生成，并且要保证稳定燃烧。当总的过量空气系数不变，而主燃烧区的过量空气降低时，NOx 的生成量降低。例如当主燃烧区的过量空气系数为 0.8 时，NOx 的生成量要比正常燃烧情况下的过量空气系数为 1.2 时降低 50%，而且燃烧也比较稳定。当主燃区的过量空气系数进一步降低时，将会有大量的 HCN 和 NH_3 生成，当过量空气系数为 0.6 时，浓度甚至高于 NOx 的浓度。生成的 HCN 和 NH_3 由于在燃尽区氧化成 NOx，将会引起 NOx 排放浓度的升高。因此主燃区的过量空气系数不宜低于 0.7，燃料中的含氮量越大，在相同的过量空气条件下，NOx 的生成量也越大，具体的数值应参照煤粉的种类以及燃烧器的布置方式。

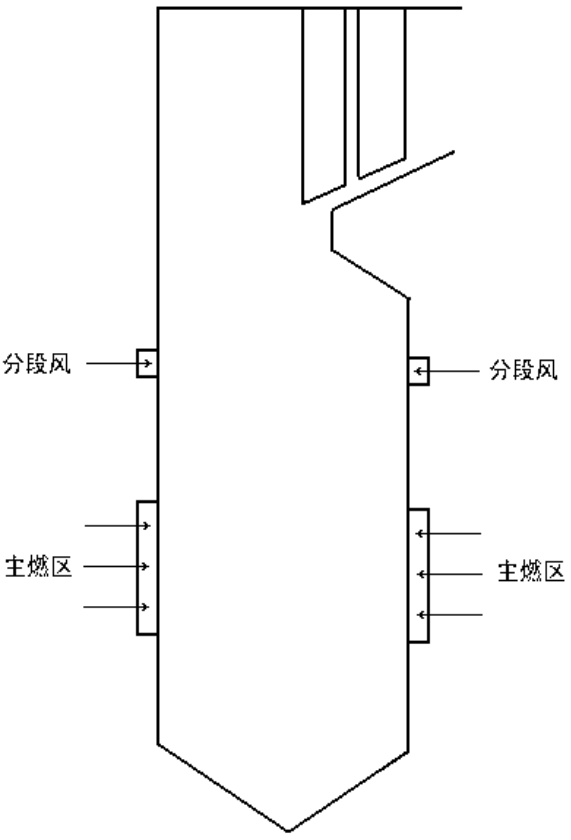

图 2-5 空气分段燃烧布置示意图

温度对分级燃烧也有影响。在主燃区内，还原性气氛下的温度越高，NOx 的降低率也越大，在燃尽区内，过量空气系数>1 的氧化性气氛下温度越高，NOx 的排放也越多。不同的煤种，特性不同，燃烧区所需温度也不同，所以应根据不同的煤种，确定合理的温度，将 NOx 的
排放浓度降到最低。

对于不同的煤种，停留时间对降低 NOx 的影响也是不同的。烟气在主燃区的停留时间取决于“火上风”喷口距主燃烧器的距离和布置。停留时间不同，达到最低 NOx 排放值时的最佳过量空气系数是不相同的。对于不同的煤种特性，要达到一定的 NOx 降低率，烟气在一级燃烧区内的停留时间和相应的过量空气系数是不相同的。为了使烟气中的 NOx 能长一点时间被还原，降低其排放量，二次风喷的应该晚一点，这无疑会增长烟气

的停留时间。但这可能会将燃尽过程推迟，不仅降低了燃烧效率，还会引起炉膛出口烟气温度的增加，从而导致炉膛出口结渣以至使管道超温等现象。要根据具体的燃料种类、具体的燃烧方式，确定合适的停留时间。“火上风”喷口的位置和主燃区的过量空气系数共同决定了主燃烧区内 NOx 所能降低的程度。

在空气分级燃烧中，在主燃区中氧的浓度较低，形成了还原性气氛，在还原性气氛中，煤粉的灰熔点会比在氧化性气氛下降低 100~120℃，因此在受热面上容易引起结渣，同时在还原性气氛中还容易腐蚀。因此应采取措施，防止高温还原性烟气与炉膛受热面的直接接触，边界风技术是一种用的很多的技术，可在炉墙上或冷灰斗布置空气槽口，空气以较低的速度通入，可以沿炉壁上升，保证在炉壁的表面温度较低，且又有较好的氧化气氛。“边界风”一般为总风量的 5%左右，可以有效的防止炉膛水冷壁的腐蚀或结渣。

三级空气分级燃烧比两级空气分级具有更好的效果，这是因为，三级空气分级时，可以使第一级的过量空气系数很低，这能使气化室内 NOx 的生成量进一步减少，还会使烟气中的 HCN、NHi 基化合物增加，但为了不使 HCN、NHi 基化合物的浓度过高，以防大量的 HCN、NHi 基化合物进入后面的 α ＞1 的氧化燃烧区(燃尽区)而在其中被氧化生成 NOx，同时，也避免焦炭 N 在气化室内因随着过量空气系数的减少而显著增加而会在后面的燃烧过程中增加焦炭 NOx 的生成量，可在气化室适当的高度增加燃烧空气的喷入。但不是说空气分级越多越好，这涉及到技术上、资金上、还有燃烧装置的规模等很多问题，应切合实际的考虑

空气分段低 NOx 燃烧技术，实施简单，效果明显，运行方便，十分适合我国的国情。

§2.2.2 燃料分级燃烧

所谓再燃烧技术（Reburning Techology）是指在炉膛（燃烧室）内设置再燃燃料欠氧燃烧的 NOx 还原区段，以控制 NOx 的最终生成量的一种“准二次措施”，该技术所以也称为炉内燃料分级燃烧技术。由 NO 的形成和破坏机理可知，已生成的 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。这些反应的总反应式为[2]：

$$4NO+CH_4 \longrightarrow 2N_2+CO_2+2H_2O \quad (2\text{-}12)$$

$$2NO+2C_nH_m+(2n+m/2-1)O_2 \longrightarrow N_2+2nCO_2+mH_2O \quad (2\text{-}13)$$

$$2NO+2CO \longrightarrow N_2+2CO_2 \quad (2\text{-}14)$$

$$2NO+2C \longrightarrow N_2+2CO \quad (2\text{-}15)$$

$$2NO+2H_2 \longrightarrow N_2+2H_2O \quad (2\text{-}16)$$

利用这一原理，将 80%—85%的燃料送入第一级燃烧区，在过量空气系数大于 1 的条件下燃烧并生成 NOx。送入主燃烧区的燃料称为主燃料，其余 15%—20%的燃料则在主燃烧器的上部送入再燃区，在 α<1 的条件下形成很强的还原性气氛，使得在主燃烧区中生成的 NOx 在再燃区内被还原成氮分子(N_2)。送入再燃烧区的燃料称为再燃燃料。在再燃区中，不仅已生成的 NOx 得到还原，同时还可抑制新的 NOx 生成，使 NOx 的排放浓度进一步降低。最后，燃烧产物进入燃尽区，送入燃尽风(OFA)，达到最终完全燃烧目的。燃尽过程中会重新生成少量的 NO，但总的来看，使用炉内再燃烧技术后，煤粉炉最终 NOx 排放量可在主燃烧区采用低 NOx 燃烧器降低 NOx 生成量的基础上，再减少 50%－70%的排放量。因此，采用该技术，使 NOx 排放量控制在 200mg/Nm^3 以下是可以实现的。

再采用分级燃烧时，为了有效降低 NOx 的浓度，再燃区是关键，需要研究再燃区中影响 NOx 浓度的因素。

燃料分级燃烧时所使用的再燃燃料可以是和一次燃料相同的燃料，例如煤粉炉可以利用煤粉作为二次燃料，但煤中的焦炭氮会使 NO 的还原效果降低，因此应尽量使用高挥发分煤种，同时，还原反应使用超细煤粉，以加快挥发分完全燃烧和产生活性基团的速率，也有利于在该段极其短暂停留时间内维持较高燃尽度。从将低飞灰可燃物角度考虑，用煤作为再燃燃料也是一个不利的选择。目前采用更多的是碳氢类气体或液体作为二次燃料，这是因为燃料分级燃烧在炉膛内需要有三级燃烧区。这使得燃料和烟气在再燃区内的停留时间相对较短，所以在燃燃料宜于选用容易着火和燃烧的气体或液体做燃料，如天然气。有利于 NO 分解。

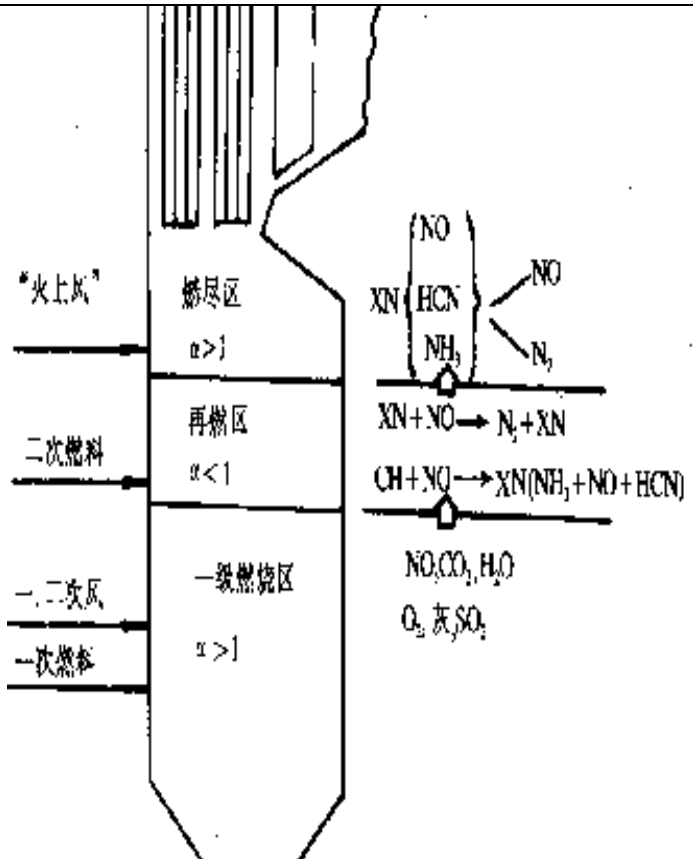

图 2-6 燃料分级燃烧示意图

再燃燃料的性质对还原过程是一个极其重要的影响因素。由燃料分级燃烧原理可知，在再燃区的还原性气氛中最有利于 NOx 还原的成分是烃类(CH_i)，因此选择二次燃料时应采用能在燃烧时产生大量烃根而又不含氮类的物质。虽然天然气、油和煤都可以作为再燃燃料，但从提高炉内再燃烧还原 NOx 的效果来说，天然气最好，天然气中不含燃料氮。二次燃料含有燃料氮将降低还原效率。天然气和油的反应能力强，其生成 NO、HCN、NH_3 等的反应时间极短暂，有利于还原过程速率的提高和 NO 还原反应的进行。与天然气比较，油的碳含量百分比较高，尤其是重油，不容易完全燃尽，在欠氧燃烧时，易析出炭，造成未燃尽损失。左图是用天然气、油和煤作为二次燃料时降低 NOx 浓度效果的比较。显然，天然气是最有效的再燃燃料。天然气中不含有 N，热值较高，H 的比例也比较高，因此，再燃天然气更容易燃尽。天然气中不含 S，也可部分降低 SO2；天然气热值高，还可减排温室气体(CO2)。氢气降低 NOx 的效果最差，这是因为它本身不能产生烃根。

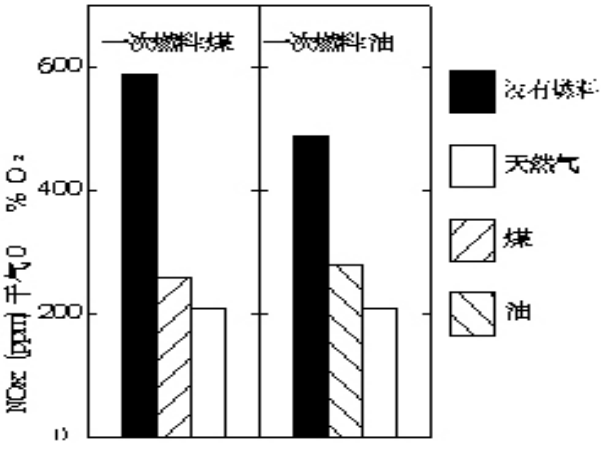

图 2-7 不同的再燃燃料对降低 NOx 的影响

我国的天然气资十分丰富，随着西气东送的实施，可有足够的天然气作为再燃燃料，因此采用天然气再燃烧技术有广阔的应用前景，本实验台的再燃燃料即采用天然气，也可为以后的应用做好技术准备。

再燃燃料的比例对煤粉再燃烧降低 NOx 也有很大影响。有足够数量的再燃燃料才能保证再燃区的还原气氛，也就是再燃区的烃根浓度。但是如果再燃燃料量过多，会造成空气量不足，不能保证再燃燃料的完全燃烧，因此要选定适当的比例。一般情况下，再燃燃料量约占比例 10~20%，不同的燃料比例选取也是不同的，对于煤粉，烟气中的 CO 浓度和飞灰含碳量会显著增加，因此煤粉作为再燃燃料时，其比例应比天然气作为再燃燃料时小。如前文所述，天然气作为再燃燃料由许多优点，因此本实验台的再燃烧采用天然气。

在天然气作为再燃燃料时，再燃区的过量空气系数对 NOx 的浓度有很大影响。因为再燃区的过量空气系数在 0.7~1 之间，对于不同的煤种，取值也是不同的。一般主燃烧区过剩空气系数（煤粉炉、包括液态排渣炉、旋风炉前室）取为 1.1；上部燃尽区为 1.15~1.2。此时产生 NOx 浓度值最低。

在再燃区内的温度越高、停留时间越长，还原反应越充分，NOx 的降低率就越大。再燃区内停留时间长，也就是增加再燃区高度，可以增加总固定氮类化合物 NH_3、HCN、NO 等在还原区的停留时间，并充分分解。由于再燃区位于再燃燃料送入喷口和“燃尽风”喷口之间，因此再燃区停留时间实际上由再燃燃料喷口和“燃尽风”喷口的位置所确定。而再燃燃料喷口的位置还影响主燃烧区的停留时间，如果增加再燃区的停留时间而减少主燃烧区的停留时间，将再燃燃料喷口布置在靠近主燃烧器的位置，不仅会降低燃料的燃尽率，而且会使较多的过量氧进入再燃区而减弱了 NOx 被还原的效果。对不同的燃煤设备，最佳的停留时间不同。再燃区内烟气和燃料的停留时间应该在 0.4-1.5s，但实际应用中，由于条件限制，不可能给出太长的停留时间。在本设计中的试验台中，沿高度方向保留了很多的二次风喷口和天然气喷口，可以保证实验中所需的不同的停留时间实验。而且试验台保密性较好，外边采取了模拟的保温措施，能够保证煤粉及天然气的稳定燃烧，所以总过量空气系数取 1.15，可以满足实验的要求。

主燃烧区 NOx 生成量越低越好，而且煤粉燃尽度尽量高，使进入再燃烧区域的残余氧量尽可能低，以抑制 NOx 的生成。主燃烧区 NOx 排放量较低时，再燃区 NO 还原为 N_2 的还原率下降，但总的 NOx 排放量下降，因此可采取措施降低主燃烧区的 NOx 生成浓度。再燃区高温有利于提高 NOx 的还原反应速率，但 1300℃又是热力型 NOx 生成的转折温度，所以通常要求再燃区的温度水平在 1200℃左右，以保持较高的还原效率。在低 NOx 试验台中，设计的再燃区温度为 1100℃～1300℃之间，可有效的降低 NOx 的排放浓度。

§2.2.3 其他低NOx燃烧技术

低 NOx 实验台所设计的低 NOx 燃烧器与其它的低 NOx 技术关系不大，因此仅简单介绍。

低过量空气燃烧：这是最简单的降低 NOx 排放浓度的方法。使燃烧尽量在接近理论空气量的的条件下进行，可使烟气中过量氧减少，抑制 NOx 的生成。采用低过量空气燃烧可以降低 NOx 排放的 10~20%，但是炉内过量空气系数较低时，有大量的 CO 生成，造成污染，而且还增加化学未燃尽损失；飞灰含碳量也增加，引起机械未完全燃烧损失；低过量空气系数形成还原性气氛，还会造成腐蚀、结渣等的可能性。降低 NOx 的排放是建立在牺牲炉膛燃烧效率的基础上的，因此需要综合考虑。

烟气再循环：烟气再循环也是目前使用较多的低 NOx 燃烧技术。它是在锅炉的空气预热器前抽出一部分烟气，送入炉内燃烧区。由于循环烟气中氧的含量极低，所以不仅可以降低燃烧温度，还可以降低燃烧区氧的浓度，因而可以降低 NOx 的排放浓度。烟气再循环降低 NOx 的效果与煤粉的品种以及烟气再循环效率有关，烟气再循环率为 15~20%时，可降低 NOx 排放的 25%。但是如果采用烟气再循环，燃烧会趋于不稳定，未燃烧损失也将增加；同时采用烟气再循环，需要加装载循环风机、烟道，需要场地，又增加了损失，系统也比较复杂，需要具体的技术经济比较后选取。

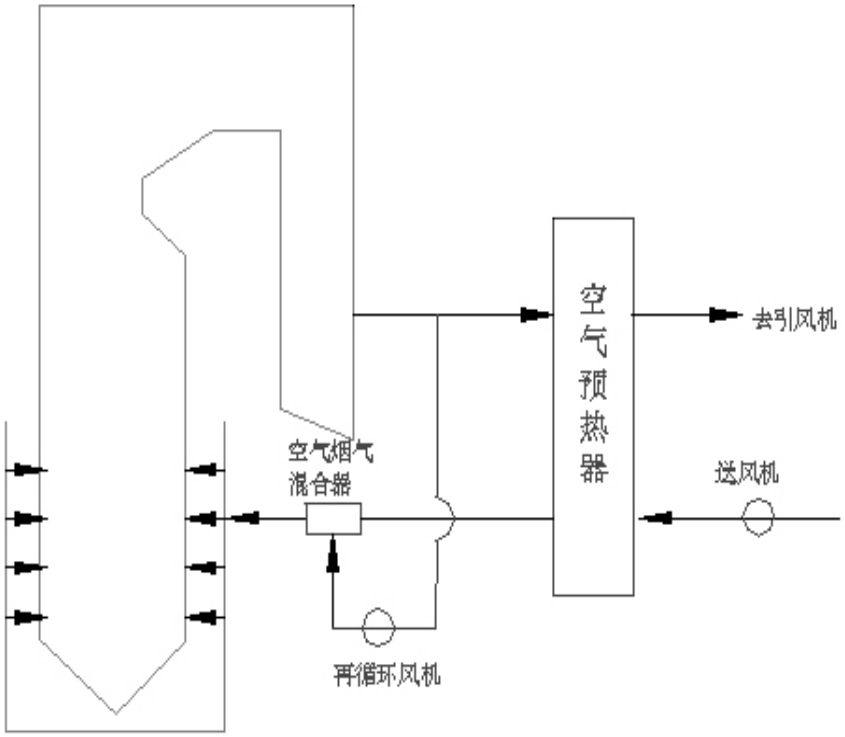

图 2-8 锅炉烟气再循环系统

§2.3 二次措施

前面所讲到的几种低 NOx 燃烧技术是实际应用中较普遍也很经济的技术措施，但如想进一步的降低 NOx 的排放，光靠这些措施是不行的。比如在瑞士，为了达到空气污染控制条例（OAPC）规定的 250mg/m^3 的排放标准，规模>1~2MW 的锅炉就很有必要采取二次措施。二次措施主要有：选择性催化剂法 SCR（Selective Catalytic Reduction）和选择性非催化剂法 SNCR（Selective Non-Catalytic Reduction）。

首先介绍炉膛喷射脱硝。炉膛喷射脱硝包括炉膛喷水、喷射二次燃料及喷氨等。炉膛喷水在实际应用中可能不太现实；喷射二次燃料实际上就是上面所讲的燃料分级燃烧。向炉膛喷射二次燃料，就是前面已经详细讨论过的燃料分级燃烧。但是二次燃料在炉膛中不会只选择烟气中的 NOx 与之反应，它们也会同时和烟气中的氧起氧化反应，从而会使二次燃料消耗量过大，而且它们的燃烧反应还会使烟气温度上升。这种方法称为非选择性降低 NOx 排放法，它在实用上实际也有一定的限度。

向烟气喷射氨、尿素等氨基还原剂，因为 NH_3 只和烟气中的 NOx 发生反应，一般并不与烟气中的氧发生反应，这种有选择的化学反应就是所讲的选择性降低 NOx 法。

选择性降低 NOx 法又可细分为两种。只向燃烧烟气喷氨而不采用催化剂的条件下 NH_3 还原 NOx 的反应只能在 950—1050℃这一狭窄的温度范围内进行。这就是选择性非催化脱硝法 SNCR。另外一种就是选择性催化脱硝法 SCR，实际上它又是一种干法脱硝的烟气处理技术，反应温度取决于所用的催化剂，这种方法在西欧和日本应用较广泛。

常用的重要还原剂有：

1 . 氨（NH_3） 常压下为气态，通常用增压容器存储。NH_3 是有毒的，有刺激性气味。

2. 氨盐比氨更易贮存，气味与氨相似。

3. 尿素 （NH_2）$_2CO$ 是常以颗粒形式贮存的白色固态粉末，通常溶解在水中作还原剂使用，尿素容易搬运且无气味。

§2.3.1 基本原理

不管是选择性催化剂法 SCR 还是选择性非催化剂法 SNCR，其反应机理都是相似的。如果喷入的还原剂是 NH_i 基化合物，那么烟气中的 NO 就与 NHi 基化合物（主要是 NH_2）发生还原反应，如式 2—17 所示。如果还原剂是尿素，则必须在参与反应之前先受热分解才行，只有这样才能有大量的 NHi 基化合物产生，因此温度至少要达到 250~300℃。反应方程式也可如式 2—17 所示。

$$4NO + 4NH_3 + O_2 \text{——>} 4N_2 + 6H_2O \qquad (2—17)$$

但在反应过程中还会有我们不希望的副反应发生，如式 2—7、2—8 所示。同时在过程中还会有 NH_3 漏泄损耗，可用式 2—9 表示。

$$4NH_3 + 5O_2 \text{——>} 4H_2O + 6H_2O \qquad (2—18)$$

$$4NH_3 + 3O_2 \text{——>} 2N_2 + 6H_2O \qquad (2—19)$$

$$NH_3 \text{ ——> } NH_3 \qquad (2—20)$$

需特别说明的是，反应（2—11）实际上是受其过程中产生的 NH_2 主导整个反应。这与一次措施中的反应式相同：$NO + NH_2$ ——>$N_2 + H_2O$ 。据研究表明，反应 2—6 所需的最佳温度大约 850℃左右，或着必须有催化剂参与才能顺利进行。

如果温度超过了 950℃，副反应（2—18）和（2—19）就变得越来越厉害。因此，不用催化剂的条件下，NOx 还原反应就有一个最佳的温度幅度：850~950℃ 。由于副反应（2—19）过多的损耗了 NH_3，因此还需要过量的还原剂。还原剂的摩尔比如下定义：

$$n=NH_3/NOx（mol/mol）$$

$$其中\ NOx=NO+NO_2（mol） \qquad (2—21)$$

根据经验，一般以摩尔比 n 为 1 左右最好，虽实际很难做到，但太大的话，喷入的氨在炉膛内不能充分反应，就会“泄漏”到锅炉的尾部受热面，与灰中的某些成分反应，生成粘性物质导致积灰、结渣，并有腐蚀的危险，所以对摩尔比 n 的控制也很重要。

§2.3.2 选择性无催化还原（SNCR）

前面已对这种方法做了简述。对选择性无催化还原来说，反应温度是最重要的。据研究，用这种方法，NOx 最佳的还原效果，通常是在温度为 850~950℃之间达到的，同时具体的效果还要受还原剂和其他参数的影响。根据 T • NUSSBAUMER 教授提供的资料，在一带还原室的使用选择性无催化还原法的用尿素做还原剂的试验炉上做的实验显示，最为合适的温度为 840~920℃之间。在实际操作上，可通过喷入 H_2 或酒精（能产生 OH 基团）来适当降低温度，也可喷入一部分甲烷来适当提高反应温度（因为其可和 OH 发生反应产生热量）。

同样根据 T •NUSSBAUMER 教授提供的在一 500KW 链条炉上所做的试验数据显示，要使 NOx 的还原率达到 50%，就要把大量的还原剂喷入炉膛，摩尔数 n 可达 3 甚至 5，由于摩尔比过达，大大增加了 NH_3 的泄漏量，（>30mg/m^3）。图 2—18 也表明，如果 $n=NH_3/NOx$ 过大会有利 NOx 的还原，但也使 NH_3 的泄漏量增加。

据国外研究，还原剂与烟气的混合不充分，是导致 NH_3 大量“泄漏”的一个重要因素。因此若使用 SNCR 法来控制 NOx 的排放，还原剂与烟气，因此就有必要增设一还原室，使反应气体能在其

中停留的时间>0. .3~0. 5S，从而可以良好混合。

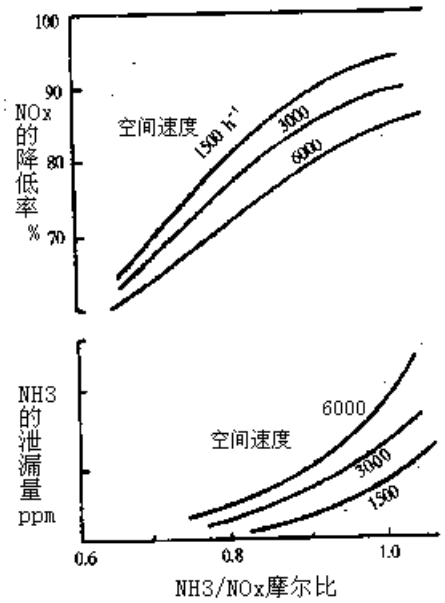

图 2—9 NH_3 的摩尔比和 NOx 降低率及 NOx 泄漏量之间的关系

为了研究燃烧生物质时 SNCR 方法对还原 NOx 的潜力，瑞士的一个实验室搭建了一个能定量加料，带分离还原室的实验台，如图 2—19 所示。如果燃料是木质残留物，在摩尔比 n=2、反应温度为 900℃的条件下，由实验可知，NH_3 的泄漏量<10mg/m^3， NOx 被还原了 60~90%。对于气态氨来说，0.3S 的停留时间是足够的，而尿素和氨盐则需 1S。

另外从实验中还发现，如果使用的还原剂是 尿素，在特定条件下，将会有 N_2O 生成。不过浓度一般很小，小于 5mg/m^3 。

图 2—11 是一配有 NOx、SNCR 技术的以木材为燃料的大型燃烧装置流程图。如果把锯末作为再燃燃料射入，通过燃料分级就可降低 NOx。但如没有以锯末作为再燃燃料的燃料分级技术，炉子只有在过量空气系数小于 1 条件下运行，炉排上方的空间起到还原室作用。

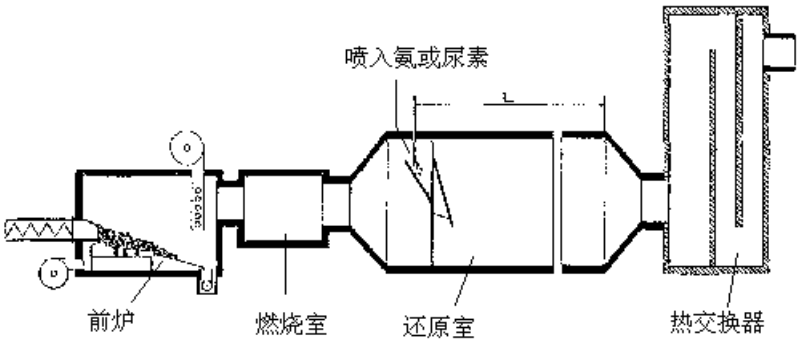

图 2—10 SCNR 方法试验装置图

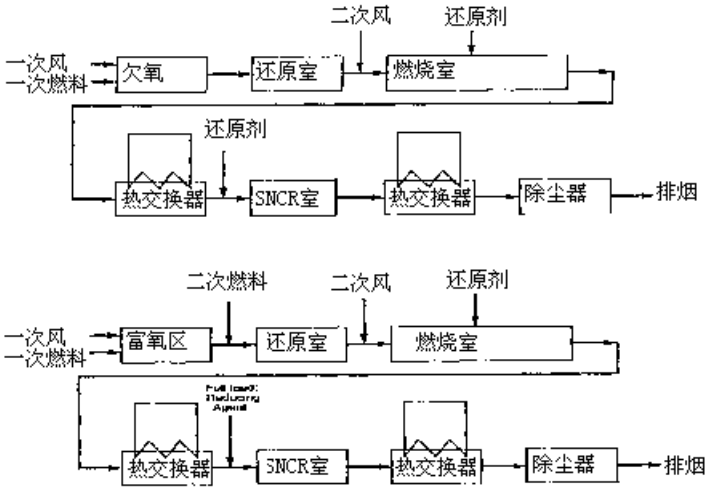

图 2—11 均带有二次措施 SNCR 的试验装置

上：一次措施为空气分级燃烧技术

下：一次措施为燃料分级燃烧技

图 2—12 则是从在实验装置 2—19 所做的试验中得出的曲线图，燃料是木质碎片，温度 850—930℃，含 N 量 1—2%。从图中可以看到停留时间对减少 NOx 的排放有很大的影响，同时停留时间增长也可减少 NH_3 的泄漏量。所以，如条件许可应尽可能的延长停留时间，但不能太长，否则排烟温度太高，增大热损失。

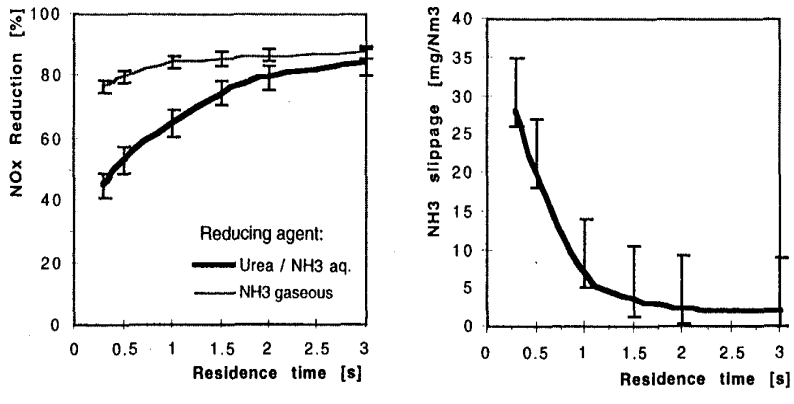

图 2—12 停留时间对 NOx 还原率及氨泄漏量的影响

§2.3.3 选择性催化还原（SCR）

根据以前的研究，对于使用氨做还原剂的 SCR 过程，不管催化剂是 TiO_2、V_2O_5 还是 WO_3，所需的催化温度都必须满足 220~270℃，使用尿素做还原剂时，相同的催化剂，但温度要在 400℃到 450℃之间才可。从国外提供的实验数据可得，对木材燃料，摩尔比 n=0. 9~1、催化温度大于 250℃时，NOx 还原率大于 90%。如果 0. 7< n < 2 时，NH_3 的泄漏量<10mg/m^3。

另外，从国外的研究情况来看，SCR 方法显示了极大的降低 NOx 的潜力。像 SNCR 过程一样，尽

管氨的泄漏量对 SCR 来说是次要问题，但如前所述，因在炉膛尾部 NH_3 可能会和烟尘中的 硫、氯等反应形成粘性的（NH_4）HSO_4、（NH_4）$_2SO_4$、（NH_4）Cl 等盐分，会导致严重的积垢问题，特别是在催化温度低于 250℃时，问题尤为突出。由于投入高，所以很少有生物质燃烧装置装备 SCR 系统，况且长期运行的经验也不足。但从长远的发展角度考虑，生物质燃烧系统的 SCR 技术必定会在将来大规模的投入应用，国内外正在对此深入研究。

§2.4 本章小结

本章着重介绍 NOx 的生成机理与控制方法。NOx 的生成机理有三种：热力型、快速型和燃料型。针对不同的生成机理，接下来讲到了抑制 NOx 生成的两种主要方法：空气分级燃烧和燃料分级燃烧。前者是通过限制空气量延迟燃烧过程，抑制 NOx 的生成；后者限制燃料的投入量，通过再燃燃料抑制 NOx 生成并还原一部分已经生成的 NOx。本章还介绍了其他几种低 NOx 燃烧技术，包括低过量空气燃烧、烟气再循环、选择性无催化还原和选择性催化还原等。

第三章 低NOx实验台与阻力计算

§3.1 实验台

§3.1.1 试验台概况

本实验台是参照德国斯图加特大学 20KW BTS 实验台设计的。实验台主要是研究如何通过空气分级和燃料分级燃烧的方式降低 NOx 的排放，以及确定当获得最低的 NOx 排放时，空气分级和燃料分级燃烧的参数如何选取。从而通过比较研究，确定低 NOx 排放的最佳燃烧方式。

实验台模拟锅炉实际燃烧沿垂直方向上一维燃烧工况，也即在实际锅炉燃烧中，将竖直方向上某条线上的燃烧情况取出来进行研究，从而可以研究整个锅炉的燃烧状况，因此，本实验台也可称为一维炉。实验台的负荷较小，煤粉的发热量有可能不够，不能保证稳定燃烧，所以采用了电加热的措施，其中也主要为了模拟炉膛中周围的烟气火焰对所取燃烧工况的加热状况。

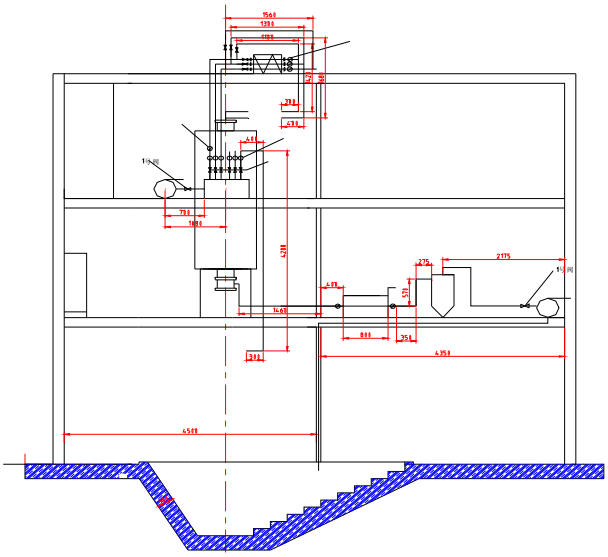

图 3-1 实验台系统示意图

实验台主要是研究空气分级燃烧和燃料分级燃烧对降低 NOx 排放的影响的。空气分级燃烧通过分级燃烧喷孔进行，试验中，可以将燃料分级燃烧的阀门关掉，送入分级风（分段风），改变燃烧状况，在炉膛中形成富燃料的主燃烧区和分级送风的燃尽区，从而可达到分级燃烧的效果，可以降低 NOx 的排放。试验时，通过改变分级燃烧的喷孔位置可以改变炉内煤粉的停留时间，通过改变风机的功率可以改变主燃烧区和再燃烧区的空气过量系数，通过改变电加热或天然气烟气加热的强度可以改变主燃烧区和再燃烧区的温度，从而可以确定这些因素对降低排放 NOx 的影响，可以确定在空

气分级燃烧时低 NOx 排放的最佳条件。

燃料分级燃烧是通过增加再燃烧喷孔和燃尽风喷孔来进行的。在燃料分级燃烧时，将 80%—85%的燃料送入第一级燃烧区，在过量空气系数＞1 的条件下燃烧并生成 NOx，其余 15%—20%的燃料则在主燃烧器的上部送入再燃区，在 α＜1 的条件下形成很强的还原性气氛，使得在主燃烧区中生成的 NOx 在再燃区内被还原成氮分子(N_2)，在再燃区中，不仅已生成的 NOx 得到还原，同时还可抑制新的 NOx 生成，使 NOx 的排放浓度进一步降低。最后，燃烧产物进入燃尽区，送入燃尽风(OFA)，达到最终完全燃烧的目的。和空气分级燃烧相比，燃料分级燃烧试验也可通过改变影响再燃烧的各因素来研究再燃烧的最佳条件。天然气是燃料分级燃烧中常用的再燃燃料，天然气作为再燃燃料有诸多优点，而且天然气在我国以后也有广泛的使用前景，采用天然气作为再燃燃料有实际应用价值，所以试验中也将采用天然气作为再燃燃料。

炉子的烟气测量装置采用两个措施，在炉子的中部和底部都保留有取样孔。在炉膛中部的烟气取样孔可以测量空气分级燃烧、燃料分级燃烧时，炉膛内部沿烟气流程的各个部分的烟气成分，可以分析 NOx 生成的影响因素以及生成机理。炉子排烟管处也有一个取样孔，可以测量最终产生的烟气，分析研究各个状况下的烟气成分、温度，研究各状况对烟气中的 NOx 生成量和和化学未燃尽损失（CO）和机械未燃尽损失（飞灰可燃物）的影响。

为了进行煤粉腐蚀结渣特性的研究，所以拟在炉子底部增加测量腐蚀结渣特性的装置，研究煤粉的腐蚀结渣特性。

§3.1.2 试验台主要参数

一、实验条件

1， 空气：流量（1.5m^3/h），温度（投入燃料前为 20℃，燃尽后为 250℃）

2， 一次风：温度（投入燃料前为 20℃，燃尽后为 300℃），一次风区域需要的空气量依过剩空气系数而定。

3， 二次风：温度（投入燃料前为 20℃，燃尽后为 320℃），一半剩余的空气以适合在第一区内的过剩空气系数。

4， 粉碎煤的质量流量：对任一种煤，保持 8.5kw 的输入热功率，对于一般煤为 1kg/h,对于褐煤而言为 1.5kg/h.。

5， 电功率：最大在 80kw。

6， 空气输入方式：一次风和二次风从同一管子输入到炉内，有一个阀门控制流量。

二、给粉系统

连续而不间断的给粉对于 NOx 减少的试验是非常重要的。给粉系统使用了 Gericke 公司的产品。

三、燃烧器

设计中保证了一、二次风具有相同的喷口当量直径。

四、大直径耐高温陶瓷管

大直径耐高温陶瓷管直径为 200mm，壁厚为 12.5mm，从德国 Haldenwanger 公司进口。最高使用温度为 1550℃。

五、加热元件

试验台使用的加热元件为硅碳棒。

硅碳棒在不同温度和时间有不同的特性，可以使用硅碳棒加热炉子达到 1500℃。

硅碳棒电阻随着温度的升高而很快的降低到 1.6Ω，所以在炉子开始加热时，可控硅电压在 0－380V 之间。整个升温速率控制在 200℃/h。

使用后硅碳棒电阻从 1.6Ω逐渐增大到最大值 10Ω。为了输入同样的电功率以保证炉温为常数，电压要随着电阻而不停变化。

炉垂直方向上共有五个区，通过加热元件和好的回热条件每个区的炉温都有会被加热到1100℃，1200℃,1300℃,1400℃，1500℃。共计 48 根硅碳棒和 12 个回路。

六、再燃燃料的喷入点

减小 NOx 排放的再燃烧燃料的喷入点位置距顶部 900mm。

七、空气分级和燃料分级时燃尽风的喷入位置

1，一、二次风在试验中可通过炉燃烧器输送到炉内。它们速度相同。

2，燃尽风由底部通过钢管喷入。

八、炉本体

1， 耐火材料由里向外共有五层，第一、二两层是同一种物质氧化铝空心球制品（60mm）、第三层是氧化铝轻质制品（65mm）、第四层是高铝轻质制品（40mm）、最外面一层是硬质纤维制品（30mm）。

2，炉总体高度 2.9m，炉内 2.5m，其他详细尺寸见附图 1。

九、取样探头与油冷却系统

1，油冷却取样探头可用来从炉子不同位置获取烟气及灰样。

2，取样探头在用油（80－300℃，8bar）冷却后，油再由水（10℃，6bar）来冷却。

十、烟风系统

§3.2 实验台的计算

§3.2.1 风管进出口面积的确定

一次风管进口面积：

$$F_{i1}=\pi d_{i1}^2/4$$
$$=3.142\times16^2/4$$
$$=201.088mm^2$$
$$=2.01\times10^{-4}m^2 \quad (3-1)$$

二次风进口面积：

$$F_{i2}=\pi d_{i2}^2/4$$
$$=3.142\times16^2/4$$
$$=201.088mm^2$$
$$=2.01\times10^{-4}m^2 \quad (3-2)$$

一次风出口面积：

$$Fo_1=\pi\ (do_{1o}^2-d_{o1i}^2)/4$$
$$=3.142\times(18^2-12^2)/4$$
$$=141.39mm^2$$
$$=1.414\times10^{-4}m^2 \quad (3-4)$$

在竖管燃烧器内的一次风截面周长为：

$$U_{o1}=\pi\ (do_{1o}+d_{o1i})$$
$$=3.142\times(18+12)$$
$$=94.26mm$$
$$=9.426\times10^{-2}m \quad (3-5)$$

在竖管燃烧器内的一次风当量直径为：

$d_{dl1}=4\ Fo_1\div U_{o1}$

$=4\times1.414\times10^{-4}\div9.426\times10^{-2}$

$=6.000\times10^{-3}$ （3－6）

二次风出口面积：

$Fo_2=\pi\ (d_{o2o}^2-d_{o2i}^2)/4$

$=3.142\times(36^2-30^2)/4$

$=311.06mm^2$

$=3.111\times10^{-4}m^2$ （3－7）

在竖管燃烧器内的二次风截面周长为：

$U_{o2}=\pi\ (d_{o2o}+d_{o2i})$

$=3.142\times(36+30)$

$=207.4mm$

$=0.2074m$ （3－8）

在竖管燃烧器内的二次风当量直径为：

$d_{dl2}=4\ Fo_2\div U_{o2}$

$=4\times3.111\times10^{-4}\div0.2074$

$=6.000\times10^{-3}m$ （3－9）

一次风和二次风的出口面积不一样。因为鼓风机和预热器都有足够的裕量系数，要保证它们出口处空气的流速一样，可以通过手动阀门来调节。

§3.2.2 煤粉成分分析

煤粉成分分析

为研究炉子的燃烧状况，所以采用了较为有代表性的煤种，煤种的元素分析如下表 2-1 所示：

表 3-1 煤粉的元素分析表

元素成分	挥发分	水分	灰分	碳	氢	硫	氮	氧
字母表示	V_{daf}	W_{ar}	A_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	S_{ar}	N_{ar}	O_{ar}
数 值	13.0	10.0	16.2	65.7	3.0	0.3	1.7	3.1

煤粉发热量：$Q_h^p=5900kcal/kg$。

煤粉中硫的组成主要有无机硫和有机硫，无机硫主要时黄铁矿和硫酸盐，其余为有机硫。在高硫煤中，硫成分大于 0.5%，硫主要以无机硫的形态存在，其中又以硫化铁（黄铁矿）居多；当煤粉中硫分较低时，硫主要以有机硫的形式存在；硫的存在形式可影响到硫分是否能够燃烧。由于所选煤种硫分小于 0.5，属于低硫煤，知有机硫分占大多数，即 $S_{op}^p=Sar=0.3\%$。

煤种的分类与发热量和挥发分有关。所选煤种挥发分 $V_{daf}=13.0\%>9\%$，煤种为烟煤。

§3.2.3 理论空气量的计算

固体燃料可燃成分反应式及所需空气量

固体燃料中可燃成分的质量百分数%		1kg 固体燃料中，所含可燃成分完全燃烧所需的理论空气量（由 $0.21O_2+0.79N_2$ 组成）/（m/kg）		
		O_2	N_2	空气量
C_{ar}	$C+O_2=CO_2$	$1.867C_{ar}/100$	$7.022C_{ar}/100$	$0.0899C_{ar}$
H_{ar}	$2H_2+O_2=2H_2O$	$5.56H_{ar}/100$	$20.92H_{ar}/100$	$0.265H_{ar}$
S_{ar}	$S+O_2=SO_2$	$0.7S_{ar}/100$	$2.63S_{ar}/100$	$0.265H_{ar}$

固体燃料燃烧所需理论论空气量 V^0 的计算公式：

$$V^0=0.0899C_{ar}+0.265H_{ar}+0.0333S_{ar}-0.0333O_{ar}$$

（《实用锅炉手册》P45）

V^0 表示 1kg 固体燃料完全燃烧所需要的标准状况下的理论空气量，m^3/kg（燃料）；

C_{ar}，H_{ar}，H_{ar}，O_{ar} 表示 1kg 收到基固体燃料中，碳、氢、硫和氧的质量百分数含量，%。

那么燃烧 1kg 煤所需要的理论论空气量 V^0 为：

$V=0.0899C_{ar}+0.265H_{ar}+0.0333S_{ar}+0.0333S_{ar}-0.0333O_{ar}$

$=0.0899\times65.7+0.265\times3.0+0.0333\times0.3-0.0333\times3.1$

$=6.795\ m^3/kg$

本试验中煤的添加量为 1.5kg/h，是均匀分布在一二次风管内的，即每根管内的加煤量为 0.75kg/h。

§3.2.4 气体密度ρ的确定

气体密度的计算公式为：

$$\rho=\rho_0\times273\div(273+t)$$

式中：ρ_0——标准状态下的气体密度，空气为 1.293 kg / m^3

t——气体温度，℃。

在试验条件下进口处 $t_1=20$℃，可得到空气密度为：

$\rho_1=\rho_0\times273\div(273+t_1)$

$=1.293\times273\div(273+20)$

$=1.205\ kg/m^3$ （3－10）

出口处 $t_2=300$℃，空气密度为：

$\rho_2=\rho_0\times273\div(273+t_2)$

$=1.293\times273\div(273+300)$

$=0.616\ kg/m^3$ （3－11）

如果不通过计算，不同温度下的空气密度可以查表得到。见于杨世铭编《传热学》P442 附录 4。

知道理标准状况下空气密度，可以算得.空气的总的质量流量为：

$Q=6.795\ m^3/kg\times1.5kg/h\times1.205\ kg/m^3$

$=12.28kg/h$

§3.2.5 气流速度的确定

烟风阻力计算是在额定负荷写进行的，其主要原始数据（速度、温度、有效面积等）均取自热力计算或者按照热力计算标准方法规定确定。所有对流受热面中气流速度和状态参数，除了通道阻力在该区段始终或终端的单个局部区段情况外，均按该区段的算术平均值进行计算。

空气的计算速度 w 为：

$$w=V/(3600F)\ m/s$$

式中：V——每小时的空气流量，m^3/h;

F——烟风通道的有效截面积。

因为一次风进口面积 F_{i1} 和二次风进口面积 F_{i2} 是相等的，加热前后管道截面积也没有变化，因而可以得到进入燃烧器以前的同一个空气流量：

$$w=0.75V/(3600F)$$
$$=6.795\times0.75/(3600\times2.01\times10^{-4})$$
$$=7.043\ m/s \qquad (3-12)$$

进入燃烧器以后，一二次风的流速分别为：

$$w_{i1}=V/(3600\ Fo_1)$$
$$=6.795\times0.75/(3600\times1.414\times10^{-4})$$
$$=10.01m/s \qquad (3-13)$$

$$w_{i2}=V/(3600\ Fo_2)$$
$$=6.795\times0.75/(3600\times3.111\times10^{-4})$$
$$=4.550m/s \qquad (3-14)$$

§3.2.6 通风阻力计算

在本试验中，空气流动阻力 Δh_{lz} 包括两项：沿程摩擦阻力 Δh_{mc} 和局部阻力 Δh_{jb}。

§3.2.6.1 沿程摩擦阻力

沿程摩擦阻力是指气流在等截面直通风道的流动阻力，。由下式计算：

$$\Delta h_{mc}= \lambda\frac{l}{d_{dl}}\frac{\rho w^2}{2} \qquad (3-15)$$

式中：Δh_{mc}——摩擦阻力，Pa；

λ——摩擦阻力系数；

l——管子长度，m；

d_{dl}——当量直径，4 倍通流面积除以流体与管道壁接触的周界长度，m；

ρ——气体密度，kg/m^3，按照气流平均温度计算；

w——气体流速，按照气流平均温度计算，m/s。

管道摩擦阻力系数由下式计算：

$$\lambda = 0.11(\frac{k}{d_{dl}} + \frac{68}{\mathrm{Re}})^{0.23} \qquad (3-16)$$

式中：k——管壁的绝对粗糙度，m。（按照《实用锅炉手册》P553 表 12－1 查找。）
本实验台中采用的是钢管烟道，取 k＝0.12×10^{-3}m。

20℃和 300℃空气的粘度分别为 15.06×10^{-6}m^2/s 和 48.33×10^{-6}m^2/s。
（《传热学》P442 附录 4： 干空气的热物理性质）
对于预热前和预热后的空气，雷诺数分别为：

$$\mathrm{Re}_1 = \frac{w d_{i1}}{\nu_1}$$
$$= 7.043 \times (16 \times 10^{-3}) \div 15.06 \times 10^{-6}$$
$$= 7.498 \times 10^3 \qquad (3-17)$$

$$\mathrm{Re}_2 = \frac{w d_{i2}}{\nu_2}$$
$$= 7.043 \times (16 \times 10^{-3}) \div 48.33 \times 10^{-6}$$
$$= 2.332 \times 10^3 \qquad (3-18)$$

在空气进入燃烧器以后，对于没有旁路的情况，一二次风管的气流雷诺数分别为：

$$\mathrm{Re}_{i1} = \frac{w_{i1} d_{dl1}}{\nu_1}$$
$$= 10.01 \times (6.000 \times 10^{-3}) \div 48.33 \times 10^{-6}$$
$$= 1.243 \times 10^3 \qquad (3-19)$$

$$\mathrm{Re}_{i2} = \frac{w_{i2} d_{dl2}}{\nu_2}$$
$$= 4.550 \times (6.000 \times 10^{-3}) \div 48.33 \times 10^{-6}$$
$$= 0.6152 \times 10^3 \qquad (3-20)$$

在空气进入燃烧器以后，对于有旁路的情况，一二次风管的气流雷诺数分别为：

$$\mathrm{Re}_{ip1} = \frac{w_{i1} d_{dl1}}{\nu_1}$$
$$= 10.01 \times (6.000 \times 10^{-3}) \div 15.06 \times 10^{-6}$$
$$= 3.989 \times 10^3 \qquad (3-21)$$

$$\mathrm{Re}_{ip2} = \frac{w_{i2} d_{dl2}}{\nu_1}$$
$$= 4.550 \times (6.000 \times 10^{-3}) \div 15.06 \times 10^{-6}$$
$$= 1.974 \times 10^3 \qquad (3-22)$$

预热前后空气的管道摩擦阻力系数分别为：

$$\lambda_1=0.11(\frac{k}{d_{i1}}+\frac{68}{\mathrm{Re}_1})^{0.23}$$

$$=0.11\times(\frac{0.12\times10^{-3}}{16\times10^{-3}}+\frac{68}{7498})^{0.23}$$

$$=4.283\times10^{-2} \quad (3-23)$$

$$\lambda_2=0.11(\frac{k}{d_{i2}}+\frac{68}{\mathrm{Re}_2})^{0.23}$$

$$=0.11\times(\frac{0.12\times10^{-3}}{16\times10^{-3}}+\frac{68}{2332})^{0.23}$$

$$=5.142\times10^{-2} \quad (3-24)$$

进入燃烧器以后，对于没有旁路的情况，管道摩擦阻力系数分别为：

$$\lambda_{i1}=0.11(\frac{k}{d_{dl1}}+\frac{68}{\mathrm{Re}_{i1}})^{0.23}$$

$$=0.11\times(\frac{0.12\times10^{-3}}{6.000\times10^{-3}}+\frac{68}{1243})^{0.23}$$

$$=6.057\times10^{-2} \quad (3-25)$$

$$\lambda_{i2}=0.11(\frac{k}{d_{dl2}}+\frac{68}{\mathrm{Re}_{i2}})^{0.23}$$

$$=0.11\times(\frac{0.12\times10^{-3}}{6.000\times10^{-3}}+\frac{68}{615.2})^{0.23}$$

$$=6.887\times10^{-2} \quad (3-26)$$

进入燃烧器以后，对于有旁路的情况，管道摩擦阻力系数分别为：

$$\lambda_{ip1}=0.11(\frac{k}{d_{dl1}}+\frac{68}{\mathrm{Re}_{ip1}})^{0.23}$$

$$=0.11\times(\frac{0.12\times10^{-3}}{6.000\times10^{-3}}+\frac{68}{3989})^{0.23}$$

$$=5.155\times10^{-2} \quad (3-27)$$

$$\lambda_{ip2}=0.11(\frac{k}{d_{dl2}}+\frac{68}{\mathrm{Re}_{ip2}})^{0.23}$$

$$=0.11\times(\frac{0.12\times10^{-3}}{6.000\times10^{-3}}+\frac{68}{1974})^{0.23}$$

$$=5.632\times10^{-2} \quad (3-28)$$

一次风管、二次风管、三次风管内径相同。设预热前后管子的总长度分别为 l_{1t} 和 l_{2t}，本试验中，l_{1t} ＝2520＋2423＋2300＋376＋476＋580＝8675mm＝8.765m，l_{2t}＝105＋205＋433＋1195＋1030＋300＋400＝3668mm＝3.668m。送风管长度为：l_{sf}＝400＋4200＋600＋4000＝9200mm＝9.2m。因为管子里面的空气是没有加热的，在计算阻力的时候可以把这一段算在预热前的长度中。

这样预热前后沿程摩擦损失分别为：

$$\Delta h_{mc1}= \lambda_1 \frac{(l_{1t}+l_{sf})}{d_{i1}} \frac{\rho_1 w^2}{2}$$

$$=4.283\times10^{-2}\times（8.765+9.2）\times1.205\times9.391^2\div（16\times10^{-3}）\div2$$

$$=2472\ \ \text{Pa} \qquad （3－29）$$

$$\Delta h_{mc2}= \lambda_2 \frac{l_{2t}}{d_{i2}} \frac{\rho_2 w^2}{2}$$

$$=5.142\times10^{-2}\times3.668\times0.616\times7.043^2\div（16\times10^{-3}）\div2$$

$$=180\text{Pa} \qquad （3－30）$$

一二次风在燃烧器内经过的距离分别为：

l_{i1}＝88＋21＋526＋5.5＋22＋21÷2

＝673mm

＝0.673m （3－31）

l_{i2}＝607－140－20÷2

＝457mm

＝0.457m （3－32）

对于没有旁路的情况，空气进入燃烧器以后，一次风和二次风受到的沿程摩擦阻力分别为：

$$\Delta h_{mci1}= \lambda_{i1} \frac{l_{i1}}{d_{dl1}} \frac{\rho_2 w_{i1}^2}{2}$$

$$=6.057\times10^{-2}\times\frac{0.673}{6.000\times10^{-3}}\frac{0.616\times10.01^2}{2}$$

$$=220.6\text{Pa} \qquad （3－33）$$

$$\Delta h_{mci2}= \lambda_{i2} \frac{l_{i2}}{d_{dl2}} \frac{\rho_2 w_{i2}^2}{2}$$

$$=6.887\times10^{-2}\times\frac{0.457}{6.000\times10^{-3}}\frac{0.616\times4.550^2}{2}$$

$$=33.44\text{Pa} \qquad （3－34）$$

对于有旁路的情况，空气进入燃烧器以后，一次风和二次风受到的沿程摩擦阻力分别为：

$$\Delta h_{mcip1}= \lambda_{ip1} \frac{l_{i1}}{d_{dl1}} \frac{\rho_1 w_{i1}^2}{2}$$

$$=5.155\times10^{-2}\times\frac{0.673}{6.000\times10^{-3}}\frac{1.205\times10.01^2}{2}$$

$$=349.1\text{Pa} \qquad (3-35)$$

$$\Delta h_{\text{mcip2}}=\lambda_{ip2}\frac{l_{i2}}{d_{dl2}}\frac{\rho_1 w_{i2}^2}{2}$$

$$=5.632\times10^{-2}\times\frac{0.457}{6.000\times10^{-3}}\frac{1.205\times4.550^2}{2}$$

$$=53.51\text{Pa} \qquad (3-36)$$

§3.2.6.2 局部阻力

局部阻力是指因通道截面和流向变化引起的局部阻力，计算公式为：

$$\Delta h_{\text{jb}}=\zeta_{jb}\frac{\rho w^2}{2} \qquad (3-37)$$

式中：Δh_{jb}——局部阻力，Pa；

ζ_{jb}——局部阻力系数，其值取决于各种局部阻力的形式。

本实验中钢管的弯头都是内外均成弧形的急弯头，阻力系数的选择方法见于《实用锅炉手册》P557之 No.23。本试验中取ζ_{jb}=0.5。

对于预热前和预热后的空气，单个弯头的局部阻力分别为：

$$\Delta h_{\text{jb1}}=53.14\zeta_{jb}\times9\div16$$

$$=14.95\text{Pa} \qquad (3-38)$$

$$\Delta h_{\text{jb2}}=27.16\zeta_{jb}\times9\div16$$

$$=7.64\text{Pa} \qquad (3-39)$$

对于一次风管和二次风管，以及后来需要的三次风管和送风管，预热前后的弯头总共有 n_{1t}=7 个，n_{2t}=4 个。从图上可以明显看到，如果不预热的话，总弯头个数为 n=20 个。

在风管进入到燃烧器的入口处，一次风与二次风相当于从管道进入到一个面积更大的管道，设小管道与大管道的面积之比为 1/5，查《实用锅炉手册》P556 表 12－4 截面变化及转变阻力系数之 No.19，知ζ_{jbrk}=0.7，于是一次风二次风在无旁路与有旁路两种情况下受到的局部阻力分别为（在有旁路或者没有旁路的具体情况下一次风、二次风、三次风、煤粉送风都是一样的）：

$$\Delta h_{\text{jbrk}}=\zeta_{jbrk}\frac{\rho_2 w^2}{2}$$

$$=0.7\times0.616\times9.391^2\div2$$

＝19.01Pa （3－39）

$$\Delta h_{jbrkp}= \zeta_{jbrk}\frac{\rho_1 w^2}{2}$$

＝0.7×1.205×9.391²÷2

＝37.19Pa （3－40）

空气预热器内的阻力损失为 Δh_{mcy}。

因为空气预热器进口温度为 20⁰C，出口温度为 300⁰C，其中流过空气的平均温度为 t_{ky}＝160⁰C。在这个温度下空气的比热容为 c_{pky}＝1.017KJ/（Kg·⁰C），运动粘度系数为 v＝30.09×10⁻⁶m²/s。前面已经算得空气的质量流量为 12.28kg/kg。于是空气预热需要消耗的功率为:

$P=c_{pky}Q（t_2-t_1）$

＝1.017×12.28÷3600×（300－20）

＝0.971KW （3－41）

对于 SRQ1 型空气预热器，试选功率为 0.5 千瓦。其宽度为 a＝0.2m，预热管纵向长度为 0.33m，假设其纵向外形尺寸为 b＝0.4m。其截面积为：

$F_{ky}=ab=0.2\times0.4=0.08m^2$

平均空气密度为：$\rho_{ky}=\rho_0\times273\div（273+t）$

＝1.293×273÷（273＋160）

＝0.815kg/m³ （3－42）

试验台的预热器是并列的，一次风和二次风用相同类型的两台。送煤风的空气流量比较小，在计算时也按照一、二次风所用的预热器来计算。

预热器里的气流速度为：

$w_{ky}=V/(3600F)$

＝6.795×0.75÷3600÷0.08

＝1.769×10⁻²m/s （3－43）

根据《实用锅炉手册》P560 的方法，下面计算横向冲刷错列光滑管束的阻力系数 ζ_{ky}。

横距取 s_1＝0.04m，纵距取 s_2＝0.04m，假设加热管内径 d＝0.002m。

$$\sigma_1 = s_1/d$$

＝0.04÷0.002

＝20 （3－44）

管子对角线节距 $s_2^{'}=\sqrt{\frac{1}{4}s_1^2+s_2^2}$

$=\sqrt{0.25\times0.04^2+0.04^2}$

＝4.123×10⁻²m （3－45）

$$\psi = (s_1-d)/(s_2^{'}-d)$$

＝（0.04－0.002）÷（0.04123－0.002）

＝0.971 （3－46）

因为 $0.1\le\psi\le1.7$，而 $\sigma_1\ge1.44$，根据 P561 公式（12－29），

$c_s=3.2+0.66(1.7-\psi)^{1.5}$

$=3.2+0.66\times0.729^{1.5}$

$=3.61$ （3－47）

预热器的当量直径为：

$d_{yr}=4F_{yr}/l_{yr}$

$=4\times0.08\div2\div(0.2+0.4)$

$=0.267m$ （3－48）

空气在预热器中流动的雷诺数为：

$Re_{yr}=w_{yr}d_{yr}/v_{yr}$

$=1.769\times10^{-2}\times0.267\div30.09\times10^{-6}$

$=157.0$ （3－49）

根据 P561 之（12－28）公式，一排管子的 阻力系数为：

$\zeta_0=c_sRe^{0.27}$

$=3.61\times157.0^{0.27}$

$=14.15$ （3－50）

暂定沿气流方向的管排数 N＝8，根据 P561 之（12－26）公式，横向冲刷错列光滑管束的阻力系数 ζ_{ky} 为：

$\zeta_{ky}=\zeta_0(N+1)$

$=14.15\times9$

$=127.35$ （3－51）

空气预热器内阻力为：

$\Delta h_{mcy}=\zeta_{ky}\ \rho_{ky}w_{ky}^2/2$

$=70.75\times0.815\times0.0236^2\div2$

$=0.028Pa$ （3－52）

这样的数量级完全可以忽略不计。这是因为空气从细管里进入到面积比原来大几十倍的粗管道（可以把空气预热器看成是一根粗管道），速度变为原先的几十分之一；而摩擦阻力是与速度的平方成正比例的，即使阻力系数能大几倍或者十几倍，阻力也会是微不足道的。

如果空气预热器内空气速度取 8－12m/s 的推荐值，w'_{yr}＝10m/s,那么计算结果为：

$Re_{yr}'=w_{yr}'d_{yr}/v_{yr}$

$=10\times0.267\div30.09\times10^{-6}$

$=8.873\times10^4$ （3－53）

$\zeta_0=c_sRe^{0.27}$

$=3.628\times(8.873\times10^4)^{0.27}$

$=78.64$ （3－54）

$\zeta_{ky}=\zeta_0(n_2+1)$

$=78.64\times5$

＝393.2 （3－55）

空气预热器内阻力为：

$\Delta h_{mcy}=\zeta_{ky}\ \rho_{ky}w_{ky}^2/2$

＝393.2×0.815×10^2÷2

＝16023Pa （3－56）

§3.2.6.3 总体阻力计算与比较

在没有旁路有预热器的情况下一次风和二次风的通风阻力分别为：

$\Delta h_1=（\Delta h_{mc1}+\Delta h_{mc2}+n_1\times\Delta h_{jb1}+n_2\times\Delta h_{jb2}+\Delta h_{mcy}）+\Delta h_{mci1}+\Delta h_{jbrk}$

$\Delta h_2=（\Delta h_{mc1}+\Delta h_{mc2}+n_1\times\Delta h_{jb1}+n_2\times\Delta h_{jb2}+\Delta h_{mcy}）+\Delta h_{mci2}+\Delta h_{jbrk}$

在本实验中，另有一段三次风的风管和送粉风的管道，它们的直径都是与一二次风管相同的。摩擦阻力与风管长度成正比，因而在计算的时候可以直接把所有直径与雷诺数都相同的管道拿到一起来计算。

可以计算得到没有旁路而有预热器的情况下的通风阻力为：

$\Delta h=\Delta h_1+\Delta h_2$

$=\Delta h_{mc1}+\Delta h_{mc2}+n_{1t}\times\Delta h_{jb1}+n_{2t}\times\Delta h_{jb2}+\Delta h_{mcyt}+\Delta h_{mci1}+\Delta h_{mci2}+\Delta h_{jbrkt}$

＝2474.0+180.0+7×14.95+4×7.64+3×0.016+220.6+33.4+2×19.0

＝3081Pa （3－57）

Δh_{mc1t}、Δh_{mc2t}——预热前后的总摩擦阻力；

$n_{1t}\times\Delta h_{jb1}$、$n_{2t}\times\Delta h_{jb2}$——预热前后弯头个数乘以每个万头顶局部阻力，即总的局部阻力；

Δh_{mcyt}——预热器内总的摩擦阻力；

Δh_{mci1}、Δh_{mci2}——燃烧器内部一二次风的阻力；

Δh_{jbrkt}——入口处的局部阻力损失；

对于空气不经过预热器的情况，预热器之内的空气阻力没有了，多出的是弯管的阻力损失。对于一次风、二次风、三次风来说，各自多出了弯头阻力和一些直管阻力，空气密度是室温下的密度。管子总长度为：l_{123t}＝（2520＋2423＋2300＋803＋550＋325＋1100＋1300＋1560＋1520＋1680＋300＋400）＋＝16881＋mm＝16.881m。加上送风管，l_t＝16.881＋9.2＝26.08m。

其沿程摩擦损失分别为：

$$\Delta h_{mcp}=\lambda_1\frac{l_t}{d_{i1}}\frac{\rho_1 w^2}{2}$$

＝4.142×10^{-2}×26.08×1.205×9.391^2÷（16×10^{-3}）÷2

＝3589.0Pa （3－58）

在这种没有预热器而有旁路的情况下一次风、二次风、三次风和送煤风总的通风阻力为：

$\Delta h_p=\Delta h_{mcp}+20\times\Delta h_{jbp1}+\Delta h_{mcip1}+\Delta h_{mcip2}+3\times\Delta h_{jbrkp}$

＝3589.0＋20×14.95＋349.1＋53.51＋3×37.2

＝4402Pa （3－59）

比较Δh与Δh_p，3081<4420，即$\Delta h<\Delta h_p$，计算时按照比较大的Δh_p来选取风机。

（如果预热器内速度取推荐值，那么计算结果将是Δh＝3081＋16023×2＝35145Pa，远远大于不用

预热器的情况。）

§3.2.7 风机的选取风机的选取

风机的选取主要是确定风机的容量和压头，风机的压头计算比较复杂，而且有部分计算与实际运行情况有关，需要根据实际经验来选取。各风机后有空气阀门来控制风量的大小，所以风机的选取时可留有余量，在实际应用时空气阀门来调小风量。

为了减少炉膛烟气向外泄漏，炉膛内保持微负压（100pa）的环境。空气沿管道流动时，机械能是守恒的，根据机械能守恒，风机的压头将抵消管道中流动损失和空气压头的变化，炉膛内的压力为 p_1，大气压为 p，管道的总能量损失为 h_w。可以知道这里的 h_w 即上面求出来的 Δh_p。有：

$$p + H - h_w = p_1 \qquad (3-60)$$

于是：$H = h_w + (p_1 - p)$

$= 4420 - 100$

$= 4320\text{Pa}$ （3－61）

接下来计算风机功率。风机的电动机功率计算公式为：

$$N = \beta \frac{q \bullet \Delta H}{3600\eta} \qquad (3-62)$$

其中：

q——风机的计算流量，m^3/h；

N——风机的电动机功率，W；

β——电动机功率储备系数，取 2；

η——在计算工况下风机的运行效率，一般离心式风机为 0.6，高效离心式风机可达 0.9。

这样可以得到电动机的功率计算值为：

$$N = 2 \times \frac{(1.5 \times 6.795) \times 4320}{3600 \times 0.6}$$

$= 48.9\text{W}$ （3－63）

§3.3 本章小结

本章介绍了低 NO_x 试验台的大体状况、主要参数和试验台建设的意义，接下来详细计算了燃烧器以前部分的摩擦阻力、局部阻力和总体阻力，并以此选取了合适的风机功率。

第四章 电加热器

试验台上的空气预热器是一台电加热器，本章主要讨论电加热器的设计与计算。

§4.1 电加热器的定义

电加热器是将电能转变为热能，用以加热制品和工件的热工设备。
本试验台中所需要的电加热器实际上是一台最高加热温度比较低的工业电炉。不同的是，一般工业电炉因为耐火温度可以达到1500^{o}C甚至更高，而我们的加热器只需要把空气加热到300^{o}C就可以了。无论从工艺来说，还是从能耗、保温材料、炉壳等方面来说，要求都可以大为降低。

§4.2 电加热器的分类

按照加热的原理，电加热器主要可以分为几种：电阻加热，感应加热，电弧加热。

§4.2.1 电阻加热：

与电源直接连接的导电材料内有电流通过时，利用电流热效应产生的热量加热的方法称为电阻加热。由电热元件产生的热量传至加热工件上的加热方式称为间接加热；工件自身直接通电的加热方式称为直接加热。
间接加热使用金属电热元件和非金属电热元件。金属电热元件常用 Mo、W、Ni、Cr、Si、Al、Fe等的金属及其合金，偶尔也用金属间氧化物。金属电热元件中加入微量稀有金属，可提高器表面的抗氧化性能。现在广泛使用金属的碳化物和石墨等作非金属电热器件。它多用在高温炉，但非金属电热元件加工困难，脆而易断，与金属电热元件相比机械性能差。
电阻炉的一般特点为：

$$Q=I^{2}Rt$$

其中，Q——发热量，J；
I——电流，A；
R——电阻，Ω；
t——时间，s。

§4.2.2 感应加热：

由于电磁感应作用，在导电的被加热件内利用感应产生的热效应而发热的加热方法。它是依靠放在交变磁场内的导电材料内部产生的涡流损耗进行加热。被加热件为磁性体时，虽然磁滞损耗应该考虑，但其值很小，可以略而不计。涡电流的加热层厚度和频率有关，频率越高，加热厚度越薄；因此要求根据加热要求选择相应频率。常用的频率一般在56赫兹的工业频率到500千赫兹左右的范围内。

§4.2.3 电弧加热：

电弧是高温下热分解形成的等离子态气体的放电现象，主要靠电子导电。电弧的温度一般都高达3000——6000K，能够使包括钢铁在内的物质精炼和融化。

§4.2.4 其他电加热器

其他的电加热方式还有：等离子电弧加热，电子束加热，弧光反射加热，激光加热，等等。

§4.3 其他分类方法

按照操作方式可以将电炉分为间歇式和连续式电炉。按照炉内气氛可以将电炉分为空气电炉、真空电炉和保护气体电炉。

§4.4 电加热器的布置方法

电加热器中加热管的布置主要有三种：正方形直列，正方形错列，三角形错列。
三角形错列布置，用于壳侧流体清洁，不易结垢，壳侧污垢可以用化学处理掉的场合。
正方形直列或者正方形错列，由于可以用机械的方法清洁外管，所以可用于易结垢的流体。

§4.5 电加热器的功率确定

电加热器的功率可以用热平衡法来计算。加热器由炉子在工作中的热能收入和热能支出各项所组成，而且收入各项总和与支出各项总和在数值上彼此相等。通过热平衡的计算，能够从理论上比较精确的计算出电加热器的功率。

§4.5.1 电加热器的支出热量

§4.5.1.1 空气温升需要的热量 Q1

空气入口的温度为 20°C，出口温度为 300°C。为了比较精确的计算空气温度升高需要的热量，把空气温度划分为几段：t_1＝20 °C，t_2＝100 °C，t_3＝200 °C，t_4＝300 °C。

$Q_1 = mc_p（t_1 - t_2）$

其中，Q_1——热量，J

m——质量流量，kg/s；

t_1、t_2——空气加热的起始温度和最终温度；

c_p——空气在（t_1＋t_2）/2 的的比热容；

在本实验中，加煤量是 1.5Kg/h，单根管子能满足的加煤量为 0.75kg/h。送煤风的流量稍微小一些，在安装过程中也用一二次风所用的加热器。单个预热器内空气的质量流量为：

$m = 0.75 \times 6.795 \times 1.205 \div 3600$

$= 1.71 \times 10^{-3} kg/s$

于是，单位时间内空气温升需要的热量为：

$Q_1=1.71\times10^{-3}\times【106.0\times（100-20）+835\times（200-100）+674\times（300-200）】$

$=403J/s$

§4.5.1.2 加热阶段炉体温度升高需要的热量 Q_2

一般说来试验台要等预热结束后才进行正式试验，因而这一部分的热量在正常工作状态下为零，不需要考虑。

§4.5.3 炉体和管壁的散热 Q_3

这主要是指炉壁外表面和管壁散失到周围空气中的热损失，计算起来比较麻烦，其占的比重也不大。参考工业炉炉体和管壁热量损失的计算方法，可以按照 $Q_3=0.2Q$ 来计算。（《工业电炉》，P208）

这样，电加热器的支出热量为：

$Q=Q_1+Q_2+Q_3$

$=Q_1\div0.8$

$=403\div0.8$

$=504J/s$

§4.5.2 电加热器的收入热量

电加热器的收入热量是电阻通电的发热量。

电加热器上引出了两根备用管道。为了考虑进一步扩大空气流量的可能，以及供电电压波动对功率的影响，在电热器的设计过程中考虑一个安全系数和功率储备系数 K。本实验台中取 K＝1.4。

于是单个电加热器的设计功率为：

$P=KQ$

$=1.4\times504$

$=706W$

如果是选择，可以选用额定功率为 0.75KW 的电加热器。

§4.6 电加热器的设计

§4.6.1 基本情况

本试验台上的加热器是电阻加热器。它可以进行洁净加热，温度也容易控制。该加热器的一个关键部件是管状电加热元件。管状电加热元件的结构是在一金属管内放入电热丝，并在空隙部分紧密地填充有良好导热性和绝缘性的结晶氧化镁。电热丝两端是通过两个引出棒与电源相接。它具有结构简单、寿命长、热效率高、机械强度好、可以弯成各种形状、使用安全等优点。

加热元件（电热体）的形状有几种：U 型，W 型，螺旋型和直线型。本加热器使用的是 W 型。

§4.6.2 电热体单位表面功率

电热体的单位表面功率是指电热体每单位表面积上所发出的功率，也称为表面负荷，用 W 表示，单位是 W/cm。它是影响电热体使用寿命的重要指标。表面功率与元件材料、规格尺寸、结构形状、

使用温度、敞露与封闭程度、散热情况、炉气性质、支托元件材料、被加热品的黑度等有密切关系。在设计时，正确选择表面功率，对于节约材料以及保证电加热器的使用寿命极为重要。表面功率越高，电热体辐射出的热流密度越大，即电热体的温度越高。表面功率选择过大，即电热体的温度越高，电热体实际温度可能超过元件允许温度，使其寿命降低。表面功率选择过小，则需要较多的电热体材料。

在理想状况下，电热体辐射出去的热量全部被工件吸收，中间没有屏蔽和热损失，此时的表面功率为电热体的理想功率 W_p。

从两固体间的辐射传热可知，电热体理想表面功率与电热体表面温度 T_1、工件表面温度 T_2 以及他们的黑度（ε_1、ε_2）有关系。当 ε_1 和 ε_2 一定时，W_p＝f（T_1，T_2）。可以做出其关系曲线，直接查出 W_p 的数值。

实际电热体辐射出的热量受自身与周围物体的遮蔽作用及炉体热损失，因此不能全部传给工件。如果采用理想表面表面功率设计电热体，要求满足相同的烧成温度，电热体的温度必然升高。所以，在设计中采用电热体允许表面功率 W_{al} 关系如下：

$W_{al}=\eta W_p$

其中，η——电热体有效辐射系数，一般为 0.33 到 0.60。本试验中取 0.50。

实际选用允许表面功率的原则是：

① 在电热体处于封闭状态下加热，在可控气氛或者有腐蚀介质中加热，工件密度小，电热体不易更换等工作环境中，电热体允许密度应取低值。

② 在电热体暴露敞开状态下加热，炉气强制流动，使用带电热体等，允许表面功率取高值。

§4.6.3 电热体尺寸计算

电热体材料选好后，应选择布置方法，即选好加热段，确定供电电路的连接方法、组数，选定实际表面功率。这样就可以确定电热体的截面积和长度。

电热体截面积和长度应满足两个要求：首先电热体应有合适的电阻，以保证生产需要的功率；其次，电热体应有合适的表面积，使其单位表面功率符合要求，以使电热体温度不超过电热体材料允许工作温度。

一般的原则是，材料的电阻率越大，总长度越短，在一定的条件下有利于安装。影响电热体单位表面功率的因素很多，如果选用过高的表面功率，虽然节省材料，但使用寿命缩短。适当提高单位表面功率，可以使元件直径、长度减少，有利于布置。

本人与上海双联热电器厂联系过，得知他们电热器的加热材料有两种：铁铬合金和铬镍合金。在本试验台中采用铬镍合金电热体。

电炉加热元件有两种：元件敞露型和元件封闭型。前者是电热体放在炉膛搁砖上或者挂在炉墙上。后者是电热体没有暴露在炉膛里，例如把电热体穿绕在马佛炉的炉膛砖的圆孔中。本试验台用的加热体是元件敞露型。查看《工业电炉》P266 图 8－1－2 知道，500oC 时的元件表面允许功率为 3.4W/cm2，700oC 时的是 2.36W/cm2，那么 300oC 时的元件表面允许功率为：

Wp ＝3.4×2－2.36

＝4.44W/cm2

在设计中采用电热体允许表面功率 Wal 为：

Wal＝η Wp

＝0.50×4.44

=0.222 W/cm2

试验台的加热器要保证正常的运转，加热元件需要有合适的表面积，以保证电热体的使用寿命。

$$F=\frac{10^3 P}{W_{al}} \quad (cm2) \tag{4-1}$$

$$Wal=\frac{10^3 P}{F} \quad (W/cm2) \tag{4-2}$$

式中：F——单根电热体的外表面积，cm2；

P——单根电热体的功率；

本预热器中加装一个电压调节器，电阻值是一定的，要得到不同的空气温度可以通过调整电压的方式来做到。这样只要保证最大功率的时候电阻的表面功率在允许表面功率以内就可以了。

若 S 为电热体截面的周长，单位 mm，则 F＝10SLcm，所以

$$10SL=\frac{10^3 P}{W_{al}} \tag{4-3}$$

$$L=\frac{10^2 P}{SW_{al}} \ (m) \tag{4-4}$$

根据功率的计算方法：

$$P=\frac{U^2}{R_t}\times 10^{-3} \quad (kW)$$

$$R_t=\frac{U^2}{P}\times 10^{-3} \quad (\Omega)$$

$$R_t=\rho_t=\frac{L}{A} \quad (\Omega)$$

由三式可得到：

$$L=\frac{U^2 A}{10^3 \rho_t P} \tag{4-5}$$

式中，U——单根电热体的端电压，V；

Rt——单根电热体在工作温度下的电阻值，Ω；

ρ_t——单根电热体在工作温度下的电阻值，Ω×mm^2/m；

代入数据可以得到：每根电热体的长度为：

$$L=\frac{U^2 A}{10^3 \rho_t P}$$

$$=\frac{220^2 A}{10^3 \rho_t P}$$

由（4－5）和（4－3）得到：

$$\frac{U^2 A}{10^3 \rho_t P} = \frac{10^2 P}{S W_{al}} \qquad (4\text{-}6)$$

于是：

$$SA = \frac{10^5 \rho_t P^2}{U^2 W_{al}} \qquad (4\text{-}7)$$

对于圆形电热体，$S = \pi d$，$A = \pi d^2/4$，
代入（4－7）得到：

$$d = \sqrt[3]{\frac{4\times 10^5 \rho_t P^2}{\pi^2 U^2 W_{al}}} \quad (mm) \qquad (4\text{-}8)$$

查《工业电炉》P229 表 7－5－1 可以知道，铬镍合金（Cr20Ni80）的电阻系数为 1.11Ω×mm²/m。电阻温度系数为 8.5×10^{-5}/°C。铬镍合金的正常工作温度为 1000°C，那么它的电阻系数为：ρ =（1＋$8.5\times10^{-5}\times1000$）×1.11＝1.204Ω●mm²/m。
代入数据可以得到电热体的直径和截面积分别为：

$$d = \sqrt[3]{\frac{4\times10^5\times1.204\times0.706^2}{3.14^2\times220^2\times2.22}}$$

$$= 0.610mm \qquad (4\text{-}9)$$

直径取的大一些只会使表面功率更小，可以保证安全和长期工作的需要。本实验中取 d =2mm。

$$A = \pi d^2/4$$
$$= 3.14\times2^2/4$$
$$= 3.14mm^2 \qquad (4\text{-}10)$$

代入数据可以得到：每根电热体的长度为：

$$L = \frac{U^2 A}{10^3 \rho_t P}$$

$$= \frac{220^2\times3.14}{10^3\times1.204\times16.3}$$

$$= 7.74m \qquad (4\text{-}11)$$

加热器截面宽×高是 0.2m×0.4m 的规格，每排可以有管子列数为：

$$0.2\div0.04-1=4 \qquad (4\text{-}12)$$

即弯三个折。预热器外部高度为 0.4m，电阻占用的长度取 0.36m。
那么每一排电阻的长度为：

$$0.36\times3+0.04\times3=1.2m \qquad (4\text{-}13)$$

可以算得电阻在加热器中的排数为：

$$N=7.74\div1.2\approx8 \qquad (4\text{-}14)$$

这与第三章计算预热器内阻力时的假定是一致的。从前一章的计算结果也可以知道，N 的取值虽然对预热器内阻力的计算结果很大，但预热器内的阻力数量级很小而可以忽略不计，即使前面假定 N 的值与 8 有一些差距，也是可以容许的。

§4.7 本章小结

本章主要介绍了电加热器的分类、布置方法，并结合本实验台中空气流量与温度等参数，选取了电阻丝的直径，计算了电阻丝的长度，给出了电阻丝的走向。在第三章里假定了电阻的直径与排数，通过计算验证后知道这些假定都是合理的。

第五章 结论

人类利用能源，也造成了环境的污染，面临着很严重的环境问题。NOx 对环境有很大的破坏作用，也会直接影响人们的健康，抑制 NOx 的生成在能源利用中显得非常有必要。

NOx 生成途径有热力型、燃料型和快速型。在煤粉炉中，燃料型 NOx 是主要因素。所以研究燃料型 NOx 的生成和控制具有重要意义。燃料型 NOx 的生成与炉内燃烧温度和燃烧过程密切相关，可以通过改变燃烧环境，来降低 NOx 的排放。空气分级燃烧和燃料分级燃烧目前最流行的降低 NOx 排放的措施。本实验台即为研究如何同过空气分级和燃料分级来降低 NOx 的排放。

空气分级将燃烧过程分为两部分进行：主燃烧段和“火上风”燃尽段。主燃烧区过量空气系数较小，是燃料在主燃烧段形成富燃料区，可抑制 NOx 的生成，还能将部分生成的 NO 还原为 N_2。在燃尽段，通入燃烧要求的剩余空气量，保证煤粉燃烧完全。在燃尽段，由于燃烧温度已经降低，可以保证获得低 Nox 的排放。

燃料分级是将燃烧过程分三部分进行：主燃烧段、再燃段和燃尽区段。大部分煤粉在主燃区燃烧，在再燃段喷如再燃燃料，如天然气，与主燃烧区产生的高温烟气混合，在还原性气氛下，可将部分 NOx 还原为氮气，最后再燃尽区段喷如燃尽风将再燃燃料燃尽，降低 Nox 的效果要好于空气分级。如果采用天然气作为再燃燃料，天然气中不含硫，可以降低 SO_2 的排放，同时，采用 20%的天然气再燃时，还将有 8%的 CO2 得减排。

低 NOx 燃烧实验台是参照德国斯图加特大学 20KW BTS 实验台设计的。实验台主要是研究如何通过空气分级和燃料分级燃烧的方式降低 NOx 的排放，以及确定当获得最低的 NOx 排放时，空气分级和燃料分级燃烧的参数如何选取。从而通过比较研究，确定低 NOx 排放的最佳燃烧方式。

本文通过详细的计算选出了合适功率的风机，并参照上海双联电热器厂的产品样本说明，给出了空气预热器（电加热器）的设计计算，得到了合适的电阻形式和布置方法。

致谢

经过四个多月的忙碌，毕业设计终于做完了。此时的感觉是完成了一件完整的作品，尘埃落定，别的可以留给后人评说。有许多个夜晚是泡在实验室里，查看资料，一步一步的向下计算。这中间走了一些弯路，有一筹莫展异常郁闷的时候，也有柳暗花明豁然开朗的体验。

在做论文的过程中，王恩禄老师给了我大方向的指导，纠正我原则性的偏差，叫我的论文沿着正确的方向走，并最终定稿。可以说，在开工与收工的阶段，王老师的指导都是有决定意义的。

在实验室做论文的大部分时间里，都是有张海燕老师的陪同的。他给了我许许多多细节方面的帮助。从草图的解释到参考资料的线索，事无巨细他悉心做答。他的这种帮助对我也是非常大的鼓励，论文做完了，他的这种支持是我不能忘记的。

和我同在王老师门下的学友郑伟达、胡泾捷，也在共同的讨论中给了我许多启发。这两个人非常勤奋，也非常认真，从他们身上我受益良多。在此也向他们二位表示感谢。

参考文献

《热交换器设计手册》，工业出版社，尾花英朗著，1982.9
《工业炉手册》，冶金工业出版社，日本工业炉协会编，1989.4
《工业电炉》，清华大学出版社，江尧忠，1993.12
《锅炉手册》，机械工业出版社，林宗虎、张永照，1989
《传热学》，高等教育出版社，杨世铭，1980
《实用锅炉手册》，化学工业出版社，林宗虎、徐通模，1999
《锅炉燃烧理论与应用》，上海交通大学出版社，还博文，1999 年
《环境保护概论》，高等教育出版社，林肇信、刘天齐等， 2000 年。
《锅炉低 NOx 排放煤粉分级燃烧的优化》，《电站系统工程》13 卷第二期，钟北京、傅国标，1997
《燃烧过程钟 NOx 形成的数学模拟》，《燃烧科学与技术》第一卷第二期，钟北京，徐旭常，1995