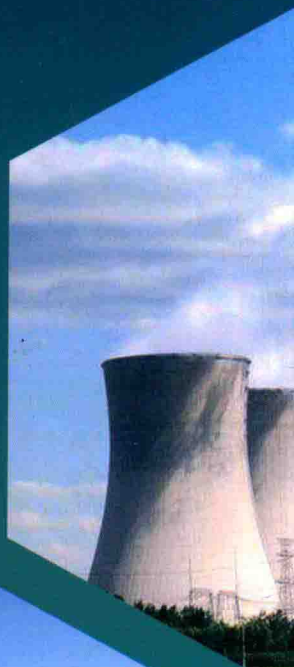


10

燃煤机组锅炉

低氮燃烧改造 实践及应用

孙路石 于洁 李敏 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

RANMEI JIZU GUOLU

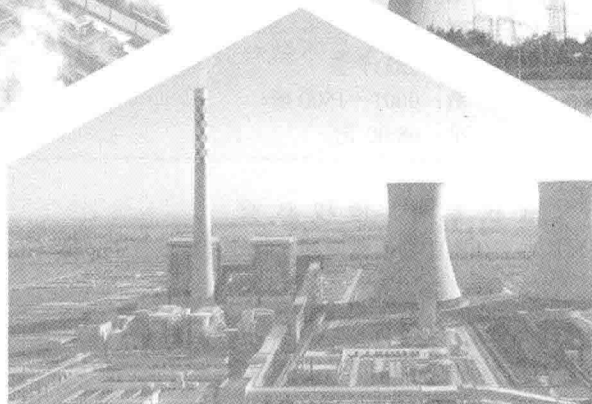
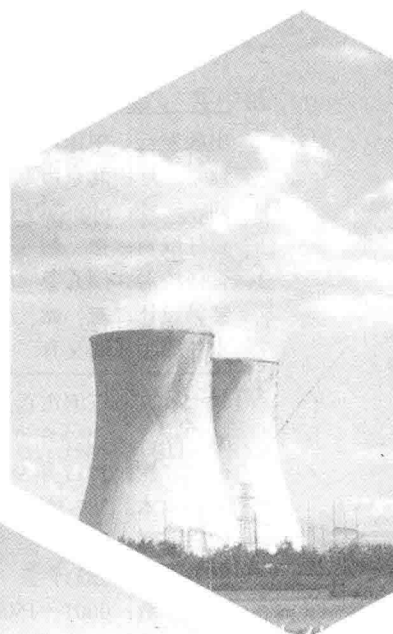
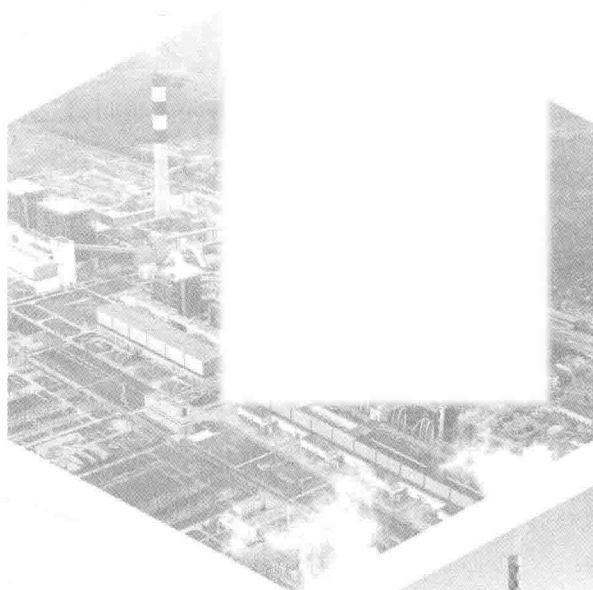
DIDAN RANSHAO GAIZAO

SHIJIAN JI YINGYONG

燃煤机组锅炉

低氮燃烧改造 实践及应用

孙路石 于洁 李敏 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书以燃煤机组锅炉为对象,对锅炉低氮燃烧技术的理论与工程实践进行了全面的介绍。本书主要内容包括氮氧化物的生成机理、目前流行的低氮燃烧技术,并比较了低氮燃烧技术在不同炉型上的应用。本书对不同类型和容量的电站锅炉低氮改造实例进行了分析,并提出了方案设计方法和低氮燃烧改造后的锅炉优化运行技术;最后对低氮燃烧技术相关设备的改造进行了总结。

本书适合研究人员、设计人员及锅炉运行人员阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

燃煤机组锅炉低氮燃烧改造实践及应用 / 孙路石, 于洁, 李敏编著. —北京: 中国电力出版社, 2017.9

ISBN 978-7-5198-1081-8

I. ①燃… II. ①孙… ②于… ③李… III. ①燃煤机组—锅炉燃烧—研究 IV. ①TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 206661 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 徐 超 (010-63412386)

责任校对: 闫秀英

装帧设计: 左 铭

责任印制: 蒯义舟

印 刷: 三河市百盛印装有限公司

版 次: 2017 年 9 月第一版

印 次: 2017 年 9 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 16

字 数: 353 千字

印 数: 0001—1500 册

定 价: 68.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

我国是一个富煤、贫油、贫气的国家，经济发展主要依靠煤炭能源，煤炭对我国经济的发展做出了巨大贡献，2015 年我国煤炭探明储量为 15 663.1 亿吨。然而煤炭在其利用开发过程中，对环境也造成了一定的污染。煤炭燃烧过程中会产生二氧化硫、氮氧化物、颗粒物以及重金属等污染物。这些污染物若处理不当，将会对大气产生严重的污染。

随着国家环保标准的提高，燃煤机组对氮氧化物的控制日益严格。目前环保部、发改委和能源局联合发布《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》，规定重点地区电站锅炉氮氧化物排放低于 $50\text{mg}/\text{m}^3$ （标准状态下），该标准比欧美发达国家更为严格。该氮氧化物排放标准对电站提出了更高的要求，需要更为可靠有效的氮氧化物控制技术。目前电站锅炉主要采用低氮燃烧和尾部烟气脱硝技术联合控制氮氧化物的排放。其中低氮燃烧技术能够在一次性投入的基础上，大幅降低氮氧化物排放量（可高于 50%）。

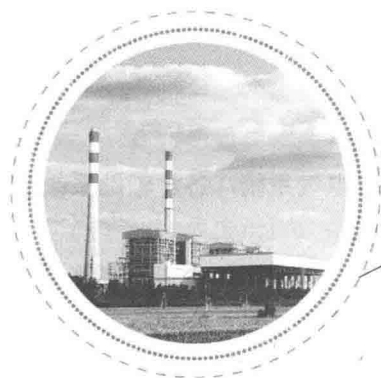
本书分为五章，第一章对燃煤电站锅炉污染排放以及法规进行了介绍；第二章对煤燃烧过程中氮氧化物的生成机理进行了总结；第三章对电站锅炉低氮改造进行了实例介绍；第四章对低氮燃烧改造后运行优化调整进行了介绍；第五章介绍了与低氮燃烧改造相关的设备的改造技术和途径。

本书通过理论介绍与实例分析相结合的方式对低氮燃烧技术在电站锅炉中的应用进行了介绍，对于学者、设计人员以及锅炉运行人员具有很好的指导作用。

由于作者水平限制以及编写时间的仓促，书中如若存在一些不妥之处，恳请读者批评指正。

前 言

● 第一章 概述	1
第一节 燃煤机组燃烧特性	1
第二节 燃煤过程中氮氧化物的形成	5
第三节 燃煤污染物的形成与危害	20
● 第二章 低氮燃烧原理与技术	30
第一节 低氮燃烧原理	30
第二节 低氮燃烧技术	31
第三节 低氮燃烧器	37
● 第三章 与低氮燃烧改造相关设备的改造	70
第一节 制粉系统改造	70
第二节 风机改造	82
第三节 水冷壁贴壁风改造	86
● 第四章 低氮燃烧改造后运行优化调整	94
第一节 冷态试验方法	94
第二节 针对性的运行调整热态试验	106
第三节 低氮燃烧引起的其他问题	138
● 第五章 低氮燃烧改造案例分析	151
第一节 四角切圆燃烧锅炉	151
第二节 前后墙对冲燃烧锅炉	181
第三节 “W”型燃烧锅炉	214
第四节 低氮改造方案设计方法优化	226
● 参考文献	243



第一章

概述

第一节 燃煤机组燃烧特性

电力是国民经济发展的重要能源，火力发电是我国和世界上许多国家发电的主要方式。如图 1-1 所示，煤炭在锅炉内燃烧放出热量，将水加热成具有一定压力和温度的蒸汽，蒸汽沿管道进入汽轮机膨胀做功，带动发电机高速旋转，从而产生电能。在汽轮机中做完功的蒸汽排入凝汽器中凝结成液态水，然后被凝结水泵送入除氧器。水在除氧器中被来自抽汽管的汽轮机抽汽加热并除去所含氧气，最后又被给水泵送回锅炉中重复上述循环过程。发电厂中存在着三种形式的能量转换过程：在锅炉中煤的化学能转变为热能；在汽轮机中热能转变为机械能；在发电机中机械能转换成电能。进行能量转换的主要设备——锅炉、汽轮机和发电机，称为火力发电厂的三大主机。

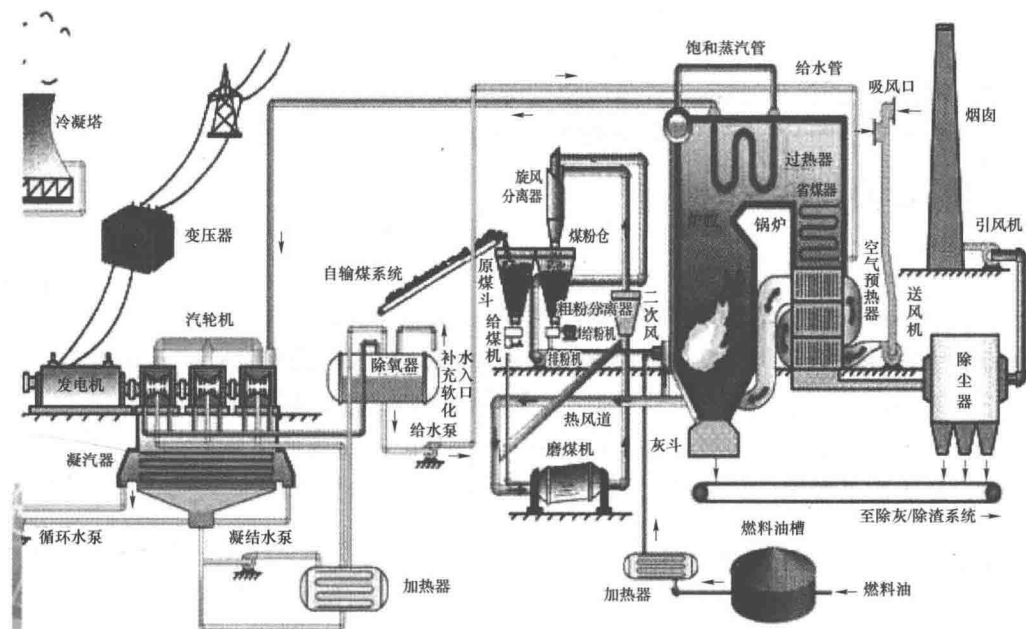


图 1-1 凝汽式燃煤电厂生产过程示意图



一、火电厂的组成

火力发电厂的主要生产系统包括汽水系统、燃烧系统和电气系统，各种辅助系统包括供水系统、化学水处理系统、输煤系统和热工控制系统等。

二、火电厂的分类

1. 按燃料分类

可分为：

- (1) 燃煤发电厂：以煤为燃料的发电厂；
 - (2) 燃油发电厂：以石油（实际是提取汽油、煤油、柴油后的油渣）为燃料的发电厂；
 - (3) 燃气发电厂：以天然气、煤气等可燃气体为燃料的发电厂；
 - (4) 余热发电厂：用工业企业的各种余热进行发电的发电厂。
- 此外，还有利用垃圾及工业废料作为燃料的发电厂。

2. 按原动机分类

可分为凝汽式汽轮机发电厂、燃气轮机发电厂、内燃机发电厂和蒸汽-燃气轮机发电厂。

3. 按供出能源分类

可分为：

- (1) 凝汽式发电厂：只向厂外供应电能的电厂；
- (2) 热电厂：同时向厂外供应电能和热能的电厂。

4. 按发电装机容量的多少分类

可分为：

- (1) 小容量发电厂：装机总容量在 100MW 以下的发电厂；
- (2) 中容量发电厂：装机总容量在 100~250MW 范围内的发电厂；
- (3) 大中容量发电厂：装机总容量在 250~600MW 范围内的发电厂；
- (4) 大容量发电厂：装机总容量在 600~1000MW 范围内的发电厂；
- (5) 特大容量发电厂：装机总容量在 1000MW 以上的发电厂。

5. 按蒸汽压力和温度分类

可分为：

- (1) 中低压发电厂：蒸汽压力小于 4.90MPa、蒸汽温度为 450℃ 的发电厂，单机功率



小于 25MW;

(2) 高压发电厂: 蒸汽压力为 7.84~10.8MPa、蒸汽温度为 538℃左右的发电厂, 单机功率小于 100MW;

(3) 超高压发电厂: 蒸汽压力为 11.8~14.7MPa、蒸汽温度为 538℃左右的发电厂, 单机功率小于 200MW;

(4) 亚临界发电厂: 蒸汽压力为 15.7~19.6MPa、蒸汽温度为 538℃左右的发电厂, 单机功率为 300~600MW 不等;

(5) 超临界发电厂: 蒸汽压力为 24MPa 左右、蒸汽温度为 538℃左右的发电厂, 机组功率为 1000MW 及以上。

6. 按供电范围分类

可分为:

(1) 区域性发电厂: 在电网内运行, 承担一定区域性供电的大中型发电厂;

(2) 孤立发电厂: 不并入电网内, 单独运行的发电厂;

(3) 自备发电厂: 由大型企业自己建造, 主要供本单位用电的发电厂(一般也与电网相连)。

三、锅炉燃烧方式

1. 切向燃烧锅炉

四角切圆的燃烧方式是将煤粉(一次风)和二次风在炉膛四角与炉膛中心一假想圆相切的方式喷入炉膛, 实现煤粉的切圆燃烧。四角切圆燃烧方式具有炉膛充满度好、扰动大、有利于燃尽和低 NO_x 排放等一系列优点, 是一种先进的燃烧方式。

20 世纪 80 年代初期, 国内引进了美国 CE 公司的 600MW 亚临界锅炉四角切圆燃烧设计制造技术, 但该燃烧技术还不能适应燃烧低挥发分劣质煤的要求、低负荷稳燃和 NO_x 排放量达不到预期值。哈尔滨锅炉厂有限公司与清华大学、哈尔滨工业大学等科研单位合作, 在 CE 公司技术的基础上开发了多项高效低 NO_x 排放、低负荷稳燃等燃烧技术, 如水平燃烧技术、双通道燃烧技术和整体分级燃烧技术等。可以实现空气分级供风、燃料分级的燃烧, 不仅使四角切圆燃烧技术能够稳定地燃烧低挥发分的劣质煤, 而且使 NO_x 等污染物的排放量低于国家标准, 处于国际先进水平。

2. W 型火焰锅炉

W 型火焰锅炉是美国福斯特·惠勒(FW)公司首创的一种炉型, 它起源于早期的 U 型燃烧炉, 也被称为“双 U 型”“下射式”或“拱式”燃烧炉。W 型火焰锅炉由下部的拱式主燃区和上部的燃尽区组成, 主燃区的深度比燃尽区大 80%~120%; 前后突出部分构成拱体, 燃烧器和部分二次风布置在拱上, 以与竖直方向呈一个较小的角

度喷入炉膛。煤粉气流和助燃二次风从拱顶向下喷入炉膛后,受到炉膛中心高温烟气的辐射加热和卷吸炉膛中的高温烟气的加热作用,开始着火燃烧,煤粉火焰向下伸展,在炉膛下部与分级风相遇后,受到分级风的顶托和热力浮升共同作用,开始逐渐转折上行,最后沿炉膛中心轴线方向上升,进入燃尽区,两拱燃烧的煤粉火焰在炉内形成“W”形火焰。W型火焰锅炉具有如下特点:① 分级送风,一次风煤粉气流和部分二次风从缩腰的前后墙拱上向下喷出,分级风沿火焰行程逐渐加入已着火的煤粉气流,从而实现分级送风,符合低挥发分煤燃烧过程延缓的特点;② 火焰行程长,煤粉颗粒在炉内的停留时间长,符合低挥发分煤燃尽时间长的特点;③ 炉膛温度高,下炉膛四周布置了大量卫燃带,使下炉膛燃烧温度较高,符合低挥发分煤燃烧过程需要较高温度的特点。W型火焰锅炉这些优点有利于无烟煤等低挥发分煤的着火、稳定燃烧和燃尽。

我国 20 世纪 90 年代初首次引进了不同技术风格的 6 台 300MW 级 W 型火焰锅炉用于燃用低挥发分煤。西安热工研究院通过调研低挥发分煤的燃烧技术,推荐挥发分低于 10% 的无烟煤使用 W 型燃烧方式。W 型火焰锅炉燃烧稳定性强、调峰能力高、煤种适应性广,为其在国内电力行业的迅速发展奠定了基础。国内三大锅炉制造商也相继引进了不同技术风格的 W 型火焰锅炉制造技术,使得 W 型火焰锅炉的国产率越来越高,制造成本越来越低,技术也越来越成熟,这些因素都使得大批不同技术风格亚临界 300MW 级机组和 600MW 机组的 W 型火焰锅炉在中国投运。并且已经向机组大型化、高参数方向发展。

3. 对冲燃烧锅炉

前后墙对冲燃烧,不仅可以强化煤粉气流的扰动与混合,增加气流在炉膛中的充满度,而且沿炉膛宽度方向热负荷及烟气温度分布更均匀,在减少炉膛出口左右侧烟温偏差方面比四角切圆燃烧具有明显的优势。同时,前后墙对冲燃烧对降低高温区受热面局部发生高温蠕变及高温腐蚀的可能性具有较好的作用。当锅炉容量增大时,只需沿炉宽方向相应增加燃烧器数量,炉膛深度变化不大,易于实现锅炉系列化。

前后墙对冲燃烧锅炉大多采用旋流燃烧器。煤粉气流经过旋流器后形成旋转气流,射出喷口后在气流中心形成回流区,这个回流区叫内回流区。内回流区卷吸炉内的高温烟气来加热煤粉气流,当煤粉气流拥有了一定热量并达到着火温度后就开始着火,火焰从内回流区的内边缘向外传播。在旋转气流的外围也形成回流区,这个回流区叫外回流区。外回流区也卷吸高温烟气来加热空气和煤粉气流。在着火后的煤粉气流的外围送入的二次风也形成旋转气流,故二次风与一次风的混合比较强烈,使燃烧过程连续进行,直至燃尽。按照旋流器的结构,旋流式燃烧器可分为蜗壳式、可动叶轮式和可动叶片式三大类。

第二节 燃煤过程中氮氧化物的形成

一、煤中氮的含量及赋存形态

1. 氮的含量

煤中氮含量较少，一般在 0.5%~2.5% 之间。但是煤中的氮对煤炭利用的影响却较大，尤其是在煤高温燃烧时，其中的氮元素易生成 NO_x 排出，污染大气。

煤中氮的含量与煤阶微弱相关。图 1-2 给出的煤种包括从泥煤到烟煤范围的印度煤、处于烟煤和无烟煤之间的英国煤。从图中可以看出，煤中氮含量随煤阶的升高而升高，含碳量在 85% 时（干燥无灰基质量含量），氮含量达到最大值，然后随着含碳量的增加而趋于下降。当含碳量增加到 80% 以上时，煤中氮含量继续增加，这可能主要归因于氧含量的降低。

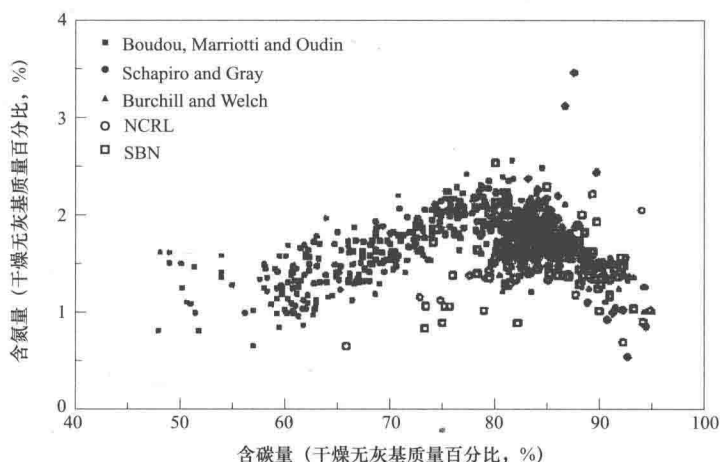


图 1-2 煤中氮的含量与煤阶的关系

尽管煤中氮含量与煤阶微弱相关，但氧氮质量比与煤阶之间存在一定的关系。研究表明，氧氮质量比随含碳量的增加而降低。

此外，对我国大多数煤来说，煤中的氮和氢含量有如下关系：

$$\text{N}_{\text{daf}} = 0.3\text{H}_{\text{daf}}$$

按此式计算的误差一般在 0.3% 以内。

煤中氮来源于煤炭形成时期的植物。它的化学成分来源于植物和细菌中的蛋白质、氨基酸、生物碱、叶绿素和叶啉等。煤化作用首先去除碳、氢和氧，而氮似乎固定在煤炭的形成阶段。因此，煤中氮几乎是完全以有机氮形式存在，而有机氮主要以吡咯、吡啶和季氮等形式存在于大分子化合物中的多环芳香结构中。这些被认为存在于煤中的杂

环化合物被称为喹啉、吡啶、咔唑或吡啶。这些杂环化合物被束缚在一个交联的大分子结构中，交联的程度与煤阶相关。

2. 氮的赋存形式

通常认为煤中氮元素全部以有机氮形式存在，以含氮官能团的形式存在于化合物中，是煤大分子结构的一部分。煤中氮的有机官能团结构决定着燃料氮在煤的热解、燃烧过程中氮元素热迁徙的路径。所以，研究煤中氮的赋存形态，是研究煤燃烧过程中氮氧化物生成规律的前提。

煤、煤焦属于不透明的固体，给鉴定其中微量元素的有机形态带来了困难，因而采用光线投射直接检测进行鉴定的方法并不适用。尽管如此，仍然有 X 射线光电子能谱（XPS）、X 射线边缘结构吸收能谱（XANES）、固体核磁共振（NMR）以及漫反射的傅立叶红外仪（TIR）等仪器成功地用于煤中氮有机形态的研究。但是，在检测中也存在一些问题，特别对于像 XPS 仪器来说，由于仅能对样品的表面进行检测，而且得到的氮官能团的谱带相互重叠，不得不对测定数据进行非线性拟合。一般来说，煤表面和其内部含氮官能团之间具有很好的关联，但表面氧化现象的存在也会对测定结果产生一定的影响。

图 1-3 给出了各种形态氮的结构及其在煤分子结构单元中所处的位置，对图中各符号的含义做如下定义：

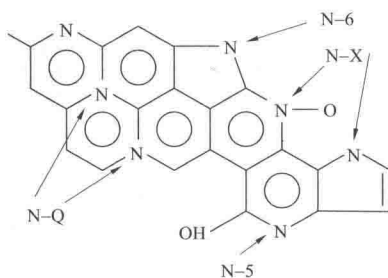


图 1-3 煤分子结构单元中含氧官能团的形态

(1) N-6 表示吡啶型氮，是指位于煤分子芳香结构单元边缘上的氮。

(2) N-5 表示吡咯型氮，主要指位于煤分子单元结构边缘上的五元环中的氮，还包括含有氧官能团的吡啶，如吡啶酮及其互变异构形式（如图 1-4 所示）。把吡啶酮及其互变异构形式归入 N-5，是因为在这些结构中的氮原子的结合能与在吡咯中氮原子的结合能相近，利用 XPS 无法将它们区分开。吡啶酮中的氮原子位于酚 C—OH 的 α 位置，氮原子中的 2 个 P 电子就进入芳香环的 π 系统之中，而在吡啶中，只有 1 个氮的电子离开原位。因此，吡啶酮型氮的结合能与吡啶氮不同，但与吡咯相近。在煤及煤焦中，吡啶酮形成的原因是煤在热解过程中被加热所致，或长期在空气中保存也能形成吡啶酮。虽然利用 XPS 无法区分吡咯与吡啶酮，但利用 XANES 可以对它们进行区分，只是成本更加昂贵，更难进行。

(3) N-Q 表示并入煤分子多重芳香结构单元内部的吡啶氮，这类氮在多环芳香结构内部取代了碳的位置，并与 3 个相邻芳香环相连，它的有效电荷以及结合能远高于位于芳香环边缘上的吡啶型氮，且略带正电荷，在此称为质子化吡啶。

(4) N-X 表示氮的氧化物，是指吡啶中的氮原子与氧原子直接相连的结构，如图 1-4 所示，同时还表示硝酸盐成分。

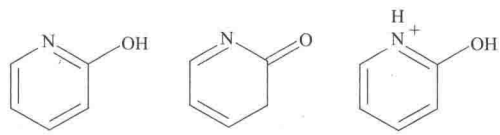


图 1-4 吡啶酮及其互变异构形式

原煤中氮元素赋存形态的研究已达成了比较统一的认识，比较有代表性的分布为：50%~80%为吡咯型含氮官能团，20%~40%为吡啶型含氮官能团，0~20%为季氮型含氮官能团。随着近年来 XANES 技术的发展，认为在一些低阶煤中存在吡啶酮。通过 XPS 对煤及炭质材料的分析，可以得到各主要含氮官能团的结合能见表 1-1。

表 1-1 煤 中 主 要 氮 官 能 团

氮的形态	符 号	结合能 eV
吡啶	N-6	398.7
吡咯	N-5	400.5
质子化吡咯	N-Q	401.1
氮氧化物	N-X	403.5

胺类物质在低阶煤中含量一般不超过 10%。各种含氮官能团的比例随着煤种的不同而有很大的差异，吡咯氮、吡啶氮随碳含量的增加而增加，达到一个极大值后随碳含量的增长出现降低的趋势，吡咯氮的极大值出现在碳含量为 85%左右，而吡啶氮的极大值出现在碳量约为 90%处，季氮随煤阶的增长而减少，高阶煤中季氮的含量相当少，在煤受热裂解过程中，煤中含氮官能团也发生变化。在温度低于 923K 的中度热解条件下，煤焦中吡啶型氮增加、吡咯和季氮型氮减少、高温和较长的停留时间会明显减少煤焦中吡咯的含量；吡咯型氮会向吡啶型氮转化，同时吡啶型氮也有一部分转化为季氮的形式。总体看来，在低温条件下，随着热解温度的升高和停留时间的增加，煤焦中吡啶型氮的比例会保持不变或呈现增加的趋势；高温热解条件下，吡啶氮随温度的升高也呈现下降趋势。

研究表明，氮的各种形态在煤的分子结构中均存在。在热解及燃烧的过程中，煤中各种形态氮的转化、在煤焦中的分布以及随挥发分的释放均与环境条件密切相关，掌握不同条件下煤中氮的迁移规律，对于有效控制氮氧化物的生成有重要意义。

二、煤中氮的热迁徙途径

煤中氮元素，简称煤氮或燃料氮，是煤在燃烧、热解及气化等过程中氮氧化物的主

要来源。这些过程都伴有煤及其中的氮原子的受热、升温及氧化、还原等物理和化学过程。氮原子在这些过程中的变迁特性决定着氮氧化物的最终生成和排放。

煤的燃烧一般可以分为两个阶段。一是煤粉颗粒受热析出挥发分，也就是通常所说的热解阶段，分别形成挥发分和煤焦；二是挥发分和煤焦的燃烧。热解阶段一部分燃料氮也会随挥发分析出，形成挥发分氮，而留在煤中的氮则为焦炭氮，还有一部分燃料氮会在热解过程中直接转化为氮气并随挥发分析出。在后续的燃烧过程中，挥发分氮和焦炭氮分别燃烧生成氮氧化物和氮气。因此，燃料氮的最终产物是氮氧化物和氮气。

氮氧化物排放主要由 NO 来决定，在通常的燃烧温度下，NO 占 90% 以上，NO₂ 仅占 5%~10%。其中 NO₂ 是由 NO 被 O₂ 在低温下氧化而成得到。因此，我们在本书中主要讨论 NO 的控制。理论上，根据 NO_x 生成来源的不同可以将 NO_x 分为热力型、快速型以及燃料型。

其中燃料型 NO_x 的生成机理十分复杂，尚未形成完全一致的说法，在此试讨论如下。燃料型 NO_x 生成路径可用图 1-5 表示。

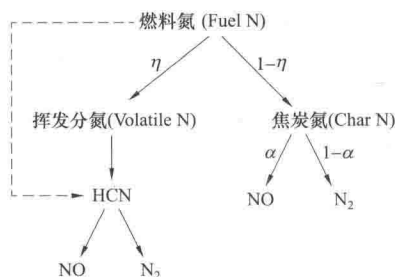


图 1-5 燃料型 NO_x 生成路径

在煤粉的实际燃烧过程中，煤粉颗粒以 $10^4 \sim 10^5 \text{ K/s}$ 的加热速率快速升温，通过煤粉颗粒周围烟气的热传导、火焰和周围墙体对煤粉颗粒的热辐射，快速到达高于 1800K 的温度。煤大分子结构首先发生热分解，煤颗粒中沥青类物质受热膨胀，随后挥发分在 10ms 的时间间隔内快速析出，煤中的氮元素以不同的比例进入挥发分和相应产生的煤焦中。挥发分中的氮元素以小分子结构的形态存在，比如 HCN、NH₃ 及吡咯、吡啶、季氮官能团相结合的多环芳香结构。挥发分随着温度的升高经历快速均相和异相反应，随着挥发分物质的燃烧，形成包围焦炭颗粒的火焰面。

而煤焦的吸热气化反应非常缓慢，反应大约持续 300ms~1s。相对于焦炭的气化反应，挥发分在煤焦孔隙中的停留时间及析出的时间较短，因此燃料氮均相反应与异相反应之间的交互作用可能性并不大。鉴于挥发分与煤焦在燃烧时间上的巨大差距，同时考虑到试验数据的采集，对挥发分和煤焦独立进行研究是常用的研究手段。

随着氧的扩散，挥发分点燃导致煤颗粒燃烧，各种含氮中间产物发生氧化、还原反应，最终部分转化为 NO_x、N₂O 或还原为 N₂。氮氧化物的前驱物分别通过不同的反应途径，最终氧化生成各种氮氧化物。

三、燃煤过程中 NO_x 生成影响因素

在煤粉燃烧过程中影响 NO_x 排放的主要因素包括：锅炉设计和燃烧状况、燃烧器的设计和运行以及煤质。在一般情况下，在富燃料条件下煤的快速脱挥发分可以使煤中尽可能多的氮转化为 N₂。在现代锅炉中，配备有低 NO_x 燃烧器，同时只供应煤粉颗粒燃烧所需的部分空气，以创建一个高温缺氧区，最大限度地提高挥发分的产率和挥发分氮转化为 N₂ 的程度。因此，煤中的挥发分含量越高，则排放的 NO_x 可能就越低；而煤中挥发分含量越低，则大部分的氮保留在焦炭中并被释放在燃尽区，排放的 NO_x 则可能就越高。在传统的锅炉中，燃烧器的布置方式使得煤粉和空气剧烈混合，在富氧的条件下是为了同时实现较高的燃烧强度和热效率。这导致了挥发分和焦炭中的氮较多地转化为 NO。

氮释放率同样与焦炭氮转化率和失重率有关。对于挥发分更高的煤种，在燃烧的初始阶段氮释放速率通常比碳损失和总质量损失的速率低，这可能会导致焦炭氮暂时富集，在低燃烧温度下尤为明显。在较高温度下，氮释放量与燃煤的总质量损失成正相关，焦炭氮含量增加与 NO_x 排放成正比关系。因此碳转化率可以作为氮释放的一个指标，特别是在焦炭氧化阶段，氮的释放和碳转化率关系是近似线性的。

煤粉颗粒的燃烧过程分为三个阶段：轻烃和永久性气体的迅速挥发、焦油和其他气体以较慢的速度挥发、焦炭缓慢燃烧。挥发分在气相中进行反应，在形成 N₂ 或 NO 之前进行快速热解，焦油中的大部分氮转化为 HCN（连同少量的 NH₃）。最后，焦炭和挥发分燃烧释放更多的氮氧化物，其产生速率远远大于焦油。焦炭和挥发分中氮转化形成的 NO 可进行气固反应，形成分子氮。由于氮化合物在每一阶段都参与反应，最终氮氧化物的形成取决于多种因素，列于表 1-2。

表 1-2 煤粉燃烧过程中 NO_x 排放的影响因素

锅炉设计	锅炉形式（对冲锅炉，四角切圆锅炉，W 型锅炉）、机组容量、燃烧器形式与数量（传统燃烧器、低氮燃烧器）、煤粉在燃烧器区域的热停留时间、是否有燃尽风
锅炉运行	投运磨煤机数量、过量空气系数、旋流强度、一二次风量比
煤粉特性	热值、煤质的品阶、煤种氮含量、挥发分含量

锅炉类型和配置有多种，根据煤粉燃烧器在炉墙上的布局分为对冲锅炉、四角切圆燃烧锅炉和 W 型锅炉。配有对冲燃烧器的锅炉由于产生强烈的湍流火焰，比四角切圆燃煤锅炉氮氧化物排放量高。现行锅炉 NO_x 的排放量主要取决于锅炉内的燃烧条件和煤的性质。

煤中挥发分含量和氮含量都会影响 NO_x 的产生，采用低 NO_x 燃烧器燃用常用煤种时可降低 NO_x 排放。实验研究发现，随着煤的氮含量的增加，NO 的产生量也增加。但是，氮的转化效率与氮含量的增加是没有线性关系的，这表明还有影响 NO_x 排放的其他因素。实践表明在空气分级的条件下，高挥发分烟煤比低挥发分烟煤产生的 NO_x 少。

本文后面章节重点讨论燃烧器的设计和运行的影响，因此在此对其他影响因素进行简要介绍。

（一）锅炉运行工况对 NO_x 的影响

锅炉的设计和运行等潜在因素都会影响煤粉燃烧过程中 NO_x 形成，而对于经过燃烧优化和调整的锅炉，影响 NO_x 生成的主要参数是：煤粉粒径分布、风粉混合程度、化学当量、煤粉炉内停留时间、过量空气系数、温度。

1. 煤粉粒径分布对 NO_x 的影响

切圆燃烧锅炉煤粉粒度分布对 NO_x 排放水平没有显著影响，但大粒径煤粉 ($>75\mu\text{m}$) 的燃尽率较低。在旋流燃烧器中颗粒粒径的减小导致 NO_x 排放物增加，原因是小粒径渗透在火焰内部进行再循环。这个循环导致煤粉颗粒在内部再循环区的缺氧区域中的停留时间变短，从而使 NO_x 的形成量增加。

尽管一般认为小颗粒增加 NO_x 的生成，但也有实验表明 NO_x 排放随粒径减小而减小。提高煤粉细度（满负荷锅炉）并降低过量空气的水平，同时保持飞灰含碳量在允许范围内，可减少氮氧化物的排放，并有可能提高锅炉效率。减小颗粒粒径可降低 NO_x 的排放，最高达 10%。一种可能的解释是因为所使用的煤的挥发分含量高。小颗粒比大颗粒有较高的加热速率，导致大量挥发分燃料氮生成氮氧化物的中间产物，如 HCN（或 NH_3 ）的比例较大。过量的 HCN（或 NH_3 ）产生后将降低 NO，而不是与氧气反应以产生 NO。类似地，高挥发分煤细颗粒产生的 NO 小于精细磨碎的低挥发分的煤。

2. 风粉混合程度对 NO_x 的影响

一二次风带旋、中心风不带旋可实现低 NO_x 排放。当二次风不带旋、中心风带旋，通常创建大的再循环区，这将导致空气和燃料的快速加热，通过热烟气的再循环，将产生更高的氮氧化物的排放。当二次风带旋、中心风不带旋，几乎没有热烟气再循环来加热空气和煤， NO_x 排放较低。总体来说旋流强度越低则 NO_x 排放越低，旋流强度越大则 NO_x 排放越高。

而另有研究表明，没有涡流产生将使 NO 的最高排放发生在富氧环境的附近，而增加旋流强度至 1.5 引起 NO 的排放显著下降。低 NO_x 燃烧器可以利用这种类型的火焰，设计产生一个贫氧环境中的煤脱挥发分过程，而在火焰外边缘供氧达到完全燃烧的目的。

3. 煤粉停留时间和化学当量对 NO_x 的影响

采用空气分级，在燃烧过程中燃烧区按照过量空气系数被划分成富燃料区（贫氧区）和燃尽区。在富燃料区，过量空气增加 NO 的生成，而较低的过量空气系数则可有效地抑制 NO 的生成。有研究表明通过改变燃烧区的空气当量比，同时保持 5% 的过量氧气水平下，可以有效抑制 NO 生成。

有研究确定主燃区最佳化学当量比在 0.9 左右 (图 1-6), 随着主燃区的过量空气入口的距离或煤粉停留时间增加, NO_x 生成量减少。

图 1-7 显示了分级燃烧的效果以及燃烧器喷口各距离处烟煤燃烧 NO 排放量的关系。三种化学当量下, 在燃烧器区域附近 NO 排放量最高。不分级燃烧条件下, 各处的氮氧化物排放量最高。在化学当量比为 0.95 的条件下, 在主燃区 NO_x 的排放量从 $700\mu\text{L/L}$ 减少为 $400\mu\text{L/L}$ 。增加过量空气, NO 通过稀释降低至 $350\mu\text{L/L}$ 。随着燃尽风的加入, 焦炭中氮被释放到气相中, NO 的排放量增加至约 $170\mu\text{L/L}$ 。

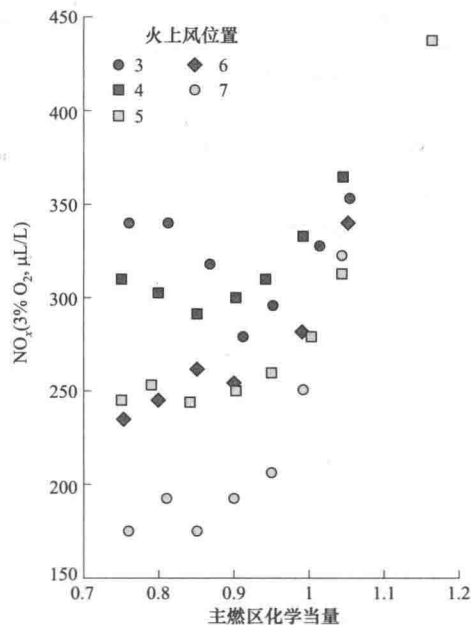


图 1-6 主燃区化学当量对氮氧化物的影响

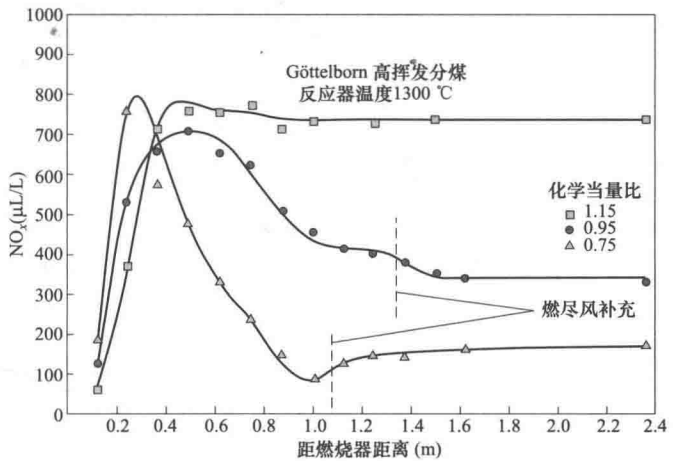


图 1-7 化学当量条件下燃烧器喷口氮氧化物排放

对于预混烟煤和褐煤, NO 排放浓度与煤粉在初始燃烧区中的停留时间呈函数关系。



在化学当量比为 0.8 条件下,挥发分中部分氮以 NO 形式释放,而在 0.6 条件下,HCN 和 NH_3 的形成量显著增加。

图 1-8 给出了煤粉在主燃烧区停留时间和化学当量比之间的关系。图 1-8 表明,煤粉停留时间的增加有利于气体氮氧化物还原 (NO、HCN 和 NH_3),从而显著降低 NO_x 排放。化学当量在 0.8~0.9 内 NO 排放量最低,随过量空气系数的增加而 NO 排放增加。

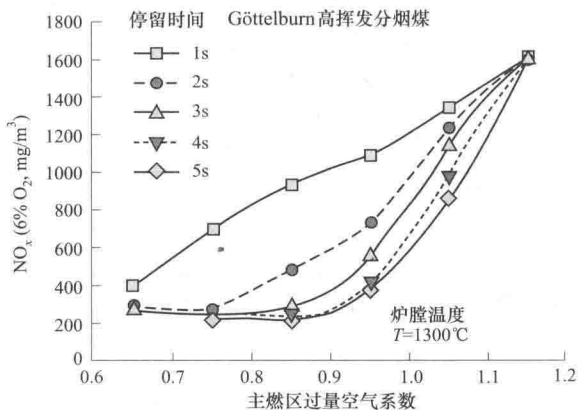


图 1-8 烟煤的煤粉停留时间对 NO_x 的影响

通常,75~400ms 是 HCN 转化成 N_2 的必要时间,但这也取决于反应温度,通常 450~500ms 为 HCN 的最佳停留时间。

4. 温度对 NO_x 的影响

热力型 NO_x 高度依赖于温度,温度升高促进热力型 NO_x 形成,而燃料型 NO_x 则对温度不敏感。在分级燃烧条件下,温度对 NO_x 影响与主燃烧区的化学当量比有关,特别是在较高的过量空气系数下。温度对主燃烧区 NO_x 的影响,在很大程度上取决于该区域化学当量比和煤的化学性质。对于中等挥发分烟煤和褐煤,温度对燃料 NO 影响很小。对于褐煤,NO 并未随着温度的变化而表现出排放量的变化。较高过量空气系数下,主燃烧区的化学当量比和分级燃烧温度对 NO 排放影响较大。

5. 过量空气系数对 NO_x 的影响

过量空气系统对 NO_x 的排放水平具有较大的影响。一般情况下,空气分级使主燃区具有较低的过量空气系数,从而可以降低 NO_x 。然而,氧含量的减少也同时导致不完全燃烧,从而导致灰分中的碳含量增加。

在英国 PowerGen 公司的能源技术中心的 1MW 燃烧试验设备上用 8 个煤种做出了过量空气系数与氮氧化物关系的测试,如图 1-9 所示。可以看出,随着过量空气系数的增加,NO 排放急剧增加。在高度分级燃烧系统中,NO 主要是通过焦炭中的氮氧化而形成的,而挥发分氮贡献很小。