

加热炉的氮氧化物排放优化操作

宗升

中国石油天然气股份有限公司大庆炼化分公司，黑龙江 大庆 163000

摘 要： 本文旨在综述当前氮氧化物排放控制的研究进展，分析加热炉氮氧化物排放的生成机制、影响因素及控制技术，探讨未来氮氧化物排放控制的发展趋势和方向。通过本文的研究，期望能够为炼油厂加热炉氮氧化物排放的有效控制提供理论支持和实践指导，推动环保技术的创新与应用，促进经济社会的可持续发展。还有就是对开工时点加热炉的时候，氮氧化物易超标情况进行分析和应对措施。

关 键 词： 氮氧化物；烟气；优化

Optimization Operation of Nitrogen Oxide Emissions from Heating Furnaces

Zong Sheng

China National Petroleum Corporation Daqing Refining and Chemical Branch, Daqing, Heilongjiang 163000

Abstract： The purpose of this paper is to summarize the current research progress of nitrogen oxide emission control, analyze the generation mechanism, influencing factors and control technology of nitrogen oxide emission in heating furnaces, and discuss the development trend and direction of nitrogen oxide emission control in the future. Through the research in this paper, it is expected to provide theoretical support and practical guidance for the effective control of nitrogen oxide emissions in refinery heating furnaces, promote the innovation and application of environmental protection technologies, and promote the sustainable development of economy and society. There is also the analysis and countermeasures for the nitrogen oxides that are easy to exceed the standard when the furnace is heated at the time of operation.

Keywords： nitrogen oxides; flue gas; optimization

引言

在各类工业排放源中，炼油厂作为能源消耗和污染物排放的大户，其加热炉等设备的氮氧化物排放问题尤为突出。加热炉作为炼油过程中的关键设备，其燃烧过程中产生的氮氧化物排放不仅受到燃料种类、燃烧条件等因素的影响，还与设备设计、运行管理等多个方面密切相关。因此，针对炼油厂加热炉氮氧化物排放的控制研究，不仅有助于降低炼油厂的污染物排放，提高环保水平，还能对其他工业领域的氮氧化物排放控制提供借鉴和参考。

一、加热炉中氮氧化物的形成原理

加热炉燃烧器所产生的 NO_x 分为三个部分，快速直接转化型、热力型和燃料转化型，其中主要为热力学 NO_x，在火焰高温区空气中的 N₂ 和 O₂ 气在高温条件下反应生成。

经分析可以得到加热炉燃烧过程中生成的烟气中的氮氧化物主要是 NO 和少量 NO_x，烟气中 NO 产生机理一般分为如下3种：

1. 热力型 NO_x。燃烧时，空气中氮在高温下氧化产生，其中的生成过程是一个不分支连锁反应。其生成机理在高温下总生成式为：N₂+O₂→2NO，NO+0.5O₂→NO₂；随着反应温度 T 的升高，其反应速率按指数规律增加。当 T<1500℃时，NO 的生成量很少；而当 T>1500℃时，T 每增加 100℃，反应速率增大

6.7 倍。

2. 快速型 NO_x。在碳氢化合物燃料燃烧时，当燃料过浓时，在反应区附近会快速生成 NO_x，由于燃料挥发物中碳氢化合物高温分解生成的 CH 自由基可以和空气中氮气反应生成 HCN 和 N，再进一步与氧气作用以极快的速度生成 NO_x，其形成时间只需要 60ms，所生成的 NO_x 与炉膛压力的 0.5 次方成正比。与温度的关系不大。

3. 燃料型 NO_x。指燃料中含氮化合物，在燃烧过程中进行热分解，继而进一步氧化而生成 NO_x。在生成燃料型 NO_x 过程中，首先是含有氮的有机化合物热裂解产生 N、CN、HCN 等中间产物基团，然后再氧化成 NO_x。

氮氧化物折算浓度与烟气中氧含量的关系为：

$$\bar{C} = \bar{C}' \times \frac{21 - O_2}{21 - X_{O_2}}$$

式中： $\bar{C}$ ——折算成基准含氧量时的颗粒物或气态污染物排放浓度， mg/m^3 ；

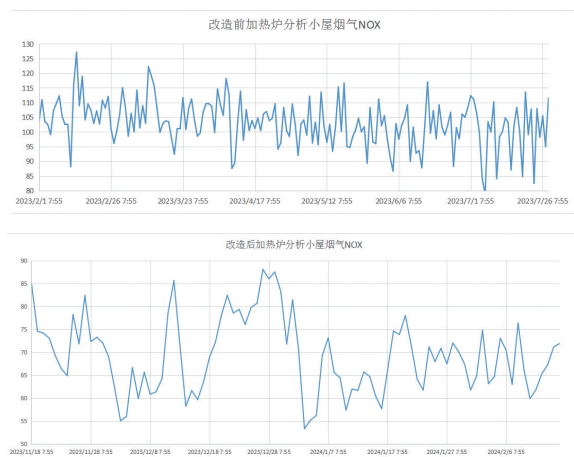
$\bar{C}'$ ——标准状态干烟气状态下颗粒物或气态污染物排放浓度， mg/m^3 ；

X_{O_2} ——在测点实测的干基含氧量，%；

O_2 ——有关排放标准中规定的基准含氧量，%。

二、加热炉低氮燃烧器使用情况

某石油汽油加氢装置共有三台圆筒式加热炉（F101、F201、F202），加热炉设计热负荷分别为：28.37MW（F-101）/5.83MW（F-201）/6.5MW（F-202），炉膛温度平均在600℃，火焰中心温度高，装置工艺要求烟气的排放必须符合环保指标要求（ $\text{SO}_2 \leq 100\text{mg}/\text{N}_3$ ； $\text{NO}_x \leq 100\text{mg}/\text{N}_3$ ），加热炉为纯瓦斯加热炉，瓦斯组分为 $\text{C}_1\text{--C}_4$ ，加热炉采用强制通风，综合炉膛温度、火焰中心温度及燃料组分可以看出，本装置 NO 类型主要是热力型、快速型而燃料型较少，燃烧器都设置在炉底的位置，采用底烧型式。三台加热炉共用一套落地式余热回收系统。利用烟气余热加热燃烧器助燃空气，2023年7月将燃烧器更换为低氮燃烧器。



由上图可以看出更换低氮燃烧器之前后的对比，更换之前氮氧化物排放平均在 $103\text{mg}/\text{m}^3$ ，更换之后氮氧化物排放平均在 $69\text{mg}/\text{m}^3$ 。

三、低氮燃烧器的运行机理

目前关于低 NO_x 燃烧器的所用到的其主要技术包括空气分级、燃料分级、烟气循环等。

空气分级燃烧，它的主要原理是把燃烧所需的空气分成两股。优点为改造简单，弥补了简单的低过量空气燃烧技术的缺点，缺点是需要很好的调整一二次风的配比，已出现不完全燃烧。且对 NO_x 控制有限。

燃料分级燃烧跟空气分级燃烧原理类似，整个燃烧过程所需的燃料分成多股。优点是可将火焰的负荷分散，单只枪的负荷和火焰降低，火焰高温区减少，进而可以控制氮氧化物的生成。缺点是，小负荷燃烧器燃料分级手段有限。

烟气循环法主要是将一部分燃烧后的烟气再返回燃烧区循环使用，降低火焰温度来控制 NO_x 的生成，烟气循环法最常用和最有效的控制方法。

此次更换低氮燃烧器原理采用燃料分级和烟气循环技术以最大限度限制热力学 NO_x 的生成。燃料分级以辅枪形式出现，燃料供应由耐火砖周围瓦斯枪喷头喷孔以一定的角度喷向燃烧区域来完成，从而达到分割火焰的目的。具有多孔分级燃烧技术和阶梯式分级燃烧技术，分层与助燃空气混合燃烧，直接拉大了火焰集中区，降低了局部火焰热强度，从而抑制了热力学 NO_x 的产生。同时，枪头喷出的火焰依靠耐火砖的独特结构，在燃料分级处形成负压区，进而使烟气在负压区进行回流、重新混合，形成烟气回流区，进一步降低高温区域，从而进一步降低 NO_x 的形成。

另外，燃烧器高速喷射的瓦斯射流带动燃烧区域附近烟气回流，加强了炉膛局部对流换热，提高炉效率的同时增加了炉管的使用寿命。

通过圆形火焰和方形扁平火焰燃烧器为例，详细说明燃料分级与强制烟气回流的技术原理。低氮燃烧器通过耐火砖内部的中心枪与耐火砖外部的瓦斯枪的燃料分级，降低局部高温区，使生成 NO_x 降低；分支瓦斯枪开孔按照一定角度，避免二级燃烧火焰相互重叠，进而增强火焰燃烧的稳定性，降低燃烧区的火焰温度， NO_x 在原来基础上也进一步得到降低。其次，由于分支瓦斯枪喷出高速燃料，形成局部低压区，形进而导致上部温度较低的烟气回流，使副局部火焰温度降低，最终使 NO_x 生成量降低^[1]。

四、装置降低氮氧化物的排放措施

（一）调整燃烧器主副火嘴比例来降低热力型氮氧化物排放

本次更换的燃烧器燃料分为两部分进入，实现了燃料分级，燃料分级配入并在两个相对独立的燃烧区内完成燃烧，即占比相对较少的中心燃料枪在过量空气中完成燃烧，大量的空气会降低火焰中心的温度，当氮氧化物排放量高时，可以通过关小副火嘴的方式避免热力学 NO_x 的大量生成。

（二）通过降低炉膛负压降低烟气中快速型氮氧化物含量

快速型氮氧化物是当燃料过浓时，在反应区附近会快速生成 NO_x ，由于燃料挥发物中碳氢化合物高温分解生成的 CH 自由基可以和空气中氮气反应生成 HCN 和 N ，再进一步与氧气进一步氧化其形成时间只需要60ms，所生成的 NO_x 与炉膛压力的0.5次方成正比。综上所述，日常的操作中我们可以通过降低炉膛负压的方式降低烟气中快速型氮氧化物的浓度。

（三）降低瓦斯中氮氢化合物含量降低烟气中氮氧化物含量

如果瓦斯中含氮化合物含量高，在燃烧过程中进行热分解，继而进一步氧化而生成 NO_x 的含量也随之增加。在生成燃料型 NO_x 过程中，首先是含有氮的有机化合物热裂解产生 N 、 CN 、 HCN 等中间产物基团，然后再氧化成 NO_x 。因此当装置烟气氮氧化物含量高时要及时联系化验对装置高压瓦斯中氮氢化合物含量，如分析出瓦斯中氮氢化合物含量偏高要及时联系公司调整瓦斯组分，从而降低氮氧化物的排放量。

（四）通过降低加热炉氧含量降低烟气氮氧化物含量

烟气中 NO_x 的生成反应离不开氧气的参与，氧气的含量影响 NO_x 的生成，这可以从烟气监测的实测值中直接反映出来，间接影响 NO_x 的折算值。氧气的含量高，生成的 NO_x 就会增加，则实测值增加，折算值增加；氧气的含量低，生成的 NO_x 就会减少，则实测值减小，折算值降低。

含氧量对氮氧化物折算值的另一个影响是直接的。这个可以从氮氧化物折算值的计算公式中分析了解到。计算公式如下：

氮氧化物折算值 = $[21/(21-X)]/1.4 \times$ 氮氧化物实测值，其中 X 为实测的烟气氧含量。

假定氮氧化物实测值不变，从换算后的公式中分析可得到烟气含氧量增大，分母变小，折算值增大；烟气含氧量降低，分母变大，折算值降低^[2]。

五、装置开停工期间，氮氧化物排放易超标问题分析

装置在开工期间，加热炉由自然通风状态改为强制通风期间，氧含量由 20% 降至 3% 期间氮氧化物容易出现氮氧化物超标情况。

当地相关部门对氮氧化物的监控，采用的是氮氧化物折算值的小时均值，折算值是氮氧化物的实测值乘以折算系数得到的，其中氮氧化物的生成与燃烧区的氧气浓度和火焰的温度密切相关，折算系数跟烟气氧含量有直接关系，氧含量高折算系数就大，所以说控制氮氧化物不超标的最重要的两个措施：一是降低燃烧区火焰温度，二是降低燃烧区氧气浓度

（一）降低燃烧区火焰温度，现在主要的做法

操作上进行优化：保证火嘴及长明灯是对称间隔的点，调整燃烧火嘴的风门，保证多火嘴（烟气内回流的低 NO_x 燃烧器，使燃烧器在设计正常负荷下工作），火焰燃烧的形态如短、硬、蓝的状态。

炼油厂用的低氮燃烧器可能都有所不同，低氮燃烧技术的发展经历了四个阶段：第一阶段传统燃烧器（氮氧化物排放水平 155-370mg/m³）；第二阶段分级扩散燃烧型（75-175mg/m³）；第三阶段分级扩散燃烧 + 烟气再循环（50-120mg/m³）；第四阶段多低氮技术耦合型（15-75mg/m³），当前技术发展正由第三阶段像第四阶段过渡，兼顾 NO_x 排放及能源效率。

（二）降低燃烧区烟气中的氧含量

停工过程：

1. 减少火嘴燃烧数量

烟气内回流的低 NO_x 气体燃烧器，燃料压力直接关系到烟气回流的强度，如果炉子处于低负荷运行，燃烧器燃料压力过低，烟气回流效果变差，NO_x 排放会上升。减少投用燃烧器数量，尽量使燃烧器在设计正常负荷下工作。保证燃料操作压力尽量高，以达到减少 NO_x 生成的目的。

2. 降低氧含量

采用低 NO_x 燃烧器的加热炉，加热炉氧含量需要控制在 3% 左右，这时燃烧器才能达到理性的排放值。氧含量过高，NO_x 会快速增高，在装置降温过程中，根据降温速度（25-30℃）逐一熄灭火嘴和长明灯，在此过程中内外操要多人配合，内操严密监

视氮氧化物瞬时值变化，逐步降低鼓风机、引风机的负荷，保证其不超标。外操要把熄灭的火嘴二次风门和长明灯风门要及时关闭，有漏风的风门可以考虑用胶带封死，关小引风机、鼓风机的入口挡板，关闭鼓风机烟气侧线，同时还要注意观察剩下火嘴的燃烧情况，保证燃烧正常。

3. 实现豁免

随着装置逐步降温过程中，加热炉的负荷在持续降低，当氧含量上升到一定数值，氮氧化物折算瞬时值将要超标时，此时需要向反方向调整，内操开大鼓风机负荷，外操开大鼓风机入口挡板、火嘴风门、看火窗等措施，使外排烟气氧含量迅速达到 19% 以上，实现豁免。

在进行该操作时，一是人员提前就位，选取在这一个小时内第 50 分钟至下一个小时第 10 分钟时间段内完成，二是系统降温速度已经降到很低，降至 10℃/h 以后再进行，以免影响系统降温速度，到达熄火温度时，加热炉进行熄火，改自然通风。

开工过程：

降低氧含量

装置氢气循环升温阶段，加热炉强制通风，先把长明灯一个点起来，根据升温速度点相应的火嘴，一般情况下在高压系统氢气循环升温阶段，加热炉负荷是比较低的，氧含量都能维持在豁免值 19% 以上，循环达到某一阶段时出现外排烟气中氧含量无法维持在 19% 以上，此时需要快速跨越豁免区，外操根据升温速度快速点几个火嘴，然后调整火焰燃烧状态，保证多火嘴、短火苗、完全燃烧，关小鼓风机入口挡板、火嘴风门，内操降低鼓风机转速，使外排烟气氧含量迅速降低，直至烟气中氮氧化物折算值、二氧化硫折算、颗粒物折算值降至正常水平。

在进行该操作时，人员提前就位，选取在这一个小时内第 50 分钟至下一个小时第 10 分钟时间段内完成，升温到一定温度，升温速度变得很缓慢^[3]。

六、结论

综上所述，在经济社会迅猛发展的背景下，国家逐渐加大了生态环境保护力度，并对工业污染物排放提出了更高的要求，颁布了一系列的降低氮氧化合物的排放标准。其目的之一就是减少加热炉燃烧生成的氮氧化合物的，保护大气环境，这是工业社会高质量发展必然需求。所以，化工企业在控制加热炉氮氧化物排放量中，应该结合自身与加热炉的实际情况，从低氮燃烧器的改造入手，分析加热炉燃烧生成氮氧化物的机理以及气体燃烧器组分异常情况，合理利用低氮燃烧技术。

参考文献

- [1] 曾令名. 炼油企业催化裂化装置再生烟气污染物减排技术分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量 .2024 ,44 (20):170-172.
- [2] 张立杰. SCV 烟气氮氧化物排放标准研究 [J]. 化工安全与环境 .2024 ,37 (10): 40-43.
- [3] 王浩渊. 从源头控制降低锅炉烟气排放中 NO_x 的方法 [J]. 节能 .2024 ,43 (07): 85-87.