

石化加热炉低NO_x燃气燃烧技术浅析

李晓阳

安徽华东化工医药工程有限责任公司上海分公司 上海 201315

摘要: 本文首先对石化装置加热炉燃气燃烧和废气排放标准进行了简单介绍, 随后分析了燃气燃烧过程中NO_x的生成机理和主要影响因素, 总结了现有的几种降低NO_x燃烧技术, 对加热炉低NO_x燃气燃烧器的设计和生产操作有一定的指导意义。

关键词: 加热炉; 燃烧; 低NO_x

Analysis of Low NO_x Gas Combustion Technology for Petrochemical Heating Furnace

Li Xiaoyang

Anhui Huadong Chemical&Medical Engineering Co., Ltd. Shanghai Branch, Shanghai, China 201315

Abstract: This article first provides a brief introduction to the gas combustion and exhaust emission standards of the heating furnace in petrochemical plants. Then, it analyzes the mechanism and main influencing factors of NO_x generation during the gas combustion process, summarizes several existing NO_x reduction combustion technologies, and has certain guiding significance for the design and production operation of low NO_x gas burners in heating furnaces.

Keywords: heating furnace; Burning; Low NO_x

加热炉是石化装置的重要热源, 一般热负荷较大, 主要燃料为燃料气, 燃烧产生的烟气一般比较洁净, 主要污染物是SO₂和NO_x, 两者是导致酸雨的主要因素, SO₂主要与燃料中硫含量有关, 随着近年国家对SO₂污染的重视, 燃料脱硫等技术被广泛推广和应用, 大气污染物中SO₂的排放已经有了较好的控制, 但NO_x的排放却有一定抬头。研究显示, 酸雨中硝酸根离子占比从上世纪末的1/10逐步上升到近年来的1/3, NO_x排放量的增加使部分地区酸雨恶化, 我国酸雨污染正由硫酸型向硫酸+硝酸复合型转变。此外, NO_x对大气的氧化性有一定影响, 导致光化学污染、雾霾等环境问题, 所以对加热炉低NO_x燃气燃烧技术的研究和推广具有十分重要的环保意义。

我国现有的大气污染物排放标准主要为: 国家综合性排放标准、行业性排放标准、地方或区域排放标准等。

国家综合性排放标准为GB 16297-1996《大气污染物综合排放标准》; 行业性排放标准有: GB 31570-2015《石油炼制工业污染物排放标准》、GB 31571-2015《石油化学工业污染物排放标准》、GB 13271-2014《锅炉大气污染物排放标准》、GB 13223-2011《火电厂大气污染物排放标准》等等。

有些地方为了保护当地环境, 制定了更加严格的地方或区域排放标准, 如上海市DB 31/933-2015《大气污染物

综合排放标准》、江苏省DB 32/4041-2021《大气污染物综合排放标准》、山东省DB 37/2376-2018《区域性大气污染物综合排放标准》等。这些排放标准对燃烧产生烟气中NO_x的浓度要求小于100、50甚至30mg/m³。NO_x排放限制日益严格, 对现有装置运行、改造和新建装置都带来了极大考验, 因此有必要对NO_x的生成机理、主要影响因素和低NO_x燃气燃烧技术进行研究。

1 NO_x的生成机理和主要影响因素

燃气燃烧生成的NO_x中主要是N₂O、NO₂和NO等氮氧化物, 其中NO占总体积的90%左右, 其他氮氧化物占总体积的10%左右。NO_x按生成机理不同可分为三个类型: 燃料型、热力型、快速型。

1.1 燃料型NO_x

燃料型NO_x是燃料气中的含氮物质在燃料气燃烧过程中被高温氧化而成, 生成NO_x的量与燃料中含氮物质的浓度有关。由于气态燃料中含氮物质很少, 因此燃烧后生成的燃料型NO_x也比较少, 主要是从源头燃料气着手减少含氮物质以减少燃料型NO_x。

1.2 热力型NO_x

1.2.1 生成机理

热力型NO_x是助燃空气中的N₂在燃料气燃烧过程中被高温氧化而成, 其反应公式为:



根据反应式可知,生成NO_x的速率和参与反应的N₂、O₂浓度有关。

1.2.2 主要影响因素

1) 温度:随着反应温度的升高,N₂和O₂反应速率加快。反应温度是影响热力型NO_x生成量的主要因素,降低反应温度即可极大的减少热力型NO_x的产生。热力型NO_x生成量与反应温度的关系如图1所示。

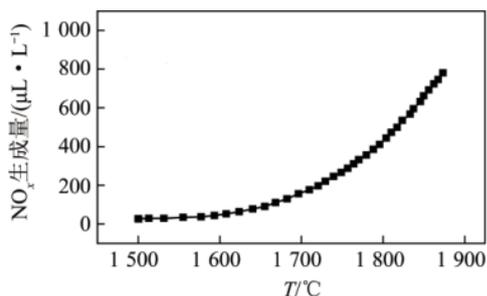


图1 热力型NO_x生成量与反应温度的关系

2) 过量空气系数(β):根据反应公式(1)(2)可知,当助燃空气过量时,反应物N₂、O₂的浓度增加,反应生成的热力型NO_x相应增加。由于助燃空气温度低于燃烧反应温度,当过剩空气量非常大时,空气对燃烧反应又起到了降温作用,使热力型NO_x的生成量减少。热力型NO_x生成量与过量空气系数的关系如图2所示,热力型NO_x的生成量随过剩空气量的增加先增加后减少,过量空气系数在0.4-1.0之间时热力型NO_x的生成量达到最大。

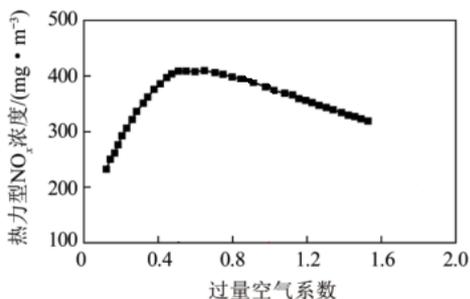


图2 热力型NO_x生成量与过量空气系数的关系

3) 停留时间:燃料气和空气在燃烧反应的高温区停留的时间越长,则发生氧化反应的时间越长,生成的热力型NO_x越多,因此应尽量减少燃料气和空气在反应区的停留时间。^[1]

1.3 快速型NO_x

1.3.1 生成机理

快速型NO_x是碳氢化合物燃料气燃烧过程中,在燃料气浓度大、空气少的燃烧反应区附近会快速生成NO_x。碳氢燃料气高温分解产生CH基,CH基与N₂反应生成N、HCN基,再和O₂反应,能快速生成NO_x,该反应活化能小、反应速度快,反应时间~60ms,反应中间产物O、OH基团与N₂发生反应会生成NO。

1.3.2 影响因素

1) 燃料类型:燃烧生成快速型NO_x的主要是碳氢燃料气,其他气体燃料(H₂、CO等)燃烧的过程中生成的快速型NO_x较少。

2) 流动状态:快速型NO_x的产生受气体的流动状态影响,当火焰附近气体以湍流状态流动时,快速型NO_x的生成量较大。

3) 过量空气系数:与热力型NO_x相似,过剩空气量增加,快速型NO_x先增多后减少,存在极值。

通过以上NO_x生成机理和主要影响因素分析可知,燃料气中含氮物质较少,因此燃烧生成的燃料型NO_x较少;影响快速型NO_x生成的主要因素是燃料类型、流动状态和过剩空气量,主要通过操作调整;热力型NO_x的生成主要受温度影响,另外还受过剩空气量和停留时间影响。热力型NO_x是燃气燃烧过程中最主要的NO_x来源。

为降低燃烧过程中产生的NO_x,需要根据不同的生成机理和影响因素,使用不同的低NO_x燃烧技术。

2 低NO_x燃气燃烧技术

低NO_x燃气燃烧技术主要分为:烟气循环燃烧、浓淡燃烧、空气分级燃烧、燃料气分级燃烧、旋流燃烧等。

2.1 烟气循环燃烧技术

烟气循环燃烧技术是指将低温烟气通过外循环或内循环的方式送至燃烧区,以降低燃料气、N₂、O₂的浓度,并降低燃烧反应温度,从而达到降低NO_x的目的。烟气循环燃烧主要分为烟气外循环燃烧和烟气内循环燃烧两种方式。^[2]

2.1.1 烟气外循环燃烧技术

烟气外循环燃烧技术是用引风机从烟囱前抽取一定量的低温烟气,通过外循环烟道输送至燃烧器与助燃空气和燃料气混合燃烧。由于此时循环烟气温度较低(~150°C),可有效降低燃烧反应物浓度和燃烧反应温度,以降低NO_x的生成量。

当外循环烟量小于总烟量的10%时,可降低20~30%的NO_x,外循环烟量大于10%后,增大烟气循环量对降低NO_x的影响较小。另外需要注意,由于循环烟气本身为惰性气体,与助燃空气混合后,会降低O₂的浓度,当混合后O₂量低于17%时,燃气燃烧的火焰稳定性将受到一定影响,因此应注意监控外循环烟气流量或混合后O₂的浓度,一般外循环烟量最大为总烟量的20%左右。

烟气外循环燃烧技术增加建设投资、占地、持续电耗,并且降低加热炉热效率,经济性不好。

2.1.2 烟气内循环燃烧技术

烟气内循环燃烧技术是通过两级燃料气射流引射,使炉膛外围烟气进入火盆砖或燃烧反应区,形成内循环,降低燃料气、N₂、O₂的浓度,降低燃烧反应温度,减少停留时间,可减少30~40%的热力型NO_x。图3为烟气内循环燃烧模拟效果图。

烟气内循环燃烧技术不增加建设投资、占地、能耗，火焰稳定，是一种成熟和广泛应用的低NO_x燃气燃烧技术。

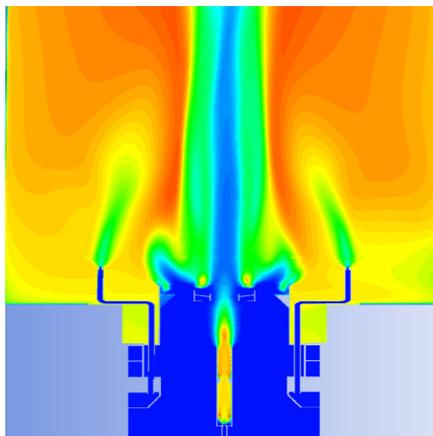


图3 烟气内循环燃烧模拟效果图

2.2 浓淡燃烧技术

浓淡燃烧技术是在燃料气和助燃空气管道或喷嘴中设置不同的分离设施，形成浓淡两种燃烧区，浓燃烧区燃料气过剩空气不足，淡燃烧区燃料气不足空气过剩，分别在偏离化学当量比的条件下进行燃烧。浓燃料气+空气不足燃烧时O₂浓度低，燃烧强度低；淡燃料气+空气过剩燃烧时空气量较大，可以降低燃烧反应温度，两种燃烧状态均可抑制NO_x的生成。^[3]

2.3 空气分级燃烧技术

空气分级燃烧技术是将助燃空气分两部分送入加热炉炉膛。首先在主燃烧区将一部分助燃空气（一次风）与燃料气混合燃烧，形成燃料气过剩的还原性气氛，此时燃烧温度和反应速度较低，可以有效减少NO_x的生成，在主燃烧区后通入剩余助燃空气（二次风），并与未完全燃烧的燃料气充分混合燃烧，此时为富氧燃烧但燃烧反应强度和温度较低，热力型NO_x的生成量较少。

2.4 燃料气分级燃烧技术

燃料气分级燃烧技术是将燃料气分两段或多段送入加热

炉炉膛进行燃烧，形成两个或多个燃烧区。初始燃烧区生成的NO_x在再燃区与二次燃料气混合并发生还原反应，从而减少NO_x的生成。^[4]

2.5 旋流燃烧技术

旋流燃烧技术是燃料气通过中心喷嘴轴向射入加热炉炉膛或径向射入同轴的旋流助燃空气中，通过旋流形成燃烧产物的中心回流区。中心回流区的形态和大小受旋流强度影响，一般具有高温低速的特点。旋流燃烧的助燃空气和燃料气混合均匀、燃烧充分、火焰稳定。受射流卷吸作用，助燃空气和燃料气射入突然扩大的加热炉炉膛时会在炉膛底部生成边界回流区，有利于形成烟气内循环，能有效抑制热力型NO_x的形成。该技术在加热炉燃烧器上有广泛应用。^[5]

3 结语

NO_x的生成机理复杂、影响因素众多，与燃烧反应、反应物的混合和流动状态密切相关。

目前已实现工业应用的低NO_x技术有烟气循环燃烧、浓淡燃烧、空气分级燃烧、燃料气分级燃烧、旋流燃烧等。在石化燃气加热炉燃烧器设计、选型、操作运行过程中，应合理运用一种或多种低NO_x燃烧技术，以实现气体燃料低NO_x燃烧。

参考文献

- [1]刘联胜. 燃烧理论与技术[M]. 北京：化学工业出版社，2008.
- [2]王志宁，杨协和，张扬，等. 内/外烟气再循环对天然气燃烧NO_x生成的影响[J]. 化工进展，2019，38(90)：4327-4334.
- [3]解利方，高健中，王丽辉，等. 浓淡燃烧式低氮燃烧器的数值模拟[J]. 煤气与热力，2017，37(3)：61-65.
- [4]徐华东，罗永浩，王恩禄，等. 再燃烧技术及其在我国的应用前景[J]. 动力工程，2001，21(4)：1320-1323.
- [5]崔名双，李小炯，苗鹏，等. 低NO_x燃气燃烧技术研究进展[J]. 洁净煤技术，2020，26(2)：24-33.