

海拔高度对燃气锅炉氮氧化物排放影响分析

于吉明¹ 李 江² 吴营磊³

1. 低碳热力发电技术与装备全国重点实验室 国家市场监管重点实验室（特种设备安全与节能） 中国特种设备检测研究院 北京 100029
2. 青海省特种设备检验检测院 青海 西宁 810003
3. 徐州龙兴泰能源科技有限公司 江苏 徐州 221300

摘 要：本文通过分析燃气锅炉烟气中氮氧化物产生的机理，研究不同海拔高度对天然气燃烧的影响，并根据氮氧化物产生的机理进一步分析对燃烧产物氮氧化物排放的影响。

关键词：锅炉；海拔高度；气体密度；氮氧化物

我国地形地貌环境复杂多变，新疆维吾尔自治区、青海省、西藏自治区、甘肃省等西部地区很多城市海拔在2000米以上，尤其是青海省、西藏自治区平均海拔在3000米以上^[1]。

气体密度随着海拔高度升高而降低，气体体积变大，天然气燃烧过程，与平原地区相比，同样质量的天然气体积变大，对于同一型号燃烧器在同样输出功率的情况下，天然气及空气流速增大，天然气燃烧火焰形态、温度分布改变，烟气中氮氧化物浓度随之改变。燃天然气锅炉烟气中氮氧化物排放量与使用地空气、天然气密度特性密不可分。

本文基于同一型号燃天然气锅炉及配套燃烧器，开展锅炉使用地海拔高度对锅炉烟气中氮氧化物排放影响规律分析。

1 氮氧化物生成机理

目前国内外对天然气锅炉燃烧生成氮氧化物的机理已经有了深入研究，理论上燃气锅炉氮氧化物有三种不同的生成机理：燃料型氮氧化物、快速型氮氧化物和热力型氮氧化物。

燃料型氮氧化物是天然气中含有的氮气及含氮的化合物在燃烧过程中氧化生成，燃料中氮化合物中的氮以原子形态存在，结合键的能量比较小，在燃烧的过程中比较容易分解生成氮氧化物^[2]。天然气组份中氮气所占比例较小，燃烧过程中燃料性氮氧化物可以忽略不计。

快速型氮氧化物由空气中的氮气和碳氢原子团反应

生成，一般生成量很小^[3]。

热力型氮氧化物是空气中的氮气在高温条件之下发生氧化反应而生成。为天然气燃烧过程中氮氧化物主要生成方式。在工业实践经验来看，多数情况下，燃烧产生的氮氧化物主要是一氧化氮，二氧化氮份额比例较小，一般低于5%^[2]，一氧化二氮份额极少，一般忽略不计。

影响热力型氮氧化物生成的主要因素：火焰温度、氧气的浓度、燃烧停留时间。

火焰温度：天然气在锅炉炉膛内燃烧，随着燃烧火焰的温度升高，燃烧产物中的氮氧化物的生成量也随之增高，Stephen等人^[4]通过大量实验发现，在燃烧温度上升到1800K时，热力型氮氧化物的生成速度开始显著提升，燃烧温度每升高100K，生成速度增加6-7倍^[4]，火焰温度与热力型氮氧化物生成浓度关系见图1^[4]。

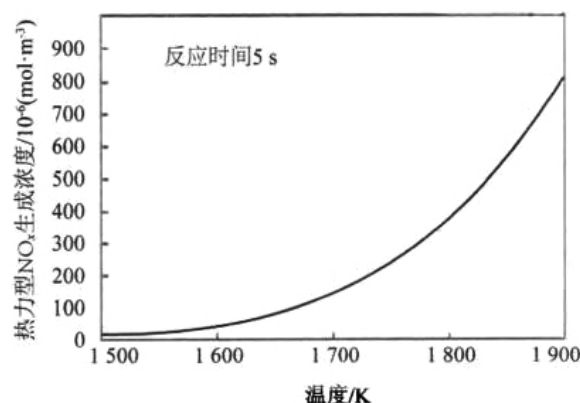


图1 火焰温度与热力型氮氧化物生成关系图

氧气浓度：天然气在燃烧器喷口位置喷出，喷口位置与空气的氧气混合燃烧，氧气的浓度越高，天然气燃烧的速率越快，燃烧现象越剧烈，火焰温度越高。

氮氧化物生成速度与O₂浓度平方根成正比比例关系，在过量空气系数 > 1时，氮氧化物的生成量随过量空气系

基金项目：国家市场监督管理总局科技计划项目（2022MK128）

作者简介：于吉明（1982-），男，硕士，高级工程师，长期从事锅炉能效、环保检测；锅炉燃烧调整、系统最优化运行调试及研究工作。

数的提升而减少,在过量空气系数 <1 时,氮氧化物的生成量随着过量空气系数的提升而增加^[5]。

当过量空气系数 >1 时,扩散燃烧过程中天然气周围氧气较多,处于富氧状态,混合均匀的情况下,碳氢化合物完全燃烧,生成二氧化碳和水,放出热量,增加空气量,多余的空气未进行燃烧反应,仅降低了火焰的温度,氮氧化物的生成量随过量空气系数的提升而减少。当过量空气系数 <1 时,扩散燃烧过程中天然气周围氧气较少,处于贫氧状态,碳氢化合物未完全燃烧,生成一氧化碳、二氧化碳和水,由于烟气中含有大量一氧化碳,天然气燃烧热量未全部放出,火焰温度较低,随着过量空气系数提高,天然气周围氧气充足,烟气中一氧化碳含量降低,二氧化碳含量升高,天然气完全燃烧,热量完全被释放,火焰温度升高,氮氧化物的生成量随过量空气系数的提升而增加。因此,燃烧过程中氧气浓度的变化对氮氧化物生成量的影响核心为火焰温度对氮氧化物浓度的影响。

燃烧停留的时间:在天然气燃烧过程中,烟气在锅炉炉膛内停留的时间越长,天然气与空气中的氧气混合越充分,单位时间内放出热量越多,烟气中的氮氧化物的产生量越大,因此,燃烧过程中停留时间的变化对氮氧化物生成量的影响核心为火焰温度氮氧化物浓度的影响。

2 海拔高度对天然气燃烧的影响

高海拔条件下,气压(气体密度)相比平原地区会降低,氧分子间的距离增大,在相同的时间内,燃料与氧分子接触的次数减少,导致燃烧反应速率降低,同时影响燃料的着火和燃尽,进而改变燃烧的温度场,对整个燃烧过程造成影响^[6]。

Nemitallah等人^[7]指出在相同的当量比条件下,升高的氧浓度导致火焰传播速度升高和雷诺数降低,这有助于火焰稳定附着。随着海拔高度升高,空气、天然气密度减少,体积随着增大,氧气浓度降低,火焰的稳定附着性减弱。

与平原地区相比,同样体积的天然气燃烧需要的氧气质量减少,燃烧器输出功率降低。为保证燃烧器输出功率不变,天然气流量增大,空气流量增大,对于同一型号燃烧器而言,为保证与平原地区同样的输出功率,燃烧器喷口位置天然气流速增大、空气流速增大,火焰变长。导致火焰对锅炉炉膛位置直接冲刷,造成安全隐患。

燃烧器使用地海拔升高2000米,同样温度下气体密度增大1.3倍,燃烧器天然气、空气喷口位置流速增大1.3倍,燃烧火焰形态随着天然气、空气流速增大而拉长,火焰高温区域随之被拉长。

同一型号燃烧器,在高海拔地区运行时,由于受燃烧器风机限制,空气流量不能完全满足天然气完全燃烧,造成天然气未完全燃尽,烟气中一氧化碳浓度升高。烟气中一氧化碳浓度随该锅炉使用地海拔高度升高而升高。天然气燃烧由于同体积氧气的质量减少,需要天然气与空气流速变大,在燃烧器燃气喷口位置无法形成稳定火焰,一般情况下天然气在距离喷口一定的位置由于炉膛壁温较高而形成推举火焰,该燃烧状态火焰温度较低,火焰面积较小,天然气中碳氢化合物无法完全燃烧。该位置烟气中一氧化碳含量较高。由于火焰形成位置距离天然气喷口有一定的距离,火焰的稳定性较之平原地区变差,出现锅炉震动现象。如果天然气与空气的流速进一步增大则无法形成火焰,造成燃烧器熄火保护而停炉。推举火焰造成天然气燃烧效率减低,锅炉运行存在一定的安全隐患。

对于高海拔地区使用的燃烧器,需要对燃烧器天然气喷口、空气喷口尺寸根据流速单独设计。

3 海拔高度对烟气氮氧化物中影响

天然气燃烧高温区主要集中在燃烧器燃气喷口区域,氮氧化物在该区域生成量最大。随着锅炉使用地点海拔升高,天然气、空气流速均增大,天然气燃烧火焰形态与平原相比有了很大区别。

对于同一型号燃烧器,空气与天然气喷口位置与尺寸固定,随着使用地海拔升高,燃烧器在与平原地区同样输出功率的条件下,天然气与空气质量流量不变,体积流量变大,火焰拉长,高温区域随之被拉长,火焰温度降低,当天然气与空气流速增大至一定范围时,形成托举型火焰,火焰温度进一步降低。天然气与空气的体积增大,空气中氧分子之间距离变大,天然气周围氧气浓度降低,相同时间内,天然气中碳氢化合物与氧气接触次数变小,燃烧火焰温度降低。天然气与空气的体积流量增大,流速随之增大,烟气在炉膛内停留时间缩短。

综上所述,海拔升高,燃烧器在与平原地区同样输出功率的条件下,火焰温度较之变低,燃烧器喷口位置天然气周边烟气浓度降低,天然气与空气流速较快,烟气在炉膛内停留时间缩短,根据天然气燃烧热力型氮氧化物生成的机理,同一型号燃烧器使用地海拔升高,燃烧后生成烟气中氮氧化物浓度降低。

4 海拔高度对烟气再循环低氮技术的影响

烟气再循环技术为目前市场中应为较为广泛的一种低氮燃烧技术,锅炉尾部受热面的低温烟气引入助燃气体中,低温烟气可以在较短时间内吸收天然气燃烧放出的热量,有效降低燃烧火焰温度^[8],烟气中氮氧化物的生

成量减少。燃烧过程中天然气周围氧气被再循环烟气稀释,氧气浓度降低,烟气中氮氧化物的生成量减少。随着再循环烟气进入炉膛,炉膛内烟气体积变大,烟气流速增加,烟气在炉膛内停留的时间减少,降低烟气中氮氧化物的生成量减少。

高海拔的地理环境决定了该地区大气压力低,相同质量流量条件下空气、天然气、烟气体积流量较平原地区增大。与平原地区相比,同样质量的再循环烟气体积变大。再循环烟气量变大,一般情况下,为了保证锅炉安全运行,不产生震动,烟气再循环量不超过燃料燃烧生成的理论烟气量的30%。

受锅炉使用地地理环境的影响,为保证锅炉安全运行,扩散燃烧燃烧器在与平原同样烟气再循环量的条件下,烟气质量流量比平原地区减少,降低烟气中氮氧化物效果较平原地区差。

5 结论

在高海拔地区运行的燃气锅炉,燃烧器在与平原地区同样输出功率的条件下,火焰温度较之变低,燃烧器喷口位置天然气周边烟气浓度降低,天然气与空气流速较快,烟气在炉膛内停留时间缩短,根据天然气燃烧热力型氮氧化物生成的机理,同一型号燃烧器使用地海拔升高,燃烧后生成烟气中氮氧化物浓度降低。

在高海拔运行燃天然气锅炉,扩散燃烧燃烧器在与

平原同样烟气再循环量的条件下,烟气质量比平原地区减少,降低烟气中氮氧化物效果较平原地区差。

参考文献

- [1]千吉明,刘超,王玉涛,李娟.海拔高度对燃气锅炉烟气中水分冷凝率的影响[J].节能技术2023,6:523-525
- [2]李娟.燃气锅炉烟气中氮氧化物计算的研究[D].中国矿业大学工程硕士专业学位论文,2021:14.
- [3]王惠云,王鹏南,武延华.降低燃气锅炉氮氧化物排放的技术和应用[J].工业锅炉,2014,(2):37-41.
- [4]StephenR T.Understanding NO_x formation in nonpremixed flames: Experiments and Smodeling[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1995, 21(5):361-385.
- [5]王志宁,杨协和,张扬,等.燃气锅炉中 NO_2 的生成规律研究[J].化工学报,2019,(8):3126.
- [6]车光兰.天然气锅炉低氮氧化物燃烧技术研究[J].工业加热,2020,49(03):13-16.
- [7]杜勇博,张井坤,笪耀东,刘雪敏,车得福高原锅炉燃料燃烧和烟气特性的研究[J].工业锅炉2020,5:1-6.
- [8]Nemitallah MA, Habib MA. Experimental and numerical investigations of an atmospheric diffusion oxy-combustion flame in a gas turbine model combustor[J]. Applied Energy 2013; 111:401-15.