

V94.3A 型燃气轮机氮氧化物排放规律研究

郭强¹, 周玉兵¹, 刘殿河¹, 韦晓峰¹, 范忠雷², 郑锦华²

(1. 国家电投集团郑州燃气发电有限公司, 郑州 450001;

2. 郑州大学化工与能源学院, 郑州 450001)

摘要:以 V94.3A 型燃气轮机为对象, 结合天然气系统工艺和燃烧室结构, 对燃气轮机氮氧化物排放的变化规律进行研究。发现烟气中氮氧化物含量与燃气轮机所处的工况、天然气燃烧模式和与负荷相对应的燃气量有关。在燃气轮机单循环工作区, 烟气氮氧化物的排放含量与预混天然气量、值班天然气量及其燃烧的协同作用有关, 其中值班天然气流量对氮氧化物生成量影响更显著。在联合循环区, 值班天然气量处于低值工作点, 在运行过程中基本维持稳定, 烟气排放的氮氧化物含量与预混天然气量成正相关。

关键词:燃气轮机; 联合循环; 氮氧化物; 负荷

中图分类号: TK478

文献标志码: B

文章编号: 1009-2889(2018)02-0056-04

燃气轮机及其联合循环常采用天然气为燃料, 具有能源转换效率高、污染物排放少、启停迅速、运行灵活等特点^[1-3]。国家标准《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223-2011)对以气体和油为燃料的锅炉及燃气轮机进行区分细化, 规定大型燃气轮机烟气中烟尘、二氧化硫、氮氧化物(NO_x)最高排放限值分别为 5 mg/m^3 、 35 mg/m^3 、 50 mg/m^3 , 才可满足国家标准排放要求^[4]。郑州燃气发电有限公司是西气东输工程配套电厂, 肩负气网和电网双调峰责任, 机组启停频繁。机组选用西门子 V94.3A 型燃气轮机(标况下额定功率 265.8 MW, 热效率 38%), 由 15 级轴流式压气机、24 个干式低 NO_x 混合型燃烧器和 4 级透平组成, 燃烧室为环形燃烧室, 燃烧器为“三段混合燃烧器”。在机组运行过程中, 烟尘和 SO_2 排放浓度较低, 均满足标准的排放限值; NO_x 绝大部分时间均满足标准要求, 仅在机组启动及发电负荷大幅变动时, 会出现瞬时排放超标准限值的情况。随着环保压力的增大, 电厂作为大气重点污染源监测点, 研究和控制燃气轮机 NO_x 排放是环保工作的重点^[1-2,5-6]。因此, 本文以 V94.3A 型

燃气轮机为对象, 对烟气中氮氧化物排放的变化规律进行分析, 为燃气轮机启动、运行、污染物减排及燃烧调试提供参考。

1 燃气轮机工作过程中氮氧化物变化规律

通过分析 2017 年 9 月份 V94.3A 型燃气轮机及其联合循环的运行过程和烟气污染物排放数据(HP5000 型在线式烟气连续排放监测系统监测, 北京牡丹联友环保科技股份有限公司), 发现燃气轮机不同操作过程的运行数据和烟气污染物(NO_x 、 SO_2 、烟尘)排放数据类似, 烟尘和 SO_2 实际浓度远低于排放限值, 烟气中主要污染物均为 NO_x , 故选取 9 月 14 日机组运行数据和 NO_x 浓度排放数据进行分析, 研究 V94.3A 型燃气轮机烟气氮氧化物排放的变化规律。

图 1 是 9 月 14 日机组发电负荷、烟气氮氧化物含量与运行时间的变化曲线。从图 1 机组发电负荷与运行时间的变化关系可以看出, 在一个运行周期内, 燃气轮机的生产周期可划分为启机(A区)、燃气轮机单循环工作区(B区)、联合循环工作区(C

收稿日期: 2018-02-05 改稿日期: 2018-04-05

基金项目: 河南省产学研合作项目(182107000052)

作者简介: 郭强(1971—), 男, 河南郑州人, 工程师, 从事环保管理工作; 通讯作者: 范忠雷(1972—), 男, 河南沁阳人, 副教授, 博士, 从事环保能源材料研究工作, E-mail: zhlfan@zzu.edu.cn

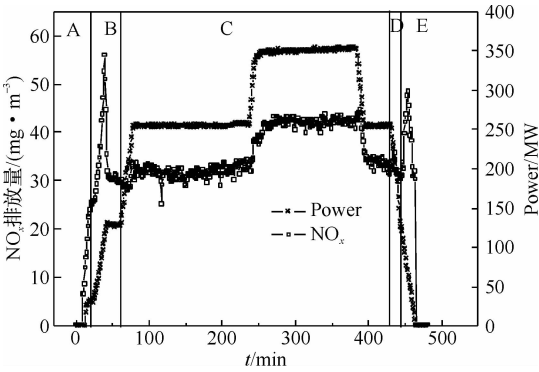


图 1 燃气轮机运行过程中负荷、氮氧化物与时间的关系

区) 、降负荷和停机(D 区和 E 区) 等 5 个阶段。图 1 氮氧化物排放曲线显示,在燃气轮机的启机和单循环工作区(A 和 B 区),烟气中氮氧化物排放浓度变化剧烈,排放浓度会出现极大值,远超燃气轮机污染物排放均值。机组在联合循环工作区(C 区),燃气轮机氮氧化物排放浓度较低,其排放水平随机组负荷(260 MW 和 350 MW 工况)变化,呈现正相关的关系,浓度满足国家标准的排放要求。在机组降负荷和停机阶段(D 区和 E 区),燃气轮机的氮氧化物排放浓度较高,烟气中氮氧化物浓度也出现了局部极大值,其特征与燃气轮机启机和单循环过程的变化趋势相似。此时,燃气轮机燃烧模式的切换与启机过程相反,污染物排放特性与燃气轮机运行初期的实验结果类似。

2 燃气轮机运行工况对烟气氮氧化物排放的影响

天然气量和燃烧方式是影响燃气轮机负荷和烟气氮氧化物排放的重要因素^[7]。由 V94.3A 型燃气轮机的天然气工艺流程和燃烧系统可知,天然气总流量由前置系统的涡轮流量计计量,值班天然气流量由值班阀天然气流量计检测计量;燃气轮机的燃烧室由一个环形的燃烧区和 24 个混合型干式低 NO_x 燃烧器组成,其中低 NO_x 燃烧器为三级燃烧器,分别为配置有天然气供气控制阀的扩散燃烧器、值班燃烧器和预混燃烧器。经过供气控制阀进行分配的天然气进入燃烧室燃烧,维持燃气轮机正常工作。通过分析燃气轮机的运行过程、天然气供气控制阀的运行情况、天然气量的分配和燃烧情况,考察了混合型低 NO_x 燃烧器供气控制阀阀位和天然气流量的对应关系,见图 2。

图 2 显示扩散供气控制阀(DIFN)、值班供气控制阀(PILOT)和预混供气控制阀(PREM)在燃气轮

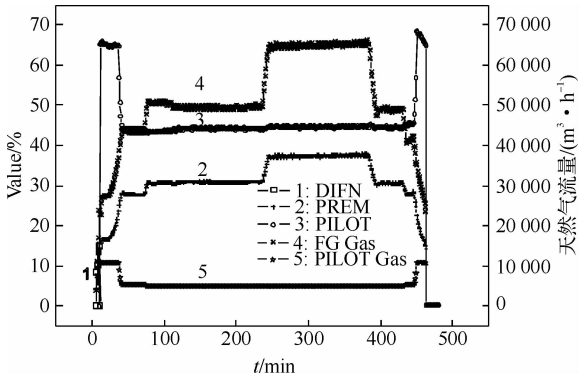


图 2 控制阀阀位和天然气流量与运行时间的关系

机运行周期内的工作情况,图 2 中 FG Gas 表示天然气总标态流量,PILOT Gas 表示值班天然气标态流量。从图 2 可以看出值班控制阀在工作周期内大致处于高值班阀位和低值班阀位两种状态(高值班阀位是 66% ± 1%,对应标准状态下体积流量为 10 720 ~ 10 900 m³/h;低值班阀位是 44% ± 1%,对应标态流量为 4 780 ~ 5 230 m³/h,并根据燃气轮机运行情况对值班控制阀进行微调;预混控制阀总体上是渐进式的,是主控制阀,通过预混天然气流量的调节,来实现电负荷的调整;扩散调节阀工作时间很短,仅在点火和升速阶段工作,并迅速与值班控制阀进行切换,正常生产过程中处于关闭状态。与阀位变化关系相对应,天然气的瞬时总流量和值班天然气流量也具有相似的变化关系,并且根据天然气总流量和值班流量,可计算出预混天然气流量。

结合图 1 和图 2 可以看出,V94.3A 型燃气轮机正常运行时,机组负荷与天然气总瞬时流量呈现正相关,而值班天然气流量基本维持在两个工作点,起维持燃烧稳定的作用。同时,烟气中瞬时氮氧化物含量与天然气瞬时流量和负荷也基本呈现正相关,只是在启机和停机阶段,烟气中氮氧化物含量出现突变,与文献[1-2]报导具有一致性。

图 3 是燃气轮机运行前期参数(天然气标态流量、发电负荷、氮氧化物)与时间的变化关系。可以看出,在启机阶段(图 3 A 区),扩散供气控制阀首先动作,天然气进入扩散燃烧器进行点火燃烧;然后预混供气控制阀逐渐开启,提供共混用天然气量,使燃气轮机提速;在达到正常转速(3 000 r/min)时,燃气轮机进入预混燃烧运行模式。

燃气轮机单循环工作区(图 3 B 区)包括高值班燃气工作区(B1 区)和低值班燃气工作区(B2 区)。对 B1 区而言,值班天然气量处于高流量工况,值班供气控制阀的阀位稳定在 66% ± 1%,对应

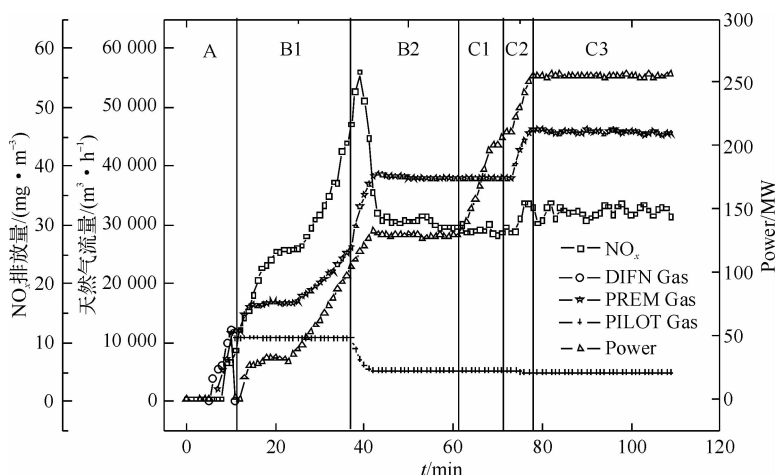


图3 燃气轮机前期运行参数(天然气流量、负荷、氮氧化物)与时间的关系

标态流量为 $10\,720 \sim 10\,900 \text{ m}^3/\text{h}$;此时,机组负荷的调整(增加)是通过预混供气控制阀的调整(增大)来实现的。当预混燃气量增加到一定程度后,预混燃烧和值班燃烧的协同效应使烟气氮氧化物含量急剧增高,并出现峰值。要降低氮氧化物的排放,最简便措施是调整燃气量。一是调整值班燃气量,通过减少扩散燃烧的燃气量,降低高温区燃烧特性来降低氮氧化物的生成量;另一是调整预混燃气加入量来降低氮氧化物的生成量。从图3也可以看出,在预混燃烧模式下,预混燃气加入量主要用于调整发电负荷;相对预混燃气量的调整,值班燃气量的调整对生成氮氧化物的影响更为显著。因此,在保证稳定燃烧的基础上,降低值班燃气流量是最佳选择,从而可大幅度降低氮氧化物的生成。就如B2区所示,当值班燃气量(减少值班调节阀开度,调整到低值班燃气工作区)和预混燃气量基本恒定后,燃气轮机输出负荷和烟气中氮氧化物含量也基本保持在稳定状态。

联合循环区(图3 C区)包括汽轮机带负荷过度阶段(图3中C1和C2区)和稳定的燃气-蒸汽联合循环阶段(图3中C3区),其中过度阶段包含了两种操作,一是值班燃气量和预混燃气量保持不变,通过汽轮机带负荷来提高系统生产负荷(C1区),另一是负荷不足部分通过增加预混燃烧器的燃气量来提高生产负荷(C2区)。当系统重新稳定后,系统处于联合循环工作区(C3区)。在联合循环区,由于值班供气控制阀维持低值工况,值班天然气量基本恒定,因而天然气总量的变化由预混供气控制阀进行调节,而且预混天然气流量远大于值班天然气流量(350 MW工况下,预混燃气流量约为值

班燃气流量的12倍),燃烧室燃烧均衡,燃烧温度易控制在低温位,因此,氮氧化物生成量与燃气的增加量基本处于正相关。

降负荷和停机阶段(对应于图1 D区和E区)。首先通过降低预混燃气的加入量来降低生产负荷,该过程对应于D区。在停机阶段(E区),为维持燃气轮机运行过程中燃烧的稳定性,需提高值班燃气量,使得预混燃气量进一步降低,这又不可避免增加了烟气中氮氧化物的含量。

通过上述分析,可以判定:烟气中氮氧化物含量与燃气轮机运行工况、天然气流量以及燃烧模式有关。在单循环工作区(B区),烟气氮氧化物含量与值班燃烧天然气量、预混燃烧天然气量及其燃烧的协同作用有关,其中值班燃气流量对生成氮氧化物的影响更显著和灵敏。在联合循环区(C区),值班燃气量处于低值工作点,天然气流量基本维持不变,烟气氮氧化物含量与预混天然气量成正相关。

3 氮氧化物形成原因分析

燃气轮机烟气中氮氧化物有两个来源^[3,8]:一种为热力型 NO_x ,另一种为燃料型 NO_x ,由于天然气氮分含量极低,因此燃料型 NO_x 可忽略不计。天然气在燃烧室燃烧过程中,烟气中 NO_x 生成量与燃烧温度、空燃比和燃烧停留时间等因素有关,其中燃烧温度和空燃比取决于单位时间燃气量、燃烧方式、空气量及其混合程度,而燃烧停留时间取决于燃烧室尺寸和结构型式。相对于筒形燃烧室,V94.3A型燃气轮机采用环形燃烧室,其燃烧停留时间约为30毫秒,能有效缩短燃气在燃烧室内停留时间,降低 NO_x 的生成量^[7]。

燃气轮机正常工作时,天然气总流量包括预混燃气流量和值班燃气流量两部分。在燃气-蒸汽联合循环区,值班燃气流量基本恒定,处于扩散燃烧低值工况,生产负荷是通过调节预混天然气流量来实现调节的。由于预混燃烧是将天然气与助燃空气先混合成均匀的可燃气体后再喷到燃烧室内燃烧,火焰产物温度均匀,温度值一般低于大量氮氧化物生成的临界温度。因此,氮氧化物生成量与天然气流量的增加成正相关,这与负荷对氮氧化物的影响一致。

在启机和低负荷运行工况,值班天然气流量对氮氧化物的影响更复杂和敏感。在相同条件下,此时主燃气(用于预混燃烧模式)流量少,值班天然气(用于扩散燃烧模式)流量大,氮氧化物生成量就高。如图 3 所示,当值班燃气流量维持稳定,增加预混天然气流量,将急剧增加氮氧化物的生成量,表现为 B 区排放的烟气氮氧化物含量出现极大值,高于国家污染物排放标准。并且,低氮燃烧器的特殊结构使值班燃烧处于局部燃烧区域的核心,扩散燃烧区被轴流空气和预混燃烧区包围,加之预混燃烧的协同作用,使燃烧室形成了局部的高温高氧氛围,造成此条件下烟气中大量氮氧化物的生成。因此,在维持正常燃烧的条件下,值班燃气体量越低越好。

4 结语

以 V94.3A 型燃气轮机为对象,对机组氮氧化

物排放的变化规律进行了分析,发现烟气中氮氧化物含量与燃气轮机所处的工作状态、天然气燃烧模式和燃气量等因素有关。在燃气轮机单循环工作区,烟气排放的氮氧化物含量与预混天然气量、值班天然气量及其燃烧的协同作用有关,其中值班燃气流量对氮氧化物含量影响更显著。在联合循环区,值班燃气体量处于低值工作点,在运行过程中基本维持稳定,使得烟气排放的氮氧化物含量与预混天然气量成正相关。

参考文献:

[1] 刘志坦,李玉刚,王凯. 中国燃气电厂烟气排放现状及政策趋势[J]. 中国电力, 2017, 50(12):1-8.

[2] 宋波,王峰,林惠,等. M701F 型燃气轮机启机过程污染物排放规律研究[J]. 燃气轮机技术, 2016,29(1):59-63,17.

[3] 王卫群,华伟,孙虹. 燃气轮机烟卤冒“黄烟”原因分析及解决对策[J]. 电力科技与环保, 2016,32(1):33-35.

[4] 环境保护部科技标准司. 火电厂大气污染物排放标准: GB13223-2011 [S]. 北京:中国环境科学出版社, 2011.

[5] 杨随. 氮氧化物减排技术与烟气脱硝工程[M]. 北京:冶金工业出版社,2007.

[6] 邢希东. 大容量燃煤锅炉低氮燃烧与脱硝系统优化运行浅析[J]. 锅炉技术, 2015, 45(2):60-64.

[7] 卢广法. 西门子 F 级燃气-蒸汽联合循环发电机组培训教材[M]. 杭州:浙江大学出版社,2014.

[8] 徐灏,胡达清,周旭健,刘海蛟. 燃机氮氧化物排放研究及脱硝技术探讨[J]. 能源与环境, 2017(5): 29-31.

Study on Nitrogen Oxide Emissions for V94.3A Gas Turbine

GUO Qiang¹, ZHOU Yubing¹, LIU Dianhe¹, WEI Xiaofeng¹, FAN Zhonglei², ZHENG Jinhua²

(1. SPIC Zhengzhou Gas Power Generation Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China;
2. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The thesis will focus on the rule of the nitrogen oxide emissions for V94.3A gas turbine in combination with the technological process of the natural gas system and its combustor structure. It is found that the nitrogen oxide content is related to the operational conditions of the gas turbine, the combustion mode and the amount of natural gas corresponding to the load on base of NOx emission data and the operation parameters. On the condition of the single cycle, nitrogen oxide content in the flue gas emissions is related to the flow rate of premixed gas, the rate of duty gas and synergy of their combustion. And the flow rate effect of duty gas on the nitrogen oxide generation is more significant than that of premixed gas. On the condition of the combined circle, the flow rate of the duty gas is in the low-value working point, which is basically stable during operation, and the nitrogen oxide content of flue gas is positively correlated with the amount of premix gas.

Key words: gas turbine; combined circle; nitrogen oxides; load