

DLN 燃烧系统运行维护特点

王贵彦¹, 黄素华²

(1. 中国华电集团公司上海分公司, 上海 200003
2. 上海明华电力技术工程有限公司, 上海 200090)

摘 要:随着 DLN 燃烧系统普遍应用于燃气轮机来降低 NO_x 的排放,有必要了解和掌握其运行维护的特点,以提高其运行可靠性和可用率。本文根据 DLN 燃烧技术降低 NO_x 排放的机理,分析了 DLN 燃烧系统运行窗口狭窄的原因,以及常见的运行问题,探讨通过 DLN 调整来避免这些问题的产生;另外还分析了几个关键变送器对 DLN 燃烧系统运行温控线及燃料分配比例的影响;指出了 DLN 燃烧系统多喷嘴燃烧器排气孔易被堵塞和沾污的特点,了解和掌握这些特点有助于指导 DLN 燃烧系统的运行维护。

关 键 词:燃气轮机;干式低 NO_x 燃烧(DLN);燃料/空气比

中图分类号:TK477 文献标识码:B 文章编号:1009-2889(2015)01-0042-04

以天然气为燃料的燃气轮机,其排放污染物主要为 NO_x,而燃气轮机降低 NO_x 排放的主要技术有注水或蒸汽、干式低 NO_x (DLN; Dry Low NO_x) 燃烧、尾部烟气 SCR^[1]。而由于技术的先进性和实际运行成本较低,现代先进燃气轮机大都采用了干式低 NO_x 燃烧技术,来降低 NO_x 的排放。我国从 2000 年初开始引进的 F 级燃气轮机,全部采用了 DLN 燃烧技术来降低 NO_x 排放。近年来,为了改善大气环境,满足新的环保要求,一批原来采用扩散燃烧方式的 9E 燃气轮机,通过对燃烧系统的改造,也采用了 DLN 燃烧技术来降低 NO_x 的排放^[2],因此国内采用 DLN 燃烧技术的燃气轮机越来越多。

但是在实际运行中,这些采用 DLN 燃烧技术的燃气轮机出现了燃烧模式切换失败、火焰筒鼓包等燃烧方面的问题^[3],检修周期短于设备供应商推荐的时间,因此有必要研究采用 DLN 燃烧技术燃气轮机运行维护的特点,以帮助提高其运行可靠性和可用率。

1 DLN 燃烧器狭窄的运行窗口

DLN 燃烧器降低 NO_x 排放的机理是采用贫燃

料预混燃烧技术控制燃烧区域温度,而为了达到降低燃烧区域温度、降低 NO_x 排放的目的,运行中其燃料/空气比非常接近于贫燃料熄火极限^[4],如图 1、图 2,因此,可能发生燃烧不稳定以及较大的燃烧动态压力波动。图 1 是 NO_x 排放限值为 25 mL/m³、CO 排放限值为 25 mL/m³ 的运行窗口,图 2 是 NO_x 排放限值为 9 mL/m³、CO 排放限值为 25 mL/m³ 的运行窗口。

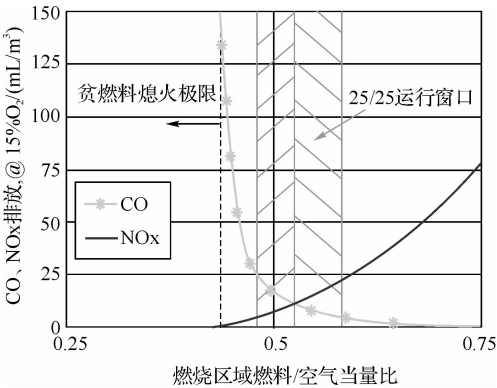
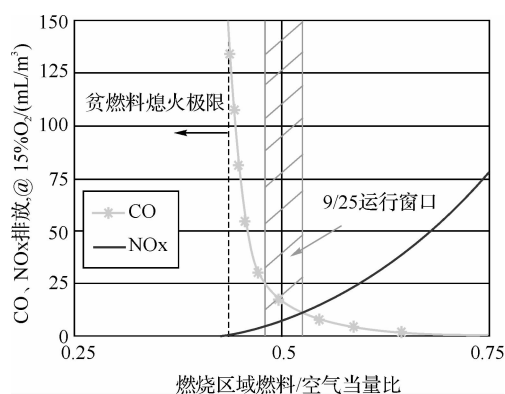


图 1 (25NO_x/25CO) 运行窗口

燃烧区域燃料/空气当量比的定义如下:

收稿日期:2014-07-13 改稿日期:2014-09-18
基金项目:上海市科学技术委员会资助项目(12DZ1201600)
作者简介:王贵彦(1959-),男,黑龙江人,在职研究生,高级工程师,中国华电集团公司上海分公司副总经理,长期从事电力企业的生产和管理工作。E-mail:Hdyngswgy@163.com。

图2 (9NO_x/25CO) 运行窗口

$$ER = \frac{(fuel/air)_{实际}}{(fuel/air)_{理论}} \quad (1)$$

式(1)中分子为实际的燃料/空气比,分母为完全燃烧时理论燃料/空气比。根据燃烧理论当燃烧区域燃料/空气当量比接近于1时,火焰温度最高、燃烧最强烈、稳定,但是此时NO_x排放最高。对于DLN燃烧器,通过减小燃烧区域的燃料/空气比,来降低燃烧区域温度、减少NO_x的生成量,同时离熄火极限又必须保留一定的安全裕度,来保证燃烧的稳定性,CO的排放量不能过高。因此,对于DLN燃烧器其运行的燃料/空气当量比窗口相当狭窄。如图2,随着要求的NO_x排放限值降低,NO_x排放限值由25 mL/m³降低为9 mL/m³时,其运行窗口变得更窄。

正是由于DLN燃烧器实际运行的最佳燃料/空气当量比窗口相当狭窄,当燃料热值或空气密度发生变化时,就有可能使得其实际运行的燃料/空气当量比偏离最佳的运行窗口,造成燃烧不稳定、动态压力波动偏大,或者NO_x排放增大等问题。对于国内引进的F级燃气轮机,每年春、秋季节,都要进行季节性的DLN燃烧调整,就是因为这个原因。在秋季当空气变冷的时候,由于冷空气的密度较大,使得燃气轮机运行在更加贫燃料的状态,需要调整,通常变低的燃气轮机NO_x排放和动态压力波动幅值的增大是需要进行DLN燃烧调整的预兆信号,此时需要增大燃料/空气比,保持燃烧的稳定性;而到了春天,当环境温度升高,就会出现与秋天相反的征兆,即:燃气轮机NO_x排放变高,而动态压力波动幅值减小,此时需要减小燃料/空气比,降低NO_x的排放。

2 DLN 燃气轮机运行中常见的问题

对于DLN燃烧器,为了降低NO_x排放,必须保

持燃烧区域燃料/空气当量比较低并且燃烧停留时间较短;但是为了CO燃尽,又要保证一定的燃烧停留时间;并且还要保证燃烧动态压力波动在许可的范围内,以及部分负荷时的稳定性。实际上,是要在NO_x、CO、燃烧动态压力波动、燃气轮机调峰范围这四者间取得一个平衡^[5]。当这四个方面的平衡被打破时,就会出现如下常见的运行问题:

- ◇ NO_x排放偏高,不符合排放要求;
- ◇ CO排放偏高,经济性变差;
- ◇ 燃烧动态压力波动偏高,造成磨损、机械应力大;
- ◇ 燃烧模式切换失败,无法达到预混燃烧;
- ◇ 贫燃料熄火,造成跳机;
- ◇ 回火(火焰在预混燃烧器燃烧),造成烧损、热应力大。

对于已经投产的燃气轮机,发生上述运行问题时,只有通过现场的DLN燃烧调整来解决。所有的DLN燃烧系统都是通过多级燃料系统来精确控制燃烧区域燃料/空气当量比,达到平衡NO_x、CO、燃烧动态压力和燃气轮机调峰范围的目的。DLN燃烧调整的过程就是在燃气轮机调峰范围内,优化分配到每一级燃料喷嘴的燃料比例。

即使已经调整好的燃气轮机,当下列影响燃料/空气比的因素发生变化时,上述四因素的平衡就可能被打破,就要重新进行DLN燃烧调整。

- ◇ 燃烧部件的磨损和老化;
- ◇ 关键温度、压力传感器发生漂移和失效;
- ◇ 气体控制阀动作不到位;
- ◇ 天然气处理系统运行不正常。

3 对DLN 燃气轮机运行影响较大的变送器

对DLN燃气轮机运行影响较大的变送器主要有如下几个:压气机排气压力变送器(96CD);大气压力变送器(96AP);进气系统压降变送器(96CS);排气压降变送器(96EP)。

其中压气机排气压力、大气压力、进气系统压降与燃气轮机运行温控线有关,设定燃气轮机基本负荷运行时的透平进口温度,而排气压降与燃烧参考温度有关,直接影响燃料的分配比例。图3、图4分别是非DLN燃烧器和DLN燃烧器的燃气轮机运行温控线。两者的区别在于横坐标,对于非DLN燃烧器,其横坐标为压气机排气压力,而DLN燃烧器,其

横坐标为压气机压比。压气机压比的定义如下：

$$CPR = \frac{P_{cd} + P_{bar}}{P_{bar} - \Delta P_{inlet}} \tag{2}$$

式中：CPR 为压比， P_{cd} 为压气机排气压力， P_{bar} 为大气压力， ΔP_{inlet} 为进气压降。

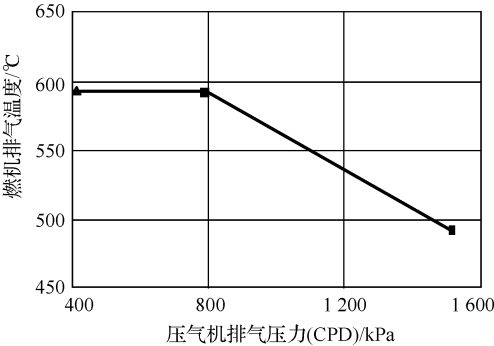


图 3 非 DLN 燃烧器燃气轮机温控线

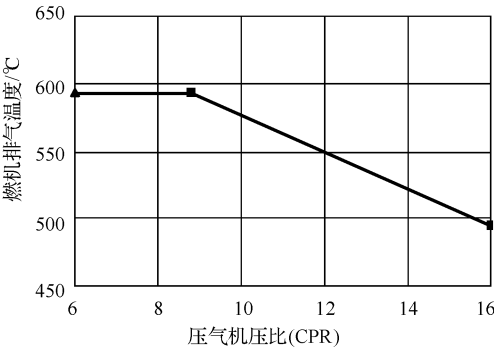


图 4 DLN 燃烧器燃气轮机温控线

因此，对 DLN 燃烧器其运行温控线不仅与压气机排气压力有关，还与大气压力和进气压降有关。

表 1 是当大气压力变送器发生漂移，测量值与实际值有偏差时，对燃气轮机基本负荷排气温度的影响，进而影响到燃气轮机的透平进口温度。

表 1 大气压力变送器发生偏差时的影响

$P_{bar}/kPa, a$		CPR		$T_{exh}/^{\circ}C$		$T_{fire}/^{\circ}C$
实际值	测量值	实际值	测量值	预期	实际	偏差
101.4	99.3	12.7	13.00	535.1	531.2	-6.6
101.4	101.4	12.7	12.70	535.1	535.1	0.0
99.3	101.4	12.7	12.47	535.1	538.5	5.8
97.9	101.4	12.7	12.24	535.1	541.8	11.6
95.8	101.4	12.7	12.02	535.1	545.2	17.3

注： T_{exh} 为燃气轮机排气温度， T_{fire} 为透平进口温度

如表 1 所示，对 DLN 燃烧器，当大气压力测量值比实际值偏低时，会造成燃气轮机基本负荷温控线设定排气温度值偏低，从而使得燃气轮机实际排气温度偏低、透平进口温度偏低，造成 CO 排放增

加、基本负荷出力降低、燃气轮机热效率降低；而当大气压力测量值比实际值偏高时，会造成燃气轮机基本负荷温控线设定排气温度值偏高，从而使得燃气轮机实际排气温度偏高、透平进口温度偏高，造成 NO_x 排放增加、燃气轮机热通道部件寿命减少。

表 2 进气压降变送器发生偏差时的影响

项目	$\Delta P_{inlet}/kPa$	$P_{bar}/kPa, a$	P_{cd}/kPa	CPR	$T_{exh}/^{\circ}C$	T_{fire} 偏差/ $^{\circ}C$
偏高值	2.3	101.4	1 179	12.9	531.9	-4.3
实际值	0.9	101.4	1 179	12.7	534.4	0.0
偏低值	0.0	101.4	1 179	12.6	536.0	2.7

如表 2 所示，对 DLN 燃烧器，当进气压降测量值比实际值偏低时，会造成燃气轮机基本负荷温控线设定排气温度值偏高，从而使得燃气轮机实际排气温度偏高、透平进口温度偏高，造成 NO_x 排放增加、燃气轮机热通道部件寿命减少；而当进气压降测量值比实际值偏高时，会造成燃气轮机基本负荷温控线设定排气温度值偏低，从而使得燃气轮机实际排气温度偏低、透平进口温度偏低，造成 CO 排放增加、基本负荷出力降低、燃气轮机热效率降低。

对于采用 DLN 燃烧技术的燃气轮机，排气压降是计算燃烧参考温度（TTRF1）的一个影响因素，当该变送器发生漂移、测量有误差时，就会影响 TTRF1 的计算结果的准确性，从而影响燃料分配比例的精确性。图 5 是某 DLN2.0 + 燃烧器在 PM 模式下燃料 PM1 分配比例随 TTRF1 的变化情况。根据上文 DLN 燃烧器的运行窗口相当狭窄，由于排气压降变送器漂移造成 TTRF1 计算值有偏差，可能会造成 NO_x、CO 排放值、燃烧动态压力波动等异常，极端情况下，可能会造成机组贫燃料熄火跳闸。

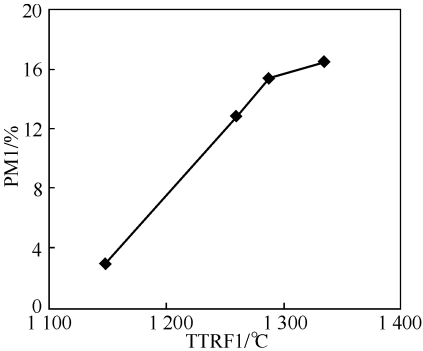


图 5 某 DLN 燃烧器 PM 模式燃料分配

4 DLN 燃烧器燃料喷嘴的特点

对于常规扩散燃烧系统，每个燃烧器有一个燃

料喷嘴,而且燃料喷嘴的排气孔较大,不易被杂物堵塞;而 DLN 燃烧系统,每个燃烧器配备有多个燃料喷嘴,并且这些燃料喷嘴带有大量小的计量排气孔,来实现对燃烧区域燃料/空气比的精确控制,由于这些排气孔尺寸较小,容易被堵塞或被污染而改变有效通流面积。

对于环管形布置的 DLN 燃烧系统,保持各燃烧筒之间燃料/空气比的均匀性是其稳定运行的最关键技术要求。而保持燃烧筒之间燃料喷嘴的有效通流面积的均匀性是获得各燃烧筒之间燃料/空气比均匀分布的关键。因此,对 DLN 燃烧系统,在机组检修中,要对燃料喷嘴的排气孔进行仔细检查,并且对燃料喷嘴进行精确的流量测试,以避免燃料喷嘴间有效通流面积偏差不符合均匀性要求。而一旦这种有效通流面积偏差不满足均匀性要求,在机组运行中就会出现前文提到的 DLN 燃烧系统常见的这些问题。

燃料预处理系统的恰当设计和正常运行是避免 DLN 燃烧系统这些小而多的计量排气孔不被堵塞或污染的重要保证。对于燃料预处理系统,常见的问题是有杂物进入或形成液滴。我国首批引进的 9F 燃气轮机,在基建调试期间,就曾发生过杂物堵塞排气孔,引起 DLN 燃烧系统故障的情况。目前,通过设置滤网来防止杂物堵塞排气孔,基本能达到预期效果。燃料预处理系统还有一个重要功能就是防止液滴的形成。即使是很微小的液滴进入燃烧器,也会引起自燃而引发回火造成灾难性的故障。如果这些液滴进入燃料喷嘴的计量孔,可能会结焦而改变其有效通流面积;如果粘附在控制阀上,就会

改变其流量控制特性,进而改变燃料分配比例。而防止液滴形成的最有效措施,就是保证天然气温度有足够的过热度。根据 GE 公司相关资料^[6],一般要求在气体燃料控制阀位置处燃气过热度至少为 28 °C。

5 结语

随着环保要求的日益严格,燃气轮机也普遍采用了降低 NO_x 排放的技术。由于运行控制成本等方面的优势,目前大型燃气轮机大都采用了 DLN 燃烧技术来控制 NO_x 的排放^[1]。而由于 DLN 燃烧系统区别于非 DLN 燃烧系统的设计特点,使得其在运行维护方面有其特殊性。了解和掌握这方面的特殊性,有助于指导运行和维护工作,提高 DLN 燃烧系统运行的可靠性和可用率。

参考文献:

- [1] 黄素华,苏保兴,华宇东,等. 燃气轮机 NO_x 排放控制技术[J]. 中国电力,2012(6):100-103.
- [2] 林晓波,肖波涛,张超,等. PG9171E 型燃气轮机 DLN-1. 0 改造面临的问题及处理方法[J]. 燃气轮机技术,2014(3):69-72.
- [3] 黄素华,陈昱,陆静,等. 干式低 NO_x 燃烧器火焰稳定性监测技术探讨[J]. 华东电力,2011(9):1533-1537.
- [4] 苏保兴,黄素华,华宇东,等. 燃料组分变化对 DLN 燃烧器运行的影响[J]. 燃气轮机技术,2014(1):48-51.
- [5] L. B. Davis, S. H. Black. Dry Low NO_x Combustion Systems for GE Heavy-Duty Gas Turbines[R]. GER-3568G, 2000.
- [6] D. Balevic, R. Burger, D. Forry. Heavy-Duty Gas Turbine Operating and Maintenance Considerations[R]. GER-3620K, 2004.

Characteristics of the Operation and Maintenance of DLN Combustion System

WANG Gui-yan¹, HUANG Su-hua²

(1. China Huadian Corporation Yunnan branch, Shanghai 200003, China;

2. Shanghai Minghua Power Technology Engineering Co., Ltd., Shanghai 200090, China)

Abstract: With the DLN combustion system is generally applied to the gas turbine to reduce NO_x emission, and in order to improve the operation reliability and availability of DLN combustion system, it is necessary to understand and grasp the characteristics of the operation and maintenance. According to the mechanism of DLN combustion technology to reduce NO_x emission, the reason of narrow window and common operation problems of DLN combustion system were analyzed, and it was discussed to avoid these common operation problems by DLN tuning in this paper. In addition the influence of some key transmitters on DLN combustion system temperature control line and fuel split were analyzed also. It was pointed out that the characteristics of DLN combustion system of multiple nozzles burner discharge orifices being susceptible to plugging or fouling. Understand and master these features help to guide the DLN combustion system operation and maintenance.

Key words: gas turbine; dry low NO_x(DLN); fuel/air ratio