

燃气轮机燃烧调整与排放控制技术研究

王相龙

川投（达州）燃气发电有限公司，四川达州，635000；

摘要：本论文聚焦于燃气轮机燃烧调整与排放控制技术研究，详细阐述通过调节燃料调节阀、优化燃料与空气混合比例等燃烧调整手段，以及干式低排放、催化燃烧等排放削减技术，以提高燃气轮机燃烧效率、减少污染物排放为目标，采用理论论证、数值模拟和实验探究等途径，针对相关技术开展深挖，为燃气轮机在能源领域的高效、清洁应用提供理论支撑与技术参考，推动实现节能减排既定目标，推动能源行业可持续发展。

关键词：燃气轮机；燃烧调整；排放控制；节能减排

DOI：10.69979/3060-8767.25.04.005

引言

燃气轮机作为核心的能源转换器械，在电力、航空等诸多领域广泛应用，伴随环保要求渐趋严苛以及能源利用效率追求持续增进，该燃烧调整及排放管控技术成研究聚焦点，不恰当燃烧易引起效率低下、污染物排放超标的相关问题，全面探究此技术，对改善燃气轮机的性能、降低环境冲击、推动能源可持续进程意义重大，本文将对其展开系统研究。

1 燃气轮机燃烧系统基础理论

1.1 燃气轮机工作原理及燃烧过程概述

燃气轮机把连续移动的气体当工质，实现从燃料能量到机械能的转变，其工作起始于外界空气经进气道被吸入压气机，压气机内多级叶片对空气做功，压力与温度跟着上扬，高压高温空气涌入燃烧室，与喷入的燃料（如天然气、航空煤油等）混合并被点燃，燃烧即刻释放出大批热能，致使室内气体温度急剧蹿升至1000-1500℃甚至更高，高温燃气从燃烧室流出后推动涡轮叶片旋转，由于涡轮跟压气机及外部负载有着连接关系，因而驱动压气机转动并对外界输出功，做功后的燃气自排气道排出，一部分联合循环系统里，排出燃气还可实现二次利用，提升系统整体效率。

1.2 燃烧动力学基础

燃烧动力学聚焦在燃烧期间化学反应的速率与机理，反应速率常数决定着反应进行的快慢，受温度、反应物浓度等因素影响，复杂的燃烧反应显现多条反应路径，反应物需突破一定的活化能壁垒才可转化为产物，活化能高低跟反应难易程度直接相关联。就拿链式反应的作用机理说，当燃料和氧气起反应的瞬间，自由基的产生与传递推动反应持续进行，在实施贫燃预混燃烧之际，反应动力学对抑制氮氧化物生成起到核心作用，采用调控反应的路径速率，能实现燃烧温度降低，减少热

力型氮氧化物的产生，保证燃烧高效实施且低污染达成。

1.3 燃烧相关热力学原理

燃烧进程符合热力学第一、第二定律，按照热力学首条定律，在燃烧进程里能量守恒，燃料的化学能转换为燃烧产物的内能跟热能，同时存在着热量散失，依靠计算燃烧前后焓的变化量，可实现燃烧效率的评估，即输出的有用功跟输入燃料化学能的比值。热力学第二定律说明，燃烧过程是不可逆的，在燃气轮机循环中，燃烧产生的高温高压燃气经涡轮膨胀做功，其流程伴随着熵的增大，此定律限制了能量转换效率的提升，为优化燃烧体系、减小不可逆损失，提升燃气轮机性能提供理论指引。

2 燃烧调整技术

2.1 燃料控制策略

2.1.1 燃料调节阀调节方法

燃料调节阀是精准控制燃料流量的关键部件，常见调节阀类型有蝶阀、球阀、针阀这类，各类阀门流量调节特性呈现差异，蝶阀结构简单、成本低，在大流量调节场合应用甚广；球阀开关迅速，适用于对流量控制响应速度要求高的场景；针阀可实现流量的精细调节，通过电动或气动执行机构改变阀芯开度，进而改变燃料流通面积，依托燃气轮机运行情形，借助控制系统调整执行机构动作，依据预设流量曲线，精准控制燃料流量，保证燃料跟空气实现合适配比，实现燃烧的稳定高效态势。

2.1.2 燃料分级燃烧技术

燃料分级燃烧是把燃料分阶段喷入燃烧室，主燃料先在富氧区燃烧，释放部分动力，把二次燃料注入贫氧区域，与主燃烧区未燃尽产物继续反应，该技术可削减燃烧的峰值温度，抑制热力型氮氧化物生成，就某型号燃气轮机这一实例而言，经由优化分级燃料比例与喷射

位置达成,把一次燃料占比设置成60%-70%,在距主燃烧区下游特定距离处喷入二次燃料,能有效拓宽燃烧稳定范围,实现氮氧化物排放减少20%-30%,同时维持较高燃烧效率,保障燃气轮机在不同工况下的良好性能。

2.2 空气供给优化

2.2.1 进气流量与压力调节

进气流量与压力对燃烧过程影响显著,利用调节压缩机转速或更改导叶角度可达成进气流量调控,若燃气轮机负荷处于增加阶段,增大压缩机转速,增强进气规模,保证燃料达成充分燃烧;则相应降低转速,避免空气过量,于压力调节的范畴,通过安装在进气管道上的压力调节阀,参照既定的压力值,自动调整阀门开度,稳定住进气压力,在变工况运行时,维持适宜进气压力能实现燃料与空气均匀混合,防止回火、熄火这类异常现象,维持燃烧平稳有序,提高燃气轮机运行可靠性及效率。

2.2.2 空气分级技术

空气分级技术分阶段把燃烧用空气引入燃烧室,一次空气跟部分燃料在主燃烧区混合着燃烧,形成富燃料区,燃烧过程温度偏高;二次空气添加至下游贫燃料区,与未燃尽产物完成后续反应,合理调控一、二次空气比例及喷入位置是关键之举,一般情形下,一次空气占总空气量为30%-50%,这种技术能有效控制燃烧温度分布,减少高温区域规模,抑制氮氧化物生成,同时促进燃料完全燃烧充分,提高燃烧效率,在大型燃气轮机之中广泛践行,辅助实现高效低污染的燃烧模式。

2.3 燃烧模式切换控制

2.3.1 不同燃烧模式特点

在预混燃烧这一阶段,燃料与空气预先均匀混合后进入燃烧室燃烧,火焰温度分布均匀,可切实降低氮氧化物的排放,但易发生回火、熄火现象,对混合均匀性与运行参数控制要求极高,扩散燃烧则是燃料与空气边混合边燃烧,燃烧稳定性好,适用多种燃料,然而火焰温度偏高,氮氧化物生成量大,部分预混燃烧融合了二者特性,一定程度上实现了燃烧稳定性与排放性能的平衡,好比在低负荷的时段,预混燃烧模式能较好满足低排放需求;扩散燃烧模式可保障燃烧稳定,输出足够功率。

2.3.2 燃烧模式切换策略制定

依据燃气轮机运行工况(如启动、升负荷、降负荷、停机)制定切换策略,为保证可靠点火与燃烧稳定,先采用扩散燃烧模式;随着负荷逐渐升高,若达到预先设定的值,切换至部分预混燃烧模式,在维持燃烧稳定之际降低氮氧化物排放;负荷继续往上升至较高层次,切换为预混燃烧模式,实现高效无高排的运行,降负荷过

程则反向切换,切换过程中,依靠精准控制燃料及空气流量、压力等参数,避免燃烧不稳定与参数突变,确保燃气轮机安全、高效运行。

3 排放控制技术

3.1 干式低排放燃烧技术

3.1.1 预混燃烧降低氮氧化物排放

预混燃烧通过使燃料与空气在进入燃烧室前充分混合,形成均质的可燃混合气体,降低燃烧峰值温度,有效遏制热力型氮氧化物生成,混合均匀度是核心要点,采用先进的混合器结构,如旋流混合器、多孔介质混合器等,增强气流扰动,促进燃料与空气均匀混合,精细控制燃料跟空气比例,维持于化学计量比邻近的贫燃情形,进一步拉低燃烧温度,某燃气轮机燃烧室采用预混燃烧法,完成对混合器设计的优化后,氮氧化物排放浓度可降低至 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 以内,显著优于传统燃烧方式。

3.1.2 贫预混燃烧技术优化

贫预混燃烧以预混为基础,进一步减少燃料与空气混合气里的燃料浓度,优化核心是杜绝回火与熄火,可通过改进燃烧器结构,好比采用钝体稳定火焰、布置稳燃腔等做法,增强火焰稳定性,实时审视燃烧过程中的温度、压力等参数,利用反馈控制系统,根据工况变化及时调整燃料与空气流量,保证混合气浓度一直处于恰当区间,在实际应用中,结合先进的传感器跟控制算法,贫预混燃烧技术能在保障燃烧稳定的基础上,将氮氧化物排放降至更低水平,契合渐严的环保相关要求。

3.2 催化燃烧技术

3.2.1 催化剂作用原理与种类

催化剂会削减燃烧反应活化能大小,使燃料在较低温度下快速、高效反应,其作用原理是反应物分子在催化剂表面进行吸附、活化以及反应,接着产物分子与催化剂脱附,常见催化剂中存在贵金属催化剂,活性极高、起燃温度低,过渡金属氧化物类的催化剂,价钱相对实惠,热稳定性较好,存在钙钛矿型催化剂,有着优异的结构稳定性及催化活性,不同催化剂适用于不同燃料与工况,例如贵金属催化剂在处理天然气等清洁燃料时效果显著,过渡金属氧化物催化剂对重质燃料适应性更强。

3.2.2 催化燃烧系统设计与应用

催化燃烧系统设计需考虑催化剂载体选择、反应器结构优化等因素,载体得有高比表面积、优良热稳定性及机械强度,常用陶瓷、金属蜂窝载体,反应器结构设计要达成气流均匀分布的效果,与催化剂充分接触,像采用固定床、流化床形式的反应器。就应用范畴而言,小型分布式能源系统中,催化燃烧燃气轮机可高效利用天然气,实现热电联合产出,同时大幅降低污染物排放;在航空领域,催化燃烧技术有望用来优化航空发动机燃

烧系统,提升燃烧成效,减少氮氧化物与碳氢化合物排放,推动航空动力系统向绿色、高效方向发展。

3.3 烟气后处理技术

3.3.1 选择性催化还原(SCR)技术

SCR技术依靠催化剂,采用还原剂,将烟气中的氮氧化物还原为氮气和水,当反应发生阶段,氨气或尿素分解得到的氨基与氮氧化物产生反应,催化剂是核心,多应用钒钛系催化剂,在250-400℃温度区间活性较高,反应温度、氨氮比、空速等是关键参数,必须精准把控,在燃煤电厂开展的烟气脱硝里,合理调整氨氮比为1.0-1.2,把控空速在3000-5000h⁻¹,能让氮氧化物脱除效率达到80%-90%区间,有效降低排放浓度,满足环保标准。

3.3.2 其他后处理技术介绍

选择性非催化还原(SNCR)技术于高温(850-1100℃)的条件里,向烟气中喷入尿素或氨水等还原剂,把氮氧化物还原成氮气跟水,无需催化剂,只是该脱硝效率相对欠佳,一般为30%-60%,吸附法借助吸附剂(像活性炭、分子筛)吸附烟气里的污染物,可针对低浓度污染物进行处理,也能借助解吸实现吸附剂再生,还有氧化吸收法,把烟气里低价态的污染物氧化成高价态,再凭借吸收剂吸收完成去除,各技术皆有优劣之分,可根据实际工况与排放要求选择组合使用。

4 燃烧调整与排放控制技术协同优化

4.1 多目标优化方法

4.1.1 数学模型建立

遵照燃烧及排放理论,以燃烧效率、污染物排放(如氮氧化物、碳氢化合物、一氧化碳)、设备运行稳定性等为目标建立数学模型,虑及燃料与空气的混合、燃烧反应动力学、传热传质等进程,通过质量守恒、能量守恒、动量守恒方程以及化学反应速率方程描述燃烧系统,采用计算流体力学(CFD)手段,结合化学反应动力学机理,建立三维燃烧模型,将燃烧室几何结构、边界条件、燃料与空气性质等参数纳入模型,精准模拟燃烧过程,为后续优化铺设理论轨道,量化各因素对目标的影响。

4.1.2 优化算法应用

采用遗传算法、粒子群算法等智能优化算法求解多目标优化问题,遗传算法仿照生物遗传进化的进程,采用选择、交叉、变异操作,在解空间中搜索最优解;粒子群算法模拟的是鸟群的觅食活动,粒子依照自身与群体最优位置调整其飞行方向,不断迭代追索最优,以燃气轮机燃烧系统当作例子,以燃烧调整及排放控制相关参数(如燃料流量、空气流量、燃烧模式切换点)作为优化变量,借助优化算法对数学模型求解,获得契合多

目标设定的参数搭配,实现燃烧效率上扬与污染物排放降低的协同优化。

4.2 系统集成与控制策略

4.2.1 燃烧调控与排放控制集成设计思路

对燃料控制、空气供给调节、燃烧模式切换以及排放控制等子系统予以有机集成,搭建一体化硬件平台,通过传感器实时采集燃气轮机运行参数(如温度、压力、流量、污染物浓度),发送到中央控制核心,开发集成控制软件,采用先进型控制算法,依照实时工况及预设目的,促进各子系统配合,若负荷出现了变化,控制器同步调节燃料调节阀的开度大小、进气流量及燃烧模式,让燃烧稳定,排放达到合格水平,实现系统整体性能有效优化。

4.2.2 智能控制策略实施

采用像自适应控制、模型预测控制的智能控制手段,自适应控制凭借系统运行状态实时调校控制参量,跟随工况变化,如依据燃烧稳定性实时调节燃料与空气比例,模型预测控制凭借系统数学模型进行,预估未来的工况情形,预先对控制策略进行优化,以燃气轮机开启阶段为例,模型预测控制依照启动阶段各时刻温度、压力的变动态势,预先调整燃料及空气供给量,维持启动的平稳性,减少污染物排放,提高系统运行的可靠度与智能水平,实现燃烧调控与排放控制的高效配合。

5 结语

本论文对燃气轮机燃烧调整及排放控制技术展开全面研究,确定各技术原理与应用途径,燃烧调整可实现燃烧过程的优化,排放调控能削减污染物生成,协同优化能达成多目标的上扬,实验验证与数值模拟为技术研究供给有效手段,需不断挖掘新技术、优化既有技术,以契合更严格的环保准则与能源高效利用要求,推动燃气轮机技术逐步进阶。

参考文献

- [1] 李安琦. 燃气轮机燃烧优化调整方法研究[D]. 南京航空航天大学, 2023.
- [2] 曹炼博, 刘志坦, 王凯, 李玉刚. 发电领域燃气轮机燃烧调整方法研究[J]. 燃气轮机技术, 2021, 34(02): 31-37.
- [3] 陈颖. 基于模型控制的9FB燃气轮机燃烧调整技术探讨[J]. 内燃机与配件, 2021, (01): 193-194.
- [4] 钟帆, 茅大钧, 汤诚, 孙道万. 基于PSO-BP的燃气轮机燃烧调整研究[J]. 青海电力, 2020, 39(04): 31-35+5.
- [5] 伍赛特. 改善航空发动机氮氧化物排放的技术方案研究[J]. 资源节约与环保, 2020, (12): 3-4.