

加湿燃烧研究现状

郝丹, 汪洋, 刘建忠, 周俊虎

(浙江大学 能源清洁利用国家重点实验室 浙江 杭州 310027)

摘 要: 首先从两个方面详细介绍了燃料加湿燃烧的研究成果, 一方面是加湿对燃气轮机燃烧室内燃烧特性的影响, 另一方面是加湿对燃料着火特性、可燃极限的影响。分析了目前加湿燃烧研究所取得的结论, 空气加湿燃烧可以降低火焰燃烧温度、改变燃烧过程中的化学反应以及传热传质过程, 影响火焰的流场和结构, 使火焰趋于不稳定。同时燃烧区温度的降低有利于降低 NO_x 排放, 对 HAT、IGCC 等热力循环中降低 NO_x 排放有重要意义, 最后指出了目前加湿燃烧存在的不足, 并结合本课题组的研究结论为后续研究方向提出了建议。

关 键 词: 加湿; 注蒸汽; 加湿火焰; 加湿燃烧; HAT

中图分类号: TK46+3 文献标识码: A

引 言

加湿燃烧广义上是指燃料在燃烧时向其中加入水或水蒸气, 以改善燃烧。根据氧化剂的不同可以分为空气加湿燃烧和纯氧加湿燃烧, 根据加湿方式的不同又可以分为燃料与水蒸气混合加湿燃烧、氧化剂与水蒸气混合加湿燃烧以及单独注入水或水蒸气对燃烧室进行加湿燃烧等。其中, 空气加湿燃烧的研究最为广泛, 其主要应用于 HAT(湿空气透平)循环、IGHAT(整体煤气化湿空气透平)循环、STIG(注蒸汽燃气轮机)循环以及 IGCC(整体煤气化联合)循环等以燃气轮机为基础的先进热力循环中^[1]。在 HAT 中, 燃气轮机系统中低品位的热量被水吸收利用, 然后将吸收了热量的水注入湿化器中与压缩空气掺杂混合均匀, 形成湿空气混合物一起进入燃烧室参加反应。加湿燃烧不仅会影响燃烧火焰的形态与燃烧的稳定性, 同时会改变燃烧产物的排放, 因此可以说加湿燃烧是 HAT 等循环中的一个关键过程。为了更加全面深入地研究加湿燃烧的重要作用及意义, 将从加湿对燃料燃烧特性的影响和加湿对燃料

点火及火焰传播特性的影响这两个方面详细介绍加湿燃烧的研究状况。

1 加湿对燃料燃烧特性的影响

在加湿对燃料燃烧特性的影响方面, 前人学者着重研究了以空气作为氧化剂的加湿燃烧技术。早在 20 世纪 60 年代, 空气加湿燃烧就被使用在内燃机中用于减少内燃机燃烧的爆震, 同时可以降低内燃机设备的温度, 防止过热, 以提高循环热效率^[2]。20 世纪 80 年代, 在燃气轮机燃烧室中也开展了相应的加水或者水蒸气以减少 NO_x 排放的研究。

目前, 国内外专家学者对空气加湿燃烧的研究主要侧重于两个方面: 一方面研究 HAT、IGHAT、STIG 和 IGCC 等以燃气轮机为基础的先进热力循环燃烧室中湿空气燃烧对 NO_x 、CO 形成的影响^[3]; 另一方面注重探寻湿度在扩散燃烧和预混燃烧中对燃烧火焰形状、结构和稳定性的影响。研究采用化石燃料为主, 涉及各种碳氢化合物燃料, 尤其对甲烷、乙烷等的研究较多。

具体内容分国外和国内研究状况详细介绍如下:

国外研究机构及学者在 HAT 循环燃烧室空气加湿燃烧方面开展的研究较早。美国联合技术研究中心(UTRC)和美国能源部—联邦能源科技中心(DOE-FETC)在模型实验台上对液体燃料空气加湿开展了预混燃烧的实验^[4], 同时进行了建模研究, 探索用于 HAT 循环的燃气轮机设计标准。研究结果显示: 湿度增加, NO_x 的排放量减少, 但火焰稳定极限对应的当量比会相应增大。

Meyer 等人为了降低 MAKLIATI 燃气轮机中

收稿日期: 2013-06-04; 修订日期: 2013-09-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51106135)

作者简介: 郝丹(1989-), 男, 安徽宿州人, 浙江大学硕士研究生。

NO_x 和 CO 的排放进行了注蒸汽实验^[5]。实验中 Meyer 等人通过两种方式注入蒸汽,一种是将蒸汽与气体燃料混合,另一种是将蒸汽混入空气中。实验数据显示在加入相同蒸汽量的情况下,燃料加湿的方法对 NO_x 排放的降低效果要比空气加湿的方法好,但燃料加湿情况下 CO 的排放量却要比空气加湿情况下大很多。形成这一现象的主要原因归结于加湿对燃烧火焰稳定性的影响,燃料加湿情况下,燃料中混合湿蒸汽使得燃料的出口速度增大,影响了火焰的稳定性,降低了火焰温度,虽减少了 NO_x 的排放,但却同时造成燃烧不完全而生成更多的 CO。

Benini 等人通过系统的实验方法并结合数值模拟的手段^[6],研究了在一个 200 N 推力的涡轮喷气发动机燃烧室内直接注入水/水蒸气后 NO 和 CO 的生成水平,实验和数值模拟的结果均表明,无论注入水还是水蒸气,NO 浓度均降低,而对于 CO 的生成情况则没有明显的结论。

另有大批学者就甲烷—湿空气燃烧对燃烧产物 NO_x 、CO 等含量影响进行了研究,主要有 Zhao 等人对甲烷—湿空气燃烧反应中间产物 OH 基对扩散火焰中快速型 NO_x 生成的影响进行了数值研究^[7],计算结果显示加湿使得 OH 基浓度下降,从而使得总体的 NO_x 降低。Belokon 等人运用实验手段研究了模型燃烧室中甲烷—湿空气燃烧扩散火焰的 NO_x 排放及燃烧效率^[8],实验结果表明:含湿量增加, NO_x 含量显著降低,CO 和未燃碳氢化合物(UHC)含量增加,燃烧效率因受 CO 和 UHC 的影响而下降,当加湿量达到 7% 时,燃烧效率已开始明显恶化。Day 等人为研究甲烷—湿空气预混火焰加湿对于 NO_x 排放的影响^[9],采用了实验和数值模拟相结合的方法,得到了与文献[6]相同的结果。

现阶段国外主要有 Lee、Seepana S、Cleeton、De-lattin 等人对加湿燃烧进行探索,侧重探讨加水蒸气与直接注水等对燃烧的不同影响^[10-13]。

国内在 HAT 循环空气加湿燃烧方面的研究,主要是以中国科学院工程热物理研究所、上海交通大学和清华大学等几所高等院校为主。侧重于研究加湿燃烧的一些基本特性,主要采用的手段有:粒子图像速度场(PIV)测量技术(用于测量钝体后加湿扩散燃烧流场的速度分布)、高温热电偶技术(用于测量火焰内部的温度分布)、气体分析仪分析技术(用于测量流场的 NO_x 分布)等。

比较突出的有中国科学院工程热物理研究所的

房爱兵等人以柴油为燃料^[11],在中压全尺寸燃气轮机燃烧室内进行的空气加湿燃烧实验。其主要研究了加湿度对燃烧特性的影响。实验结果表明,空气加湿燃烧对燃烧室内温度分布、出口温度场、污染物生成(即 NO_x 、CO、UHC)及燃烧稳定性等均有一定程度的影响,主要结果如图 1 所示。

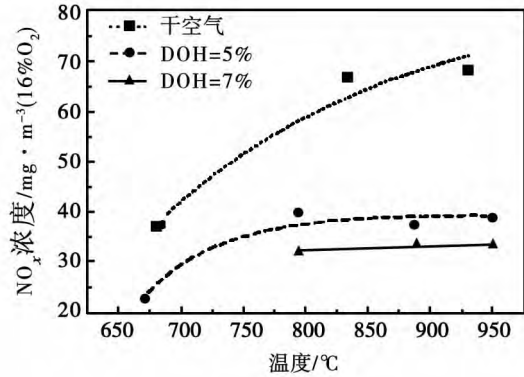


图 1 NO_x 浓度与燃烧室出口燃气温度关系

Fig. 1 Relationship between the NO_x concentration and the gas temperature at the outlet of the combustion chamber

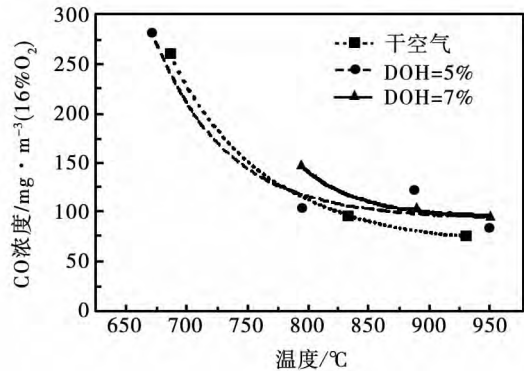


图 2 CO 浓度与燃烧室出口燃气温度关系

Fig. 2 Relationship between the CO concentration and the gas temperature at the outlet of the combustion chamber

数据显示,空气加湿燃烧导致 NO_x 排放显著下降,而 CO 和 UHC 排放略有上升,燃烧室出口温度场畸变加剧。这些结论对燃烧情况较为复杂,内部流动作用较为强烈的全尺寸燃气轮机燃烧室的设计提供了直接的帮助。张哲颠等人通过对甲烷—湿空气对冲扩散火焰进行数值研究^[14],以探索甲烷—湿空气火焰中 CO 生成的化学机理,揭示加湿和 CO 排

放的关系, 这些方法对准确预测 HAT 循环中 CO 的排放有参考意义。另外, 金大祥等人通过设计构建了一种大湿度燃烧室实验台^[15], 来研究 HAT 循环和 STIG 循环过程中的加湿燃烧基本特征。

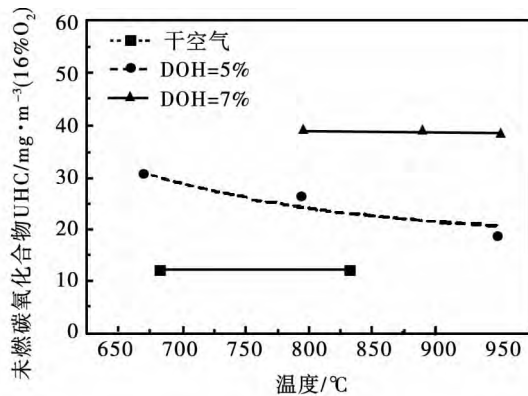


图 3 UHC 浓度与燃烧室出口燃气温度关系
Fig. 3 Relationship between the UHC concentration and the gas temperature at the outlet of the combustion chamber

再有上海交通大学的顾欣等人利用粒子图像速度场 (PIV) 测量技术分别对丙烷—湿空气燃烧的二维瞬时速度场、圆盘形钝体后甲烷—湿空气非预混火焰的回流区速度场进行了测量, 得到了加湿燃烧情况下主流区、回流区的速度场分布, 对进一步认识加湿燃烧特性有重要的帮助^[16~17]。葛冰等人采用粒子图像速度场 (PIV) 测量技术测量了加湿、不加湿状况下钝体后丙烷—空气湍流扩散燃烧流场的速度分布; 其次利用高温热电偶测量了两种流场火焰内部的温度分布; 再次使用气体分析仪测量了两种流场的 NO 分布^[18]。最后通过对两种流场中所测得结果的分析比较, 得到加湿扩散燃烧流场与不加湿扩散燃烧流场的差异。总体来说两者有一定的相似性, 但加湿使得燃烧流场回流区中心的位置前移、回流区长度减小和燃烧区最高温度降低, 并且使得燃烧室内的 NO 浓度降低, 可以说加湿改善了燃烧室的燃烧状况, 提高了燃烧室内温度分布的均匀度, 降低了污染物的排放。这与周见广等人通过数值模拟不同湿度条件下 HAT 循环燃烧室内扩散燃烧过程所得到的结果相同^[19~20]。

从以上国内外学者研究成果中可以发现, 针对加湿对燃料燃烧特性的影响, 国外学者主要关注 HAT、IGCC 等先进热力循环燃烧室中空气加湿燃烧对 NO_x、CO 等排放的影响; 而国内学者更倾向于测

量、模拟空气加湿燃烧燃烧室内的温度场分布、速度场分布和产物浓度等燃烧特征, 整体把握空气加湿燃烧特性为改善乃至设计全新的燃烧室提供支撑。

2 加湿对燃料点火及火焰传播特性的影响

在 HAT、IGHAT、IGCC 等先进热力循环中空气加湿燃烧技术能够明显降低污染物 (主要是 NO_x) 排放水平, 但是随着加湿量的增加会相应带来燃料点火困难、燃烧速率低、火焰传播速度慢和容易熄火等一系列问题。因此, 对加湿燃烧时燃料点火及火焰传播特性等进行研究显得非常重要。

国外的 Shebeko 等人研究了 H₂-O₂ 混合物分别在 N₂ 和水蒸气两种稀释剂作用下的可燃极限和燃烧速度^[21]。实验观察到可燃极限在 2~4 MPa 几乎与压力无关。N₂ 和水蒸气均会对 H₂-O₂ 混合物燃烧速度造成影响。但未能得到具体的水蒸气对 H₂-O₂ 混合物可燃极限的影响, 仅为进一步研究提供了一些指导思路。

另有些许国外的学者利用 PLIF 技术对燃料燃烧火焰进行了测量, 如 Schefe 等人通过 PLIF 测量火焰中 OH 浓度来研究环形旋流甲烷/空气预混燃烧中加氢对稳定性的影响^[22]。测量结果是接近稳定极限附近 OH 摩尔分数降低、火焰尺寸降低, 而且高 OH 浓度区火焰表现出更容易脱落的特征, 添加氢气明显增加 OH 浓度并扩大火焰稳定性。

Tsurikov 等人利用实验 PLIF 测量技术及数值模拟方法, 通过 OH 浓度分布来识别反应区域与可燃区域, 其结果发现燃烧室压力对火焰长度有明显变化, H₂ 浓度提高有助于稳定火焰, 而 CH₄ 的存在会引起流动方向上火焰面的急剧扩大^[23]。虽然这些研究并没有直接涉及到加湿对燃料点火及火焰传播的影响, 但是其研究方法和测量手段同样适用于加湿燃烧的研究。

国内的张波等人应用 CHEMKIN-II 程序计算了水蒸气对甲烷/空气层流预混火焰传播速度的影响^[24]。结果表明: 水蒸气的加入会使甲烷/空气层流预混火焰传播速度降低。

在加湿对燃料燃烧火焰传播特性的影响方面, 最新的研究有上海交通大学的谢岳生、葛冰等人, 其分别利用平面激光诱导荧光系统 (PLIF)、激光粒子图像速度场测量技术等先进测量手段对加湿后火焰形态及燃烧流场特性进行测量, 探讨加湿后火焰的

传播特性^[25~26]。

目前,国内尚未有学者在加湿对燃料点火特性、可燃极限的影响上进行系统全面的研究,部分学者关于细水雾灭火机理的研究对此有稍许的借鉴意义。

王喜世等人探讨了在灭火时细水雾的蒸发潜热吸热作用、热容吸热作用以及稀释氧气作用在抑制气体扩散火焰方面的相对贡献^[27]。实验结果表明,细水雾抑制和熄灭气体火焰是其稀释氧气、蒸发潜热吸热和热容吸热作用共同作用的过程,且潜热吸热作用比热容吸热作用更明显。在卷吸作用下,由于有更多的细水雾到达火焰内部,所以其对火焰内部温度的影响比水蒸气更大。

秦俊等人应用三维 LDV/APV 系统和热成像方法^[28]探索了细水雾抑制火焰形成与传播的机理和规律,比较了细水雾抑制气体扩散火焰时水雾的蒸发潜热吸热作用、热容吸热作用以及稀释氧气作用的相对影响。

另外,梁天水等人关于细水雾抑制熄灭燃油油雾火的实验与 Fluent 模拟结果对研究加湿情况下燃料与氧气混合浓度比、动力学效应与热辐射等有可参考之处^[29]。

细水雾抑制和熄灭火焰的主要机理表现为燃料表面冷却(主要针对液体和固体可燃物)、蒸发吸热、减小热反馈以及稀释氧气等。加湿燃烧时水蒸气的加入,同样会将氧化剂稀释(HAT 循环湿空气中纯氧的含量只占 15.9%,明显低于空气中的 21%),加上水蒸气促进氧原子与水的反应 $O_2 + H_2O = 2OH + O$,使得湿空气中的氧原子含量进一步减少,因此对燃料气体的点火有一定的影响^[30]。

加湿对燃料点火特性、可燃极限的影响方面研究较少,这可能与加湿后燃料着火受多种因素(加湿比例、温度、压力)影响,难以与搭建控制单一变量的实验系统有关,同时,加湿燃烧实验对设备材料的安全性及耐腐蚀、耐水性等有较高的要求,也为试验测量带来一定的困难。对此可以通过 Fluent、CHEMKN 等工程计算软件进行理论的模拟并结合实验验证的方式进行研究。

3 加湿燃烧的总结与展望

从国内外加湿燃烧方向的文献资料可知,迄今为止,各国学者对多种燃气轮机循环燃烧室内湿空

气燃烧进行了一系列的研究,选用燃料主要以甲烷、乙烷为主,也有柴油与合成气;采用实验和数值模拟相结合的方法,一方面在各种燃气轮机模型燃烧室或全尺寸燃烧室内进行空气加湿燃烧实验,通过粒子图像速度场(PIV)测量技术、高温热电偶技术、气体分析仪分析技术等测量手段获取空气加湿燃烧特性;另一方面运用 CHEMKN 等工程计算软件开展空气加湿燃烧数值模拟,对包括扩散燃烧和预混燃烧在内的空气加湿燃烧进行了详细的研究。

研究重点包含:燃气轮机循环燃烧室内湿空气燃烧的污染物(NO_x 、CO 等)排放;湿空气燃烧流场主流区/回流区的速度场分布、温度分布和火焰稳定性等燃烧特性;湿空气燃烧室及其喷嘴的改造和设计等。

结论普遍认为,空气加湿燃烧可以降低火焰燃烧温度,改变燃烧过程中的化学反应以及传热传质过程,影响火焰的流场和结构,使火焰趋于不稳定,同时燃烧区温度的降低有利于降低 NO_x 排放,对 HAT、IGCC 等热力循环中降低 NO_x 排放有重要意义,但空气加湿燃烧对 CO 排放的影响尚没有明确的结论,只有当燃料为柴油时,由于空气加湿有利于柴油的雾化,促进反应更加完全,因此可以稍许降低柴油燃烧中的 CO 排放。

但在加湿对燃料点火特性和可燃极限的影响上,现有研究涉及较少,因此未来在加湿燃烧方向一方面可以继续探索各种类型的燃气轮机燃烧室内空气加湿燃烧的燃烧特性,完善燃烧室燃料喷口、燃料组织方式的设计方案,增加燃料利用率,提高系统的热量传递效率;另一方面可开展针对不同燃料(H_2 、 CH_4 等)在加湿情况下的点火特性、可燃极限的研究。以氢气为例,氢气在纯氧下化学反应原理较为简单,且氢气能量密度高,结合当前氢氧微尺度燃烧方向的研究热点,以氢氧燃烧为基础的燃气轮机反应生成物仅为水蒸气,无其它污染物,洁净高效,但同时氢氧反应较一般燃料燃烧更为剧烈,难以控制,存在极大的安全隐患,适当地加入水蒸气不仅可以降低氢氧燃烧的最高温度,防止烧坏燃烧器,同时可以增加产物水蒸气的产量,对后续做功环节提供更多的工质。因此可以进行氢氧点火燃烧情况下的加湿实验,测量不同加湿情况下氢氧的点火界限,着火点特性等。

本课题组正进行这一课题的研究,拟通过搭建氢氧加湿燃烧实验台系统测量氢气氧气在添加不同

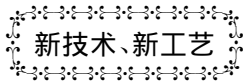
水蒸气比例情况下的点火极限,同时结合 Fluent、CHEMKIN 等工程计算软件数模拟氢氧加湿点火燃烧状况,为实验设计提供指导与支持,相信对 $H_2 - O_2$ 加湿点火特性的研究结果可以为后续 CH_4 等更为复杂的燃料进行加湿情况下的着火特性实验提供技术基础。

参考文献:

- [1] 房爱兵. 燃气轮机燃烧室空气加湿燃烧的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2005(4): 713 - 716.
FANG Ai-bing. Experimental study of the air-humidified combustion in a combustion chamber of a gas turbine [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005(4): 713 - 716.
- [2] 张哲颠. 湿空气扩散火焰的实验和数值研究[R]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所) 2006.
ZHANG Zhe-dian. Experimental and numerical study of the flame diffused by the wet air [R]. Beijing: Postgraduate college under the Chinese Academy of Sciences (Engineering Thermophysics Research Institute) 2006.
- [3] 张哲颠,王岳,肖云汉. 湿空气燃烧的研究进展[C]//北京: 中国工程热物理学会燃烧学学术会议论文集(上册). 2006.
ZHANG Zhe-dian, WANG Yue, XIAO Yun-han. Recent advances in the study of wet air combustion [C]//Beijing: Proceedings of the combustion seminar held by China Engineering Thermophysics Association (Volume 1) 2006.
- [4] Rao A D, Samuelsen G S, Robson F L. A feasibility and assessment study for FT4000 humid air turbine (HAT) [R]. EPRI Report, 1993. TR - 102156.
- [5] Meyer J L, Grienche G. An experimental study of steam injection in an aeroderivation gas turbine [R]. ASEM paper 97 - GT - 506, 1997.
- [6] Benini E, Pandolfo S, Zoppellari S. Reduction of NO emissions in a turbojet combustor by direct water/steam injection: Numerical and experimental assessment [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(17 - 18): 3506 - 3510.
- [7] Zhao D. Behavior and effect on NO_x formation of OH radical in methane-air diffusion flame with steam addition [J]. Combustion and Flame, 2002, 130(4): 352 - 360.
- [8] Belokon A A, Khritov K M, Klyachko L A. Prediction of combustion efficiency and NO_x levels for diffusion flame combustion in HAT cycles [R]. ASME paper, FT - 2002 - 30369, 2002.
- [9] Day W H. High efficiency gas turbine engine has zone where heated fuel is mixed with steam for injection into combustor to reduce nitric oxide emissions [R]. United Technologies Corp.
- [10] Lee J J, Jeon M S, Kim T S. The influence of water and steam injection on the performance of a recuperated cycle microturbine for combined heat and power application [J]. Applied Energy, 2010, 87(4): 1307 - 1316.
- [11] Seepana S, Jayanti S. Steam-moderated oxy-fuel combustion [J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(10): 1981 - 1988.
- [12] Cleeton J P E, Kavanagh R M, Parks G T. Blade cooling optimisation in humid-air and steam-injected gas turbines [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(16): 3274 - 3283.
- [13] Delattin F. Effects of steam injection on microturbine efficiency and performance [J]. Energy, 2008, 33(2): 241 - 247.
- [14] 张哲颠. 甲烷-湿空气对冲扩散火焰中 CO 的生成特性 [J]. 工程热物理学报, 2006(S2): 203 - 206.
ZHANG Zhe-dian. CO production characteristics in the counter-flow diffusion flame by burning methane with wet air [J]. Journal of engineering thermophysics, 2006(S2): 203 - 206.
- [15] 金大祥. 大湿度燃烧室实验台的研制 [J]. 动力工程, 2000(5): 816 - 820.
JIN Da-xiang. Development of a combustion chamber test rig at a large humidity [J]. Power Engineering, 2000(5): 816 - 820.
- [16] 顾欣. 加湿湍流燃烧火焰稳定的速度场特性分析 [J]. 燃气轮机技术, 2006(2): 30 - 33.
GU Xin. Analysis of the characteristics of a steady speed field of a combustion flame humidified by a turbulent flow [J]. Gas Turbine Technology, 2006(2): 30 - 33.
- [17] 顾欣. 湿空气非预混火焰回流区速度特性的实验 [J]. 上海交通大学学报, 2007(03): 357 - 360 + 365.
GU Xin. Experiment of the speed characteristics of the return flow zone formed by a wet air non-premixed flame [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007(03): 357 - 360 + 365.
- [18] 葛冰, 臧述升, 顾欣. 加湿回流湍流扩散燃烧流场的实验研究 [J]. 上海交通大学学报, 2006(8): 1287 - 1292.
GE Bing, ZANG Shu-sheng, GU Xin. Experimental study of the flow field formed by humidified turbulent flow diffusion combustion [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006(8): 1287 - 1292.
- [19] 周见广. 大湿度旋流扩散燃烧的变工况特性 [J]. 上海交通大学学报, 2004(10): 1617 - 1622.
ZHOU Jian-guang. Off-design characteristics of the swirling diffusion combustion at a large humidity [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004(10): 1617 - 1622.
- [20] 周见广, 臧述升, 翁史烈. 湿度对 HAT 循环燃烧室旋流扩散燃烧特性的影响 [J]. 热能动力工程, 2004(4): 363 - 366.
ZHOU Jian-guang, ZANG Shu-sheng, WENG Shi-lie. Influence of humidity on the swirling diffusion combustion characteristics in a HAT circulation combustion chamber [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2004(4): 363 - 366.
- [21] Shebeko Y N. Investigation of the combustion characteristics of $H_2 - O_2 - N_2 - H_2O$ mixtures under elevated pressures and temperatures combustion [J]. Explosion and Shock Waves, 1994, 30(1): 15 - 18.
- [22] Schefer R W. Hydrogen enrichment for improved lean flame stability [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2003, 28(10): 1131 - 1141.
- [23] Tsurikov M. Investigations of a syngas-fired gas turbine model combustor by planar laser techniques [J]. Proceedings of the

- ASME Turbo Expo 2006 ,1: 303 - 309.
- [24] 张波,傅维标. 氢气和蒸汽对甲烷/空气层流火焰传播速度的影响[J]. 燃烧科学与技术 2004(6): 559 - 562.
ZHANG Bo, FU Wei-biao. Influence of hydrogen and steam on the diffusion speed of a methane/air laminar flow flame [J]. Combustion Science and Technology 2004(6): 559 - 562.
- [25] 谢岳生. 双旋流合成气加湿扩散燃烧的实验与数值研究[R]. 上海: 上海交通大学 2012.
XIE Yue-sheng. Experimental and numerical study of the dual swirling flow synthesized gas humidified diffusion combustion [R]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University 2012.
- [26] 葛冰,臧述升,郭培卿. 多孔式喷嘴加湿旋流扩散燃烧流场的实验研究[J]. 上海交通大学学报 2012, 46(5): 661 - 665.
GE Bing, ZANG Shu-sheng, GUO Pei-qing. Experimental study of the humidified swirling flow diffusion combustion flow field in a multi-hole nozzle [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(5): 661 - 665.
- [27] 王喜世. 细水雾抑制气体火焰的实验[J]. 中国科学技术大学学报 2006(01): 26 - 28.
WANG Xi-shi. Experiment of a gas flame prohibited by fine water mist [J]. Journal of China University of Science and Technology, 2006(01): 26 - 28.
- [28] 秦俊. 细水雾抑制气体扩散火焰的机理研究[J]. 燃烧科学与技术 2003(5): 391 - 396.
QIN Jun. Study of the mechanism governing the gas diffusion flame prohibited by fine water mist [J]. Combustion Science and Technology 2003(5): 391 - 396.
- [29] 梁天水,廖光焯,王喜世. 细水雾与油雾火焰相互作用的实验及数值模拟研究[J]. 热科学与技术 2010(3): 249 - 255.
LIANG Tian-shui, LIAO Guang-xuan, WANG Xi-shi. Experimental and numerical simulation study of the interaction between a fine water mist and oil mist flame [J]. Thermoscience and Technology 2010(3): 249 - 255.
- [30] Bhargava A. An experimental and modeling study of humid air premixed flames [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the Asme 2000, 122(3): 405 - 411.

(孙显辉 编辑)



新技术、新工艺

航改和重型燃气轮机组最佳不对称联合循环

据《Gas Turbine World》2013年5-6月刊报道,正在提出一种独特的联合循环设计理念,使航改型燃气轮机和重型燃气轮机组合成不对称装置,可以改变加载,以便达到极好的低负荷运行特性和效率。

与相当额定参数的1×1F级设计比较,使用1台100 MW的LMS100航改型燃气轮机和1台210 MW Fr7FA.05重型燃气轮机,基于2×1配置设计的422 MW联合循环装置突出的优点是:

一调节

在50%~75%负荷下运行时,低负荷热耗率比F级装置普遍减少5%~10%;

一排放

与常规设计30%~40%负荷比较,在联合循环负荷调节到20%(~80 MW)时,装置的排放仍保持在可允许的范围内;

一启动

在冷态启动的10 min内,航改型机组就能达到100 MW满输出功率,并且在30 min内能达到联合循环装置的满输出功率(422 MW)。

一投资

与2个平行1×1联合循环装置比较,装置的初投资(每千瓦安装费用)约减少20%。

给出了不对称联合循环的热力原理图,航改型燃气轮机、重型燃气轮机以及其联合循环潜在能量的焓熵图,相对效率随联合循环负荷变化的关系曲线图。

(吉桂明 摘译)

加湿燃烧研究现状 = **Current Status in the Study of the Humidified Combustion** [刊, 汉] XI Dan, WANG Yang, LIU Jian-zhong, ZHOU Jun-hu (National Key Laboratory on Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(1). - 1 ~ 6

Firstly, the authors described in detail the research findings in the humidified combustion of fuel from the following two aspects: one is the influence of the humidification on the combustion characteristics of gas turbine combustors and another is the influence of the humidification on the ignition characteristics and combustible limits of fuel. Secondly, they also analyzed the conclusions currently obtained from the study of the humidified combustion. The air humidification combustion can lower the combustion temperature of the flame, change the chemical reactions during the combustion and heat and mass transfer process and influence the flow field and configuration of the flame, making the flame tend to be unstable and at the same time, to lower the temperature in the combustion zone is favorable to reducing the NO_x emissions and of a major significance for reducing the NO_x emissions from the HAT and IGCC etc. thermal cycles. Finally, the authors pointed out that there do exist some shortcomings in terms of the humidified combustion and gave suggestions for the future studies in this regard on the basis of the foregoing research results. **Key words:** humidification, steam injection, humidified flame, humidified combustion, HAT (humid air turbine)

某涡轮支承环连接结构故障分析 = **Analysis of the Fault Occurred to the Connection Structure of the Supporting Ring of a Gas Turbine** [刊, 汉] WANG Ming-xin (Naval Representative Office Resident in Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150078), HE Jian-yuan, LIANG Chen, ZHANG Li-chao (CSIC Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150078) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(1). - 7 ~ 12

To solve the supporting ring connection structure of a gas turbine, on the basis of the fault phenomena being described in detail, analyzed were the harms caused by the fault from the viewpoint of the structures and planned was a flow path for remedying the fault. Through a metallographic inspection of the bolt faulted and analysis of its fracture, rationality of the structure at the connection location, a multi-condition check calculation of the temperature field and strength as well as the fault replay test of the above-mentioned items etc., the analytic conclusions were verified, the fault causes identified and an improved version proposed, i. e. when the bolts are assembled, no thread grease should be applied and the above-mentioned bolts should be replaced with silver-plated ones. Through a trial-run check of the whole machine, the rationality of the improved version was proved. The remedy of the fault has meliorated the supporting ring structure design of the turbine part of the gas turbine and at the same time enhanced the reliability of the whole unit. **Key words:** turbine part of a gas turbine, supporting ring connection structure, fault analysis, test verification, improved version