

贫燃催化燃烧燃气轮机的研究进展

尹 娟, 翁 一武

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 超低热值燃气 (UIHVF) 种类繁多, 总量非常巨大。UIHVF 甲烷浓度 1% ~ 5%, 很难点火燃烧, 直接排放到大气中, 造成环境污染。催化燃烧是处理 UIHVF 最有效的燃烧方法。对催化燃烧机理及其燃气轮机催化燃烧的研究现状进行了综述, 总结了燃气轮机催化燃烧和燃气轮机贫燃催化燃烧的技术关键点, 介绍了燃气轮机贫燃催化燃烧系统、部件工作特性等方面的研究成果, 指出了燃气轮机催化燃烧、燃气轮机贫燃催化燃烧的不足以及解决方案, 提出了后续工作的发展方向。燃气轮机贫燃催化燃烧的研究进展包括: 贫燃催化燃烧特性的数值模拟与试验验证; 系统中叶轮机机械部件的设计及性能分析; 催化燃烧对系统特性影响的分析。

关 键 词: 催化燃烧; 燃气轮机; 超低热值燃气; 贫燃催化燃烧; 压气机

中图分类号: TK479

文献标识码: A

引 言

天然气的主要成分是甲烷, 甲烷氢碳比最高, 在所有烃类物质燃烧中占有绝对优势。但是甲烷高效燃烧的火焰温度通常高于 1 600 °C。在如此高的温度下燃烧天然气, 很容易离解空气, 将氮气氧气直接化合, 必然导致氮氧化物的产生。如果火焰温度低于

1 500 °C, 接近熄火的燃烧将造成低燃烧效率、未完全燃烧气体的高排放。催化燃烧甲烷可以在低温下进行, 同时, 催化燃烧可以在不降低甲烷转化率的前提下实现未燃烧碳氢化合物 (UHC)、CO 和 NO_x 等污染物的超低排放甚至零排放^[1]。催化燃烧是一项环境和能源共同驱动的燃烧技术。近年来, 催化燃烧在很多动力系统领域得到了广泛应用, 比如燃气轮机、锅炉。

受催化剂活性失效温度的限制, 催化燃烧的最高燃烧温度在 1 200 ~ 1 300 °C。和燃气轮机的传统燃烧方式相比, 催化燃烧燃气轮机不需要冷却, 减少了能量损失。同时, 催化燃烧是处理超低热值燃气 (UIHVF) 的最有效的燃烧方法。UIHVF 包括煤矿通风瓦斯, 部分低热值沼气、秸秆气等生物质气和钢铁、化工、矿物燃烧生产过程中产生的低热值燃气如高炉煤气。UIHVF 大量存在, 其中甲烷的含量在 1% ~ 5%, 这类燃气通常很难点火燃烧, 很多直接排放到大气中。甲烷的温室效应是二氧化碳的 23 倍, 直接排放 UIHVF 将造成严重的环境污染。若将 UIHVF 作为能源应用于催化燃烧燃气轮机

发电系统中, 有效利用这一资源, 将其转变成热能或电能, 节能减排所产生的效益必将十分显著^[2-3]。因此, 催化燃烧技术在燃气轮机中的应用受到工业界和研究者的充分重视。

Vaillant S R 等人开发了一种催化燃烧锅炉^[4]。该催化燃烧锅炉的燃烧器由涂有催化剂的两层金属蜂窝结构体组成, 两层结构体呈径向排布。燃气和空气预混后在第一层扩散流动, 在第二层点燃, 催化剂附着在第二层末端 1 mm 处。此催化燃烧炉在试验条件下未检出有 NO_x、CO 和 CH₄ 排放。可以应用于家庭的采暖^[4]。

燃气轮机贫燃催化燃烧 (LCCGT) 是上海交通大学和澳大利亚联邦研究院共同开发的新型动力系统, 该燃气轮机系统以 CH₄ 浓度大约 1% 的煤矿通风瓦斯 (UIHVF 的一种) 作为主燃料, 以催化燃烧室作为唯一的燃烧装置。对系统关键部件特性及整机工作特性进行了全面的计算、试验及分析。

1 催化燃烧

1.1 甲烷催化燃烧反应机理与数学模型

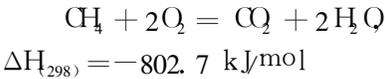
收稿日期: 2009-03-10 修订日期: 2009-06-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (90610039); 国家 863 高技术基金资助项目 (2007AA05Z134)

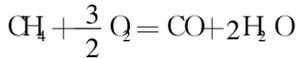
作者简介: 尹 娟 (1979-) 女, 河北沧州人, 上海交通大学博士研究生。

1.1.1 甲烷催化燃烧的反应机理

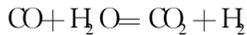
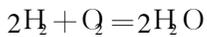
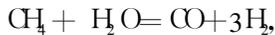
甲烷的燃烧机理为:



上式是一个总的简化式, 实际上的反应机理包括一系列的基本反应。甲烷燃烧时可能产生 CO 或 CO_2 , 这取决于燃烧前空气和甲烷的配比。比如可能发生:



还可能会发生其它的反应:



催化燃烧整个过程是由甲烷和氧气扩散到催化剂表面、在催化剂表面发生反应、反应产物游离催化剂表面并扩散到通道中的多步化学过程组成。当考虑多步表面反应时, 甲烷气体催化燃烧的动力学机理会变得非常复杂。

Chou 等人在对多通道整体式反应器甲烷催化燃烧的研究中使用了 23 种不同的反应, 将整个催化燃烧过程分为吸附、表面反应和解吸 3 个步骤^[5]。

1.1.2 甲烷催化燃烧的数学模型

Raj 分别用 N-S 模型、边界层模型和 Plug-flow 模型分析了甲烷催化燃烧的流动与化学变化过程^[6]。N-S 模型的前提假设条件较少, 因而结果比较可靠, 但是计算费用较高。对于高雷诺数流动, 利用边界层模型做计算可以得到精确的结果而且计算费用不高。Plug-flow 模型是最低廉的计算模型, 但是保证计算结果准确的应用范围较小。同时, 传质系数不可避免地拓展了 Plug-flow 模型的应用范围。

1.2 催化燃烧装置种类及结构

1.2.1 颗粒塞满填料床或流化床

化学工业中很常见催化剂载

体为颗粒状, 如图 1(a) 所示。颗粒状结构可以为催化反应提供较大的接触面积。颗粒载体通常由更小的颗粒结构压缩制成, 催化剂附着在小颗粒上。颗粒载体的大小可以根据具体的反应要求及工作条件确定。气流流过填料床或流化床通道, 在颗粒载体表面发生催化燃烧反应。反应具有较好的绝热性, 反应速率较高。若颗粒载体的体积较大, 将会阻碍气流的扩散。解决这一问题可以将载体体积减小, 数量增多, 但会增加气流的压力损失。此种催化燃烧装置在处理汽车尾气污染时较为常用^[7]。

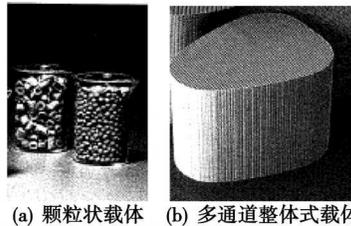


图 1 催化燃烧装置中载体

1.2.2 多通道整体式

多通道整体式催化反应装置由许多彼此隔离且与流动方向平行的细长通道组成, 如图 1(b) 所示。基体单元通道横界面形状可以分为圆形、正方形、蜂窝形、交错波纹形等。多通道整体式反应器采用陶瓷或金属结构, 催化剂涂敷在基体结构内表面, 催化反应发生在涂层上。与颗粒塞填料床式催化反应器相比, 多通道整体式系统在处理相同流量的燃气时更加简便, 压力损失较小, 是目前最常用的催化燃烧反应装置。

2 贫燃催化燃烧的特点

文献 [2-8] 中分析了进口温度、压力、甲烷浓度、速度等工作条件对贫燃催化燃烧的影响, 可

以得出贫燃催化燃烧的特点有:

(1) 适合于贫燃催化燃烧的最优进口温度依赖于所选用的催化剂活性和其它工作条件, 不同催化剂和工作条件下, 催化燃烧的起燃温度相差很大。提高进口温度能促进催化燃烧, 但是如果进口温度过高, 除了对催化剂活性产生负面影响外, 由于化学反应迅速进行完毕, 烟气在流道中流动, 产生热损失, 反而会降低出口温度。

(2) 工作压力直接影响到催化反应的速度。较高压力工况下, 表面氧 $\text{O}(s)$ 分解缓慢, 甲烷浓度很低, 与自由氧结合困难。甲烷转化被减缓, 通道中气流温度升高缓慢。

(3) 高甲烷浓度工况下反应的起始时间比低浓度工况下要早。甲烷迅速转化, 流道中的气流温度较快上升, 温度的上升有助于氧气离解, 参与反应氧增多, 进一步促进催化燃烧反应。燃气中甲烷分子扩散到催化表面的速度和概率随着甲烷浓度的降低而逐渐减小, 因此为了保证甲烷的完全转化, 贫燃催化燃烧的进行必须要求在一定甲烷浓度之上。

(4) 贫燃催化燃烧对进口速度的要求很严。流速过快, 反应物组分扩散速度加快, 燃气与催化剂表面的接触时间减少, 导致了催化燃烧反应不能充分进行, 最终降低甲烷转化率; 流速过慢, 反应生成热不能及时传递到出口, 降低催化燃烧室的工作性能。

3 燃气轮机催化燃烧 (CCG II) 的研究进展

3.1 燃气轮机催化燃烧技术关键点

催化燃烧在燃气轮机中应用概念由 Pfefferle 在 20 世纪 70 年

代提出^[9]。目前, 已有大量的文献及综述文章报道。归纳催化燃烧燃气轮机技术的关键, 要确保以下 3 点。

3.1.1 燃烧稳定性

来自于燃气轮机系统中压气机出口或回热器出口气体的温度必须达到催化燃烧的起燃温度。同时, 尽量保持通入燃气低流速流动以保证催化反应的高转化率。

3.1.2 催化剂活性的热稳定性

催化剂的活性直接决定化学反应速率, 在催化燃烧反应中要通过控制燃气流量调整反应温度, 防止催化剂活性降低、腐蚀、老化。

3.1.3 基体结构及催化剂负载材质的热稳定性

反应装置中基体结构及催化剂负载的选材要有很强的耐高温性, 保证催化反应的顺利进行。

3.2 催化燃烧燃气轮机的研究进展

Pfeffer^[9]对稳定催化燃烧及催化装置的设计做了综述^[9]。来自于压气机出口或回热器出口的气体经过催化燃烧反应后, 温度上升, 高温气体在涡轮内做功带动发电机发电。催化燃烧燃气轮机的主要形式以及技术分类如下。

3.2.1 主要形式

催化燃烧燃气轮机可以分为完全催化燃烧和混合催化燃烧两种。对于前者, 燃烧反应主要发生在催化剂表面; 对于后者, 催化燃烧只是燃烧反应的中间过程, 催化燃烧后气体温度上升保证后面的气相燃烧反应的进行。

3.2.1.1 完全催化

文献 [10] 中定量分析了一套完全催化燃烧系统, 如图 2 所示, 在催化燃烧装置的前端设置

了常规燃烧室, 在系统的起动阶段以及催化燃烧进口温度较低时预热气体。催化燃烧装置后端的旁通阀可以根据系统的工作特性及时调整进入涡轮的气体温度。

3.2.1.2 混合式催化

文献 [1] 提到了一套混合式催化燃烧系统。如图 3 所示, 系统分为预燃混合区、低温度催化燃烧区和气相燃烧区。在燃烧装置进口通入空气, 在床层喷射主燃料, 经过催化燃烧区发生反应后, 燃气进入气相燃烧区, 未完全反应的 UHC 或 CH_4 完全氧化燃烧, 最终气体温度足以推动涡轮转动。

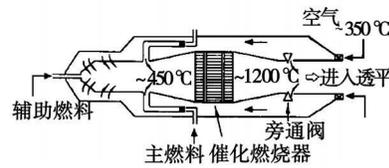


图 2 完全催化燃烧系统

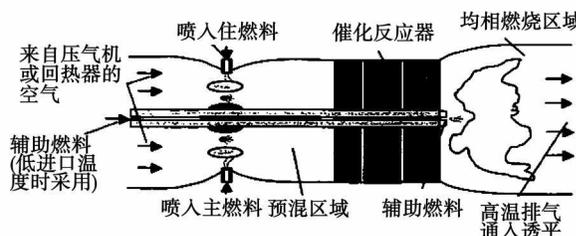


图 3 混合催化燃烧系统

3.2.2 技术分类

当前对催化燃烧燃气轮机的研究主要分为: 反应器结构及燃气进入方式的创新; 高效催化剂物性的探求; 边界条件对催化燃烧特性影响的分析等 3 个方面。

图 4 是一种新型的催化剂负载体结构。高温工况下陶瓷材料的负载体同堇青石负载体相比, 机械强度低、耐热击能力差, 会被挤压变形。图中的结构可以很好地解决这一问题, 其中的每一部分无论是在轴向还是在径向都松

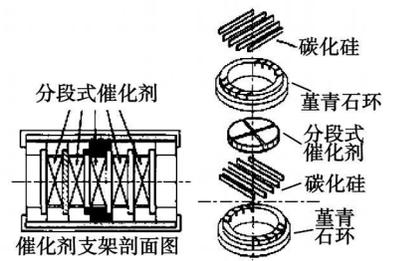


图 4 新型催化剂负载体结构

弛地叠在一起, 这样热应力就大大减小了^[10]。同时, 为了保证燃气与空气混合的均匀性, Ozawa 提出了新型的预混装置, 如图 5 所示, 包括金属壁面内通道和喷嘴。燃料从内通道通入经喷嘴喷射, 在预热器中被加热到一定温度后, 与空气混合, 混合物扩散到催化剂表面发生催化燃烧反应^[11]。在甲烷催化燃烧过程中所用催化剂存在两个关键问题: 热稳定性和低温活性。Pd Pt、Rh Au 等负载型贵金属是传统的

甲烷低温催化燃烧催化剂, 具有优良的低温起燃活性和催化性能。但贵金属催化剂价格昂贵、易烧结, 金属氧化物催化剂近年来吸引了研究者广泛的注意力, 尤其是钙钛矿型金属氧化物

催化剂。该类催化剂已经广泛地应用于甲烷催化燃烧。如何提高催化剂的比表面积以及活性相和载体之间的协同效应, 催化剂的制备方法尤为重要^[12]。清华大学钟北京老师课题组一直联合使用 CFD 软件、Fluen 和化学反应动力学软件 DETCHEM 对甲烷—空气混合物在微燃烧器内的催化燃烧进行了数值模拟, 分析了不同边界条件对甲烷催化燃烧的影响^[13]。

4 燃气轮机贫燃催化燃烧 (LCCGT)的研究进展

LCCGT是上海交通大学和澳大利亚联邦研究院共同开发的新型动力系统,以含 1% CH₄ 浓度的煤矿通风瓦斯气 (ULHVF的一种)作为主燃料,研究燃机系统的热力特性和工作特性。这套系统适用于其它超低热值燃料燃气轮机。

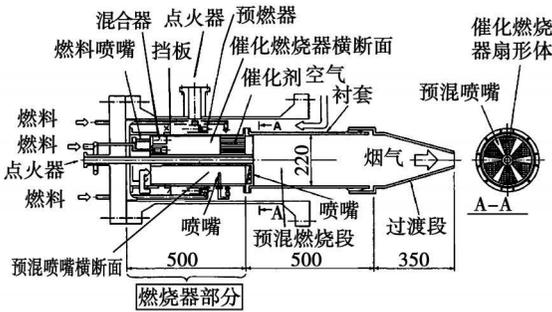


图 5 新型燃料预混系统 (mm)

该 LCCGT发电系统项目中,中方负责热力循环计算,压气机、透平、减速器、回热器的设计计算,并在合作厂家进行了生产制造。澳方负责催化燃烧室、热交换器、发电机和控制系统设计以及制造。课题组在研究超低热值燃气催化燃烧特性和催化剂活性弱化规律的基础上,研究了该动力系统能量转换的特性、热力循环参数匹配和应用范围,分析了全工况条件下贫燃催化燃烧特性对 LCCGT动力系统特性的影响,同时进行了叶轮机械部分的性能试验。目前, LCCGT的样机试验台在澳洲布里斯班的 QCAT中心已经搭建完毕,已经成功完成了点火试验。

4.1 燃气轮机贫燃催化燃烧技术关键点

LCCGT的工作原理为:主燃料直接通入压气机内被压缩,温

度压力上升后经回热器换热,温度达到催化燃烧的起燃温度后,在催化燃烧室内进行催化燃烧反应,高温的烟气通入透平做功发电。系统的起动阶段需要常规燃烧室预热气体。

由于 LCCGT与常规燃气轮机存在着很大的不同,在设计和运行过程中需要注意以下问题:

(1) ULHVF的流量具有波动性,而且热值很低,在试验阶段,需严格处理系统的进气问题,保证发电机组具有连续稳定的供气源;同时控制燃气的流速尽量低,保证甲烷完全转化。

(2) ULHVF直接通入压气机,在相同功率下 LCCGT中压气机的通流面积远大于常规燃气轮机中压气机的通流面积。同时,ULHVF中的甲烷浓度变化量对系统的热力参数影响很大,如甲烷浓度从 1%变动到 1.5%,相对量变动就达到 50%,产生的热量也增加 50%,因此对压气机的稳定工作范围提出了很高要求。

4.2 燃气轮机贫燃催化燃烧的研究进展

4.2.1 催化燃烧室工作特性的研究

对不同工作条件、不同催化剂下的 ULHVF的催化燃烧进行了数值模拟,设计了贫燃催化燃烧试验台,并进行了试验验证。通过数值计算结果与试验结果的对比,得出结论:(1)起燃温度是催化燃烧反应中最关键的因素,直接影响着贫燃催化燃烧的成败;达到起燃温度后,提高温升对甲烷转化率影响不大。(2)增加

压力将延缓催化反应速度,在通道不够长或者催化剂的量不够多时,有可能反应不完全;在压力增加的情况下,增加催化剂负载量或提高进口温度,会在一定程度上弥补压力的延缓作用。(3)进口流速(或流量)对贫燃催化燃烧反应的影响很大,其增加将导致低转化率,降低出口温度,甚至导致熄火。(4)虽然进口温度以及当量比(或甲烷浓度)的增加对反应能起到一定的促进作用,但是工作温度要保证在其催化剂失活的温度以内。

4.2.2 叶轮机械的设计及性能分析

贫燃工况下,工作压力直接影响到催化反应的速度、催化剂的活性。常规燃气轮机系统燃用中低热值燃料时,除燃烧室需做一定的改动以适应燃料变化外,还需要通过适当减小压气机通流面积或增大透平通流面积的措施确保燃气轮机安全运行不发生喘振。由于 LCCGT系统中的燃气不是通入燃烧室,而是直接通入压气机进行增温增压,在催化燃烧室中不再额外添加燃料,与常规燃气轮机工艺流程明显不同。因此,必须设计开发一种新的离心压气机,实现与催化燃烧室、透平工作性能的匹配。由于燃料热值比较低,与同输出功率常规燃气轮机相比, LCCGT系统中燃料的质量流量必然有所增加,导致通过压气机的质量流量增加,从而要求压气机的通流面积要较同输出功率的常规燃机系统中压气机的通流面积大。

压气机的通流面积大,则叶轮的出口直径相对较大,出于对压气机工作的稳定性考虑,叶片出口宽度不易过大。因此,新压气机叶轮的出口宽径比相对较

小。根据 Balj 的分析, 高效离心压缩机的比转速一般在 $0.62 \sim 1.08$ 之间, 因此对于微型燃机系统中的压气机来说, 为使其比转速在高效范围内, 一般均采用高转速^[14]。因此, 低宽径比高比转速是 LCCGT 系统中压气机结构的特点。根据 LCCGT 压气机结构的特点, 设计了低出口宽径比高比转速压气机叶轮, 并进行出厂性能试验。利用数值计算和试验两种方法预测了其工作性能。对比结果, 可以得出: 试验结果与数值计算结果基本吻合, 该压气机在全工况下达到设计要求; 随着转速的增加, 此压气机压比特性线在小流量区增长的趋势越来越大; 采用低宽径比高比转速设计带来的负面作用是提高了叶尖相对马赫数。

4.2.3 催化燃烧对 LCCGT 系统特性影响的分析

在分析 UIHVF 在各种工作条件 (不同进口温度、不同工作压力、不同进口速度、不同体积浓度) 下的催化燃烧特性的基础上, 进一步分析催化燃烧对 LCCGT 系统特性的影响。即研究催化燃烧转化率、压气机压比、透平进口温度、燃料流量、浓度对燃气轮机系统特性的影响。

5 CCGT 及 LCCGT 存在的问题及解决方案

CCGT 及 LCCGT 与常规燃气轮机相比存在着很多优点, 同时也可能存在一定的问题。

(1) 在系统起动机况以及部分负荷工况, 来自于回热器出口的气流温度未能达到催化燃烧的起燃温度, 造成系统不能正常工作。因此系统中要设置辅助燃烧室 (常规燃烧室) 以及高浓度燃料系统, 必要时及时切换保证系

统的稳定工作。

(2) 催化剂的活性是系统稳定工作的重要保证。由于贵金属催化剂使用受温度限制, 超过其许用温度将造成催化剂失效, 抑制催化反应的进程。因此在催化燃烧室的设计准备阶段, 要筛选高效、耐老化、耐侵蚀的催化剂。

6 发展方向

节能减排的需求使得催化燃烧在工业应用中发挥越来越重要的作用, 是一种很有前景的新型燃烧技术。由于 UIHVF 的大量存在, 贫燃催化燃烧技术的研究有深远的意义。LCCGT 系统的研究较常规燃气轮机的研究更具挑战性, 也需要研究者进一步探索完善。主要有以下几个方向:

(1) 目前 LCCGT 系统热效率较低, 希望能够设计出更节能的热力系统流程, 提高系统热效率与发电效率;

(2) 为确保整机试验的顺利进行, LCCGT 系统催化燃烧室还是保守采用贵金属做催化剂。为降低成本, 需要研制新型催化剂作为贵金属催化剂的替代;

(3) LCCGT 的整机试验台在试验起动机况, 还是通过手动调节阀来实现双燃料切换。双燃料伺服控制系统的实现有待于进一步开发;

(4) 除了在设计阶段保证 LCCGT 部件具有良好的工作特性外, 对于系统运行中的各部件匹配、动态调节还需要进一步研究。

参考文献:

[1] GIANPIERO GROPPI ENRICO TRONCONI PIO FORZATTI Investigations on catalytic combustors for gas turbine applications through mathematical model analysis [J]. Applied Catalysis A General 1996 138(2): 177-197.

[2] 尹娟, 翁一武. 煤矿通风瓦斯燃气轮机中的催化燃烧特性分析 [J]. 动力工程, 2009 29(2): 104-110

[3] 尹娟, 翁一武. 燃用低浓度煤矿通风瓦斯的燃气轮机系统及性能分析 [J]. 现代电力, 2007 24(5): 68-71

[4] VAILLANT S R GASTEC A S Catalytic combustion in a domestic natural gas burner [J]. Catalysis Today 1999 47(1-4): 415-420

[5] CHOU C P CHEN J Y EVANS G H et al Numerical studies of methane catalytic combustion inside a monolith honeycomb reactor using multi-step surface reactions [J]. Combustion Science and Technology 2000 150(1-6): 27-57

[6] RAJA L L KEE R J DEUTSCHMANN B Q et al A critical evaluation of Navier-Stokes boundary layer and plug-flow models of the flow and chemistry in a catalytic combustion monolith [J]. Catalysis Today 2000 59(1-2): 47-60

[7] HAYES R E KOLACZKOWSKI S T Introduction to catalytic combustion [M]. Australia Gordon and Breach Science Publishers 1997

[8] SU S AGNEW J Catalytic combustion of coal mine ventilation air methane [J]. Fuel 2006 85(9): 1201-1210

[9] PFEFFERLE W C Catalytic supported thermal combustion [P]. US 3928961, 1975

[10] SADAMORIH TANIOKA T MATSUI HISA T Development of a high-temperature combustion catalyst system and prototype catalytic combustor ure-bine test results [J]. Catalysis Today 1995 26(3-4): 337-344

[11] OZAWAA Y FUJITA T SATO M Development of a catalytically assisted combustor for a gas turbine [J]. Catalysis Today 1999 47(1-4): 399-405

[12] 严河清, 张甜, 王鄂凤, 等. 甲烷催化燃烧催化剂的研究进展 [J]. 武汉大学学报, 2005 51(2): 161-165

[13] 钟北京, 洪泽恺. 微燃烧器内甲烷催化燃烧的数值模拟 [J]. 热能动力工程, 2003 18(6): 584-588

[14] 花严红, 袁卫星, 袁修干, 等. 微小流量离心压缩机叶轮流场性能模拟计算 [J]. 航空动力学报, 2008 23(10): 1896-1902

(编辑 孙显辉)

贫燃催化燃烧燃气轮机的研究进展 = Research Advances Concerning Lean-burning Catalytic Combustion-based Gas Turbines [刊, 汉] / YIN Juan, WENG Yiwu (College of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(3), —249 ~253

UIHV (ultra low heating value) gases are numerous in variety and exist in extremely huge quantities. To ignite UIHV methane at a concentration from 1% to 5% is very difficult and its direct emissions to the atmosphere will cause pollution to the environment. The catalytic combustion is deemed as the most effective method for the disposal of UIHV gases. An overview was given of the status quo of the research on the mechanism featuring the catalytic combustion and the lean burning catalytic combustion-based gas turbines. Moreover, the key technologies were summed up for both types of gas turbines. The research achievements of the working characteristics of the above gas turbine systems and components were described and their shortcomings and solutions also pinpointed. The development tendency for future work was also proposed. The recent advances in the study of the gas turbines under discussion include: numerical simulation and test verification of lean burning catalytic combustion characteristics; analysis of design and performance of turbomachinery components in their systems; analysis of the influence of catalytic combustion on the system characteristics. Key words: catalytic combustion; gas turbine; UIHV (ultra low heating value) gas; lean-burning catalytic combustion; compressor

机匣切向喷气角对涡轮动叶间隙流动的影响 = Influence of the Casing Tangential Air Injection Angles on the Turbine Blade Tip Clearance Flow [刊, 汉] / NIU Mao sheng, ZANG Shu sheng (College of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(3), —254 ~258

Casing air injection has been proven to be one of the effective measures for improving secondary flow distribution in rotor blade passages and enhancing turbine efficiency. By adopting a numerical simulation method, the authors have studied the influence of casing tangential air injection angles on blade tip clearance flow control. It has been found that with an increase of the above cited angle, the influence scope of the fluid outgoing from the air injection holes into the clearances along the axial direction will become smaller due to a decrease of the component of the air injection speed in the tangential direction with the maximum decrease margin possibly reaching 50%, leading to a degradation of the role stopping the clearance flow by the casing air injection. In the meantime, the size of the upper passage vortex will grow due to an increase of the tangential air injection angle and intensify the vortex core strength by about 1%, resulting in an increased flow loss at the rotor blade outlet section. With the negative effect of the air injection on the power output of the rotor blades being taken into consideration, a tangential air injection angle should be properly chosen to attain the aim of enhancing the turbine efficiency. Key words: clearance flow control; tangential air injection angle; clearance vortex; passage vortex

小偏差方法在变几何燃气轮机性能研究中的应用 = Application of a Small Deviation Method in the Study of the Performance of Variable Geometry Gas Turbines [刊, 汉] / QU Chao, SONG Hua fen (College of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(3), —259 ~264

To analyze the influence of the variable geometry of a gas turbine on its performance, proposed was a new method for studying the above-mentioned performance, which is based on a small deviation equation. A comparison of the calculation results obtained by using the new method with those obtained by using characteristics curve method indicates that the calculation precision by using the new method can be guaranteed within 4% under the majority of operating conditions, as shown in Table 2. The calculation results obtained by using the new method show that to change the turbine geometry can result in different effects: to change the geometry of both HP and LP turbine can