

单筒形氢氧燃烧室结构设计及运行参数优化研究

高佳佳¹, 朱 跃¹, 魏小林², 陈广伟¹

(1. 华电电力科学研究院有限公司, 浙江 杭州 310000; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘 要: 随着高含量氢气合成气及扩散火焰燃烧技术在燃气轮机工业应用的发展, 氢气燃烧室技术研究越来越多。针对新型氢氧燃机热力循环系统, 设计单筒形氢氧燃烧室, 通过 CFD(计算流体力学) 对其内燃烧、流动及温度场分布特点进行对比研究, 优化其结构及运行参数。结果表明: 平面旋流器角度为 45° 时, 燃烧室内流场及温度场达到最佳状态; 采用循环水冷的对流换热系数为 2 000 W/(m²·K) 时, 燃烧室壁面的最高温度均在 750 K 以下; 当入射掺混速度 v_j 达到 60 m/s 时, 燃烧室出口温度场径向不均匀度平均值 RTDF ≈ 9.0%, 最大不均匀度 OTDF ≈ 23.6%, 可满足运行要求。

关 键 词: 单筒形; 氢氧; 燃烧室; 结构设计; 旋流器; 数值模拟; 优化

中图分类号: TM611 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2018.03.007

Structure Design and Operation Parameter Optimization for a Single Cylinder H₂-O₂ Combustion Chamber

GAO Jia-jia¹, ZHU Yue¹, WEI Xiao-lin², CHEN Guang-wei¹

(1. Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd, Hangzhou, China, Post Code: 310000;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing, China, Post Code: 100190)

Abstract: Due to the developments of gas turbines fed by the syngas with high content of hydrogen and of the technology of diffusion flame combustion, more and more researches on hydrogen-fuelled combustors have been carried out. Based on a new type of thermodynamic cycle system with hydrogen gas turbine, a single cylinder H₂-O₂ combustion chamber was designed. The structure and operation parameters were optimized by comparing the combustion, flow and temperature field distribution characteristics by CFD simulation. The results showed that the flow field and temperature field in the combustion chamber reach the best state when the planar swirl angle is 45°. With the convective heat transfer coefficient of circulating water of 2 000 W/(m²·K), the highest temperature of the combustion chamber wall is below 750 K. When the mixing speed v_j reaches 60 m/s, the average RTDF ≈ 9.0%, and the maximum OTDF ≈ 23.6%, which can meet the operation requirement.

Key words: single cylinder, Hydrogen-oxygen, combustion chamber, configuration design, plane cyclone, numerical simulation, optimization

引 言

20 世纪 90 年代以来, 世界主要发达国家和国际组织都对氢能研发和实现向氢经济转化给予了极大重视, 并纷纷投入巨资进行氢能相关技术研发, 部分研究学者及机构将氢气的应用推广到燃气轮机

(以下简称燃机) 工业^[1~2]。尽管一些研究表明采用预混燃烧的燃机系统可以用来燃烧纯氢^[3~4], 但由于氢气具有极短的点火延迟和快速的火焰传播速度等特点, 对预混燃烧时的吹熄、回火及燃烧稳定性等有很大影响^[5], 故实际只在扩散火焰燃烧中得到了安全可靠的运行实例^[1,6]。

在扩散火焰燃烧室中, 燃料和氧化剂在一次燃

收稿日期: 2017-04-01; 修订日期: 2017-05-10

作者简介: 高佳佳(1987-), 男, 江苏徐州人, 华电电力科学研究院有限公司工程师。

烧区混合并燃烧,由于氢气燃烧的绝热燃烧温度比甲烷要高 100~150 ℃,若仅考虑热力型 NO_x,则氢气扩散火焰燃烧产生的 NO_x将是甲烷的 3~4 倍^[7],故降低 NO_x排放成为氢气-空气扩散火焰燃烧室研究的重点,通常采用的方法有向一次燃烧区注入水、水蒸气或其它惰性气体等^[8]。20 世纪 90 年代初期,日本成立 WE-NET 氢能研究计划,提出氢-氧燃烧燃机先进朗肯循环关键技术^[9],该循环是基于水蒸气膨胀的单工质热力循环系统,因此实现了高效及污染物“无排放”的目标。此后又通过质能平衡计算及烟分析对该系统的运行及优化做了进一步研究^[10],并在原系统的基础上发展了一种新颖的化学循环系统^[11]。然而,上述提出的氢-氧燃气轮机研究多偏向于循环系统运行的可行性、运行能力分析 & 整体优化。

尽管氢气扩散火焰燃烧室存在一些实验研究结果,然而要完全通过实验得到燃烧室内所有的运行特性数据却并不简单且成本很高,数值模拟成为了燃机燃烧室运行特性研究及辅助设计的重要工具^[12-13],与此同时,部分学者还研究了氢气的反应动力学机理以作为氢气燃机燃烧室数值模拟上的应用^[14]。本研究在前人对氢气燃机研究的基础上,通过全三维 CFD,对单筒形氢氧燃烧室内燃烧、流动及温度场分布特点进行对比研究,优化其结构及运行参数。

1 氢氧燃烧室

1.1 热力循环系统

图 1 为新型氢氧燃机热力循环系统图。氢气和氧气在燃烧室一次燃烧区内扩散燃烧后产生高温燃气,与由高压水泵(BFP)提供的并经过余热锅炉(HRBL)升温后的二次掺混用水在二次掺混区掺混后进入涡轮膨胀做功,除掺混用水外其余进入冷凝器冷凝,然后再由高压泵送入循环。上述系统在燃烧过程中产物为水蒸气,不会产生传统燃气轮机

因高温燃烧生成的大量 NO_x 问题,因此带来很大的环境效益;同时,燃烧效率更高,高的涡轮进口温度提高了整个循环效率。燃烧室壁面冷却水经燃烧室冷却夹套升温后与余热锅炉加热后的高温水同时进入二次掺冷区掺混高温燃气。Tetsuya Funatsu 等人对该系统进行优化后其效率可达 60% 以上^[15],并分析了整个系统的启动过程,指出其巨大的实用潜力。

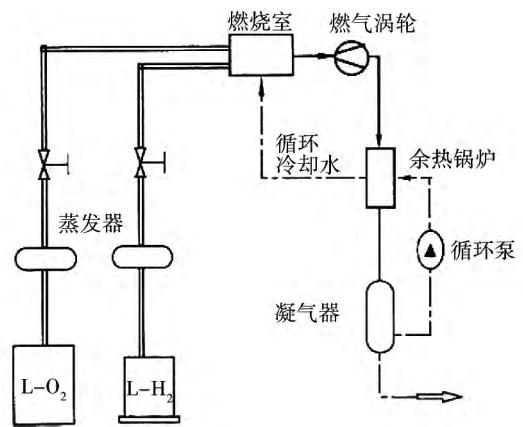


图 1 新型氢氧燃机热力循环系统

Fig.1 A new thermodynamic cycle system of hydrogen gas turbine

1.2 燃烧室结构

根据文献 [16~17],选取单筒形燃烧室结构形式。其中旋流器采用平面旋流器,结构如图 2 所示。燃烧室热力和气动计算结果如表 2 和表 3 所示。

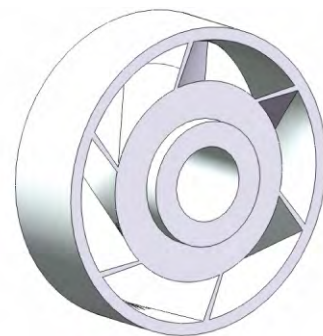


图 2 平面旋流器结构示意图

Fig.2 Structure of the planar swirler

表 2 燃烧室热力计算结果(氢气)

Tab.2 Calculation results of combustion chamber thermodynamics (hydrogen)

低位发热量 $H_u / \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	燃 料 $M_f / \text{g} \cdot \text{s}^{-1}$	氧气量 $L_{O_2} / \text{g} \cdot \text{s}^{-1}$	氧燃比 O/F	二次掺冷用水量 $M_w / \text{g} \cdot \text{s}^{-1}$
120 999	0.72	7.45	1.3	15.36

表 3 燃烧室气动计算结果

Tab.3 Calculation results of combustion chamber aerodynamics

燃烧室直径 D_t /mm	燃烧室过渡锥顶角 $\beta/(\circ)$	旋流器安装角 $\alpha_s/(\circ)$	燃烧区长度 L_c /mm	掺混段长度 L_m /mm	燃烧室总长 L_t /mm
32	50	30	68	62	130

2 数值计算及分析

2.1 数值方法

数值计算采用 CFD 软件 Fluent 及其前处理软件 Gambit 进行实体建模,为提高计算精度,计算区域同时包括旋流器和燃烧室本体,二次掺混孔附近进行局部加密,网格采用四面体非结构化网格,网格总数约 23 万。

计算采用基于压力、隐式、稳态的求解方法,湍流模型采用 Shih 等人提出的带旋流修正的 $k-\varepsilon$ (realizable $k-\varepsilon$) 模型^[18]。考虑辐射及对流影响,辐射模型采用 DO(离散坐标系)模型,外壁水冷对流换热系数取 $2\,000\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,燃烧反应流模型采用详细反应机理的 EDC 模型,反应机理采用 Li 等人发展的最适用于燃机燃烧室研究的 H_2-O_2 详细反应机理^[19],热力学数据来自 LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)提供的氢氧反应机理组分的热力学数据。边界条件采用速度入口、出流,壁面采用无滑移壁面条件及标准壁面函数,燃烧室运行压力为 1 MPa。

2.2 计算结果及分析

2.2.1 入口旋流器结构优化

氧化剂通过旋流器旋流进入燃烧室,与具有一定“喷雾”锥角的燃料混合燃烧后在燃烧室中心形成回流区,回流区对燃烧室内火焰的稳定性、保证燃烧室性能等有着至关重要的作用^[16]。在保证“喷雾”锥角不变时,回流区结构与旋流强度有关,旋流器的叶片安装角直接影响旋流强度,在初始设计中旋流器叶片安装角为 30° ,对应的旋流数为 0.499 ^[20],图 3、图 4 分别为头部轴向速度和 H_2O 质量分数分布云图。

由图 3~图 4 可以看出,由于旋流器旋流强度较弱,造成回流区半径太小,不利于稳燃,同时,在燃烧室头部过渡段壁面处形成外侧回流区,这不仅会使中心回流区远离喷嘴,不利于稳燃,也会增加气流的流阻损失^[16]。为避免上述不利的影响,在方案 2 中将旋流器叶片安装角增大到 45° ,以增大旋流强度

来增大中心回流区,对应的旋流数为 0.864 ^[20]。图 5~图 7 是改进后燃烧室速度分布图及与改进前的对比。

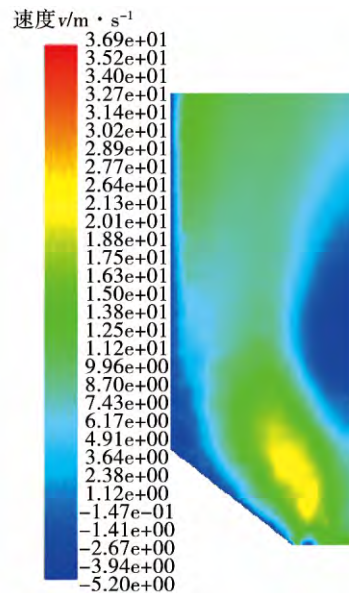


图 3 燃烧室头部轴向速度分布 ($\alpha_s = 30^\circ$)

Fig.3 Axial velocity distribution at the head area of combustion chamber ($\alpha_s = 30^\circ$)

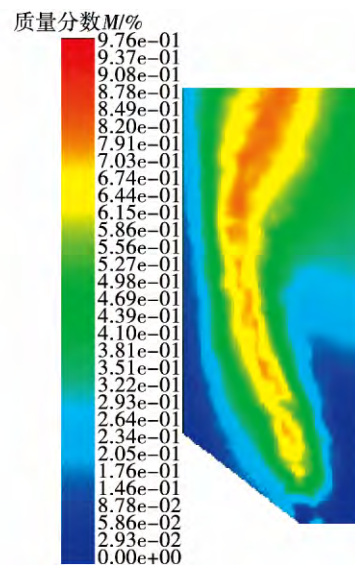


图 4 燃烧室头部 H_2O 质量分数分布 ($\alpha_s = 30^\circ$)

Fig.4 Mass fraction distribution of H_2O at the head area of combustion chamber ($\alpha_s = 30^\circ$)

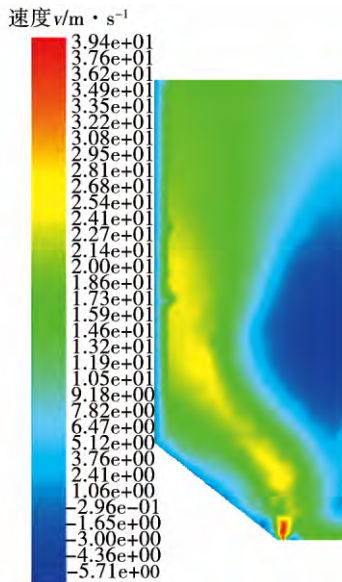


图 5 燃烧室头部轴向速度分布($\alpha_s = 45^\circ$)

Fig.5 Axial velocity distribution at the head area of combustion chamber($\alpha_s = 45^\circ$)

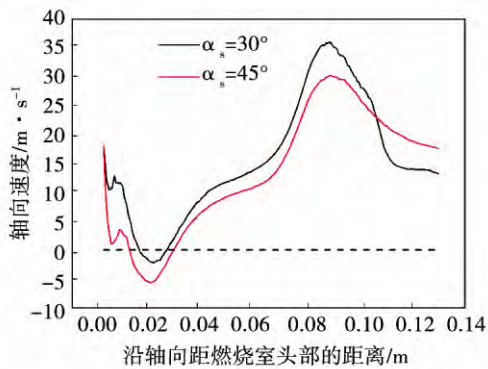


图 6 不同旋流角燃烧室中心轴向速度分布
Fig.6 Axial velocity distribution at the chamber center area for different swirl angles

由图 5~图 7 可知,与图 3~图 4 计算结果相比,当旋流器导叶角增大到 45° 后,头部中心回流区半径明显增加,同时头部过渡段壁面处回流区消失,故改进结构后流场得到了明显的改善。图 8 是改进后燃烧室头部 H_2O 的质量分数分布图,可以看出在回流区的边界上含有大量 H_2O 的高温气体进入回流区,并流向喷嘴出口位置来点燃新鲜的燃料空气混气,从而强化稳定燃烧。

2.2.2 壁温

燃烧室壁温高低及均匀程度对燃烧室的工作寿命起着决定性的影响。常规的燃烧室壁温不应超过

金属材料长期工作所能承受的温度水平,对工作寿命要求较长的燃烧室,把最高温度控制在 $650 \sim 750^\circ C$,在工作寿命较短的燃烧室中,最高壁温有可能超过 $800 \sim 850^\circ C$,甚至局部地区有可能达到 $900^\circ C$ 。图 9~图 11 为计算得到的燃烧室壁面及其附近温度分布图。

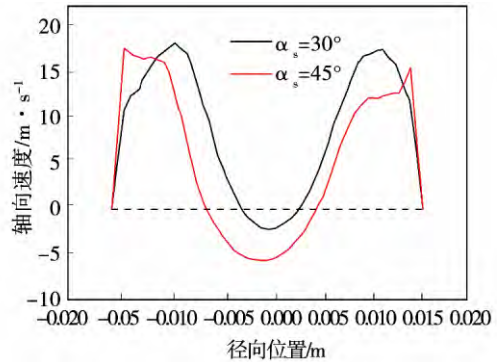


图 7 回流区中心处轴向速度沿径向分布
Fig.7 Radial distribution of the axial velocity in the backflow center region

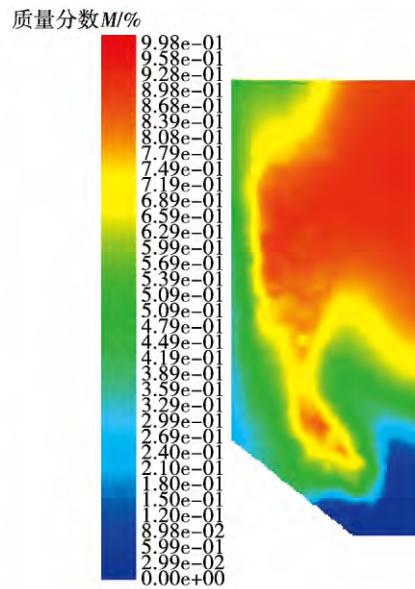


图 8 燃烧室头部 H_2O 质量分数分布($\alpha_s = 45^\circ$)
Fig.8 Mass fraction distribution of H_2O at combustion chamber head area

由图 9~图 11 可以看出,燃烧室壁面温度沿轴线方向存在 2 个峰值,第 1 个峰值在一次燃烧区,第 2 个峰值在二次掺冷孔下游附近,主要是由于二次掺冷射流存在一定的入射速度,使得在掺冷孔下游存在一个相对的掺冷死区,从而造成壁温温度较高。

但是从整体温度分布来看,燃烧室壁面的最高温度在 750 K 以下,远低于金属材料长期工作的温度水平,故采用水冷的壁面温度符合壁温设计要求。

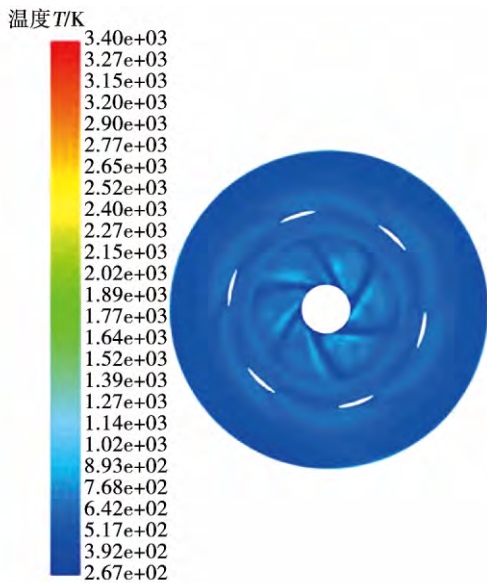


图 9 燃烧室壁面温度分布
Fig.9 Wall temperature distribution of the combustion chamber

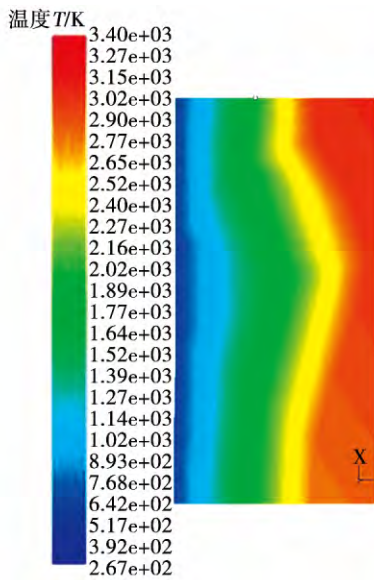


图 10 燃烧室壁面附近温度分布
Fig.10 Temperature distribution near the chamber wall

2.2.3 燃烧室出口温度场

燃烧室出口处燃气温度场的均匀性程度对燃气透平第一级导叶和工作叶片的工作安全性有密切的

影响,因此是燃烧室最重要的指标之一,常用来表示燃烧室出口温度场不均匀程度的参数有^[16]:

(1) 径向不均匀度 RTDF:

$$RTDF = \frac{T_{r,max} - T_{3,ave}}{T_{4,ave} - T_{3,ave}} \quad (1)$$

(2) 最大不均匀度 OTDF:

$$OTDF = \frac{T_{4,max} - T_{3,ave}}{T_{4,ave} - T_{3,ave}} \quad (2)$$

式中: $T_{3,ave}$ —燃烧室进口平均温度, K; $T_{4,ave}$ —燃烧室出口燃气平均温度, K; $T_{4,max}$ —出口全场最高温度, K; $T_{r,max}$ —等半径周向平均温度的最大值, K。一般要求 $RTDF \leq 10\%$, $OTDF \leq 30\% \sim 35\%$ 。图 12~图 13 为不同入射掺混速度和温度时燃烧室出口径向平均不均匀度沿径向的分布。

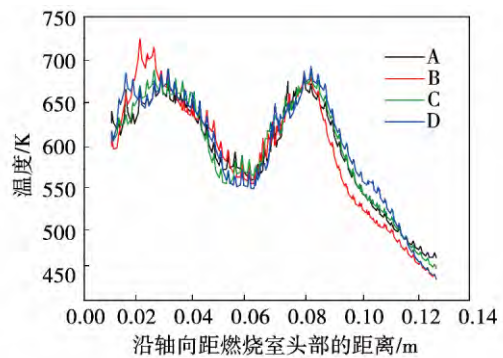


图 11 周向不同位置燃烧室壁面温度轴向分布曲线

Fig.11 Wall temperature distribution curve of combustion chamber at different axial position

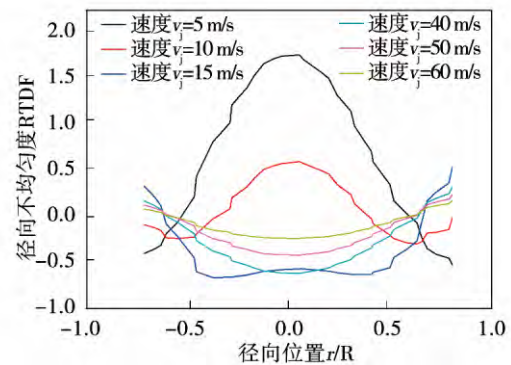


图 12 出口径向不均匀度与掺混速度关系(温度 $T_j = 300$ K)

Fig.12 Relationship between incident mixing speed and RTDF($T_j = 300$ K)

由图 12 可以看出,当入射速度不大,致使入射深度小于燃烧室半径时,燃烧室出口温度场均匀性随入射速度的增加先改善然后又恶化,在 $v_j = 10$ m/s 时燃烧室出口温度均匀性相对较好,但其离设计值仍有较大差距;当继续增加入射速度使得掺混入射深度大于燃烧室半径时,燃烧室出口温度场均匀性随入射速度的增加明显改善,在 $v_j = 60$ m/s 时,燃烧室出口温度场径向不均匀度平均值 RTDF $\approx 9.0\%$,最大不均匀度 OTDF $\approx 23.6\%$,均满足运行要求。由图 13 可以看出,燃烧室出口温度场均匀性随入射掺混温度的增加而有所改善,但改善的效果不是很明显。

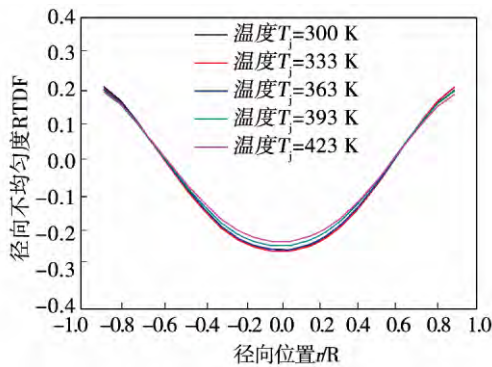


图 13 出口径向不均匀度与掺混温度关系(速度 $v_j = 60$ m/s)

Fig.13 Relationship between incident mixing temperature and RTDF ($v_j = 60$ m/s)

3 结 论

针对新型氢氧燃机热力循环系统,设计了单筒形氢氧燃烧室,通过 CFD 对其内燃烧、流动及温度场分布特点进行了对比研究,优化了结构及运行参数,研究获得结论如下:

(1) 燃烧室内回流区直径随入口旋流强度的增加而增加,入口平面旋流器角度为 45° 时,燃烧室内流场及温度场达到最佳状态。

(2) 采用循环水冷的对流换热系数为 $2000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时,燃烧室壁面的最高温度均在 750 K 以下,满足燃烧室运行时壁温要求。

(3) 入射掺混温度的增加对燃烧室出口温度场均匀性有一定的改善,但并不明显。

(4) 入射掺混速度对燃烧室出口温度场均匀性

影响明显,当 v_j 大于 10 m/s 时,燃烧室出口温度场均匀性随入射掺混速度的增加明显改善,在 $v_j = 60 \text{ m/s}$ 时,燃烧室出口温度场径向不均匀度平均值 RTDF $\approx 9.0\%$,最大不均匀度 OTDF $\approx 23.6\%$,满足运行要求。

(4) 数值模拟方法可作为燃烧室内部燃烧、流场计算及燃烧室设计优化、改型等的有力工具。

参考文献:

- [1] CHIESA P, LOZZA G, MAZZOCCHI L. Using hydrogen as gas turbine fuel [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005, 127: 73-80.
- [2] BONZANI F, DELLA FIORE L, FALAVIGNA L, VERGERIO G, Gazzotti D. New fuel flexibility requirements: fuelling hydrogen enriched natural gas in a heavy duty gas turbine [J]. Power-Gen 307; 2008.
- [3] ZIEMANN J, SHUM F, MOORE M, KLUYSKENS D, THOMAIER D, ZARZALIS N, et al. Low- NO_x combustors for hydrogen fuelled aero engine [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1998, 23 (4): 281-288.
- [4] MINAKAWA K, MIYAJIMA T, YUASA S. Development of a hydrogen fuelled micro gas turbine with a lean premixed combustor [C]. AIAA Paper 97-3388, In: 33rd Propulsion Conference and Exhibit, Seattle, WA, 1997.
- [5] LIEUWEN T, MCDONNELL V, PETERSEN E, SANTAVICCA D. Fuel flexibility influences on premixed combustor blowout, flashback, autoignition and stability [C]. ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air (GT2006), May 8 - 11, 2006, Barcelona, Spain, GT2006-90770.
- [6] LACY B, ZIMINSKY W, LIPINSKI J, VARATHARAJAN B, YILMAZ E, BRUMBERG J. Low emissions combustion system development for the GE energy high hydrogen turbine program [J]. ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air (GT2008), June 9 - 13, 2008, Berlin, Germany, GT2008-50823: 617-624.
- [7] COCCHI S, PROVENZALE M, CINTI V, CARRAI L, SIGALI S, CAPPETTI D. Experimental characterization of a hydrogen fuelled combustor with reduced NO_x emissions for a 10 MW class gas turbine [C]. ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air (GT2008), June 9-13, 2008, Berlin, Germany, GT2008-51271: 991-1000.
- [8] AMY R. Industrial gas turbines: performance and operability [M]. CRC Press; 2007.
- [9] JERICHA H et al. Steam cooled hydrogen/oxygen combustion chamber for the high-temperature steam cycle [C]. 19th International Congress on Combustion Engines, 1991.
- [10] FUNATSU T, DOHZONO Y, FUKUDA M. Startup analysis of an H_2 - O_2 -fired gas turbine cycle. Electrical Engineering in Japan,

- 1999, 128(1), 9-16.
- [11] JIN HG, ISHIDA M. A novel gas turbine cycle with hydrogen-fueled chemical-looping combustion [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2000, 25: 1209-1215.
- [12] LAI M, REYNOLDS R R, ARMSTRONG J. CFD-based, parametric, design tool for gas turbine combustors from compressor deswirl exit to turbine inlet [C]. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air, (GT2002)*, June 3-6, 2002, Amsterdam, The Netherlands, GT2002-20090: 545-552.
- [13] 崔玉峰, 徐 纲, 聂超群, 等. 数值模拟在合成气燃气轮机燃烧室设计中的应用. *中国电机工程学报*, 2006, 26(16): 110-116. CUI Yu-feng, XU Gang, NIE Chao-qun, et al. Application of numerical simulation in the design of gas turbine combustor for burning syngas [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(16): 110-116.
- [14] STRÖHLE J, MYHRVOLD T. An evaluation of detailed reaction mechanisms for hydrogen combustion under gas turbine conditions [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32: 125-135.
- [15] FUNATSU T, DOHZONO Y, FUKUDA M. Startup analysis of an H₂-O₂-fired gas turbine cycle [J]. *Electrical Engineering in Japan*, 1999, 128(1), 9-16.
- [16] 焦树建. 燃气轮机燃烧室. 北京: 机械工业出版社, 1981. JIAO Shu-jian. *Gas turbine combustor* [M]. China Machine Press, 1981.
- [17] 钟芳源. 燃气轮机设计基础. 北京: 机械工业出版社, 1987. ZHONG Fang-yuan. *Gas turbine design basis* [M]. China Machine Press, 1987.
- [18] SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A, et al. A new k-ε eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows-model development and validation [J]. *Computers Fluids*, 1995, 24(3): 227-238.
- [19] LI J, ZHAO ZW, et al. An updated comprehensive kinetic model of hydrogen combustion [J]. *International Journal of Chemical Kinetics*, 2004, 36: 566-575.
- [20] 史永征, 郭 全, 潘树源. 两个轴向叶片式旋流器的旋流强度计算公式的探讨 [J]. *北京建筑工程学院学报*, 2007, 23(2): 17-19. SHI Yong-Zheng, GUO Quan, PAN Shu-yuan. Research on formula of swirl number of bladed axial swirler [J]. *Journal of Beijing Institute of Civil engineering*, 2007, 23(2): 17-19.

(孙显辉 编辑)