

某重型燃机环形燃烧室内 NO_x 生成的数值研究

付忠广, 石黎, 刘炳含, 沈亚洲

(华北电力大学 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 北京 102206)

摘要: 采用数值模拟的方法对某重型燃气轮机环形燃烧室内热力型 NO_x 的生成规律进行分析。分析表明: 燃烧器根部形成了两个旋转方向彼此相反的主环流, 主环流区温度约为 1 600 ~ 1 700 K, 该区域热力型 NO_x 生成速率较低。凸台后形成绕凸台方向旋转的高温环流区, 环流区温度接近 1 900 K, 该区域热力型 NO_x 生成速率明显加快。外壳侧凸台后环流区温度较高, 该区域 OH 自由基摩尔分数及热力型 NO_x 生成速率明显高于轮毂侧。

关键词: 燃气轮机; 环形燃烧室; NO_x 排放; 数值模拟

中图分类号: TM611.3 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.04.009

引言

燃烧室是燃气轮机的核心部件之一, 逆流环管型结构燃烧室、圆筒形燃烧室以及环形燃烧室是重型燃气轮机燃烧室的 3 种典型结构^[1~3]; 计算 CFD (流体动力学) 方法的广泛应用, 降低了燃烧室研制费用及研制周期^[4]。

目前, 国内关于环管型及圆筒形燃烧室的数值研究成果较多^[5~6]; 何敏等采用两种不同组分的低热值燃料环管燃烧室燃烧流场进行计算, 研究表明, 燃料组分变化直接影响燃烧室燃烧效率与出口温度^[5]; 李名家、董红、冀春俊及金戈等运用数值模拟和试验方法对回流式环管型燃烧室冷态和热态条件下的性能进行了研究, 为燃烧室优化设计提供指导依据^[6~9]; 然而, 国内针对环形燃烧室内的数值研究成果则相对较少, 张文普、赵晓燕等对 GE-F101 型工业燃气轮机环形燃烧室内流动及燃烧过程进行数值模拟, 研究表明: 旋流和燃料进口射流对燃烧室流内温度、流场、火焰结构以及 NO_x 分布有着重要的

影响^[10~12]。

本研究采用数值方法分析了环形燃烧室内速度场、温度场、OH 自由基浓度场以及 NO_x 生成规律, 为有效利用干式贫预混燃烧技术、控制 NO_x 排放提供参考。

1 环形燃烧室及 DLN(干式低氮)燃烧器

某 F 级重型燃气轮机环形燃烧室由轮毂、外壳两部分构成^[14~15], 周向配置有 24 个尺寸较小的 DLN 混合型燃烧器。图 1 给出了 DLN 燃烧器及环形燃烧室的示意图。燃料经预混通道、扩散通道或值班通道进入燃烧室^[16]; 高负荷条件下, 稀薄预混燃料通过燃烧器外侧的角向旋流器喷入燃烧室^[16], 燃烧过程按照均相预混可燃气体的火焰传播方式进行组织, 可大幅降低热力型 NO_x 的生成^[13]; 5% ~ 10% 的值班燃料经由值班通道进入燃烧室, 可在燃烧器根部形成一个稳定的点火源^[14~15]。

2 数学模型和计算方法

2.1 网格划分

采用商用 CFD 软件 Fluent 的前处理软件 Gambit 进行建模及网格划分。在不影响结果和简化计算的前提下, 取以一个燃烧器为中心及其所在的燃烧室 1/24 扇形段作为计算域^[8~10]。文献[16]的几何模型中包含了扩压器、旋流叶片以及喷嘴的具体结构, 最终网格数量达到 490 万。为了降低网格划分难度及网格数量, 加速计算收敛, 本研究对计算模型进行一定的简化^[8~10], 通过在边界条件中设置速度的轴向、径向以及周向分量来模拟旋流器对气流

收稿日期: 2015-05-11; 修订日期: 2015-05-11

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014ZZD04; 2014XS17)

作者简介: 付忠广(1963-), 男, 河北邢台人, 华北电力大学教授。

通讯作者: 石黎(1987-), 男, 华北电力大学博士研究生。

流动的影响。通过适当简化, 整个计算区域均采用六面体网格。为了增加计算精度, 对燃烧器及凸台区域进行局部网格加密^[10~12]。正式计算前进行网

格无关性验证, 对计算模型进行网格加密, 直到最新加密网格的结果与前一次网格加密的结果一样时为止^[10], 最终网格数量约为 90 万。

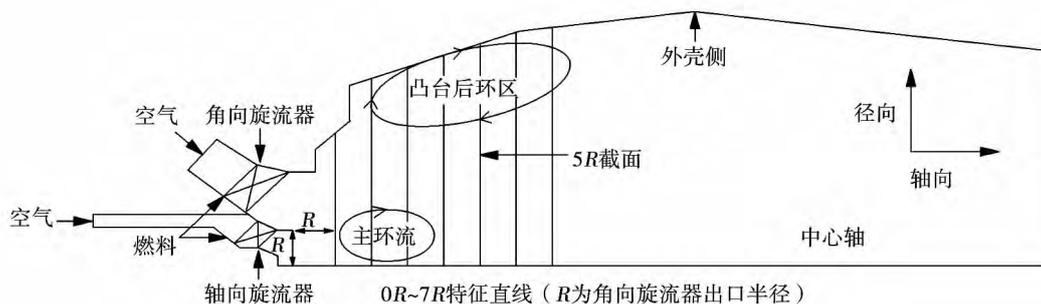


图 1 DLN 燃烧器及环形燃烧室示意图

Fig. 1 Schematic diagram of DLN burner and annular combustion chamber

2.2 边界条件

天然气的成分及发热量如表 1 所示, 由表 1 可知, 其主要成分为 CH₄, 质量分数为 96.1%, 天然气中还包括少量 C₂H₆、C₃H₈ 等碳氢化合物以及 CO₂、N₂ 等杂质, 燃料的低位发热量为 34.81 MJ/m³。

表 1 燃料特性

Tab. 1 Fuel composition and heating values

名称	质量分数
CO ₂ / %	0.62
N ₂ / %	0.56
CH ₄ / %	96.1
C ₂ H ₆ / %	1.74
C ₃ H ₈ / %	0.58
C ₅ H ₁₂ / %	0.04
低位发热量 / MJ · m ⁻³	34.81
高位发热量 / MJ · m ⁻³	38.62

天然气的质量流量为 0.633 kg/s, 温度为 10 °C, 全压为 2.36 MPa^[14]; 值班燃料比为 6%, 值班燃料及预混燃料的当量比 Φ 分别为 0.36 及 0.53^[15]; 空气的全压为 1.63 MPa^[14]; 燃烧过程中存在的“热阻”及摩擦、掺混等不可逆流动等因素造成的燃烧室压力损失为 45 800 Pa^[14]; 环形燃烧室的轮毂与外壳的内壁均安装有隔热瓦块, 忽略散热损失^[15~17]; 两个周向边界设为周期性边界条件^[8~12]。

表 2 边界条件

Tab. 2 Boundary conditions

名称	数值
燃料质量流量 / kg · s ⁻¹	0.633
燃料温度 / °C	10
燃料压力 / MPa	2.36
值班燃料比 / %	6
值班燃料当量比	0.36
预混燃料当量比	0.53
空气压力 / MPa	1.63
燃烧室压力损失 / Pa	45 800

2.3 数学模型

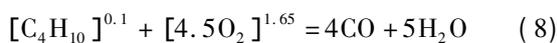
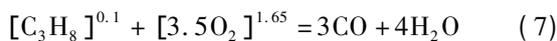
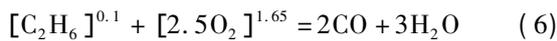
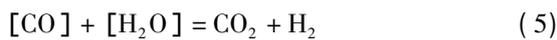
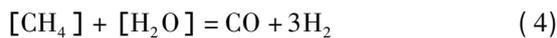
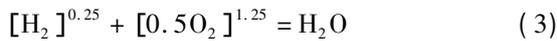
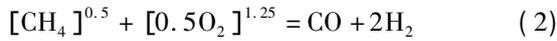
采用 RANS(雷诺时均方法) 模拟湍流平均速度场、平均标量场以及平均作用力, 以减小计算量和储存量^[6~8]; 采用 RNG $k - \epsilon$ 湍流模型模拟湍流流动, 以提高强旋流流动预测的准确性^[9]; 采用 EDC(涡团耗散概念) 燃烧模型结合 Arrhenius 公式对燃烧过程进行模拟^[10], 化学反应速度如公式 1 所示。

$$R_i = A T^\beta \exp(-E_a/RT) \prod C_i^{\alpha_i} \quad (1)$$

式中: A —指前因子; β —温度指数; E_a —活化能, J/mol; R —通用气体常数, J/(mol · K); C_i —第 i 种物质的浓度, mol/m³; α_i —幂指数。

CH₄ 的燃烧反应相当复杂, 包含有 53 种组份和 325 个基元反应^[12]。受制于计算条件及燃烧模型, 需对 CH₄ 燃烧反应进行简化。简化方法主要有: 准

稳态与准平衡假设、敏感性分析以及 CSP 简化方法^[15-16]。简化后的 CH₄ 四步反应过程如式(2)~式(5)所示; C₂H₆、C₃H₈ 等碳氢化合物含量相对较小,简化为一步反应,反应过程如式(6)~式(8)所示; OH 自由基是燃烧化学反应的中间产物,可作为 PLIF(激光诱导荧光技术)进行燃烧诊断研究的介质^[17]。本研究中将 OH 的生成简化一步反应,如式(9)所示。



热力型 NO_x 由空气中的 N₂ 与 O₂ 在温度高于 1 773 K 时反应生成,其生成量与温度、在高温区停留时间以及氧的分压有关,热力型 NO_x 反应速率如式(10)~式(11)所示。在近当量条件下,需考虑式(12)。



3 计算结果与分析

3.1 计算结果验证

燃气轮机燃烧室的工作过程具有高温、高气流速度、高燃烧强度以及高过量空气系数等特点^[1-4]。该型燃气轮机燃烧室出口燃气初温的设计值为 1 713 K^[17],目前电站燃气轮机燃烧室出口平均流速可达 120~170 m/s^[1-3],为了防止透平叶片受热不均,燃烧室出口最大温度偏差(燃气的最高温度与平均温度只差)应低于 60~80 K^[1-3]。计算工况中,燃烧器出口燃气初温、平均流速以及最大温度偏差的计算值分别为 1 709 K、160 m/s 以及 80 K,均处于合理的范围。燃烧室出口 NO_x 质量浓度为 53.5 mg/m³(15% O₂),文献[14]中的实际排放浓度的测量值为 54.5 mg/m³,二者的误差仅为 2.02%,

数值计算精度较好。

3.2 速度场

燃烧室内气流组成成分是燃料在高速流动的气流中实现稳定和完全燃烧的重要条件,并直接决定了燃烧效率、火焰长度以及燃烧稳定性^[1-3]。图 2(a) 给出了 5R 截面上的轴向速度分布,该截面垂直于中心轴,且与轴向旋流器出口距离为 5R, R 为轴向旋流器出口半径。由图 2(a) 可知,截面中心区域,流速较低,趋向壁面区域,流速迅速增大,近壁面区域,轴向速度降低至 -5~-10 m/s;图 2(b) 显示了燃烧室出口截面上的轴向分布,由图 2(b) 可知,由于截面积的减小,截面轴向速度明显增加,平均轴向速度约为 150 m/s。相比 5R 截面,出口截面轴向速度分布更为均匀,近壁面区域,轴向速度降低至 30~40 m/s。

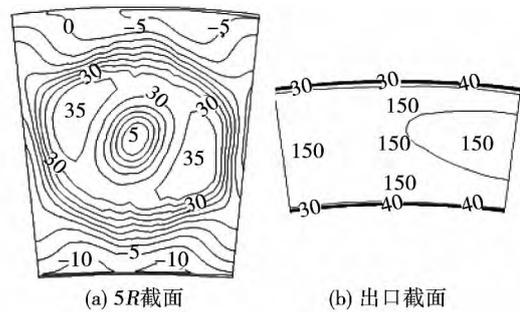


图 2 5R 及出口截面轴向速度分布(m/s)
Fig. 2 Velocity distributions in 5R and outlet sections (m/s)

图 3 给出了燃烧室中心截面轴向速度分布,由图 3 可知,在燃烧室中心轴与主流区的内边界之间,形成了两个旋转方向彼此相反的主环流,主环流绕自身轴线及燃烧室中心轴线旋转^[1-3]。主环流区内,回流的高温燃气可形成稳定的点火源。气体流经凸台时,通流截面发生突扩,在凸台后方形成绕凸台方向旋转的环流区^[3-4]。过渡段几何形状发生了改变,产生的离心力导致轴向速度分布不完全对称。

为了定量分析热力型 NO_x 生成规律,在燃烧室中选取 0~7R 等 8 条特征直线,各特征直线均垂直于中心轴,且与轴向旋流器出口的距离为 0~7R, R 为轴向旋流器出口半径。分析轴向速度、温度以及 OH 自由基浓度等参数沿特征直线的分布规律,特征直线的选取如图 1 所示。

图 4 给出了不同特征直线上的轴向速度分布, 由图 4 可知, 中轴线附近区域 轴向速度相对较小, 当轴向距离 $\geq 1R$ 时, 出现负向速度, 当距离 $\geq 4R$ 时, 负向速度消失。趋向壁面区域, 速度迅速增大, 达到最大值后迅速减小, 速度最大值的间隔随流动距离的增加而增大, 这说明主流区的范围随流动距离的增加而扩大。近壁面区域, 由于凸台后环流区的存在, 轴向速度再次出现负值, 且速度随流动距离的增加先减后增。

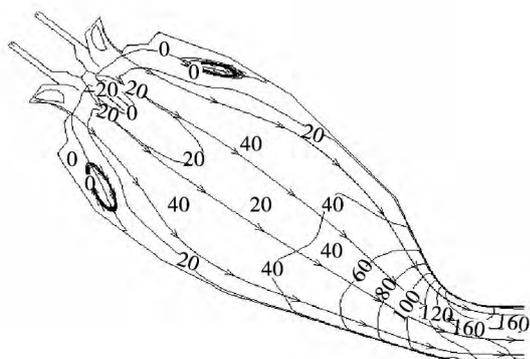


图 3 中心截面轴向速度分布 (m/s)

Fig. 3 Velocity distribution in central cross section (m/s)

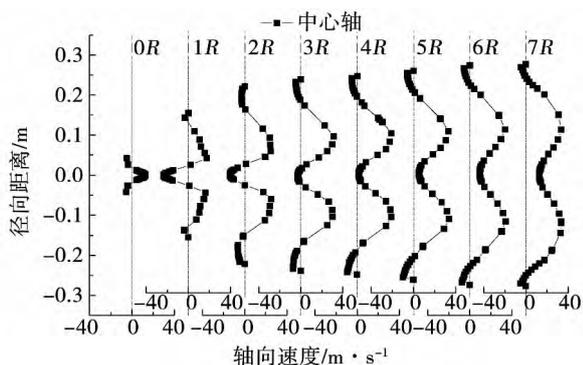


图 4 不同特征直线轴向速度分布 (m/s)

Fig. 4 Velocity profiles in different feature lines (m/s)

3.3 温度场

值班火焰采用扩散燃烧方式, 在燃烧器根部形成稳定的点火源, 稀薄预混燃料在中心火焰之外的燃烧空间以湍流火焰传播方式进行燃烧^[14]。图 5 (a) 给了 5R 截面上的温度分布, 由图 5 (a) 可知, 截面中心区域温度较高, 平均温度约为 1 700 K, 可形成稳定的点火源。最高温度位于近壁面区域, 约为

1 900 K; 图 5 (b) 给了出口截面上的温度分布, 由图 5 (b) 可知, 该截面上的温度分布规律与 5R 截面相似, 中心区域温度较低, 约为 1 680 K, 近壁面区域, 温度较高, 为 1 720 ~ 1 760 K, 且外壳侧近壁面区域温度高于轮毂侧。由图 5 (b) 还可知, 由于旋流器导向作用产生的离心力, 使得截面温度分布不完全对称, 左侧高温区域范围略大于右侧。

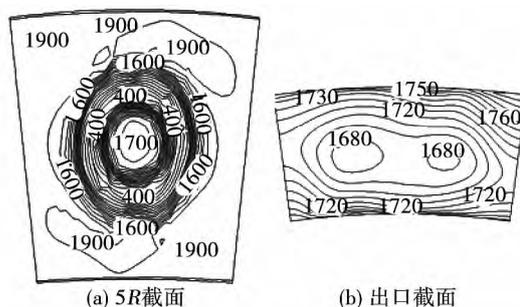


图 5 5R 截面出口截面温度分布 (K)

Fig. 5 Temperature distributions in 5R and outlet sections (K)

图 6 给出了燃烧室中心截面温度分布, 由图 6 可知, 燃料气体进入燃烧室后, 便开始着火燃烧, 温度迅速升高, 其中, 主环流区温度为 1 600 ~ 1 700 K, 最高温度位于凸台后环流区, 约为 1 900 K。主环流及凸台后环流区的存在, 保证了燃料的着火和稳定燃烧, 减小了火焰长度^[14]。

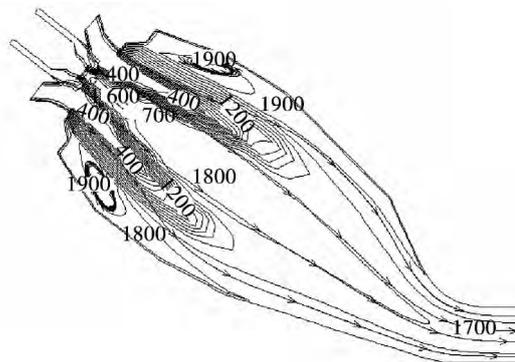


图 6 中心截面温度分布 (K)

Fig. 6 Temperature distribution in central cross section (K)

图 7 给出了不同特征直线上的温度分布, 由图 7 可知, 中轴线附近区域, 温度较高, 平均温度为 1 550 ~ 1 760 K, 平均温度及高温区域的范围随流动

距离的增加而增大。趋向壁面区域,温度迅速减小,达到最小值后又开始迅速增大。由图 7 可知,温度最小值随流动距离的增加而增大。近壁面区域,温度则有所降低。由图 7 还可知,燃烧室内部温度分布不均,外壳侧凸台后环流区的温度高于轮毂侧,最高温度之差的平均值约为 24 K。当温度超过 1 800 K 时,热力型 NO_x 生成速率将明显升高^[15],因此,外壳侧热力型 NO_x 生成速率必将高于轮毂侧。

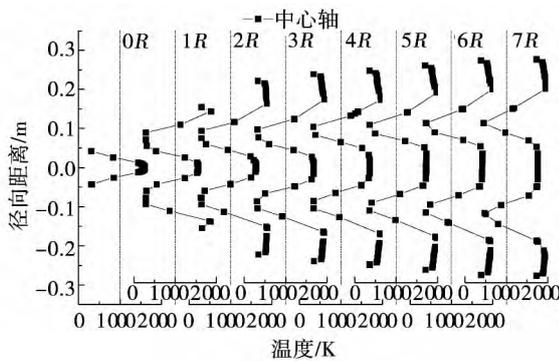


图 7 不同特征直线温度分布(K)

Fig. 7 Temperature profiles in different feature lines(K)

3.4 OH 摩尔分数分布

火焰中的 OH 自由基主要分布在反应区和已燃区^[17]。图 8(a) 出了 5R 截面上的 OH 自由基摩尔分数分布,由图 8(a) 可知,截面中心区域,OH 自由基摩尔分数较低,平均摩尔分数约为 1e⁻⁹,近壁面区域,OH 自由基摩尔分数相对较高,这说明较高的温度明显促进了 OH 自由基的生成;图 8(b) 给出了出口截面上 OH 自由基摩尔分数分布,由图 8(b) 可知,由于温度降低,该截面上的 OH 自由基摩尔分数明显降低。图 9 给出了燃烧室中心截面的 OH 自由基摩尔分数分布,由图 9 可知,最高摩尔分数位于凸台后环流区,约为 1e⁻⁸,且外壳侧凸台后环流区摩尔分数高于轮毂侧。

图 10 给出了不同特征直线上 OH 自由基摩尔分数分布,由图 10 可知,中轴线附近区域,OH 自由基摩尔分数较低。趋向壁面区域,OH 自由基摩尔分数迅速增大。近壁面区域,摩尔分数又有所降低。对比温度分布由图 7 可知,凸台后环流区及近壁面区域 OH 自由基摩尔分数分布规律与温度分布规律相似,这说明高温明显促进了 OH 自由基的生成。

由图 10 还可知,燃烧室内部摩尔分数出现上下不均匀分布的现象,外壳侧凸台后环流区 OH 自由基摩尔分数明显高于轮毂侧。

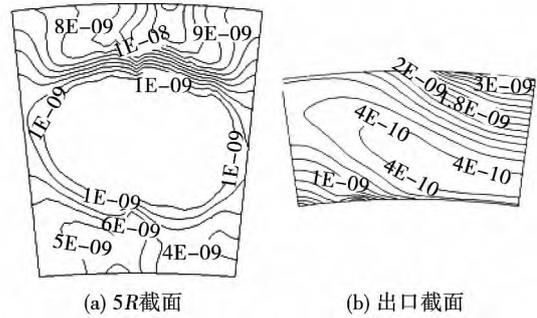


图 8 5R 截面及出口截面 OH 自由基摩尔分数分布

Fig. 8 OH mole fraction distributions in 5R and outlet sections

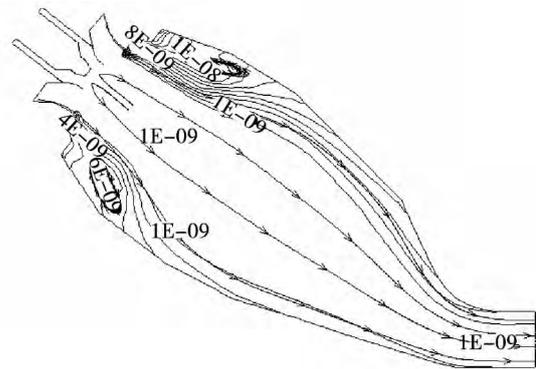


图 9 中心截面 OH 自由基摩尔分数分布

Fig. 9 OH mole fraction distribution in central cross section

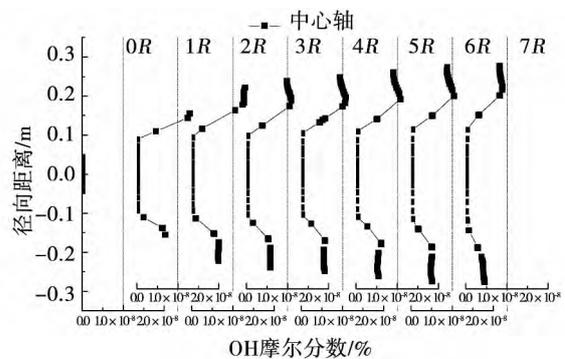


图 10 不同特征直线 OH 自由基摩尔分数分布

Fig. 10 OH mole fraction distributions in different feature lines

3.5 热力型 NO_x 生产速率分布

热力型 NO_x 是空气中的 N₂ 与 O₂ 在高温条件下反应生成^[1-3]。温度对热力型 NO_x 的影响最为明显, 当温度低于 1 800 K 时, 热力型 NO_x 生成速率很小, 当温度高于 1 800 K, 温度每升高 100 K, 反应速率将增大 6 ~ 7 倍^[18]。图 11(a) 出了 5R 截面上的热力型 NO_x 生成速率分布, 由图 11(a) 可知, 截面中心区域, 热力型 NO_x 生成速率相对较低, 约为 5e⁻⁵ kgmol/(m³ · s), 对比温度分布由图 6(a) 可知, 该区域平均温度低于 1 800 K, 低温抑制了热力型 NO_x 的生成, 近壁面区域, 热力型 NO_x 生成速率则相对较高; 图 11(b) 了出口截面上热力型 NO_x 生成速率分布, 由图 11(b) 可知, 相比 5R 截面, 该截面上 NO_x 生成速率明显降低, 对比图 5(b) 可以发现, 出口截面最高温度低于 1 800 K, 低温抑制了热力型 NO_x 的生成。

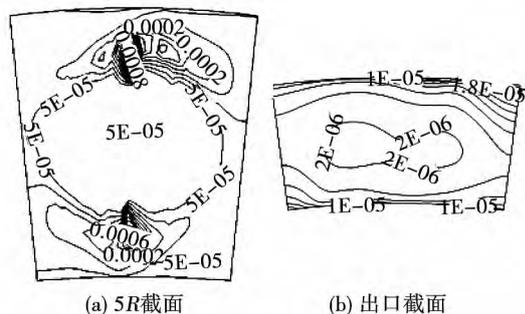


图 11 5R 截面积出口截面 NO_x 生成速率分布 (kmol/(m³ · s))
Fig. 11 NO_x formation rates in 5R and outlet sections (kmol/(m³ · s))

图 12 给出了燃烧室中心截面热力型 NO_x 生成速率分布, 由图 12 可知, 燃烧室内热力型 NO_x 生成速率最大值位于凸台后环流区, 对比图 5 可以发现, 该区域最高温度超过 1 900 K, 高温极大地促进了热力型 NO_x 的生成, 由于温度分布不均, 外壳侧凸台后环流区热力型 NO_x 生成速率高于轮毂侧。

图 13 给出了不同特征直线上的热力型 NO_x 生成速率分布, 由图 13 可知, 热力型 NO_x 生成速率分布与 OH 自由基摩尔分数分布规律相近。中轴线附近区域, 热力型 NO_x 生成速率较低, 平均生成速率为 1.0 e⁻⁷ ~ 1.1 e⁻⁶ kgmol/(m³ · s), 生成速率随流

动距离的增加而增大。趋向壁面区域, 热力型 NO_x 生成速率迅速增大, 生成速率的最大值为 7.7 e⁻⁴ kgmol/(m³ · s)。近壁面区域, 生成速率则明显降低。由图 13 还可知, 由于温度较高, 外壳侧凸台后环流区热力型 NO_x 生成速率及范围均明显大于轮毂侧。

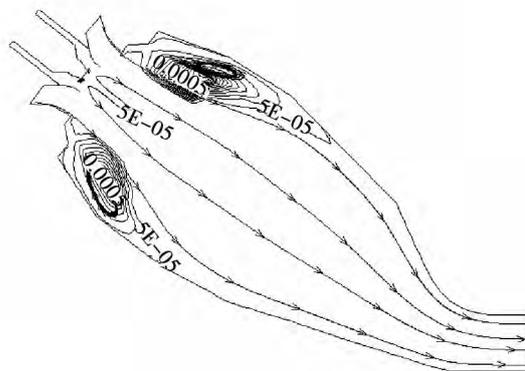


图 12 中心截面 NO_x 生成速率分布 (kmol/(m³ · s))

Fig. 12 Distribution of NO_x formation rates in central cross section (kmol/(m³ · s))

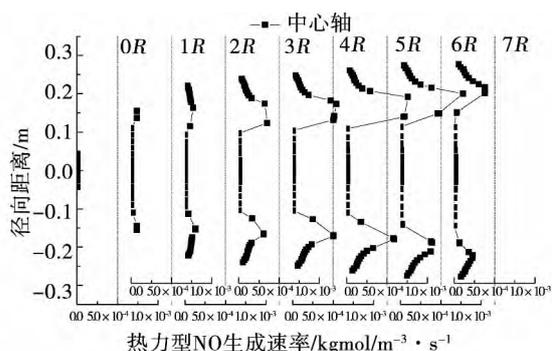


图 13 不同特征直线 NO_x 生成速率分布 (kmol/(m³ · s))

Fig. 13 Profiles of NO_x formation rates in different feature lines (kmol/(m³ · s))

4 结 论

- (1) 火焰管轴线与主流区的内边界之间, 形成了两个旋转方向彼此相反的主环流, 在凸台后形成低压区而产生绕凸台方向旋转的环流区;
- (2) 主环流区温度约为 1 600 ~ 1 700 K, 低温

抑制了 NO_x 的生成,凸台后环流区温度则接近 1 900 K 热力型 NO_x 生成速率明显增大;

(3) 外壳侧凸台后环流区温度相对更高,OH 自由基摩尔分数以及热力型 NO_x 生成速率明显高于轮毂侧。

参考文献:

- [1] 付忠广,张辉.电厂燃气轮机概论[M].北京:机械工业出版社,2014:14-15.
FU Zhong-guang,ZHANG Hui. Introduction to power plant gas turbine[M]. Beijing: China Machine Press,2014:14-15.
- [2] 焦树建,孙守林,张艳春,等.燃气轮机与燃气-蒸汽联合循环装置[M].北京:中国电力出版社,2007:17-22.
JIAO Shu-jian,SUN Shou-lin,ZHANG Yan-chun,et al. Gas turbine and gas-steam combined cycle unit[M]. Beijing: China Electric Power Press,2007:17-22.
- [3] 姚秀平,齐进,张莉,等.燃气轮机与联合循环[M].北京:中国电力出版社,2010:34-44.
YAO Xiu-ping,QI Jin,ZHANG Li,et al. Gas turbine and combined cycle[M]. Beijing: China Electric Power Press,2010:34-44.
- [4] 蒋洪德.加速推进重型燃气轮机核心技术研究开发和国产化[J].动力工程学报,2011,31(8):563-566.
JIANG Hong-de. Promote heavy duty gas turbine core technology development and industrial application in China [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2011,31(8):563-566.
- [5] 何敏,蔡文祥,赵坚行,等.数值研究低热值燃料环管燃烧室燃烧流场[J].航空动力学报,2013,28(2):324-329.
HE Min,CAI Wen-xiang,ZHAO Jian-xing,et al. Numerical investigation of combustion flow fields in low Heating fuel cannular combustor [J]. Ship Science and Technology,2010,32(8):117-122.
- [6] 李名家,林枫,任艳艳,等.数值研究低热值燃料环管燃烧室燃烧流场[J].舰船科学技术,2010,32(8):324-329.
LI Ming-jia,LIN Feng,REN Yan-yan,et al. Numerical simulation and experimental study of the gas turbine combustor [J]. Journal of Aerospace Power,2010,32(8):324-329.
- [7] 董红,闻雪友,李名家,等.环管型燃烧室火焰筒壁温气热耦合数值模拟[J].航空动力学报,2014,29(5):1071-1078.
DONG Hong,WEN Xue-you,LI Ming-jia,et al. Coupled heat transfer numerical simulation of wall temperature of can annular combustor flame tube [J]. Ship Science and Technology,2010,32(8):324-329.
- [8] 冀春俊,任建新.燃气轮机回流式燃烧室内两相流动数值模拟及分析[J].热科学与技术,2008,7(4):349-353.
JI Chun-jun,RENG Jian-xin. Numerical simulation and analysis of two-phase flow in reverse flow type combustor [J]. Journal of Thermal Science and Technology,2008,7(4):349-353.
- [9] 金戈,张志学,顾铭企. QD128 航改燃气轮机燃烧室数值模拟[J].燃气轮机技术,2008,34(2):30-35.
JING Ge,ZHANG Zhi-xue,GU Ming-qi. Numerical simulation of QD128 aero derivative gas turbine combustor [J]. Gas Turbine Technology,2008,34(2):59-63.
- [10] 张文普,丰镇平.燃气轮机环形燃烧室内燃烧流动的数值模拟[J].动力工程学报,2004,24(1):37-40.
ZHANG Wen-pu,FENG Zhen-ping. Numerical simulation of three-dimensional combustion flow in a gas turbine annular combustor [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2004,24(1):37-40.
- [11] 赵晓燕,李祥晟,丰镇平.燃气轮机低热值合成气燃烧室内三维湍流流动的数值模拟研究[J].动力工程学报,2009,29(4):330-334.
ZHAO Xiao-yan,LI Xiang-sheng,FENG Zhen-ping. Numerical simulation research on three dimensional turbulence flow in a gas turbine combustor burning low heat value syngas [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2009,29(4):330-334.
- [12] 张文普.燃气轮机燃烧室内 NO_x 生成影响因素的数值研究[J].燃气轮机技术,2004,17(4):59-63.
ZHANG Wen-pu. Numerical study on the factors effecting on NO_x formulation in a gas turbine combustor [J]. Gas Turbine Technology,2004,17(4):59-63.
- [13] 葛冰,田寅申,袁用文,等.重型燃气轮机先进低 NO_x 燃烧技术分析[J].热力透平,2013,42(4):251-259.
GE Bing,TIAN Yin-sheng,YUAN Yong-wen,et al. Advanced low NO_x combustion technologies for heavy-duty gas turbine [J]. Thermal Turbine,2013,42(4):251-259.
- [14] 张栋芳,崔耀欣,何磊,等. SGT5-4000F 型燃气轮机燃烧室介绍[J].热力透平,2010,39(4):248-251.
ZHANG Dong-fang,CUI Yao-xin,HE Lei,et al. Introduction of combustor for siemens SGT5-4000F gas turbine [J]. Thermal Turbine,2010,39(4):248-251.
- [15] BulatG,Jones WP,Marquis AJ. NO and CO formation in an industrial gas-turbine combustion chamber using LES with the eulorian sub-grid PDF method [J]. Combustion and Flame,2014,161:1804-1825.
- [16] 耿辉,翟振辰,桑艳,等.利用 OH-PLIF 技术显示超声速燃烧的火焰结构[J].国防科技大学学报,2006,28(2):1-6.
GENG Hui,ZHAI Zhen-chen,SANG Yan,et al. Reveal the flame structure of supersonic combustion using OH-PLIF technology [J]. Journal of National University of Defense Technology,2006,28(2):1-6.
- [17] 郑洪涛,李雅军,蔡林.燃气轮机燃烧室点火位置及点火过程计算[J].热能动力工程,2014,29(1):22-28.
ZHENG Hong-tao,LI Ya-jun,CAI Lin. Calculation of the ignition location and process for the combustor of a gas turbine [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2014,29(1):22-28.

(姜雪梅 编辑)

centrifugal compressor ,secondary flow ,back-sweptness ,shock wave

某重型燃机环形燃烧室内 NO_x 生成的数值研究 = **Numerical Simulation of NO_x Formation in a Heavy Duty Gas Turbine Annular Combustion Chamber** [刊 汉]FU Zhong-guang ,SHI Li ,LIU Bing-han ,SHEN Ya-zhou (Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment (North China Electric Power University) ,Ministry of Education ,Changping District ,Beijing ,China ,Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(4) . -52 ~ 58

The NO_x emission characteristic of an annular combustion chamber in a heavy duty gas turbine is numerically studied using a validated model. The predicted results show that there are two main convergent flow regions with opposite revolving direction near the nozzle and two convergent flow regions after boss in the annular combustion chamber. The formation rate of thermal NO_x is lower in the region of main convergent flow due to relatively lower temperature in those regions which is approximately 1 600 ~ 1 700 K. However ,the temperature in convergent flow regions after boss is over 1 900 K ,and thus greatly enhance thermal NO_x formation rate. The OH mole fraction and thermal NO_x formation rate in the flow regions near the crust are relatively higher due to higher temperature in this region. **Key words:** gas turbine ,annular combustion chamber , NO_x formation ,numerical simulation

圆孔型预旋喷嘴转静盘腔内流动换热特性的数值研究 = **Numerical Investigations on the Flow and Heat Transfer Characteristics of the Rotor Stator System with Circle Pre-swirl Nozzles** [刊 汉]CHEN Shu-xian ,GAO Tie-yu ,LI Jun(School of Energy & Power Engineering ,Xi'an Jiaotong University ,Xi'an ,China ,Post Code: 710049) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(4) . -59 ~ 66

The flow and heat transfer characteristics of the rotor stator cavity with circle pre-swirl nozzle structures was numerically investigated using three-dimensional Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) and SST turbulence model. The numerical drag coefficient and Nu coefficient distributions in the rotor stator cavity agreed well with the experimental data. The reliability of the utilized numerical method was also demonstrated. Three different turbulent flow