

中国工程热物理学会

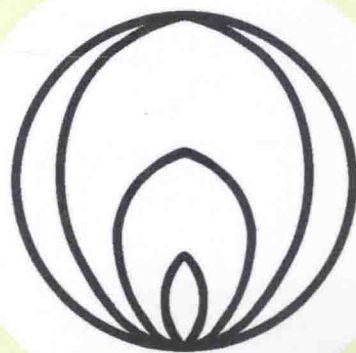
燃烧学学术会议

论文集（下册）

二〇〇六

武汉

中国工程热物理学会编



燃烧学学术会议论文集(下册) 目录

三. 燃烧过程数值计算(续)

- 064188 分级燃烧过程的稳定性分析.....张 昊 朱 民(621)
- 064191 双头部燃烧室两相燃烧流场数值研究.....蔡文祥 赵坚行(626)
- 064192 主燃孔对双旋流器燃烧室流场的影响.....党新究 赵坚行 吉洪湖(632)
- 064193 基于详细反应机理的航空发动燃烧室燃烧流场计算.....
.....侯宽新 刘 勇 赵坚行(638)
- 064194 直接数值模拟与大涡模拟后台阶紊流流动.....郭晓东 赵坚行(644)
- 064201 N_2/O_2 双介质阻挡放电机理研究.....魏燕丽 魏冬香 李婷婷 顾 璠(650)
- 064202 煤油/气氧/气氢火箭发动机燃烧不稳定性数值仿真研究.....
.....聂万胜 谢庆纷 段立伟 庄逢辰(655)
- 064203 自定义标量法模拟丙烷燃烧过程.....张令品 谢洪勇 陈 石(661)
- 064206 人体上呼吸道内气流和燃烧污染物颗粒沉积的大涡模拟.....
.....林 江 胡桂林 樊建人(668)

四. 燃烧污染控制

- 064006 模型燃烧室水蒸汽伴随稀释燃烧降低污染物排放的实验研究.....
.....刘 泉 徐 纲 房爱兵(674)
- 064009 燃气轮机合成气燃室燃料气加湿实验研究.....
.....雷 宇 房爱兵 徐 纲 聂超群 黄伟光(683)
- 064012 加压喷动流化床煤气的炉内脱硫.....李乾军 章名耀(688)
- 064022 城市污泥与煤在循环流化床中混燃的温度预测模型.....
.....何军飞 马晓茜 阳 晶 赵增立 李海滨 陈 勇(693)
- 064025 有机钙脱硫脱硝技术研究.....李文皎 吴祯祥(701)
- 064026 含铬固体废物焚烧中 $CrO_2OH + O \rightarrow CrOOH + O_2$ 基元反应研究.....
.....胡 娟 杨小勇 于溯源 吴国是 徐景明(705)
- 064028 气液接触时间对湿法液柱喷射烟气脱硫反应的影响.....
.....杨小勇 李 彦 李定凯 陈昌和 徐旭常 项光明(712)
- 064037 炉排-流化复合垃圾焚烧炉热态工业测试(一)物料测试.....
.....张衍国 李清海 蒙爱红 王 亮 陈昌和(718)
- 064038 炉排-流化复合垃圾焚烧炉热态工业测试(二)气体测试.....
.....张衍国 李清海 蒙爱红 贾金岩 陈昌和(726)
- 064039 垃圾物理特性与可焚烧特性的关系.....
.....李清海 张衍国 蒙爱红 贾金岩 党文达 陈昌和(734)
- 064042 逆向稀疏波对火焰结构影响的实验研究.....陈先锋 孙金华 姚礼殷(740)
- 064046 LIBS 煤质检测实验中延迟时间的研究.....
.....李 捷 陆继东 谢承利 余亮英 陈 文 李 娉 刘 彦 李卫杰(746)
- 064059 均相系统中汞的氧化实验与热平衡计算.....
.....罗光前 姚 洪 徐明厚 成濑一郎(751)
- 064066 火灾烟气毒性气体在狭长通道内迁移的模拟实验研究...冯文兴 杨立中(758)

- 064093 固定床内模拟城市固体垃圾燃烧试验研究.....
.....梁立刚 孙 锐 郭 强 代 魁 刘 翔 吴少华(764)
- 064106 氧燃烧方式下燃煤过程中 NO_x 排放特性的实验研究.....
.....徐志英 邱建荣 温 存 吴 辉 王小华 曾汉才(772)
- 064107 氧燃烧方式下矿物质与重金属行为特征的实验及模拟研究.....
.....温 存 邱建荣 徐志英 刘 豪 吴 辉 孔凡海 成 斌(777)
- 064113 电站锅炉中纷煤灰与 SiC 质耐火材料结渣性的研究.....
.....叶 昌 匡加才 陈冬林 陈亚平 谭 宇(783)
- 064116 横向冲刷式降膜脱硫方式的试验研究.....
.....赛俊聪 吴少华 赵 妍 秦裕琨(790)
- 064123 消防水幕衰减火灾热辐射的实验研究.....
.....葛晓霞 靳红雨 王道成 魏 东(796)
- 064126 氧燃料燃烧方式下燃煤汞析出规律的初步试验研究.....
.....吴 辉 邱建荣 王泉海 王小华 李 媛 刘 峰 熊全军(802)
- 064132 神府煤热解过程中微量元素挥发性的实验研究.....
.....李 扬 张军营 赵永椿 高晋生 吴幼青 郑楚光(807)
- 064137 高温水解—离子色谱法对贵州煤中氟含量研究.....
.....刘雪峰 宋党育 孙学信 张军营 郑楚光(814)
- 064144 CaO 碳化反应中快速化学反应阶段的判定.....
.....王保文 郑 瑛 池保华 郑楚光(821)
- 064145 未燃尽炭表面吸附汞的机理研究.....
.....李 猛 刘 晶 郑楚光 邱建荣 陆继东(827)
- 064149 纯 CO₂ 气氛下碳酸钙热解的实验研究...池保华 郑 瑛 王保文 郑楚光(832)
- 064158 二次风、煤粒度对链条炉闷炉启动时冒黑烟的影响.....王清成 罗永浩(836)
- 064160 用 DSC-DTG 研究飞灰熔融过程.....王小波 闫常峰 李海滨 陈 勇(841)
- 064173 喷嘴直径对清灰性能的影响.....孙晓茗 项光明 姚 强 宋 蓄(850)
- 064178 簇模型 CaO(001)表面上吸附氯化汞的热力学研究.....
.....赵鹏飞 郭 欣 郑楚光(857)
- 064181 滤料荷电对过滤性能的影响研究.....
.....熊 刚 宋 蓄 姚 强 徐海卫 黄 斌(863)
- 064182 气相温度脉动对煤粉颗粒热解氮化合物释放的影响.....张洪涛 张 健(869)
- 064183 二次风率对分级进风燃烧室内湍流燃烧与 NO_x 生成的影响.....
.....张 健 袁书生 郑晓川 张洪涛 周力行(875)
- 064189 用生命周期分析评价我国两种垃圾焚烧技术的环境影响.....
.....陈德珍 王正宇 胡雨燕 Thomas H. Christensen(882)
- 064190 水合肼在中高温烟气中与 NO 反应的反应机理分析.....张祚明 陈德珍(890)
- 064196 正庚烷复合均质压燃的燃烧与排放特性研究.....
.....马骏骏 吕兴才 吉丽斌 黄 震(897)
- 064207 LPG 发动机首循环对冷起动排放的影响.....
.....邱冬平 栗 工 李理光 刘志敏(904)

五. 液雾及气体燃料燃烧

- 064011 三组元喷嘴“综合性能数”研究.....李清廉 王振国(911)
- 064014 柴油机受控高雾化燃烧理论与直喷式柴油机“超 ω -一环山型燃烧室”设计与试验.....李玉山(918)
- 064016 电动增压器流量特性的测定与数值分析.....姚春德 周红秀 任美林(935)
- 064019 静电增强湿式除尘器的优化运行分析.....赵海波 郑楚光(940)
- 064021 两相脉冲爆震发动机不同进气方式研究.....王治武 严传俊 李 牧 郑龙席 黄希桥(946)
- 064030 稀燃天然气发动机燃烧循环变动的工况分析研究.....姚宝峰 李国岫 刘建华(953)
- 064031 点燃式稀燃天然气发动机燃烧循环变动的非线性动力学分析研究.....李国岫 姚宝峰 郑亚银(959)
- 064033 贴壁风对脱硫反应器内液滴粘壁的影响.....张 颀 由长福 祁海鹰 陈昌和 徐旭常(966)
- 064057 遗传算法在二甲醚均质压燃燃烧优化中的应用.....李 鏐 颜伏伍 罗马吉(972)
- 064102 提高喷雾模拟精度的方法研究.....张辉亚 张煜盛 莫春兰 徐 波(977)
- 064109 正庚烷压燃内燃机中组分热量变化的研究.....郭晓平 王占杰(985)
- 064112 水雾协流管式燃烧器火焰拉伸特性.....刘昶亚 陆守香 朱迎春(991)
- 064142 甲醇高效清洁燃烧模式设计的试验研究.....尧命发 陈 征 郑尊清 张全长(997)
- 064143 柴油机燃用酯-乙醇-柴油时微粒生成与排放的研究.....王建昕 陈 虎 帅石金(1003)
- 064164 柴油机氮氧化物的特征时间模型.....宋金瓯 姚春德 王洪夫(1011)
- 064179 壁流式柴油机颗粒过滤体捕集性能的实验研究.....孟忠伟 郭 栋 宋 蕾 姚 强 徐旭常(1017)
- 064184 甲烷微通道内催化燃烧有关转化率的讨论.....焦 健 钟北京(1023)
- 064185 “旋转型气-液雾化喷嘴”的雾化特性研究.....龚景松 傅维镛(1029)
- 064186 某支板式超音速剪切流燃烧的数值研究.....侯凌云 王人杰(1034)
- 064200 燃用天然气合成油增压柴油机特性研究.....武 涛 黄 震 张武高 方俊华(1039)
- 064204 细水雾熄灭受限空间油池火主导机理分析.....牛国庆 余明高 刘志超 于水军(1045)

六. 其它燃烧问题及燃烧测试技术

- 064004 运用激光层析观测预混火焰前锋.....穆克进 王 岳 雷 宇 张哲巖 聂超群 肖云汉(1052)
- 064005 射流剪切层及相关预混火焰的被动控制.....穆克进 王 岳 惠 鑫 张哲巖 聂超群(1059)
- 064007 燃气轮机合成气燃烧室中燃烧噪声的现场测试与分析.....房爱兵 徐 纲 聂超群 黄伟光(1067)

- 064008 燃气轮机中热值合成气燃烧室改造技术—现场调试与考核.....
.....徐 纲 雷 宇 房爱兵 俞 镔 刘庆国 聂超群 黄伟光(1074)
- 064027 甲烷—空气扩散火焰法合成多壁碳纳米管的实验研究.....
.....于晓丽 张晓峰 杨小勇 王 捷 于溯源(1082)
- 064050 气体射流在液体工质中的扩展形态研究.....
.....余永刚 齐丽婷 周彦煌 吕学霞(1088)
- 064053 加湿对钝体燃烧器火焰内部速度场的影响.....葛 冰 藏述升 顾 欣(1092)
- 064058 煤粉锅炉末燃碳随飞灰粒径分布规律的实验研究.....刘彦丰 钟晓亮(1100)
- 064060 纤维素、木质素对生物质与煤混烧特性的影响.....
.....王泉斌 戴 立 吕当振 周 科 姚 洪 徐明厚(1105)
- 064075 燃烧调整过程中炉内黑度检测实验研究.....杨 超 周怀春 于鹏锋(1112)
- 064077 测量轴对称火焰温度与烟黑容积份额分布的实验研究.....
.....李 芳 周怀春 卢 晶(1117)
- 064081 火焰辐射及偶丝导热对热电偶测温影响的数值分析.....
.....熊 倩 周怀春 艾育华 卢 晶(1122)
- 064082 大型电站燃煤锅炉内颗粒介质辐射特性的检测与分析.....
.....姜 春 周怀春 于鹏峰(1128)
- 064088 火焰特征辐射谱线测温方法实验研究.....
.....程智海 蔡小舒 岳 俊 欧阳新 李俊峰 唐荣山(1135)
- 064101 $\text{CuO}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 催化吸附剂脱硝性能研究.....
.....赵清森 向 军 毛金波 石金明 陈 伟(1140)
- 064110 典型煤种气化产物热重—红外连用实验研究.....
.....石金明 向 军 孙路石 陈 伟 赵清森(1146)
- 064117 用双色法研究汽油机燃烧火焰温度分布.....
.....王丽雯 何 旭 安新亮 王建昕(1152)
- 064118 应用高速纹影法对汽油机燃烧过程的研究.....
.....安新亮 何 旭 王丽雯 王建昕(1160)
- 064119 半焦燃烧特性的热重试验研究.....刘典福 魏小林 盛宏至(1167)
- 064121 相对温度和氧气浓度对滑动弧放电特性影响研究.....
.....李晓东 薄 拯 严建华 杜长明 池 涌 岑可法(1174)
- 064150 扩散燃烧场的 PIV 测试方法探讨.....杨浩林 赵黛青 杨卫斌(1180)
- 064151 低热损微燃烧器原型设计及燃烧实验.....蒋利桥 赵黛青(1185)
- 064168 二维喷动床颗粒流动的脉动特性实验研究.....
.....柳冠青 李水清 赵香龙 姚 强(1190)
- 064170 电场对火焰形状及碳烟沉积特性的影响.....王 宇 姚 强(1197)
- 064177 超燃冲压发动机支板凹腔一体化燃烧室实验研究.....
.....顾洪斌 陈立红 张新宇(1203)
- 064195 旋转阀脉冲爆震发动机协调工作研究.....韩德祥 韩启祥(1208)
- 064197 脉冲爆震发动机地面启动研究.....张义宁 王家骅 张靖周(1214)
- 064198 煤油/空气 PDE 激波反射起爆研究.....
.....李建中 王家骅 范育新 张义宁 张靖周(1221)
- 064199 模拟冲压进气条件对 PDE 推力测量影响.....范育新 王家骅 曹梦源(1228)
- 064205 纤维素热解过程中活性纤维素的生成研究.....
.....刘 倩 王 琦 王树荣 骆仲泱 岑可法(1234)

分级燃烧过程的稳定性分析¹

张 昊 朱 民

清华大学热能工程系, 热科学与动力工程教育部重点实验室, 100084

(Tel: 010-62797161, Email: zhumin@tsinghua.edu.cn)

摘 要 通过分级稀相预混燃烧控制NO_x排放的技术已广泛运用在现代地面燃气轮机。该燃烧形式的关键技术之一是如何避免和抑制振荡燃烧现象。本文简要阐述了发生振荡燃烧的机理, 并且通过线性分析方法对某分级燃烧室流场分布和燃烧稳定性进行计算。同时分析了混合当量比等参数对燃烧过程的影响, 得出在不同因素影响下, 系统的稳定性和模态。这些分析有助于我们在设计和运行分级燃烧系统时, 实现燃烧系统的安全、高效和清洁运行。

关键词: 振荡燃烧 分级燃烧 稳定性分析

1 引言

通过分级稀相预混燃烧控制NO_x排放的技术已广泛运用在现代地面燃气轮机。热NO_x的生成主要与火焰温度和滞留时间相关。通过分级燃烧将不同的燃烧方式组合起来, 在主要工况范围内采用稀相预混燃烧, 控制燃烧温度和滞留时间, 从而达到降低NO_x排放量的目的[1]。分级燃烧按照燃烧器的排列方式分为串联和并联。对于串联方式, 各级喷嘴沿火焰筒轴向分布, 空气分级供入燃烧室。并联方式的喷嘴沿火焰筒径向分布, 如图1所示,

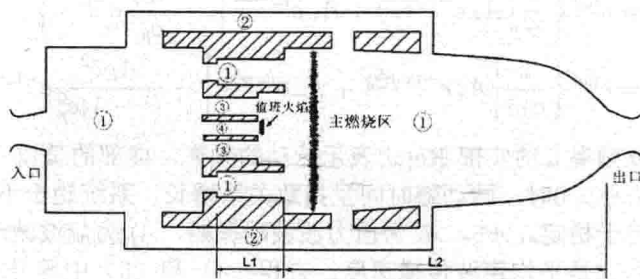


图1: 燃烧室结构示意图

在不同功率时采取不同的喷嘴组合方式来控制火焰筒内的温度[2]。虽然这种燃烧方式对降低污染物排放有明显的效果, 但由于此运行方式接近维持火焰的极限温度, 容易引起自激振荡燃烧。燃烧振荡主要由燃烧放热的脉动与燃料流量的脉动, 燃烧室内周期性的涡脱落和混合当量比的脉动等物理过程相互耦合引起[3,4,5]。在实际运行中, 一旦形成振荡燃烧, 不仅会干扰燃烧过程, 使污染控制失效, 减少部件的工作寿命, 严重的话还会造成整个燃烧部件结构性破坏。为了避免在实际系统运行中发生振荡燃烧, 需要发展出预测振荡燃烧的有效方法, 帮助和指导燃烧系统的设计和运行。

¹国家自然科学基金(50576045)和教育部留学回国人员科研启动基金资助项目。

线性分析方法是目前人们对振荡燃烧现象进行研究时所采用的一个重要方法。这种方法可以预测系统振荡燃烧的产生及发展过程,分析可能出现振荡燃烧的模态和其稳定性。大量的研究分析工作是对一维模型展开的。如Lieuwen[3]通过建立简单的直管道火焰模型描述了声波、涡旋和熵波与燃烧过程之间的相互作用以及声波和火焰之间的相互影响。Hubbard和Dowling[6]运用线性理论对预混燃烧进行了理论分析,建立了不稳定放热与湍流火焰速度、化学当量比以及流动旋度之间的关系。也有一些学者将振荡的径向和周向分量考虑进来,进行三维的数值分析。如Pankiewicz[7]等结合传递矩阵和线性分析的方法对环形燃烧中的不稳定燃烧进行分析。本文将通过线性分析方法,对某分级燃烧室流场分布和燃烧稳定性进行计算,同时分析了混合当量比等参数对稳定性的影响。下节简要介绍线性分析方法和数学模型;第三节将对燃烧过程计算分析结果进行分析讨论;最后将对本文工作进行总结。

2 线性分析方法

线性分析是一种能够有效预测燃烧振荡产生及发展的分析方法[8]。在线性分析中,如果物理量的脉动是一个小量,通过对质量、动量和能量守恒方程的分解与化简,并忽略其中的高阶关联项,可以得到线性波动方程:

$$\frac{1}{\bar{c}^2} \frac{\bar{D}^2 p'}{Dt^2} - \nabla^2 p' = \frac{\gamma - 1}{\bar{c}^2} \frac{\bar{D} q'}{Dt}. \quad (1)$$

方程的右边描述了非稳定燃烧热 q' 对声场 p' 的影响。将方程(1)的解通过傅立叶变换到复频域内,可写成如下的形式[9]

$$\hat{p} = e^{i\omega t} \left[A_+ e^{-i\omega \frac{x}{\bar{c} + \bar{u}}} + A_- e^{i\omega \frac{x}{\bar{c} - \bar{u}}} \right], \quad (2)$$

$$\hat{u} = \frac{e^{i\omega t}}{\bar{\rho} \bar{c}} \left[A_+ e^{-i\omega \frac{x}{\bar{c} + \bar{u}}} - A_- e^{i\omega \frac{x}{\bar{c} - \bar{u}}} \right], \quad (3)$$

$$\hat{p} = e^{i\omega t} \left\{ \frac{1}{\bar{c}^2} \left[A_+ e^{-i\omega \frac{x}{\bar{c} + \bar{u}}} + A_- e^{i\omega \frac{x}{\bar{c} - \bar{u}}} \right] - \frac{A_E \bar{\rho}}{c_p} e^{-i\omega \frac{x}{\bar{u}}} \right\}, \quad (4)$$

$$\hat{T} = e^{i\omega t} \left\{ \frac{1}{c_p \bar{\rho}} \left[A_+ e^{-i\omega \frac{x}{\bar{c} + \bar{u}}} + A_- e^{i\omega \frac{x}{\bar{c} - \bar{u}}} \right] - \frac{A_E \bar{c}^2}{(\gamma - 1) c_p^2} e^{-i\omega \frac{x}{\bar{u}}} \right\}. \quad (5)$$

其中声场脉动的复频率 ω 的实部 $\text{Re}(\omega)$ 表示脉动的频率,虚部的负值 $-\text{Im}(\omega)$ 表示振幅的增长率。当 $-\text{Im}(\omega) > 0$ 时,脉动随时间呈指数关系增长,系统趋于不稳定;反之脉动随时间衰减,系统趋于稳定。 A_+ 、 A_- 为压力波波动振幅, A_E 为熵波波动振幅, x 是轴向坐标, $\bar{u}$ 是平均速度, $\bar{c}$ 是平均声波传播速度。方程(4)和(5)中等号右边与 A_E 相关的项分别是由熵波引起的密度和温度脉动。

方程(1)可通过火焰传递函数来闭合。在预混燃烧系统中,流动扰动会引起燃料喷嘴处混合当量比的脉动,如假设混合当量比脉动和非稳定燃烧热之间有一个时间延迟 τ ,则其关系可写为:

$$\frac{\hat{q}}{\bar{q}} = k_p \frac{\hat{\phi}}{\bar{\phi}} e^{-i\omega \tau}, \quad (6)$$

由此我们可以建立非稳定燃烧和流动之间的关系。其中的延迟时间是指燃气从喷嘴流到火焰面燃烧时所用的时间。另外我们还可以建立放热量脉动和温度脉动之间的关系:

$$\frac{\hat{q}}{\bar{q}} = k_s \frac{\hat{T}}{\bar{T}} e^{-i\omega \tau}. \quad (7)$$

我们还需要利用边界条件来确定方程的唯一解。一般认为燃气轮机燃烧室由于与压气机和透平相连，所以其入口和出口处近似为阻塞条件。入口边界条件可写为：

$$\rho'/\bar{\rho} + u'/\bar{u} = 0. \quad (8)$$

Marble 和 Candel[10]则给出了出口边界条件：

$$2(u'/\bar{u}) + \rho'/\bar{\rho} - p'/\bar{p} = 0. \quad (9)$$

结合边界条件和系统方程即可求解系统模态及其稳定性。

3 计算结果分析

本文以分级稀相预混燃烧室为例进行分析，其结构示意图如图1所示。该燃烧室在火焰筒中心有主燃烧器，沿周向布置了若干环形燃烧器。在筒壁上开有掺混孔，用于冷却筒壁和降低燃气的出口温度。图中的标号1、2、3和4分别代表机匣、环管喷嘴和燃烧室通道，冷却通道，主喷嘴和涡流器通道以及值班火焰通道。在分析时，可把燃烧室分解为由不同功能模块组成的系统，如图2所示。该系统包括扩压段和机匣、环形喷嘴、主喷嘴、主燃烧区和冷却通道。不同的模块由对应截面不同的管道连接。当截面积变化，流动有分叉或汇流时，通过质量流量、动量和能量的守恒关系得出变化前后的参数。

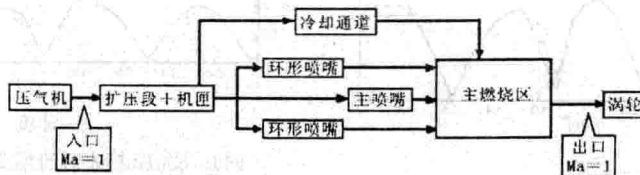


图2：燃烧室各部分的模型示意图

首先对设计工况下，满负荷时的燃烧过程进行了计算。图3和4分别是燃烧过程的平均压力和温度分布情况。由图3可见，通过火焰后和在火焰筒收缩段中，压力会不断下降，整个过程的压力恢复系数约为99.4%。从图4可以看出虽然值班火焰的温度超过2200K，但整个燃烧过程的平均温度处在一个相对较低范围内，有利于降低NO_x的生成。

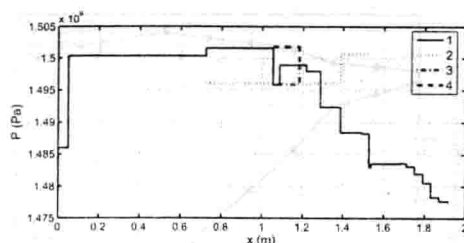


图3：平均压力分布

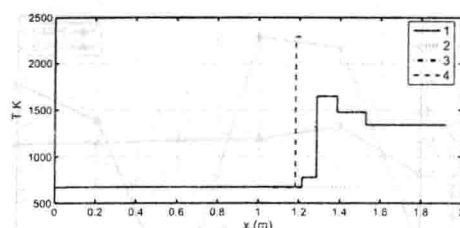


图4：平均温度分布

图5为分析系统稳定性的结果。图中横轴为频率，纵轴为幅值的增长率。由前面讨论可知，当增长率为正时，系统处于非稳定状态，反之为稳定状态。从图中可以看出在100 Hz和600 Hz附近有两个不稳定频率点。在实际运行时，在这两个频率范围处可能会发生自激振荡。对于不同的模态，我们可以得到流场在不同通道的脉动分布。图6是600 Hz模态时，流场在不同通道里的脉动分布。由图可见压力、温度和密度脉动其

变化相位相同，而与速度脉动的变化相位相反，这与理论分析是一致的。通过比较它们的值，可检验其满足边界条件方程（8）和（9）。分析其它模式的脉动分布也有类似的结果。

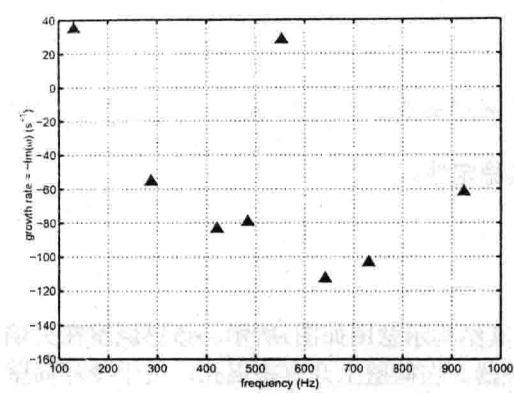
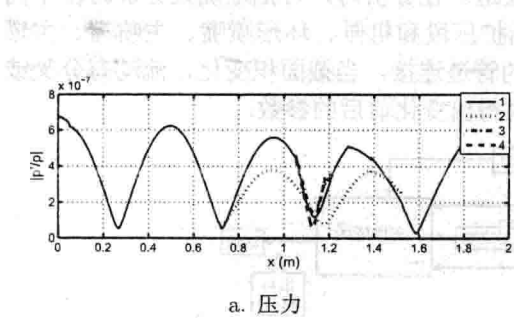


图5：燃烧过程振荡模式及其振幅增长率



a. 压力

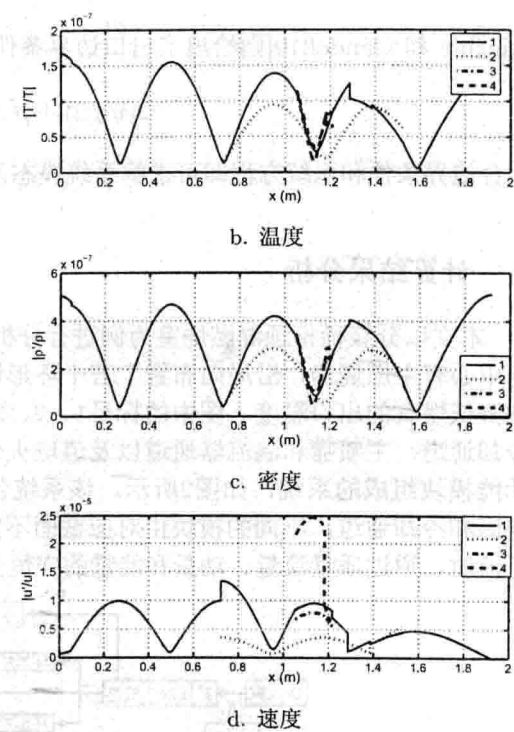


图6：600Hz模式时流场变量的脉动分布

在实际运行中，由于种种原因可能会使系统偏离设计工况。譬如当空气或燃料系统发生波动时，必定会影响下游的燃气比、流动速度，从而导致燃烧放热量或燃烧位置的变化。这些变化在一定条件下可能会使系统的稳定性受到影响。因此我们首先分析了燃气混合延迟时间对系统稳定性的影响。这里主要是通过改变主火焰面的轴向位置来改变延迟时间的。通过计算发现，延迟时间的变化对系统稳定性有明显的影

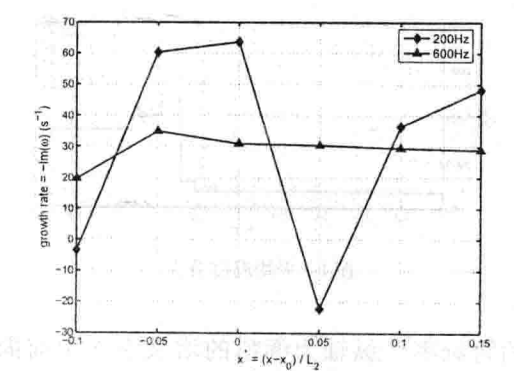


图7：系统稳定性随主火焰位置的变化

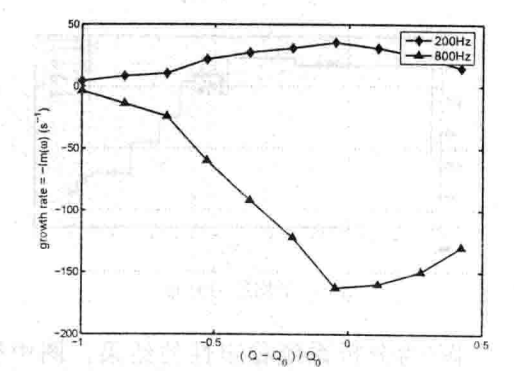


图8：系统稳定性随值班火焰燃烧热的变化

图7体现了不同频率范围内，主火焰面轴向位置对稳定性的影响。如图所示在100 Hz这个较低的频率范围内模式振幅增长率随着主火焰位置的变化呈剧烈的交错变化。而

在600 Hz时,系统始终处于非稳定范围,而且振幅增长率变化不大。同时,我们还分析了满负荷时混合当量比对稳定性的影响。改变混合当量比会引起火焰放热量的变化。此时燃料在主燃烧区内燃烧,值班火焰放热量的变化有可能对系统的稳定性产生较大的影响。在分析中,我们取设计工况下的放热量为参考值,计算了200 Hz和800 Hz两个模态下值班火焰的相对放热量变化对振幅增长率的影响,图8显示了振幅增长率随值班火焰相对放热量的变化关系。随着放热量的增加,在高频附近模态趋于稳定,而在低频范围内则始终处于不稳定模态,但是有趋于稳定的趋势。可见变化值班火焰的燃烧放热对低频模态稳定性的影响更大。

4 结论

本文简要介绍了振荡燃烧发生的机理和相关因素的影响,并且通过网格模块化的方法,对分级预混燃烧室模型进行了燃烧稳定性分析。通过计算可以得到系统流动参数平均值和脉动值的分布情况,以及此燃烧系统的稳定性。从结果中可以看出在中低频率100 Hz和600 Hz两处范围附近,系统在实际运行中可能会处在不稳定状态下。另外,我们对影响燃烧稳定性的相关参数的变化进行分析,得出在低频模态时火焰位置的变化会使振荡振幅增长率发生较大的波动。同时值班火焰放热量的变化也会对稳定性产生一定的影响。这些计算分析有助于我们在设计和运行分级燃烧系统时,实现燃烧系统的安全、高效和清洁运行。

参考文献

- [1] Rokke, P.E., Hustad, E., Rokke, N.A., and Svendsgaard, O.B., "Technology update on gas turbine dual fuel, dry low emission combustion systems", ASME paper GT2003-38112, 2003
- [2] Davis, L.B., and Black, S.H., "Dry Low NO_x Combustion Systems for GE Heavy-Duty Gas Turbines", GER-356SG, GE Power Systems, Schenectady, NY.
- [3] Lieuwen, T., "Modeling Premixed Combustion-Acoustic Wave Interactions: A Review", *Journal of Propulsion and Power*, Vol.19, No.5, Sept-Oct, 2003, pp.765-781.
- [4] Reuter, D.M., Hegde, U.G., and Zinn, B.T., "Flowfield measurements in an unstable ramjet burner", *Journal of Propulsion and Power*, v6, n6, Nov-Dec, 1990, pp.680-865
- [5] Lieuwen, T., Torres, H., Johnson, C., and Zinn, B.T., "A mechanism of combustion instability in lean premixed gas turbine combustors", *Journal of Engineering for gas turbines and power*, Vol.123, Jan, 2001, pp.182-189
- [6] Hubbard, S., and Dowling, A.P., "Acoustic Instabilities in Premix Burners", *4th AIAA Aeroacoustics Conference*, June 2nd-4th, 1998, pp.1-11
- [7] Pankiewicz, C., Evesque, S., Polifke, W., and Sattelmayer, T., "Stability Analysis of Annular Gas Turbine Combustors", LECT Workshop on Instabilities in Aero-Engine Combustors, December 4-5, 2001, Stuttgart, Germany.
- [8] Dowling, A.P., and Stow, S.R., "Acoustic Analysis of Gas Turbine Combustors", *Journal of Propulsion and Power*, Vol.19, No.5, Sept-Oct 2003, pp.751-764.
- [9] Stow, S.R., and Dowling, A.P., "Thermoacoustic oscillations in an annular combustor", *ASME paper*, 2001-GT-0037, 2001
- [10] Marble, F.E., and Candel, S.M., "Acoustic Disturbance from Gas Nonuniformities Convected Through a Nozzle", *Journal of Sound and Vibration*, Vol.55, No.2, 1977, pp.225-243.

双头部燃烧室两相燃烧流场数值研究

蔡文祥 赵坚行

(南京航空航天大学能源与动力学院, 南京 210016)

联系电话: 025-84892987 Email: zjxzhao@nuaa.edu.cn

摘要: 本文在贴体坐标系下对双头部火焰筒内三维两相紊流燃烧过程进行数值模拟, 采用代数雷诺应力模型模拟紊流粘性、EBU-二阶矩模型模拟燃烧反应速率、六通量辐射模型考虑热辐射对燃烧流场及火焰筒壁温的影响。分别运用颗粒轨道模型与颗粒随机轨道模型研究燃烧室内气液两相流动与燃烧过程, 将所得出口温度分布与实验结果进行比较, 均较为相符。

关键词: 双头部火焰筒, 两相反应流场, 代数雷诺应力模型, 颗粒随机轨道模型, 数值模拟

1 前言

在航空发动机燃烧室内的燃油雾化、蒸发以及燃烧过程相当复杂, 气液两相之间的紊流输运过程强烈, 其内的紊流及旋流流动中颗粒测量较为困难, 实验费用高, 而采用数值模拟燃烧室内气液两相紊流流动以及燃烧过程, 可降低实验工作量, 了解内部工作过程。因此, 在现代的航空发动机的设计中, 采用计算流体力学(CFD)及计算燃烧学(CCD)方法已成为一个研究热点。

本文采用代数雷诺应力紊流模型^[1]、随机轨道模型^[2]或颗粒轨道模型^[3]、六通量辐射模型和EBU-二阶矩燃烧模型等对某先进航空发动机燃烧室两相燃烧流场进行计算, 模拟分析颗粒轨道模型与颗粒随机轨道模型对两相流动与燃烧过程的影响, 计算结果与实验数据比较表明, 两种模型都吻合较好, 但在计算工作量上, 颗粒轨道模型更适合工程应用。

2 计算对象

本文研究对象来自某先进航空发动机环形燃烧室, 其火焰筒包含 28 个作为预混段的圆筒形头部, 每个头部内装有一个涡流器, 后通过转接段由圆形预混段过渡到扇形扩张段, 与后端火焰筒相连接。气流分别从火焰筒内外环壁面上的一排主燃孔、两排掺混孔、多排气膜冷却孔以及火焰筒头部涡流器进入火焰筒内。燃油在预混段与扩张段内与空气充分混合, 在燃烧室内充分燃烧。由于考虑到计算的复杂性以及结构的相似性, 取整个燃烧室的 2/28 即含两个燃油喷嘴的两头部区域进行建模, 可满足周期性条件并减少工作量。图 1 为燃烧室火焰筒总体网格轮廓图。

3. 网格的划分与生成

由于 TTM 法灵活、方便, 通用性强, 本文采用此法生成网格。所需求解方程的一般形式为:

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 g_{ij} \bar{r}_{\xi_i \xi_j} + \sum_{k=1}^3 g^{kk} P_k \bar{r}_{\xi^k} = 0 \quad (1)$$

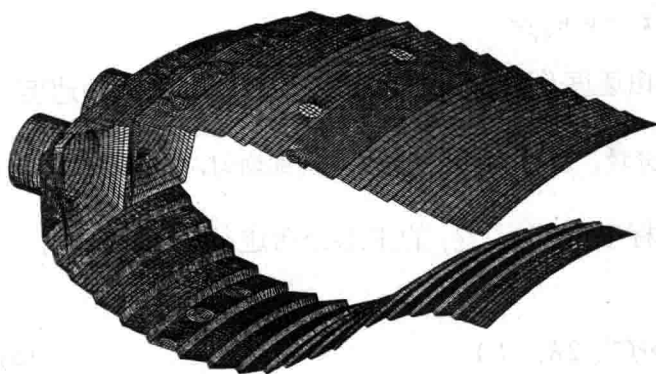


图1 为燃烧室火焰筒总体网格轮廓图

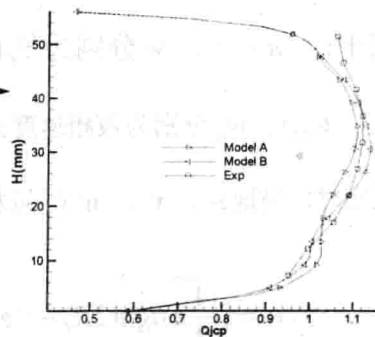


图2 出口温度分布系数

上式中各变量定义可参见文献[4]。考虑到火焰筒头部几何形状复杂,本文采用型线定点法确定复杂几何边界^[5,6],以生成三维贴体网格,供数值模拟使用,其轮廓见图1。

4 数学模型

4.1 Rodi 代数雷诺应力模型

常用的标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型是根据 Boussinesq 的线性涡旋粘性假设得出,其通用性相对较差,而直接求解 $\overline{u_i u_j}$ 的雷诺应力模型需求解方程过多,计算费用高。为此, Rodi^[1]提出利用代数关系模化雷诺应力输运方程各项,经变换可得到应力代数关系表达式:

$$\frac{\overline{u_i u_j}}{k} = \phi_1 \frac{P_{ij}}{\varepsilon} + \phi_2 \delta_{ij} \quad (2)$$

$$\text{式中, } \phi_1 = \frac{1-C_2}{P/\varepsilon+C_1-1}, \quad \phi_2 = \frac{2}{3} \frac{C_2 P/\varepsilon+C_1-1}{P/\varepsilon+C_1-1} \quad (3)$$

其中, C_1 与 C_2 为模型系数, P 为 k 方程中产生项张量,根据上述公式(2)与(3)可求得紊流各向异性紊流粘性。

4.2 颗粒群轨道模型

常用的颗粒轨道模型假定颗粒群沿着各自的轨道运动,颗粒间没有紊流扩散,而这种假设在实际过程中有所偏差,而采用颗粒随机运动轨道^[2]可考虑气相脉动随机速度对颗粒运动的影响,本文分别采用这两种模型对计算对象进行数值研究。颗粒随机轨道模型在圆柱坐标系下油珠的运动方程为:

$$\begin{aligned} du_p/dt &= (u+u'-u_p)/\tau_p \\ dv_p/dt &= (v+v'-v_p)/\tau_p + w_p^2/r \end{aligned} \quad (4)$$

$$dw_p/dt = (w + w' - w_p)/\tau_p - v_p w_p/r$$

式中: u 、 v 、 w 分别为气相速度分量, u' 、 v' 、 w' 分别为气相脉动速度分量, u_p 、 v_p 、 w_p 分别为液相速度分量。假设紊流流向同性和局部均匀, 当颗粒穿过紊流涡团时, 当地 u' 、 v' 、 w' 可按标准方差 $\sigma = \sqrt{\frac{2}{3}k}$ 的正态分布进行随机取样^[3]:

$$u' = \sqrt{\frac{4}{3}k} \text{sign}(2R_f - 1) \text{erf}^{-1}(|2R_f - 1|) \quad (5)$$

式中, k 为紊流动能, R_f 为随机数, 均匀分布在 0-1 之间。 $\text{sign}(x)$ 为符号函数, $\text{erf}(x)$ 为误差函数。将根据式(5)求得 u' 、 v' 、 w' 代入式(4), 按下式求解颗粒轨道:

$$x_p = \int u_p dt, \quad r_p = \int v_p dt, \quad \theta_p = \int w_p dt \quad (6)$$

颗粒轨道模型运动方程与随机轨道模型相仿, 仅不考虑气相脉动速度分量 u' 、 v' 、 w' 。

4.3 燃烧模型

EBU-二阶矩^[7]燃烧模型使用方便, 能够考虑燃料浓度脉动的影响, 本文采用该模型模拟燃烧室中的燃烧过程, 反应速率可由下式表示:

$$R_{fu} = \min(R_{fu,EBU}, R_{fu,SecOrd}) \quad (7)$$

上式中 $R_{fu,EBU} = C_R g^{0.5} \rho \varepsilon / k$

$$R_{fu,SecOrd} = -A_0 \rho^2 \overline{m_{fu} m_{ox}} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \text{ch}\left(\frac{E}{RT} \frac{(\overline{T^2})^{0.5}}{T}\right) \times \left[1 + \frac{\overline{m_{ox} m_{fu}}}{\overline{m_{ox} m_{fu}}} + \frac{(\overline{m_{ox}^2})^{0.5}}{\overline{m_{ox}}} + \frac{(\overline{m_{fu}^2})^{0.5}}{\overline{m_{fu}}} + \text{th}\left(\frac{E}{RT} \frac{(\overline{T^2})^{0.5}}{T}\right)\right] \quad (8)$$

上式中各相关项可用下述代数表达式进行模化:

$$\overline{m_{fu} m_{ox}} = C_y \frac{k^3}{\varepsilon^2} \frac{\partial \overline{m_{fu}}}{\partial x_j} \frac{\partial \overline{m_{ox}}}{\partial x_j}, \quad \overline{T^2} = C_T \frac{k^3}{\varepsilon^2} \left(\frac{\partial \overline{T}}{\partial x_j}\right)^2, \quad \overline{m_{ox}^2} = C_{\alpha} \frac{k^3}{\varepsilon^2} \left(\frac{\partial \overline{m_{ox}}}{\partial x_j}\right)^2, \quad \overline{m_{fu}^2} = C_{fu} \frac{k^3}{\varepsilon^2} \left(\frac{\partial \overline{m_{fu}}}{\partial x_j}\right)^2$$

5, 计算结果与分析

本文在自编程序的基础上分别采用颗粒轨道模型 (Model A) 以及颗粒随机轨道模型 (Model B) 对研究对象进行数值研究, 并对两者的计算结果进行比较分析, 部分结果如图 2~14 所示。

对于航空发动机燃烧室出口平均温度分布及出口温度分布系数是相当重要的设计参数。相对与出口平均温度, 两种模型计算值之差相对于燃烧室内温升的比例小于 1%, 区别不明显。图 2 将出口温度分布系数的数值模拟结果与实验结果进行了比较, 采用两种模型计算均与实验结果较为吻合, 各有优缺点。采用颗粒轨道模型在出口温度分布系数最大值位置预测较为符合于实验值, 近外环区域内预测值优于随机轨道模型, 但近内环

区域内值不若颗粒轨道模型预报准确，而采用颗粒随机轨道模型与之相反。

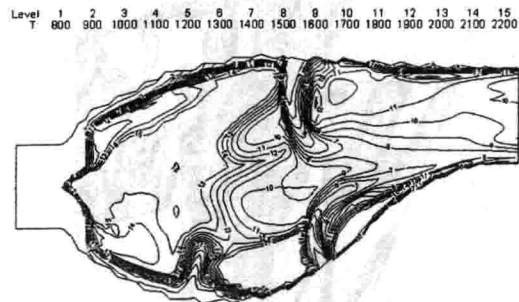


图 3 第一头部中心温度 T 等值线分布 (Model A)

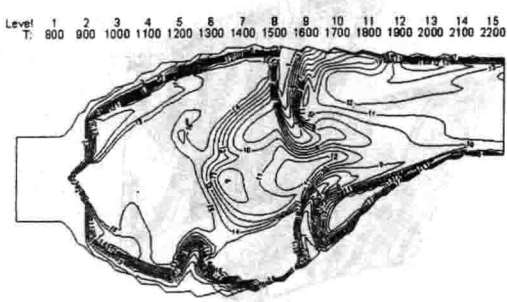


图 4 第一头部中心温度 T 等值线分布 (Model B)

图 3、4 分别为采用颗粒轨道模型、颗粒随机轨道模型所得到计算对象第一头部周向中心截面的温度等值分布规律。可以看出，采用两种模型计算所得温度分布相似，均可反映的主燃孔、掺混孔的冷却掺混强度及深度的影响且分布相似。对于燃烧室性能及污染物排放的影响至关重要的主燃区范围内温度分布基本相同；在燃烧室近壁区域内存在明显的温度梯度分布且相似，这一点可由图 5、6 对比验证。

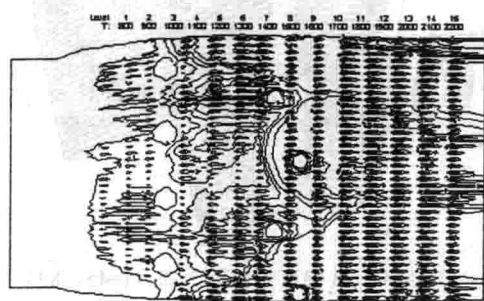


图 5 燃烧室外环壁面温度 T 等值线图 (Model A)

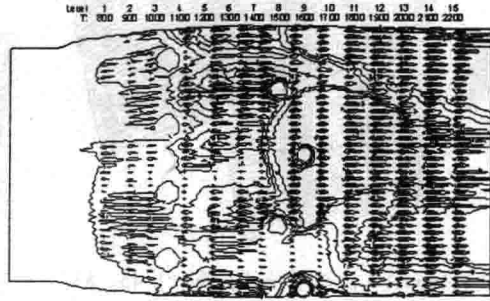


图 6 燃烧室外环壁面温度 T 等值线图 (Model B)

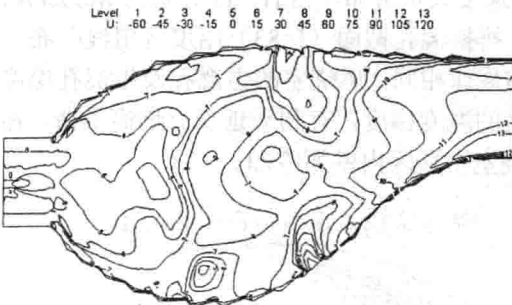


图 7 第一头部中心速度 u 等值线图 (Model A)

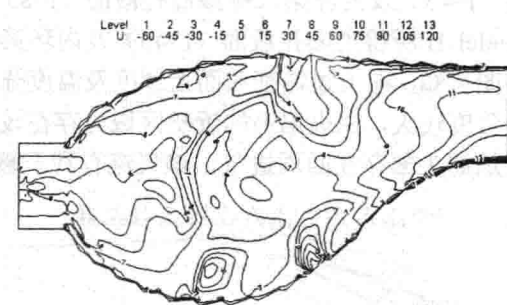


图 8 第一头部中心速度 u 等值线图 (Model B)

图 7、8 分别为 Model A、Model B 所得到第一头部中心截面的周向速度 (u) 等值分布规律。两种模型计算所得速度分布规律预报相同，对于火焰稳定燃烧器决定作用的回流区大小及其位置的预测的结构也较为相同。

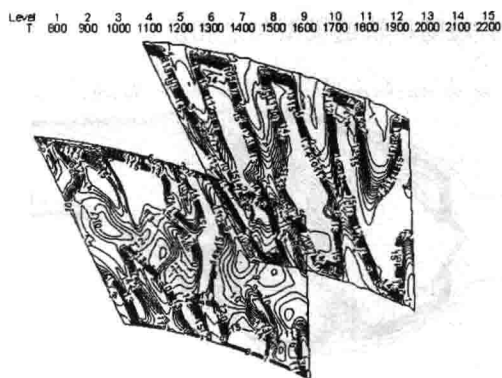


图 9 Model A 速度矢量分布 (I=12、45、83)

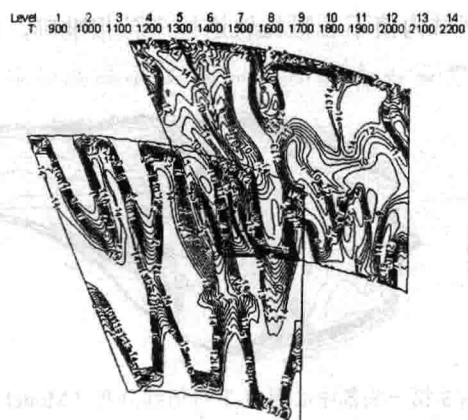


图 10 Model B 速度矢量分布 (I=12、45、83)

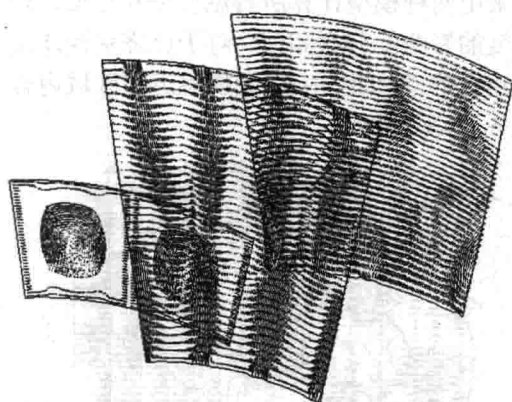


图 11 Model A 温度等值线分布 (I=45、83)

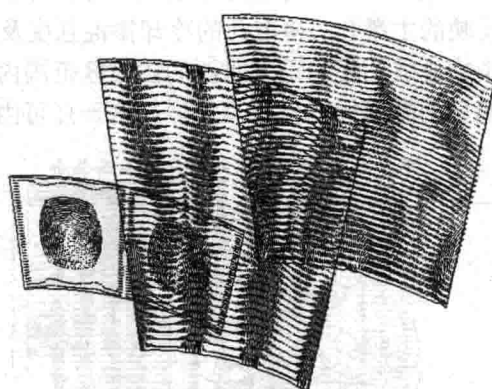


图 12 Model B 温度等值线分布 (I=45、83)

图 9、10 分别为 Model A、Model B 所得到火焰筒头部进气截面 (I=12)、主燃孔截面 (I=45) 及内环第二排掺混孔截面 (I=83) 速度矢量分布。图 11、12 分别为 Model A、Model B 所得主燃孔截面 (I=45) 及内环第二排掺混孔截面 (I=83) 温度等值线分布。由图可知,在上述特征截面上速度及温度分布规律相同,燃烧室的主燃孔及掺混孔深度及强度较大,在火焰筒的近壁区域内存在较大的温度梯度,有利于延长火焰筒寿命。在火焰筒头部存在四周进气,该气流有利于燃烧室主燃区内壁面冷却。

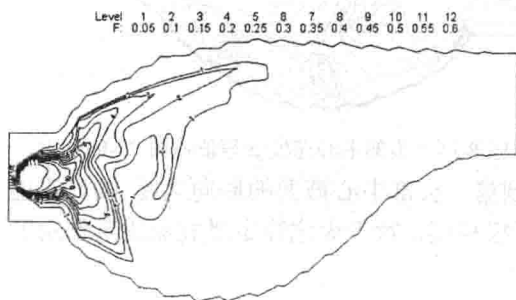


图 13 第二头部燃油浓度 F 等值线图 (Model A)

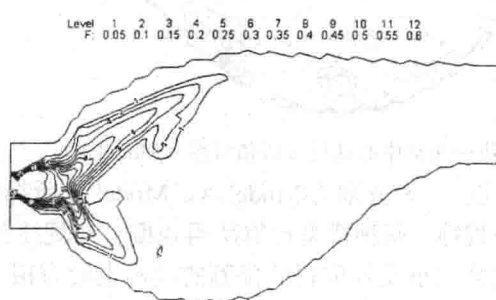


图 14 第二头部燃油浓度 F 等值线图 (Model B)

图 13、14 分别为 Model A、Model B 所得到第二头部中心截面的燃油浓度 (u) 等值线分布。由于采用的不同模型对两项流动进行数值模拟,所得结果略有不同但分布规律

仍基本相似。

本文计算对象网格数目为 $127 \times 43 \times 122$ ，在 P4 2.4G，512M 的机器上进行数值模拟。采通过对计算结果的对比分析可知，两种模型计算结果相似，各有优缺点，采用颗粒随机轨道模型并无过多优势，但采用颗粒随机轨道模型的时间要比颗粒轨道模型增加 51% 以上。

6. 结论

综合上述结果分析表明，采用数值模拟可了解燃烧室内部气流流动情况以及出口气流参数分布，这对分析火焰筒内的物理化学反应过程有着巨大的帮助。通过与实验结果的对比表明，数值模拟具有较强的可信性；采用不同的数学模型对计算结果有着一定影响，如本文对颗粒轨道模型及颗粒随机轨道模型进行数值研究表明，颗粒随机轨道模型虽然能够考虑气相脉动对颗粒运动的影响，但综合考虑计算精度以及计算成本，颗粒轨道模型更适合用于工程问题。

参考文献:

- [1] Rodi, W., A New Algebraic Relation for Calculating the Reynolds Stresses, Z. Angew. Math. Mech., Vol. 56, p210, 1975.
- [2] Wei, H., Chen, Y. S. and Shang, H. M., The Study of Liquid Surface Evaporation for Spray Combustion Applications, AIAA-97-0800, 1997.
- [3] Crowe, C. T., The Particle-Source-Cell Model for Gas-Droplet Flow, ASME 75-WA/H7-25, 1975.
- [4] 赵坚行, 燃烧的数值模拟[M], 科学出版社, 2002.
- [5] 赵坚行, 伍艳玲, 周琳, 先进燃烧室涡流杯流场计算, 工程热物理学报, Vol.21, No.1, 2001.
- [6] 蔡文祥, 胡好生, 赵坚行, 环形燃烧室火焰筒及旋流器流场计算[J], 工程热物理学报, V.26, p.253-256, 2005.
- [7] Chen, S. L. etc., Numerical Simulation of Methane-air Turbulent Flame Using a New-Second-Order Moment Model, Acta Mechanica Sinica(English series), Vol.16, No.1, P41, 2000.

Numerical Study of Two-Phase Reacting Flow in Annual Combustor with Two-Heads

Cai Wenxiang, Zhao Jianxing

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Numerical analysis of three-dimensional two-phase reacting flows is developed in arbitrary curvilinear coordinates. Algebraic Stress model, EBU-SecondOrder turbulence combustion model and Six-Flux Radiation model are applied to numerical simulations. On the non-staggered grid system, the discretization equations are solved with SIMPLE algorithm. The couple of the gas phase and the liquid phase is carried out by the Particle Trajectory model / the Stochastic Particle model. The calculated exit temperature distribution coefficient and measured data are reasonable agreement. Predictions show the Particle Trajectory model is economical and it may be used for the engineering application.

Keywords: Two-phase reacting flow, Algebraic stress model combustor, Stochastic particle model, Numerical simulation

主燃孔对双旋流器燃烧室流场的影响

党新宪 赵坚行 吉洪湖

(南京航空航天大学能源与动力学院, 南京, 210016)

联系电话: 025-84892987, EMAIL: zjxzhao@nuaa.edu.cn

摘要: 本文通过试验和数值模拟的方法研究了不同主燃孔几何参数与布局对双级旋流器燃烧室内三维冷热态流场的影响。计算结果与试验数据相当吻合表明燃烧室主燃孔的几何参数和布局的变化对燃烧室的冷热态流场、出口温度及燃气成分分布有较大的影响。

关键词: 主燃孔, 双旋流器, 燃烧室, 三维冷热态流场, 试验

Experimental and Numerical Study of Flow Fields for Dual-Stage Swirler Combustor with Different Primary Hole Arrangements

DANG Xin-xian, ZHAO Jian-xing, JI Hong-hu

(College of Energy and Power Engineering ,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The three-dimensional flow fields of a dual-stages swirler gas turbine combustor with different Primary hole parameters and arrangements are investigated by experiment and numerical simulation. Calculations are in fair agreement with the experimental data. It is shown that the great influences of different primary hole parameters and arrangements on cold and reacting flows fields as well as profiles of outlet gas temperature and concentrations.

Key words: Primary hole, Dual-stage swirler, Combustor, three-dimensional flow field, Experiment

1 引言

现代歼击机飞机发动机强调轻、小、推重比大。因此重量轻、尺寸小的短环形燃烧室得到广泛应用。但由于歼击机要求发动机燃烧室稳定工作范围宽、高空起动点火联焰性能好、燃烧效率高、流阻低、点火可靠、燃烧稳定、寿命长、低污染排放和出口温度分布合理。这使得短环形燃烧室内燃烧流场的组织非常困难^[1]。

为了提高航空发动机的燃烧效率及扩大其稳定工作范围, 要求火焰筒头部具有良好的雾化特性并形成良好的气流结构。这就要求改善火焰筒头部装置的几何结构。在航空发动机环形燃烧室中, 燃烧室头部旋流器的级数从单数发展到双级、三级。其中双级旋流器是一种新型涡流器, 由于它能改善燃油雾化质量和燃烧室火焰稳定性能, 因此常被一些先进发动机燃烧室采用。双级旋流器得到了广泛应用, 其作用有两方面: 一是形成中心回流区, 实现火焰稳定; 二是提高紊流强度、改善油气混合, 提高燃烧效率^[2-5]。

发动机燃烧室主燃孔的变化对燃烧室内气流结构与流场有着很大的影响, 它不仅直接影响到火焰筒内回流区的尺寸, 而且还影响整个燃烧室的燃性能如: 出口温度和燃气浓度分布等。因此, 研究主燃孔变化对燃烧室流场的影响规律就显得非常重要。本文采