

# 驻涡燃烧室前驻体后端面冷态流场数值模拟

钟兢军, 刘世青

(大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁 大连 116026)

**摘 要:** 对中心驻体式驻涡燃烧室而言, 适当的前驻体后端面几何变形可以为驻体间驻涡提供更加良好的遮蔽条件, 有利于驻涡形成和稳定, 弱化旋涡之间干扰, 增强旋涡分布的均匀性。采用数值模拟方法在冷态条件下研究了 9 种后端面造型的流场, 详细研究驻涡腔内部的流动特性, 发现中心后凸形端面造型时流场总压损失低, 驻涡腔内旋涡稳定且分布合理、均匀, 研究结果可为设置前驻体喷射提供依据, 为组织和利用旋涡结构稳定火焰提供帮助。

**关 键 词:** 驻涡燃烧室; 前驻体后端面; 冷态流场

中图分类号: TK473.2 文献标识码: A

## 引 言

当前燃烧室设计面临的新挑战是如何进一步提高燃烧室性能、研究和采用先进燃烧室设计方法和燃烧诊断技术、减少排气污染以及使用低成本适用性强的燃料<sup>[1]</sup>。驻涡燃烧室技术(TVC)是一种独特低排放、高性能火焰稳定燃烧技术, 类似于传统旋转稳定燃烧技术, 驻涡燃烧技术也存在两个燃烧区域: 引燃点火区域和主燃烧区域<sup>[2~5]</sup>。驻涡强化来流与引燃燃料混合、燃烧区域径向扩展, 增强抵制外流场脉动能力, 在燃烧室内燃烧稳定, 且使得燃烧室整体贫燃和富燃熄火极限得到扩展、燃烧效率提高和污染排放降低, 燃烧性能优异。

旋转冲压发动机 AVC 火焰稳定器技术是在 TVC 基础改进的燃烧室技术<sup>[6~8]</sup>, 结构特点为燃烧室内沿流动方向布置前、后两驻体, 在两驻体间形成驻涡腔。气流流经两驻体时, 驻体间流体在主流粘性力作用下形成排列和锁定于两驻体间的旋涡, 这种在一定主流条件下驻涡腔内形成的回流旋涡称为驻涡<sup>[9]</sup>。通过参考国外专利及国内相关研究成果的理论分析, 认识到前驻体后端面不仅影响驻涡区的气流速度, 而且影响驻涡的分布形式和稳定性, 从而影响到燃烧的稳定性, 但相关的研究工作却鲜见于

文献。本研究对前驻体后端面 9 种变化方式进行了数值模拟, 研究最有利于驻涡燃烧室驻涡稳定的最佳前驻体后端面造型。

## 1 模型及计算条件

旋转冲压发动机所运用的驻涡燃烧室结构线性展开如图 1 所示, 同时也作为本研究所采用的物理计算模型。计算在模型结构尺寸为 100 mm×100 mm×850 mm 气流通道构成的三维计算域进行, 前驻体为圆形头部, 宽度占流道宽比为 0.65。

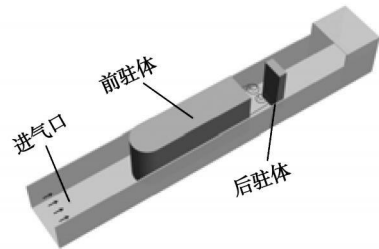


图 1 驻涡燃烧室模型

前驻体后端面选取半圆形侧翼、三角形侧翼两种后侧翼形状<sup>[6]</sup>及 C 形后端面、E 形凸形端面、内缩 C 形后端面、后端面内缩形等 9 种造型进行冷态流场的数值模拟, 9 种后端面造型结构如图 2 所示。计算网格采用分区构造的方法, 对驻涡腔和驻体前部区域加密处理, 网格总数控制于  $3.6 \times 10^5 \sim 4.2 \times 10^5$ 。计算工具选用计算流体力学商用软件 Fluent 求解控制方程为三维定常雷诺平均方程, 湍流模型选择 Realizable k- $\epsilon$  Model 采用标准壁面函数 (standard wall function)。来流条件采用压力边界条件, 来流总压为 0.633 7 MPa (折合来流速度为 185 m/s, 约 0.6 MPa), 为可压缩性均匀来流条件。气流总温为 321.6 K, 湍流度为 3.2%。出口边界也采

收稿日期: 2009-09-17 修订日期: 2010-01-12

基金项目: 国家高技术研究计划 (863) 基金资助项目 (2007AA05Z255)

作者简介: 钟兢军 (1963-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 大连海事大学教授, 博士生导师。

用压力出口条件。

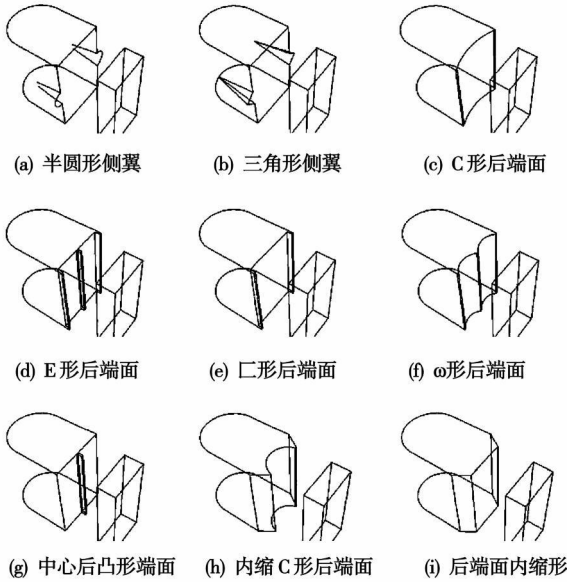


图 2 9 种前驻体后端面造型

## 2 计算结果分析

### 2.1 数值验证

采用商用软件进行数值模拟, 计算结果如图 3 所示。实验数据值为文献 [8] 的实验数据, 模拟值为本研究采用相同的模型和边界条件所得数值验证结果, 可见在  $H/D_f$  (指驻涡腔长度/驻涡腔深度) 大于 0.6 之后, 数值计算与实验数据无论在计算数值结果还是曲线趋势上, 都符合的比较好, 它们的误差不超过 5%。可以说明本研究所选用的数值计算方法及湍流等模型基本上可以满足要求。

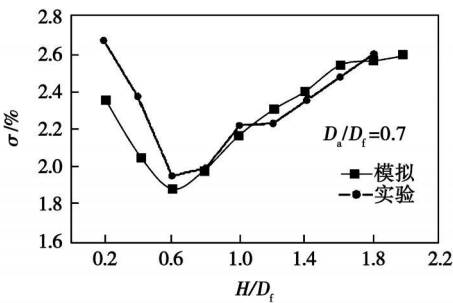


图 3 实验与计算对比

### 2.2 压力损失分析

为分析各造型对出口总压影响, 采用总压损失系数  $\sigma^*$  定义为:

$$\sigma^* = \frac{(\bar{P}_1^* - \bar{P}_2^*)}{\bar{P}_1^*} \quad (1)$$

式中:  $\bar{P}_1^*$ 、 $\bar{P}_2^*$  一进口、出口总压。

出口截面的压力损失如图 4 所示, 计算结果已进行归一化处理 (数据脱密处理方法之一, 即将结果与某数相除, 得到最大值为 1 的结果) 两种带有侧翼造型的前驻体后端面造型总压损失较其它造型高, 原因是侧翼变形使得前驻体两侧流道更为狭窄, 流动速度高, 同时侧翼增加了流动扰动, 磨擦损失加剧, 出口截面损失增加。采用后端面内缩造型, 出口截面压力损失最小, 原因是后端面进行收缩后, 流体在流过前驻体后流动增加一个过渡段, 扩压过程较为平缓地完成, 对比其余造型突扩形式减小了流动总压损失。其余几种造型出口总压损失相差不大, 主要是由于几种造型变形均处于驻涡腔内, 对主流影响不大, 故而总压损失在出口截面上相差不大。

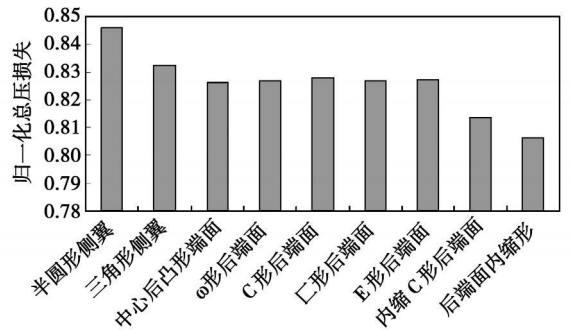


图 4 前驻体后端面造型流场出口截面总压损失

### 2.3 驻涡区流动分析

影响驻涡区燃烧稳定的主要因素有两方面, 一方面是影响化学反应速度的燃料种类及当量比等化学属性, 另一方面是驻涡腔中的流动特性。流动特性中比较重要的又有两个方面, 一是流体流动的速度大小及湍流度等速度构成, 二是速度分布所形成的流场结构。

#### 2.3.1 流动速度分析

在各种后端面造型时驻涡腔平均速度值如图 5 (a) 所示。驻涡腔平均速度以带侧翼两种后端面造型最高, 达 30~40 m/s 以 C 形后端面最低, 为 13.1 m/s E 形后端面、U 形后端面、omega 形后端面和中心后凸形端面与 C 形后端面相差不多, 为 13~15 m/s 之间, 带有收缩变形的后端面驻涡腔中平均流速较高。由此得到, 存在最佳驻体宽度范围使得驻涡腔中流速最低, 偏离此最佳宽度范围时则会引起驻涡腔流速升高。未引起驻体宽度变化的变形, 速度差异则表征各自变形增强或减弱外侧主流对驻涡腔的扰动作用。从流速看, C 形前驻体后端面造型为驻涡腔

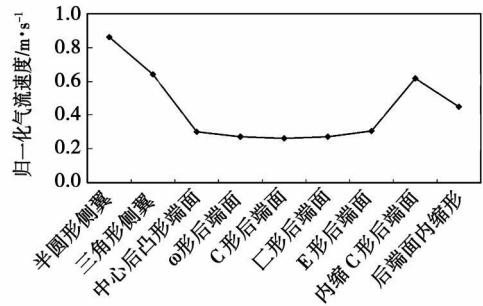
提供最稳定、受外侧主流干扰最小的工作环境; E形后端面、C形后端面、 $\omega$ 形后端面和中心后凸形端面造型次之。

湍流度分布表明, 高湍流度区域分布于驻涡腔贴近于后驻体外表面处, 对驻涡腔内流体的湍流度进行质量加权平均计算结果如图 5(b)所示。湍流度与平均速度有类似变化规律, 湍流度最大值出现在半圆形侧, 最小值出现在中心后凸形端面。低湍流度的流动最平稳, 易于形成稳定火焰驻留, 但可能影响火焰传播速度。

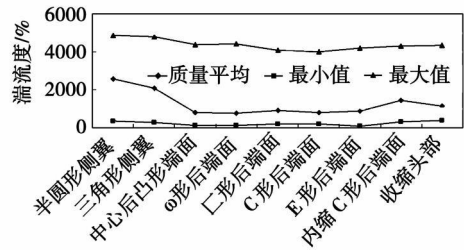
### 2.3.2 流场结构分析

单旋涡与双旋涡结构对凹腔驻涡燃烧室性能影响较大, 本研究借用凹腔驻涡燃烧室中单双涡概念进行分析<sup>[6]</sup>。凹腔中单涡是指在凹腔中形成单一旋涡, 双涡指在凹腔中形成上下排列的两个旋涡。对比驻涡燃烧室结构, 中心驻体式驻涡燃烧室驻涡腔相当于两个凹腔驻涡燃烧室凹腔反向联接构成。对中心驻体式驻涡腔, “单涡结构”指驻涡腔中截面与外侧主流间仅有一个旋涡; 用“双涡结构”指驻涡

腔中截面与外侧主流间形成两个旋涡。不同后端面造型 Z轴中截面驻涡区流线如图 6所示。



(a) 驻涡腔内气流平均速度



(b) 驻涡腔内气流湍流度

图 5 驻涡腔内气流平均速度

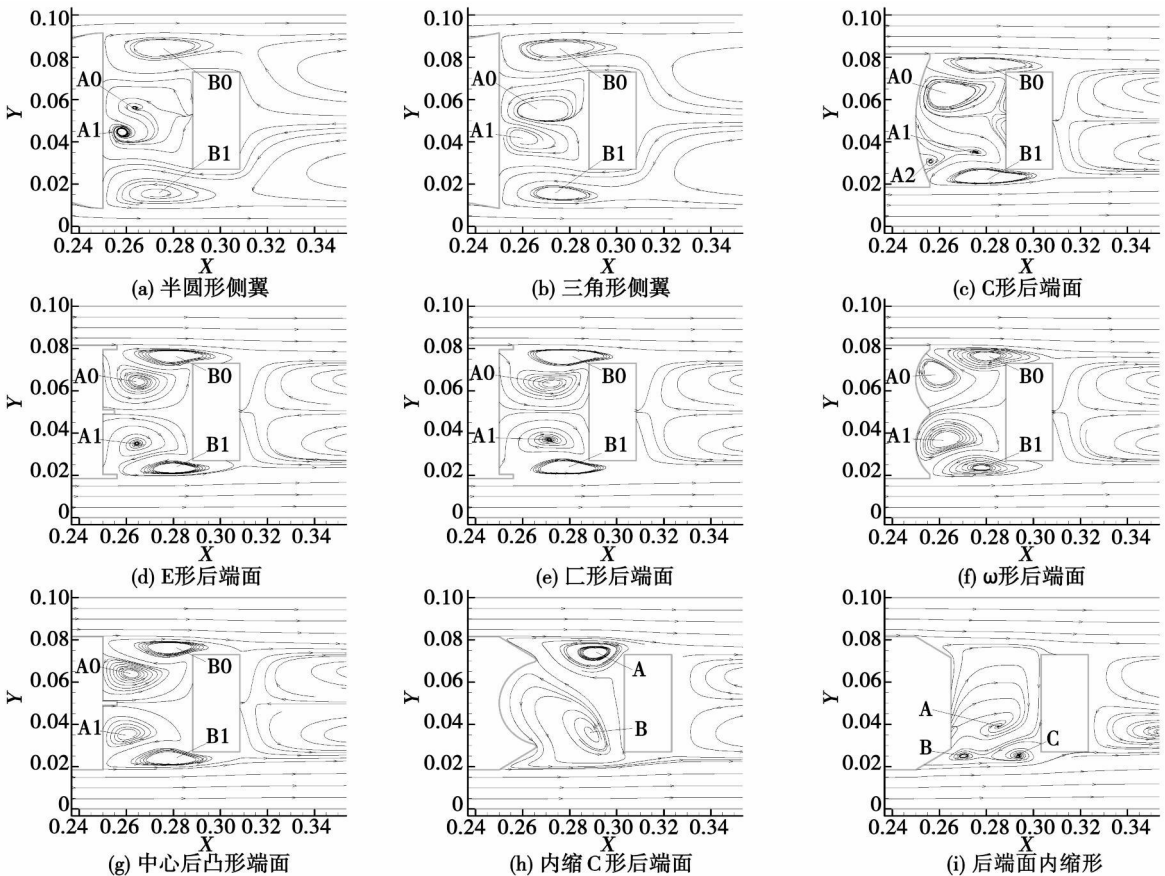


图 6 9种前驻体后端面造型流场流线图

半圆形侧翼: 驻涡腔内形成双涡结构, 旋涡  $A_0$  和  $A_1$  尺度小且分布不均匀, 旋涡影响区域占驻涡腔室空间不超过 30%,  $A_0$  涡核略偏向后驻体。外侧旋涡  $B_0$  与  $B_1$  形态、大小类似, 且流向尺度大, 如图 6(a) 所示。 $A_0$ 、 $A_1$  涡核与低压区不重合,  $A_0$  流线背离涡核, 是不稳定的;  $A_1$  旋涡外侧流线指向涡核形成稳定极限环, 内侧流线背离涡核, 是不稳定的。部分上侧流体进入驻涡腔下部, 极小部分在上侧形成旋涡  $A_0$  说明上下侧旋涡间存在相互作用, 旋涡独立性差, 这样的分布不利组织掺混, 不稳定、不均匀的旋涡分布不仅不利于驻涡腔内形成稳定驻留火焰, 而且不利向外侧主流均匀持续传热传质。

三角形侧翼: 形成两个双涡结构, 旋涡  $A_0$  和  $A_1$  几乎完全占据驻体腔室,  $A_0$  旋涡影响区域大于  $A_1$ 。 $A_0$  与  $A_1$  涡核位置有差异—— $A_0$  涡核偏向后驻体,  $A_0$  和  $A_1$  涡核与低压区重合,  $A_0$  流线指向涡核方向, 是稳定的;  $A_1$  旋涡外侧流线指向涡核形成稳定的极限环, 内侧流线背离涡核, 是不稳定的。截面上侧有部分流体通过中截面进入驻涡腔下侧, 且由于上侧流体对下侧的扰动, 使  $A_1$  旋涡压缩于驻涡腔前部。

C 形后端面: 流场结构复杂, 截面上部  $A_0$ 、 $B_0$  构成双涡结构, 但截面上下侧旋涡分布不对称。诱导涡  $B_0$ 、 $B_1$  形态和大小均匀; 旋涡  $A_0$ 、 $A_1$  和  $A_2$  分布不均匀, 旋涡  $A_0$  布满截面上侧驻涡腔, 涡核重合低压区, 流线方向背离涡核, 是不稳定的。截面下侧分布小旋涡  $A_1$  和  $A_2$  旋涡运动速度低, 旋涡强度低, 流线方向指向涡核, 但涡核与低压区不重合, 这种流动在逆压梯度下进行, 稳定性不能持久。驻涡腔上侧流体向下侧流动, 对下侧旋涡和低压区分布干扰严重。

E 形后端面: 形成清晰、对称分布的双涡结构, 旋涡  $A_0$ 、 $A_1$  占驻体腔约 60% 空间, 均匀对称。 $B_0$  和  $B_1$  形态和大小类似, 旋涡受前驻体后端面延伸部分限制, 在流动方向被压缩。 $A_0$  和  $A_1$  涡核重合于低压区; 同时旋涡发展饱满, 两旋涡相对独立, 没有流动干扰; 流线均指向旋涡中心, 它们都是稳定的。

□ 形后端面: 旋涡结构清晰, 分布均匀对称。诱导涡  $B_0$  和  $B_1$  形态和大小类似, 受前驻体后端面限制, 流动方向上被压缩。内侧旋涡  $A_0$ 、 $A_1$  上下对称, 涡核与低压区重合; 旋涡发展饱满, 旋涡之间独立。 $A_0$ 、 $A_1$  旋涡流线指向涡核, 且向低压区流动, 是稳定的。

ω 形后端面: 驻涡腔内形成两对双涡结构, 旋涡基本对称。外侧诱导涡  $B_0$ 、 $B_1$  形态和大小均匀对称; 内侧旋涡  $A_0$ 、 $A_1$  没有完全占据驻体腔室, 旋涡  $A_0$  和  $A_1$  不对称——上侧小, 下侧大;  $A_0$  流向长度上占驻涡腔 50% 左右,  $A_1$  占 70% 驻涡腔流向长度; 两涡核重合于低压区;  $A_0$  流线背离涡核, 是不稳定的;  $A_1$  流线指向涡核, 是稳定的;  $A_1$  流动速度大于  $A_0$  其旋涡强度大于  $A_0$  旋涡。部分流体自下部向驻涡腔上部流动, 对  $A_0$  旋涡进行压缩。不均匀的旋涡分布不利于火焰稳定。

中心后凸形端面: 形成对称、饱满的双涡结构, 有利于形成稳定点火源。外侧诱导涡  $B_0$  和  $B_1$  头部延伸至前驻体后端面, 旋涡流向长度为传热传质过程提供理想的空间条件; 旋涡  $A_0$  和  $A_1$  未完全占据驻体腔, 呈对称分布。所有涡核均与低压区重合, 流线指向涡核, 顺压力梯度运动增强其稳定性, 旋涡是稳定的。 $A_0$  和  $A_1$  间无流线穿过, 旋涡不存在或仅存在微弱干扰, 均匀旋涡分布有利火焰稳定。

内缩 C 形后端面: 形成两个不规则旋涡结构。上侧形成类似悬挂旋涡的旋涡 A 下侧旋涡 B 几乎占据全部驻涡腔。A B 旋涡中心均与低压区重合, 但流线方向均背离涡核, 是不稳定的。驻涡腔内形成旋涡 B 流体运动横贯驻涡腔。该旋涡结构不利于火焰稳定和火焰及热产物向外侧主流传播。

后端面内缩形: 形成不规则旋涡分布。上侧空间没有形成旋涡结构, 但存在一个大面积低压区; 驻涡腔下侧形成 3 个小范围旋涡, 只有旋涡 C 与低压区重合, 旋涡 A B C 流线方向均指向涡核, 旋涡是稳定的。流体在整个驻涡腔内形成自下向上运动的复杂流动。

综上所述, E 形、□ 形、ω 形和中心后凸形端面 4 种造型在驻涡腔形成的旋涡对称而均匀。

### 3 结 论

研究了 9 种前驻体不同后端面造型对驻涡腔内流速、旋涡分布和出口截面总压损失的影响, 通过数值模拟获得以下结论:

(1) 后端面造型变化不应偏离最佳驻体当量宽度范围, 否则不利于驻涡腔内低速区的形成和旋涡的稳定。

(2) 在驻涡腔中间位置采用物理隔断造型可以切断或减弱旋涡间干扰, 增强旋涡均匀性、稳定性。

(3) 中心后凸形端面造型在驻涡腔内形成平均

流速低且稳定和分布合理的旋涡, 燃烧室出口总压损失不高, 是所研究后端面造型中的最佳选择。

参考文献:

[ 1 ] HSU K Y, GROSS L P. Characteristics of a trapped vortex combustor [ J ]. Journal of Propulsion Power, 1998, 14(1): 57—65.  
 [ 2 ] BURRUS D L, JOHNSON A W, MROQUEMORE M, et al. Performance assessment of a prototype trapped vortex combustor concept for gas turbine application [ R ]. ASME Paper 2001—GT—0087, 2001.  
 [ 3 ] HENDRICKS R C. Experimental and computational study of trapped vortex combustor sector ring with tri-pass diffuser [ R ]. NASA/TM—2004—212507, 2004.  
 [ 4 ] 何小民, 姚 锋. 流动和油气参数对驻涡燃烧室燃烧性能的影响 [ J ]. 航空动力学报, 2006, 21(5): 810—813.

[ 5 ] KANDEBO STANLEY W. New combustor aims to boost performance, lower emissions [ J ]. Aviation Week and Space Technology, 2001, 3: 43—44.  
 [ 6 ] 樊未军, 孔昭健, 邢 菲, 等. 凹腔驻涡模型燃烧室内涡的演化发展 [ J ]. 航空动力学报, 2007, 22(6): 888—892.  
 [ 7 ] 邢 菲, 孟祥泰, 李继保, 等. 凹腔双驻涡稳焰冷态流场初步研究 [ J ]. 推进技术, 2008, 29(2): 9—12.  
 [ 8 ] 何小民, 王家骅. 驻涡火焰稳定器冷态流场特性的初步研究 [ J ]. 航空动力学报, 2002, 17(5): 567—571.  
 [ 9 ] 樊未军, 易 琪, 严 明, 等. 驻涡燃烧室凹腔双涡结构研究 [ J ]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 67—70.

(编辑 伟)

新技术、新工艺

## IM2500燃气轮机在美国海军中已使用 40年

据《Gas Turbine World》2009年9~10月号报道, 2009年标志GE的IM2500燃气轮机在美国海军使用已有40周年。

从1969年开始, 一台IM2500发动机被选择来驱动美国海军的卡拉汉号货船。

IM2500不断的升级改进, 它能跟上增加功率的要求并推动船舶推进系统的设计。最新一代IM2500+G4的输出功率为35 338 kW。比较起来, 最早型号IM2500的输出功率只有20 515 kW。

美国海军统计的IM2500总的运行时间已超过1 300万h, 平均两次撤换之间的时间对于燃气发生器为24 125 h, 对于动力涡轮为27 875 h。

到目前为止, 已有700多台IM2500发动机在美国海军175艘各种类型舰船中运行。这些舰船包括:

- “飞马座”级导弹水翼艇
- “佩里”级护卫舰
- “斯普鲁恩斯”级驱逐舰
- “基德”级驱逐舰
- “阿里伯克”级驱逐舰
- “堤康德罗加”级巡洋舰
- “T-AOE6”级高速战斗支持船
- USNS Watson
- 美国海岸警卫队巡逻艇
- “独立”级濒海战斗舰
- X艇
- LHD(直升飞机船坞登陆舰)/LHA(两栖攻击舰)

在全世界范围内, IM2500被用于30个国家海军的推进系统。目前, 总计已有2 500台IM2500系列发动机用于船用和工业应用。

(吉桂明 摘译)

驻涡燃烧室前驻体后端面冷态流场数值模拟 = Numerical Simulation of the Cold-state Flow Field on the Rear End Surface of a Front Centerbody in a Trapped Vortex Combustor [刊, 汉] / ZHONG Jing-jun, LU Shi-qing (College of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, China, Post Code: 116026) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(5). — 482 ~ 486

As far as a centerbody type trapped vortex combustor is concerned, a proper geometrical deformation on the rear end surface of the front centerbody can provide more favorable covering conditions for the trapped vortices between centerbodies, lending themselves better to forming and stabilizing the trapped vortices, weakening the interference among the vortices and enhancing the uniformity of the vortex distribution. By using a numerical simulation method, nine patterns of the flow fields formed by modeling the rear end surface were studied in the cold state. In addition, the flow characteristics inside the trapped vortex cavity were studied in detail. It has been found that when the central modeling of the convex end surface is being performed, the total pressure loss of the flow field is low and the vortices in the trapped vortex cavity become stable and rationally and uniformly distributed. The research results can provide a basis for setting up a front centerbody jet and offer assistance and support for organizing and utilizing the vortex configuration to stabilize the flames. Key words: trapped vortex combustor; rear end surface of a centerbody; cold-state flow field

汽轮机末级静叶水滴沉积规律与缝隙去湿研究 = Study of the Law Governing the Water Droplet Deposition and Wetness Removal From the Stationary Blades at the Last Stage of a Steam Turbine [刊, 汉] / TAN Rui, WANG Xin-jun, GUAN Pan-long, et al. (Turbomachinery Research Institute, Xian Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(5). — 487 ~ 490

By using software Fluent, numerically calculated was the law governing the 3-D water droplet movement and deposition in the last stationary blade cascade of a 600 MW steam turbine with the locations of the deposition of the water droplets on the stationary blades in the axial and radial direction being determined. Subsequently, an experimental study was conducted of the water removal performance of the suction from slots on the hollow blade cascade. It has been found that the water quantity deposited on the concave surface of a stationary blade accounts for 12.2% of the total water quantity at the inlet of the cascade while that deposited on the convex surface of a stationary blade occupies 1.6% of the abovementioned total water quantity. The water quantity sucked through the slots on the concave surface of a stationary blade is greater than that on the convex surface. The closer the location of the slots to the trailing edge of the stationary blade, the greater the water quantity being sucked. With an increase of the width of the slots, the water quantity sucked through the slots will first decrease and then increase. When the width of the slots is about 3.0 mm, the water quantity will reach a relatively low value. The water quantity sucked through the slots will increase with an increase of the suction pressure difference and quickly decrease with an increase of the main stream speed. Key words: steam turbine; water droplet movement and deposition; hollow stationary blade; wetness removal from slots; stationary blade in the last stage