

文章编号:1000-8055(2010)03-0654-05

舰载燃气轮机间冷器传热与流动的数值模拟

文超柱, 董 威

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 针对平直型翅片板翅式间冷器矩形通道的结构特点,建立了流动换热分析的耦合计算模型,应用计算流体力学方法对间冷器的通道流场进行了数值模拟.分析了计算区域内多个截面的温度、压力、局部传热系数等参数的分布图形和变化趋势,并考察了不同工况下间冷器的换热性能和压力损失.所得结论可为舰载燃气轮机间冷器的设计与优化提供有益的参考.

关 键 词: 间冷器; 舰载燃气轮机; 板翅式换热器; 耦合计算

中图分类号: TK124

文献标志码: A

Numerical simulation of heat transfer and fluid flow on marine gas turbine intercooler

WEN Chao-zhu, DONG Wei

(School of Mechanical Engineering,

Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: On the base of structure features of plain fin rectangular channels, a coupled calculation model of flow field and temperature field was established. One computational fluid dynamics (CFD) program had been used for the simulation on the fluid flow and heat transfer in the physical model. Graphics and trends of temperature, pressure, velocity and local heat transfer coefficients of multiple cross-sections were given and analysed. The performance of intercooling heat exchanger under different loads had been studied. The results could be a useful reference for the optimum design of marine gas turbine intercooling heat exchanger.

Key words: intercooler; marine gas turbine; plate-fin heat exchanger;
coupled calculation

近年来,随着航空发动机技术的发展,航空发动机经改型在非航空领域得到广泛应用.在舰船上,航空发动机与柴油机结合而组成的战舰联合动力装置,明显提高了战舰的动力性能,且其应用前景很广阔^[1].采用间冷回热循环的燃气轮机较简单循环燃气轮机有很多优点:在设计工况下,间冷回热循环的功率更大、热效率更高,从而,在典型的运行工况下可以减少 25% 甚至更多的耗油量;同时在低工况下,采用间冷回热循环的燃气轮机改善了简单循环经济性很差的特点;采用间冷回热循环的燃气轮机在运行时可靠性更强、噪声

更低而且排气的红外辐射更少.因此燃气轮机间冷回热循环成为近年来竞相开展的研究课题.间冷回热循环中,间冷器位于低压压气机和高压压气机之间,通过降低进入高压压气机气流的温度,减少了高压压气机的负荷,提高了燃气轮机的输出功率,因此间冷器是间冷回热循环中很重要的部件^[2].

间冷循环燃气轮机的设计中,要求间冷器尽量紧凑,这主要是由间冷器所处的位置决定的,加上间冷器流道复杂,因此开展间冷器的结构优化设计分析非常重要.在诸多换热器中,板翅式换热

收稿日期:2009-01-13; 修订日期:2009-05-19

作者简介:文超柱(1973-),男,湖北荆州人,硕士生,主要从事舰载燃气轮机间冷器的设计与研究.

器由于其结构紧凑、轻巧、传热强度很高等特点,近些年来被广泛应用到航空航天领域,也成为舰载燃气轮机间冷器的首选换热器形式。板翅式换热器的不断发展,使得可供使用的多种翅形数据很多,但设计计算时所需要的拟合关联式却很少。随着计算流体力学和计算技术的日益发展,借助计算流体力学(CFD)与模拟测试来研究翅片流动和传热的本质,从而建立翅形流动换热数据库,其意义十分重要^[3]。由于我国对舰载燃气轮机的研制起步较晚,目前对舰载燃机间冷器的设计分析,尤其是间冷器流道的流动换热分析研究很少。板翅式间冷器的内部结构比较复杂,加上内部通道微小,在目前的计算条件下进行整个换热器内部流动换热的计算非常困难^[4],但可以利用板翅式换热器冷热流体通道对称性的特点,借助部分通道的流动换热模拟计算,来分析整个换热器内的流动换热特点,从而减少计算量。本文借助CFD开展间冷器内部微小流道的数值模拟计算分析,研究板翅式间冷器微小通道内冷热流体流场以及各种参数的分布特点,希望能够为改进间冷器的结构,优化间冷器板翅参数提供参考依据。

1 物理模型及求解

板翅式间冷器内部结构通道非常细小,如果对整个间冷器内部流动换热进行建模并进行计算分析,计算工作量将非常巨大,目前的计算条件还无法承受。不过鉴于板翅式间冷器流体通道和翅片结构的重复和对称性,可以针对较为典型的流动单元来进行流动和传热分析,这样只需要利用很少的计算机资源,其计算结果就可以反映出流场内各参数的变化规律。图1示出了间冷器芯体的基本板束结构,图中方框标示出了本文CFD模拟计算单元。所计算的板翅式间冷器采用逆流单叠布置,气侧为低压压气机出口的空气,液侧为乙二醇水溶液。低压压气机出口的空气通过间冷器换热后温度下降,气体的热量由乙二醇水溶液带走。计算用的间冷器模型冷热流体的流动长度350 mm,气侧板间距6.2 mm,液侧板间距3 mm,气液两侧翅片的间距均为1.4 mm,翅片厚度0.2 mm,隔板厚度0.5 mm。

舰载燃气轮机间冷器为了保证芯体内流体充分换热,一般低压压气机出口的气流首先通过扩压流动减速,经过间冷器换热后,再经过收敛通道加速进入高压压气机,因此间冷器入口处的气体流动速度不是很大,流动马赫数一般在0.1~

0.15左右,可以将间冷器内的气体流动当作不可压流体来处理。计算模型中间冷器流动通道的气体、液体和固体区域统一求解,采用流固耦合一体化的计算方法分析间冷器通道内的流动换热情况。对于气体区域,采用理想气体模型,控制方程采用三维定常Navier-Stokes(N-S)方程组,湍流模型采用标准的 $k-\varepsilon$ 双方程模型,采用分离变量法隐式求解,压力和速度耦合采用Simple算法,动量和能量方程的计算格式选用二阶迎风格式。液体区域的控制方程、求解方法和气体区域一致。由于固体区域的密度分布在空间上不变,故不必求解连续方程和运动方程,只需要求解能量方程,而流体和固体之间的信息传递则通过内部计算来直接实现^[5]。数值模拟计算采用Fluent软件。

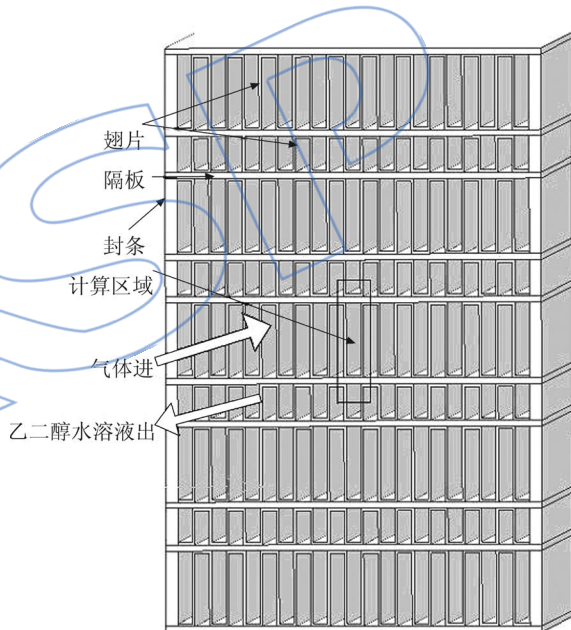


图1 间冷器芯体基本板束结构

Fig. 1 Basic structure of plate-fin heat exchanger

换热器运行时,考虑到气体沿流动方向的温差变化较大,空气和乙二醇水溶液的比热容、导热系数随温度的变化通过线性插值来得到,而黏性系数则由Sutherland公式计算得到。

间冷器气侧和液侧的通道截面都很小,本文计算中采用的是均匀网格,通过网格独立性计算,最后选用网格总数为1 213 165个的模型进行间冷器通道流场的计算分析,通道截面计算网格如图2所示。

气侧和液侧的流动参数参照典型的中等功率等级的舰载燃气轮机设计工况下的使用条件。计算分析时,气侧采用的是压力入口边界条件,给定

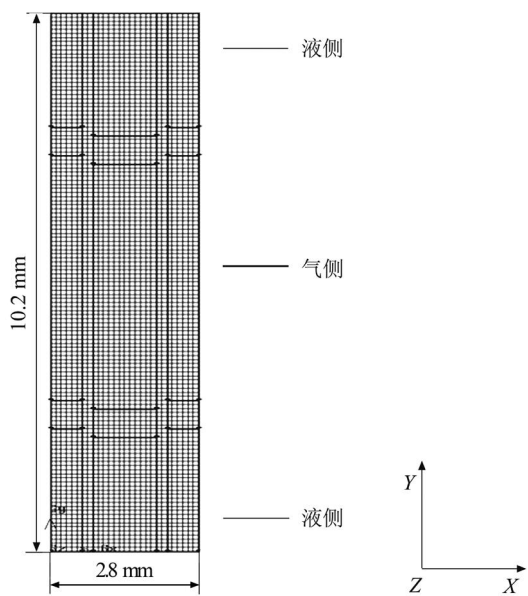


图 2 计算网格

Fig. 2 Computation grid

来流总压 304 792 Pa, 总温 429 K; 液侧采用的是速度入口边界条件, 液侧入口温度 293 K. 气液两侧都采用了压力出口边界条件, 给定总压、总温, 同时给定气侧和液侧的目标流量. 计算区域的上下左右 4 个面采用对称面边界条件, 这样就表示在区域的外部还有同样的结构单元. 在耦合一体化计算中, 流体和翅片以及隔板固体交界面采用的是耦合边界条件. 所选的计算区域内, 气侧目标质量流量设为 1.4 g/s, 液侧目标质量流量为 3.8 g/s.

2 计算结果及分析

燃气轮机间冷器出口气流温度的均匀性对于高压压气机性能的影响比较大, 间冷器设计程序只能给出间冷器出口的气流平均温度, 无法了解间冷器出口气流的温度分布情况. 借助 CFD 数值模拟, 可以得到间冷器气体流动内温度沿流程的变化情况以及气流的出口温度分布, 这样可以借助 CFD 计算结果改善间冷器出口至高压压气机收敛流道的设计, 一方面降低间冷器的压力损失, 一方面提高间冷器的气流出口温度均匀性. 间冷器设计中主要关心的是气侧流动参数的变化, 下面的分析主要给出气侧温度、压力等参数的计算结果.

图 3 给出了间冷器中间通道截面 ($X = 1.4\text{ mm}$) 沿流道的液侧、壁面、气侧温度变化情况, $Z = 0\text{ mm}$ 为气体入口, 液体出口; $Z = 350\text{ mm}$

为气体出口, 液体入口. 图 4 给出了间冷器通道气侧沿流程的压力变化情况.

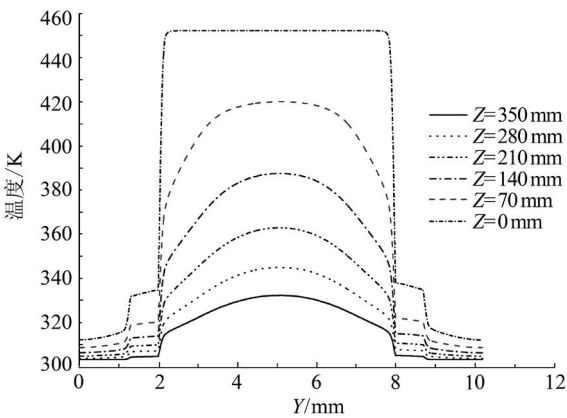


图 3 流程各截面温度变化图

($X = 1.4\text{ mm}$)

Fig. 3 Diagram of temperature trends

($X = 1.4\text{ mm}$)

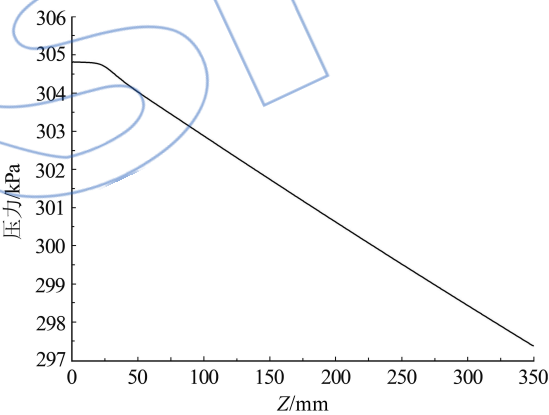


图 4 气侧气体压力随流程变化图

Fig. 4 Air side pressure distribution

图 5 和图 6 给出了气侧出口截面的温度分布和压力分布. 在计算条件下, 气侧出口处的温度和总压采用质量平均得到气侧出口平均温度为 311.6 K, 气侧出口平均总压为 297 038 Pa, 由此得到间冷器的总压损失为 2.54%. 目前采用 CFD 对间冷通道流动换热进行模拟分析的研究工作开展的不多, 有关板翅式间冷器的实验结果就更少了, 因此本文把采用板翅式换热器工程设计方法^[6-7]得到的设计结果与 CFD 计算结果作个比较. 同样的间冷器结构和流动参数条件下, 采用板翅式换热器工程设计方法得到的气侧出口温度为 313.2 K, 气侧出口总压损失为 3.06%^[8]. CFD 计算模拟分析得到的计算结果与传统的工程设计方

法设计结果吻合很好,可以认为采用 CFD 计算分析板翅式间冷器的流动换热是可行的,这样就可以借助 CFD 计算软件来研究板翅式间冷器内部翅片流动和传热的本质,并建立翅形流动换热数据库,优化间冷器的结构设计,同时 CFD 软件能够给出气侧出口的温度分布,对于分析和设计间冷器至高压压气机的气流收敛通道,改善高压压气机进口气流的温度均匀性具有十分重要的意义.

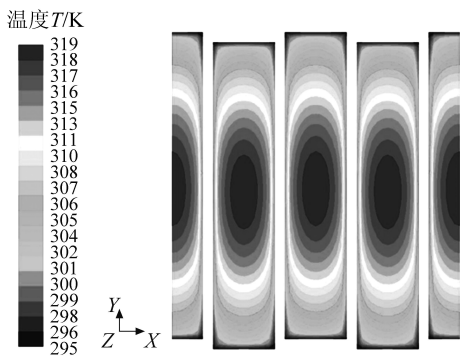


图 5 气侧出口截面的温度分布图
($Z = 350\text{ mm}$)

Fig. 5 Outlet temperature contours of air side
($Z = 350\text{ mm}$)

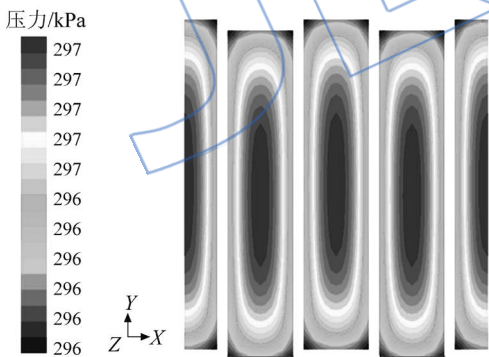


图 6 气侧出口截面的压力分布图
($Z = 350\text{ mm}$)

Fig. 6 Outlet pressure contours of air side
($Z = 350\text{ mm}$)

图 7 给出了间冷器中间通道截面沿流程气侧和液侧的表面热流密度分布.气侧进口处由于气体温度比较高,热流密度比较大,随着气体温度的逐渐降低,气侧和液侧的表面热流密度都逐渐下降.

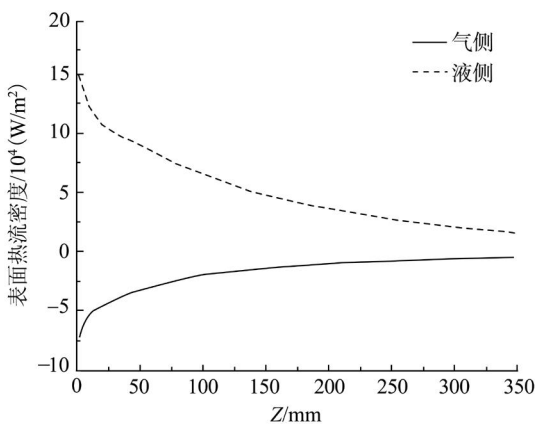


图 7 沿流程局部表面热流密度 ($X = 1.4\text{ mm}$)

Fig. 7 Local surface heat flux ($X = 1.4\text{ mm}$)

3 结 论

本文对平直翅片板翅式间冷器芯体内部建立了数学模型,应用 CFD 软件对芯体内的微小通道的传热和流动过程进行了数值模拟,并分析了一些典型截面上的温度、压力和局部表面热流密度等参数的分布情况.比较了传统板翅式换热器设计方法和 CFD 数值模拟结果,两者在间冷器出口处所得到平均温度和总压结果吻合很好,可以认为采用 CFD 计算分析板翅式间冷器的流动换热是可行的.借助 CFD 计算软件来研究板翅式间冷器内部翅片流动和传热的本质,并建立翅形流动换热数据库,优化间冷器的结构设计是可行的.可以看出,CFD 数值模拟能较为直观地反映了间冷器内部流场的流动细节,CFD 数值模拟所给出的气侧出口温度分布,对于设计间冷器出口的收敛通道,以及改善高压压气机进口气流的温度均匀性都具有指导意义.由此可见,采用 CFD 数值模拟用于间冷器的流场分析,能够为舰载燃气轮机间冷器的设计提供一定的理论依据,指导间冷器的设计和优化,从而减少实验研究费用和缩短间冷器的研制周期.

参考文献:

[1] 张方伟,张会生,苏明.中冷回热循环燃气轮机技术[J].船舶工程,2004,26(2):7-9.
ZHANG Fangwei, ZHANG Huisheng, SU Ming. On the inter-cooled recuperated gas turbine technology[J]. Ship Engineering, 2004, 26(2):7-9. (in Chinese)
[2] Lieutenant S. Integration of the WR-21 intercooled recuperated gas turbine into the royal navy type 45 destroyer

- [R]. ASME Turbo. Expo. , 2001-GT-0531 ,2001.
- [3] 凌祥,涂善东,陆卫权. 板翅式换热器的研究与应用进展[J]. 石油机械,2000,28(5):54-58.
- LING Xiang, TU Shandong, LU Wei-quan. Advances in development and application of plate-fin heat exchangers [J]. Petroleum Machinery, 2000,28(5):54-58. (in Chinese)
- [4] 祝银海,厉彦忠. 板翅式换热器翅片通道中流体流动与传热的计算流体力学模拟[J]. 化工学报,2006,57(5):1102-1106.
- ZHU Yin-hai, LI Yan-zhong. CFD simulation of fluid flow and heat transfer in channels of plate-fin heat exchangers [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2006, 57(5):1102-1106. (in Chinese)
- [5] Sondak D L, Dorney D J. Simulation of coupled unsteady fluid dynamics and conduction heat transfer in a turbine stage[R]. AIAA 99-2521,1999.
- [6] 余建祖. 换热器原理与设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2006.
- YU Jianzu. Principle and design of heat exchangers[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press,2006. (in Chinese)
- [7] 凯斯 W M. 紧凑式热交换器[M]. 北京:科学出版社,1997.
- Kays W M. Compact heat exchangers[M]. Beijing: Science Press, 1997. (in Chinese)
- [8] 文超柱. 舰载燃气轮机间冷器的设计与研究[D]. 上海:上海交通大学,2009.
- WEN Chao-zhu. Design and study on intercooling heat exchanger of marine gas turbine [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University,2009. (in Chinese)