

空气导管对飞机密闭空间传热流动的影响

施红 蒋彦龙 钟伟 彭莹 蔡玉飞

(南京航空航天大学航空宇航学院,南京,210016)

摘要:在分析高温高压空气导管作用下飞机货舱三角区内的空气传热和流动机制的基础上,采用数值计算方法对舱内空气的导热-辐射-对流耦合换热问题进行研究,考察了空气导管布置位置、导管管径和辐射对传热流动特性的影响。研究表明:舱内空气传热和流动受空气导管在垂直方向上的位置变化影响较大;当导管布置位置在水平方向上变化时,仅对温度场影响较大,而对流动强度的影响较小;随着导管直径的增加,空气导管与舱内空气的总换热量增加,舱内各处空气的温度也随之升高,相应的自然对流强度减弱;辐射传热会减小空气导管与货舱三角区壁面之间的换热温差,增加总的换热量,并且削弱自然对流的强度。

关键词:温度场和流场;数值模拟;空气导管;飞机

中图分类号:V229.5

文献标识码:A

文章编号:1005-2615(2012)03-0313-07

Effect of Bleed Air Ducts on Flow and Heat Transfer in Aircraft Enclosed Space

Shi Hong, Jiang Yanlong, Zhong Wei, Peng Ying, Cai Yufei

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Based on the analysis of the heat transfer and flow mechanism of cabin air outside the high temperature pneumatic duct, a numerical simulation is conducted to solve the complex heat transfer problem with combined convection, conduction and radiation. The influence of factors, such as the duct position, the duct diameter and the radiation heat transfer on the temperature and flow distribution are investigated. The results show that the duct with up and down locations has a dramatic effect on the thermal and flow performance while the duct with left and right locations has strong effect on the thermal behaviors and little effect on the flow intensity. The total heat transfer and the temperature of the cabin air increase with the increasing diameter while the flow intensity decreases with the increasing diameter. The radiation heat transfer decreases the difference between the walls and the flow intensity of the cabin air while it increases the total heat transfer.

Key words: flow field and temperature field; numerical simulation; air duct; aircraft

大型客机空气管理系统主要包括引气、座舱压力和温度调节、空气分配、发动机和机翼防冰等子系统,各系统通过空气导管进行交联。高温高压空气导管管内流动的是高温气体,并穿过机翼、发动机吊挂、机身等多个区域,空气导管所在舱内区域温度过高或分布不合理,不仅给导管外围设备的安

全工作带来极大隐患,也将给相邻系统增加额外的热负荷,影响其安全性和可靠性^[1]。故有必要在设计阶段对高温高压空气导管管外的温度场进行数值模拟,从而为该区域内的管路布置、探测系统布置、其他设备布置及其性能要求提供理论依据。空气导管内的高温气体通过对流换热将热量传递给

导管,导管通过绝热层的导热、绝热层外边界与舱内空气的对流换热以及绝热层外边界与舱壁的辐射换热再将热量传递给舱内空气和舱壁,最后通过舱壁与周围环境的热交换将热量传递给环境。因此上述传热流动现象可以抽象为密闭空腔内的导热、自然对流换热以及辐射换热的耦合问题。该问题吸引了许多学者进行研究^[2-6]。陶文铨等^[7]提出了一种简易可行的处理空气导热与四周壁面的辐射换热联合作用的数值计算方法,研究表明空气间隙的导热和辐射属于同一量级。EISherbiny等^[8]人通过大量的实验分析,证实了壁面的导热和辐射都对自然对流产生很大的影响。Larson和Viskanta^[9]模拟了具有高温热源的二维封闭方腔内的自然对流,证实了辐射换热几乎占整个换热量的一半。上述研究表明热边界和几何构型对密闭空间的自然对流和换热有很大的影响。但是大多数的研究工作都是针对矩形空腔、方形空腔和圆形空腔,在定壁温和绝热条件下进行数值模拟的^[10-13],然而空气导管外封闭空间的热边界条件相对比较复杂,一般为对流和导热耦合边界条件。同时封闭腔由于安装空间等限制,所在区域形状并非规则的几何构型,这些都将影响流动和换热特性。本文以实际工程背景下飞机高温高压空气导管所在货舱三角区为研究对象,建立流动和换热数学模型,获得导管的布置位置、导管的分布情况,同时考察导管的布置位置、导管的管径和热辐射对流动换热特性的影响,该研究作为飞机空气导管布置和优化提供参考依据。

1 基本模型和数学描述

1.1 物理模型

本文研究的空气导管布置在货舱三角区中,由于导管所在的货舱三角区纵向相对较长,因此文中忽略其纵向的换热对管外温度场和流场的影响,重点研究空气导管的二维温度场和流场。货舱三角区中的导管示意图如图1所示,导管直径为76.2 mm,导管外侧壁面的温度为260℃;空气导管外敷设12.7 mm的绝热层,绝热层的导热系数为0.04 W/(m·K);腔体左侧为飞机蒙皮,考虑绝热以后腔体左壁面与外界大气的等效对流换热系数为1.056 W/(m²·K),舱外温度为55℃;腔体右侧为三角区与货舱的隔板,右壁面对货舱的等效对流换热系数为20 W/(m²·K),货舱内的温度为35℃;腔体上方为三角区和座舱之间的地板,考虑绝热措施以后的上壁面对座舱的等效对流换热系数为1.56 W/(m²·K),座舱内的温度为35℃。因此上

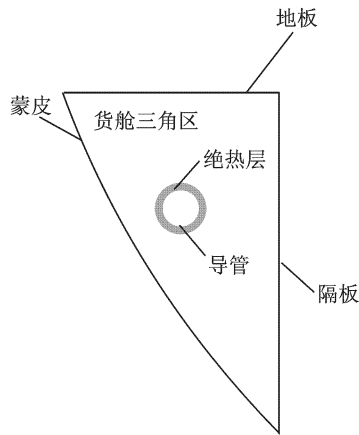


图1 货舱三角区中导管示意图

述物理问题可描述为:含定温圆管密闭腔中自然对流、导热和辐射耦合换热的问题。

1.2 控制方程

密闭腔内的流体为空气,假设密闭腔内的流体为牛顿流体且不可压缩,流动为层流流动,不考虑粘性加热的影响,二维密闭空间的控制方程组为^[12]:

连续性方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

X方向动量方程

$$\frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g\beta(T - T_r)\cos\phi + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

Y方向动量方程

$$\frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + g\beta(T - T_r)\sin\phi + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

能量方程

$$\frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

式中: u 和 v 分别表示沿着 x 和 y 方向的速度; p 表示流体的有效压力; ρ 和 T 分别表示流体的密度和温度; T_r 为参考温度; ν 和 α 分别表示流体的运动粘度和热扩散率; g 为重力加速度; β 为热膨胀系数; ϕ 表示重力加速度和参考坐标系之间的夹角。

对上述方程采用“QUICK”格式对方程进行离散,压力速度耦合采用SIMPLE算法。

1.3 辐射换热量

将舱内空气视为热辐射透明体,则对于被透热介质隔开的多表面系统,可以采用网络法^[14]计算

壁面的辐射换热。参与辐射的表面主要有:腔体的上表面,左侧壁面,右侧壁面以及绝热层的外表面,对于参与辐射的表面系统,被流体单元网格在边界上划分为有限多个表面单元,如图2所示,用每个单元的中点温度表示该单元的温度。

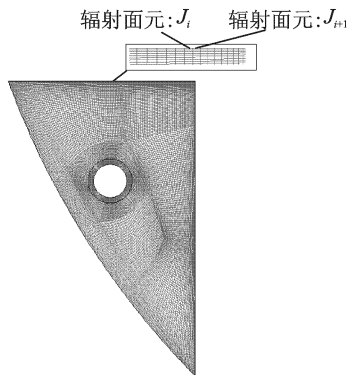


图2 腔体网格图

则参与表面辐射的第*i*个表面的有效辐射量 J_i 可以表示为

$$J_i = \varepsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \varepsilon_i) \sum_{j=1}^N J_j X_{i,j} \quad (5)$$

式中: ε_i 为第*i*个面单元的发射率,假设所有参与辐射的表面的发射率为1; σ 为Stefan-Boltzmann常数; $X_{i,j}$ 为第*i*个面单元到第*j*个面单元的辐射角系数; N 为参与辐射面单元的总数。

获得有效辐射换热热量后,则第*i*个面单元的净辐射热流量 Q_{ri} 为

$$Q_{ri} = \sum_{j=1}^N (J_i - J_j) X_{i,j} \quad (6)$$

1.4 耦合边界处理

对于有辐射影响的耦合换热问题,数值计算采用附加源项的方法处理。根据产生辐射换热的固体壁面所在的位置,辐射对对流换热的影响可以分为两种情况:(1)固体辐射表面处于求解区域的内部,这时固体与流体的分界面同时存在导热、对流和辐射耦合问题;(2)固体壁面为求解区域的边界,辐射换热为对流和辐射耦合问题。本文中在绝热层表面的耦合边界为第一种情况,三角区的3个壁面为第二种情况。边界面上热流密度连续性公式如下

对于绝热层外表面上有

$$-\lambda_s \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_s = -\lambda_f \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_f + q_r \quad (7)$$

对于三角区的3个壁面则为

$$q_0 = -\lambda_f \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_f + q_r = h(t_e - t_w) \quad (8)$$

式中: λ_s 为绝热层的导热系数; λ_f 为空气的导热系

数; q_r 为辐射换热热量; q_0 为壁面的换热量; t_e 环境温度; t_w 壁面温度。

2 数值结果与分析

2.1 程序验证

采用本文的数值计算方法对文献[3]中的含方形障碍物方腔内热壁面的平均 Nu 数随角度 ϕ 的变化进行了计算分析(瑞利数 $Ra = 10^5$,导热系数为0.2)。结果比较如图3所示,可见使用本文中的计算方法和计算程序可获得和文献中基本一致的计算结果,表明此方法和程序的可靠性。

本文对网格独立性进行了考核,对壁面和绝热层外表面进行加密,共考查了4组网格,网格数分别为:6 228,10 276,18 996,25 218。在上述网格数下导管的总换热量分别为:106.44,109.06,109.43和109.52 W。当网格数增加到18 996时,与网格数25 218的计算误差仅有0.08%,因此本文采用的网格数为18 996。

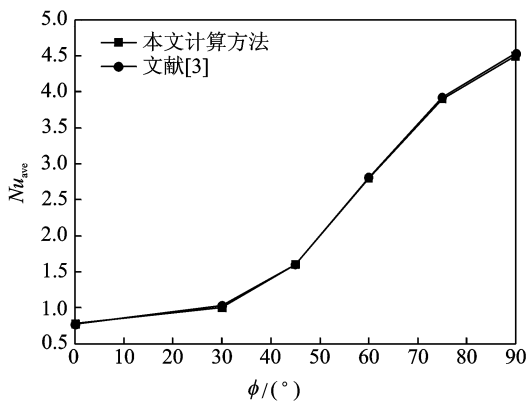


图3 热壁面的平均 Nu 数随 ϕ 的变化

2.2 计算结果

空气导管的圆心距离密闭腔上表面216 mm,距离密闭腔右表面196 mm。密闭腔内的流场和温度场分布见图4,5。

由图4和图5可知,货舱三角区中主要的流动现象发生在绝热层外表面以及壁面附近。由于右壁面跟外界的对流换热系数较大,因此右壁面处的换热较上壁面和左壁面强烈。绝热层外表面的温度大于舱内空气的温度,因此绝热层外表面附近的空气被绝热层外表面加热,加热后的空气由于密度减小向上流动,受上壁面阻挡后分别向两侧壁面流动,形成导管与左壁面的逆时针漩涡以及导管与右壁面的顺时针漩涡;而导管的下方主要是冷气体,因此该处的空气自然对流较弱,主要以导热为主,其温度梯度线基本成水平往下减少。

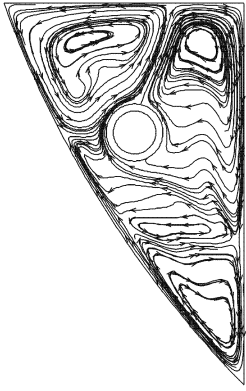


图4 三角区中的流线分布图

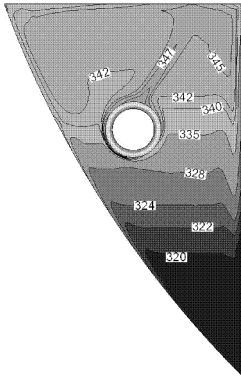


图5 三角区中的温度分布图

2.3 影响因素分析

空气导管外的温度场和流场分布将受到绝热层厚度、空气导管位置、导管直径等因素的影响。本文以下主要考察导管布置位置和导管直径变化以及热辐射对温度场和流场的影响。以图5中导管的

圆心为中心进行偏移,水平向右为正 X 方向,垂直向上为正 Y 方向。不偏移时的位置为Middle,正 X 的位置为Right,负 X 的位置为Left,正 Y 的位置为Top,负 Y 的位置为Bottom。

2.3.1 导管布置位置

图6给出了三角区内空气导管位置变化时的温度场和流函数分布图。由图6(a)可知,当导管向上布置时,三角区上壁面附近的空气温度较其他布置形式的高,三角区上半部分顺时针和逆时针漩涡不断缩小,其流函数的最大值较其他几种布置方式最小,说明其自然对流现象最弱。由图6(b)可知,当导管向下布置时,热流体向上运动过程中不断的与周围气体发生热交换,因此温度分布较向上布置时更均匀且发生热交换的空间更大。同时其流线图中顺时针和逆时针漩涡都不断扩大,且其流函数的最大值较其他几种布置方式最大,说明其自然流动现象最剧烈。由图6(c)可知,当导管向左壁面靠近时,左壁面和导管之间的空气温度梯度变化增大,流线图中逆时针漩涡不断缩小顺时针漩涡不断增大。由图6(d)可知,当导管向右布置时,热流体在上升过程中向右壁面倾斜的角度越大,导管与右壁面间空气的温度变化梯度越大,而导管与左壁面间的空气温度分布相对较均匀。流线图中逆时针漩涡不断增大顺时针漩涡不断缩小。同时从流函数的最大值来看,导管向左布置和向右布置其数值变化不大,说明导管向左和向右对自然对流强度的影响较小。

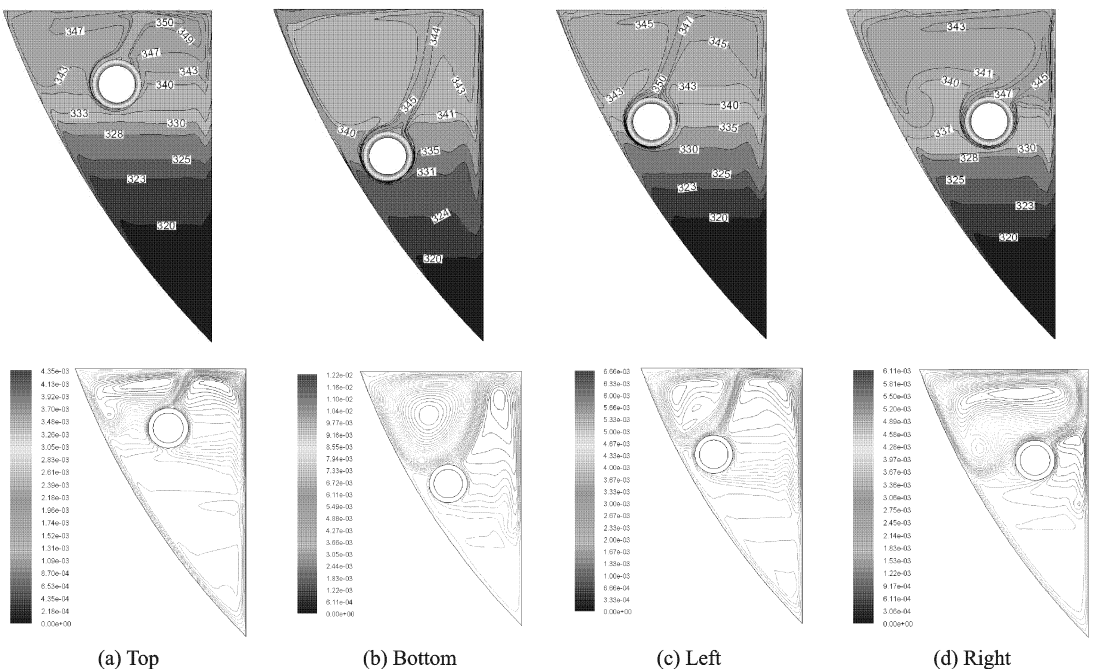


图6 不同位置下三角区内空气温度和流函数分布图

图7为舱内总换热量及密闭腔体上壁面平均温度随Y轴偏移距离的变化图。由图7可知,导管越往上布置三角区上壁面平均温度会增加,由于上壁面是三角区与座舱的隔板,上壁面温度越高,因而会增加对座舱的热负荷。同时,导管越往下布置,舱内总的换热量会增加,因此在导管布置设计时,应充分考虑导管周围设备与导管的距离、对温度的敏感度、三角区上壁面的温度、总换热量等因素优化设计。对于本文中给出的结构,在距离图5中管道圆心正上方18 mm处能获得换热量和上表面温度的交叉点,即为优化位置。

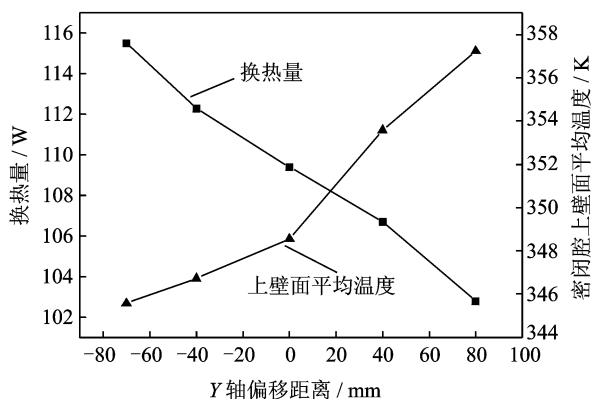


图7 总换热量和密闭腔体上壁面平均温度随着Y轴偏移距离的变化

2.3.2 导管直径

为了进一步考察导管的管径变化对三角区管外舱内空气传热流动特性的影响,分别计算导管直

径为50.8,63.6,76.2和88.8 mm时三角区内舱内空气的温度场和流场分布,计算结果如图8所示。

图8为在导管位置不变而管径变化时三角区内温度场和流场的分布图。由图可知,随着管道半径的增加,导管与舱内空气的换热面积增大,导管传递到舱内空气的总热量也增大,三角区内各处流体的温度也逐渐升高。同时由流函数的最大值可知,随着导管半径的增加,发生自然对流的空间相对减小,自然对流的强度减弱。

由图9可知,随着导管直径的增加,货舱三角区左舱壁(Cabin-wallout)、右舱壁(Cabin-wallinner)的平均温度变化幅度相对较小。货舱三角区上壁面(Floor-wall)的平均温度和舱内空气的平均(Air-average)温度变化趋势一致,随着导管管径的增加温度逐渐升高,温度变化约为10 K左右。绝热层外表面(Insul-wall)的平均温度随着导管管径的增加变化不稳定,其主要原因是:导管管径的增大虽然增加了高温空气导管与绝热层的换热表面积,但是由于三角区空间有限,当导管管径变化时会使得导管外自然对流空间减小,故对导管绝热层外表面的换热能力并非随着管径增大而线性增强。

2.3.3 热辐射

密闭空间内壁面温度分布的不均匀必然会导致空间内的辐射换热,当密闭空间内的自然对流不是很强烈时,辐射换热所占据的份额是不能忽视的。以下为不考虑辐射换热和考虑辐射换热的计算结果。

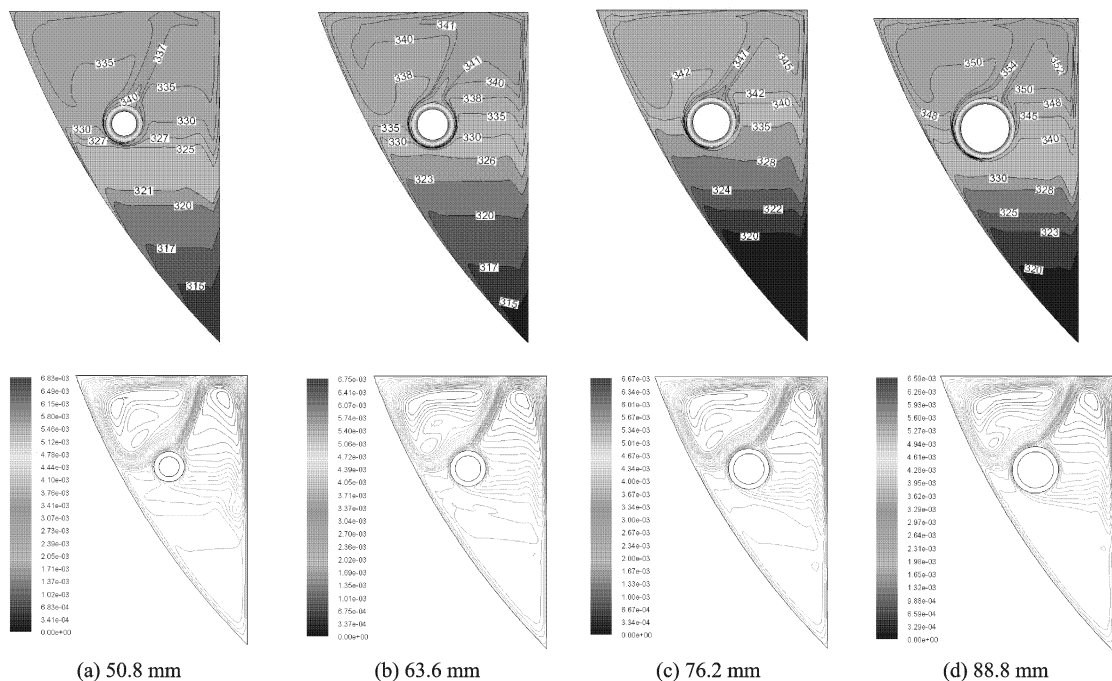


图8 不同导管直径下三角区内空气温度和流函数分布图

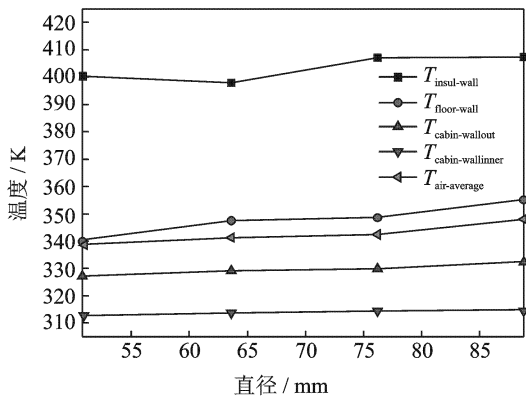


图9 温度参数随导管管径变化曲线

图10为不考虑辐射和考虑辐射换热影响时的温度分布和流函数分布图。由图10中空气温度分布图对比可知,在考虑辐射换热时,三角区上半部分的空气温度相对降低,而三角区下半部分的空气温度相对升高。由图10中流函数分布图对比可知,辐射换热削弱了自然对流的强度。

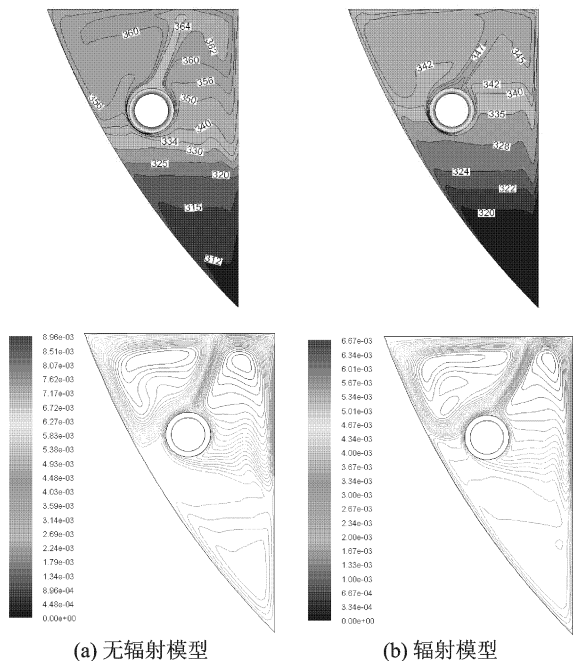


图10 无辐射模型和辐射模型下三角区内空气温度和流函数分布图

由表1可知,考虑辐射换热时,绝热层外表面和三角区的上壁面温度降低,而三角区左右两侧的温度变化不大。由于辐射换热,导管对舱内空气的换热量增加,并且从换热量的值可以看出辐射所占的换热量的比例相对较大。从计算误差的数值来看,不考虑辐射换热可使得绝热层外表面温度的计算误差达到11.88%,而换热量的误差达到25.54%。

表1 考虑辐射和不考虑辐射时传热特性参数变化

传热特性参数	不考虑辐射	考虑辐射	误差/%
$T_{cabin-wallinner}/K$	314.2	317.5	-1.04
$T_{cabin-wallout}/K$	329.7	329.6	0.04
$T_{floor-wall}/K$	348.5	335.8	3.79
$T_{insul-wall}/K$	407.1	363.8	11.88
Q/W	109.4	146.9	-25.54

由表2和表3所知,辐射换热不仅降低了绝热层外表面的温度,同时还减少了表面之间的温差以及不同布置方式所带来的传热特性的差异。因此,在本文所述的工程背景下,空气导管外绝热层与壁面的辐射换热是不能忽略的。

表2 不考虑辐射换热时不同导管布置方式下传热特性参数变化

传热特性参数	Top	Bottom	Middle	Left	Right
$T_{cabin-wallinner}/K$	313.4	314.7	314.3	314.1	314.1
$T_{cabin-wallout}/K$	328.9	331.7	329.8	331.4	329.7
$T_{floor-wall}/K$	357.2	345.6	348.6	351.9	343.1
$T_{insul-wall}/K$	414.7	400.1	407.1	405.3	412.0
Q/W	102.8	115.5	109.4	111.1	104.1

表3 考虑辐射换热时不同导管布置方式下传热特性参数变化

传热特性参数	Top	Bottom	Middle	Left	Right
$T_{cabin-wallinner}/K$	317.3	317.6	317.5	317.5	317.5
$T_{cabin-wallout}/K$	329.3	330.2	329.6	328.9	329.0
$T_{floor-wall}/K$	339.1	333.8	335.8	337.1	334.6
$T_{insul-wall}/K$	365.6	363.1	363.8	364.3	363.4
Q/W	145.5	147.6	146.9	146.6	145.9

3 结 论

本文在分析飞机货舱三角区高温高压空气导管外舱内空气传热和流动机制的基础上,采用有限体积法建立其传热和流动计算数学模型,并通过SIMPLE算法对其进行稳态计算,考察了空气导管布置位置、导管管径和热辐射对流动换热特性的影响。计算结果表明:

(1)导管的布置方式对舱内空气的流场和温度场影响程度不一致。当导管向上布置时,三角区上壁面附近的空气温度较其他布置形式的高,其上壁面的平均温度比向右布置时高出约14 K,且其自然对流强度最弱。当导管向下布置时,其换热空间增大,对流强度增强,换热量增加,且此布置方式下的换热量是所有布置形式中最大的。导管向左布置和向右布置时,尽管其温度分布发生较大的变化但

其流动强度变化不大。

(2)随着导管直径的增加,导管与舱内空气的换热面积增大,导管传递到舱内空气的总热量也增大,三角区内各处流体的温度也逐渐升高。导管直径从50.8 mm增加到88.8 mm时,舱内空气的平均温度增加约为10 K左右。同时随着导管直径的增加发生自然对流的空间相对减小,自然对流的强度减弱。

(3)当壁面间温差较大时,辐射换热所占据总的换热份额较大。对于本文的计算实例,不考虑辐射换热可使得绝热层外表面温度的计算误差达到11.88%,而换热量的误差达到25.54%,因此辐射换热不能忽略。同时辐射换热会减小壁面间的换热温差,增加总的换热量,并且削弱自然对流的强度。

参考文献:

[1] Adib A M L, Baptista C A R P, Barboza M J R, et al. Aircraft engine bleed system tubes: material and failure mode analysis [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2007, 14(8):1605-1617.

[2] Fusegi T, Farouk B. A computational and experimental study of natural convection and surface/gas radiation interactions in a square cavity [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1990, 112(3):802-804.

[3] Manab Kumar Das, Saran Kumar Reddy K. Conjugate natural convection heat transfer in an inclined square cavity containing a conducting block [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, 49(25/26):4987-5000.

[4] Hossain M A, Takhar H S. Thermal radiation effects on the natural convection flow over an isothermal horizontal plate [J]. *Heat and Mass Transfer*, 1999, 35(4):321-326.

[5] Akiyama M, Chong Q P. Numerical analysis of natural convection with surface radiation in a square enclosure [J]. *Numerical Heat Transfer*, 1997, 32(4):419-433.

[6] Cesini G, Paroncini M, Cortella G, et al. Natural convection from a horizontal cylinder in a rectangular cavity [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, 42(10):1801-1811.

[7] 陶文铨,李斌. 处理区域内部导热与辐射联合作用的数值计算方法 [J]. *西安交通大学学报*, 1985, 19(3):

66-75.

Tao Wenquan, Li Bin. A numerical scheme for heat conduction problems involving radiation exchange within solution domains [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 1985, 19(3):66-75.

- [8] ElSherbiny S M, Hollands K G T, Raithby G D. Effect of thermal boundary conditions on natural convection in vertical and inclined air layers [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1982, 104(3):515-520.
- [9] Larson D W, Viskanta R. Transient combined laminar free convection and radiation in a rectangular enclosure [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1976, 78(1):65-85.
- [10] 杨卫卫,何雅玲,徐超,等. 二维方腔非稳态自然对流数值模拟研究 [J]. *工程热物理学报*, 2004, 25(2):282-284.
- Yang Weiwei, He Yaling, Xu Chao, et al. Two-dimensional numerical study of transient natural convection in rectangular enclosure [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2004, 25(2):282-284.
- [11] 赵秉文,邢荣鹏,张世将,等. 矩形方腔湍流自然对流数值模拟研究 [J]. *浙江理工大学学报*, 2008, 25(4):457-461.
- Zhao Bingwen, Xing Rongpeng, Zhang Shijiang, et al. The numerical simulation study of turbulence natural convection in rectangular cavity [J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University*, 2008, 25(4):457-461.
- [12] 邹剑峰,郜冶. 含加热圆管方腔内自然对流的数值研究 [J]. *热科学与技术*, 2007, 6(4):326-330.
- Zou Jianfeng, Gao Ye. Numerical investigation of natural convection in square cavity containing heated circular pipe [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2007, 6(4):326-330.
- [13] Xu Xu, Sun Gonggang, Yu Zitao, et al. Numerical investigation of laminar natural convective heat transfer from a horizontal triangular cylinder to its concentric cylindrical enclosure [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(13/14):3176-3186.
- [14] 杨世铭,陶文铨. 传热学 [M]. (第四版). 北京:高等教育出版社, 2006.
- Yang Shiming, Tao Wenquan. *Heat transfer* [M]. (The Fourth Edition). Beijing: Higher Education Press, 2006.