

# 民用飞机翼身整流罩区域 温度场分析研究及影响

## Analysis Study and Effect of Belly Fairing Zone Temperature for Civil Aircraft

闫旭东 南国鹏 苏利焱 简夕忠 / Yan Xudong Nan Guopeng Su Liyan Jian Xizhong  
(上海飞机设计研究院,上海 201210)  
(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

### 摘要:

现代民用飞机机身结构大量采用复合材料,但因其遇到高温时会变软,耐热性较差,这就对复合材料周围的环境温度提出了新的要求。以某型飞机的空调组件安装区域进行温度场 CFD 计算,分析了安装区内的高温部件对机身复合材料结构的影响。为了防止机身复合材料被高温部件烫伤,在高温部件的上方安装隔热板同时进行局部通风冷却,并对相应的工况进行 CFD 计算对比。

**关键词:**复合材料;高温;温度场;冷却

**中图分类号:**V245.3

**文献标识码:**A

[Abstract] A large number of composite materials are used in aircraft structure, which could become weak in high temperature condition. A computational fluid dynamics (CFD), steady state computational model of the aircraft high temperature area was used to investigate and analyzed. Thermal-protective coating and ventilating is used to protect composite material parts from being heated.

[Key words] composite material; high temperature; temperature field; cooling

## 0 引言

随着全球民用航空的发展,民机的机身结构大量采用了重量轻强度大的复合材料。航空复合材料的使用减轻了飞机重量,降低了飞机油耗,节省了运营成本,实现了低碳环保。但是复合材料遇到高温时会变软,耐热性较差。这就对复合材料周围的环境温度提出了新的要求。空调组件安装区在中央翼下面的翼身鼓包区,安装区内的高温管路会使局部区域温度过高,对附近复合材料的结构造成影响。通过增加隔热板设置,实施通风冷却方案可以降低局部温度。

## 1 空调组件安装区的高温部件

空调组件安装区内的换热器及引气管路的表面温度很高,最高可以达到 210℃。表 1 和图 1 是

空调组件安装区的高温部件的表面温度,可以看出每个部件在飞机巡航阶段的温度比地面时候低,因此选择夏天地面热天作为计算分析的极限工况点。

表 1 空调组件安装区的高温部件

	部件	表面温度/℃ 地面热天	表面温度 /℃巡航
	初级换热器出口区域	119	107
	次级换热器进口区域	175	160
	次级换热器出口区域	45	18
	回热器及附近管路	40	10
	冷凝器及附近管路	30	4
	充压腔及冲压空气排气管	166	133
高温 气源 管路	APU 引气管	120	120
	空调组件引气管	120	120

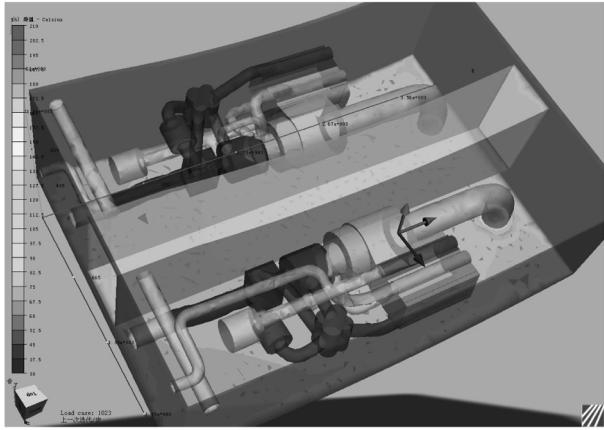


图1 空调组件安装区高温部件

## 2 隔热板材料及属性

为了防止机身复合材料被高温部件烫伤,在空调组件安装区的上方安装一层5mm的玻璃棉隔热板。玻璃棉可以有效减少空调组件安装区向上的传热,保护位于空调组件安装区上方的中央翼复合材料温度不会过高。玻璃棉导热系数取 $0.065\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 。

## 3 外部边界条件

外部边界条件见表2。

表2 外部边界条件

热天	地面
空调组件安装区壁面温度 / $^{\circ}\text{C}$	49.5
空调组件安装区壁面换热系数 / $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$	20
翼身鼓包壁面换热系数 / $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$	10

## 4 局部通风冷却

为进一步降低高温部件对机身复合材料的影响,对高温区进行局部通风冷却。靠近中央翼下壁板最近的高温部件是左侧初级换热器进口区域,表面温度达到 $210^{\circ}\text{C}$ 。通过安装笛形管装置对此区域进行通风冷却,通风气流对空调组件上层区域冷却后通过位于安装区后壁板上的排气孔排到起落架舱。通过分析得出增加笛形管通风冷却后,中央翼下壁板局部高温区域降温效果显著。

## 5 传热模型

在三维坐标系中的对流换热过程中,流体的速度

矢量 $U$ 在三个坐标上的分量分别为 $u, v, w$ ,压力为 $p$ ,流体密度为 $\rho$ 。对图2中所示的微元体积 $dx dy dz$ ,应用质量守恒定律、动量守恒定律及能量守恒定律<sup>[1]</sup>。

质量守恒方程:

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

动量守恒方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \text{div}(uU) = \text{div}(\nu \text{grad}u) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \text{div}(vU) = \text{div}(\nu \text{grad}v) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \text{div}(wU) = \text{div}(\nu \text{grad}w) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w h)}{\partial z} = -p \text{div}U + \text{div}(\lambda \text{grad}T) + \Phi + S_h \quad (5)$$

其中: $\nu$ 为流体的运动粘度, $\lambda$ 是流体的导热系数, $\Phi$ 为流体的内热源, $S_h$ 为由于粘性作用机械能转换为热能的部分。

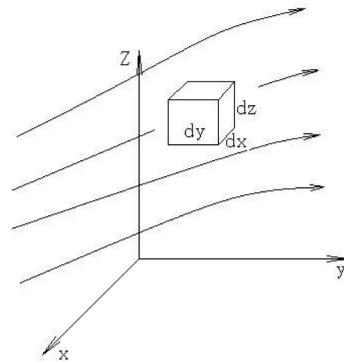


图2 三维直角坐标系及微元体

空调组件安装区的传热模型可以简化成如图3所示:空调组件安装区的上面安装有隔热板,隔热板和中央翼之间有结构夹层(用于连接隔热板和中央翼下壁板)。局部通风气流进入空调组件安装区后,从后壁板排入起落架舱。

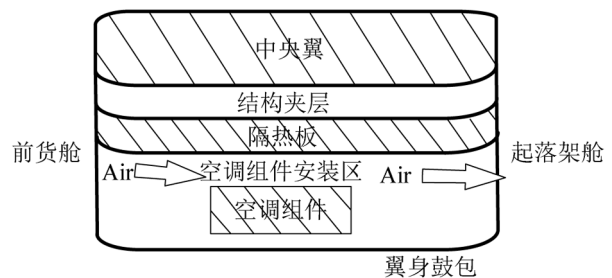


图3 传热模型示意图

## 6 网格划分

网格可分为两大类:结构网格和非结构网格。结构网格就是网格拓扑相当于矩形域内均匀网格的网格。为了便于处理物面边界条件以提高计算精度,常要求结构网格具有贴体性质,即通过坐标变换,使物体的几何边界成为坐标面(线)。非结构网格就是指这种网格单元和节点彼此没有固定的规律可循,其节点分布完全是任意的。

本文用到的网格系统全部采用结构化网格。对空调组件安装区的部件进行模型简化,简化后的模型进行网格划分,总网格数在 106 万。图 4 是对整个安装区进行的网格划分,图 5 是对空调组件及高温气源管路部件进行的网格划分。由于隔热板及机腹蒙皮相对比较薄,对这两个部件的网格进行了加密处理。

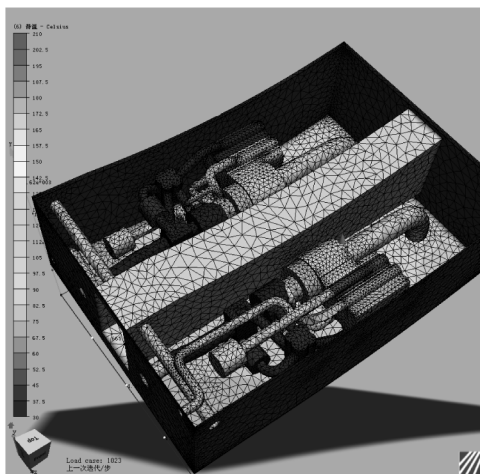


图 4 空调组件安装区域网格划分

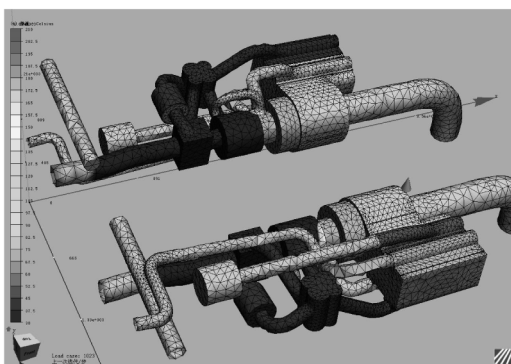


图 5 空调组件及高温导管网格节点划分

## 7 计算结果分析

计算结果如表 3 所示,没有加装隔热板和通风

冷却的中央翼下壁板最高温度可以达到 115℃。加装隔热板之后,中央翼下壁板最高温度降低至 95.3℃。加装隔热板的同时对局部高温区进行通风冷却后,中央翼下壁板最高温度降低到 84.5℃。计算过程还发现,区域温度与通风冷却的流量有很大的关系,通风流量越大,冷却效果越好,中央翼下壁板最高温度越低。图 6、图 7 和图 8 是各个方向的温度分布。

表 3 加装隔热板和进行局部通风冷却前后的效果对比

	空调组件安装区平均温度 / °C	中央翼下壁板最高温度 / °C
未安装隔热板	82.3	115
安装隔热板未进行局部通风	86.5	95.3
安装隔热板同时局部通风	74.9	84.5

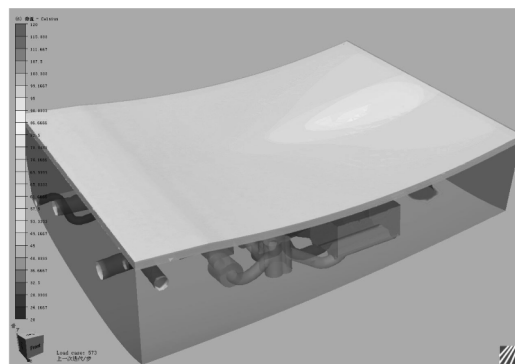


图 6 中央翼下壁板温度分布

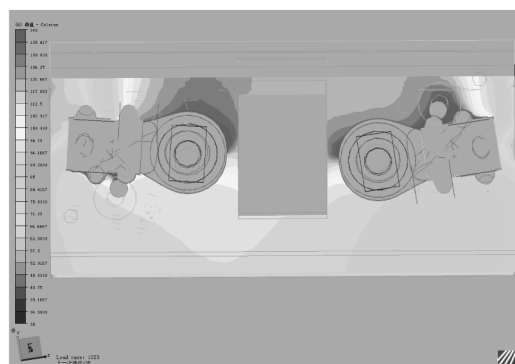


图 7 空调组件安装区温度分布(X方向)

## 8 结论

通过 CFD 计算可以看出,在极限工况下(夏天地面热天),空调组件安装区的区域温度较高。通过在空调组件安装区上方加装隔热板和高温区局部(下转第 90 页)

气支线机较涡桨支线机有明显的收入优势,较喷气窄体机有明显的成本优势。从图中可以直观看出,在该类市场中喷气支线机相较其他两者有经济性优势。对于平均旅客需求大于135人的市场,由于喷气窄体机能提供更多座位数满足市场需求,因此在该类市场中喷气窄体机经济性最优。

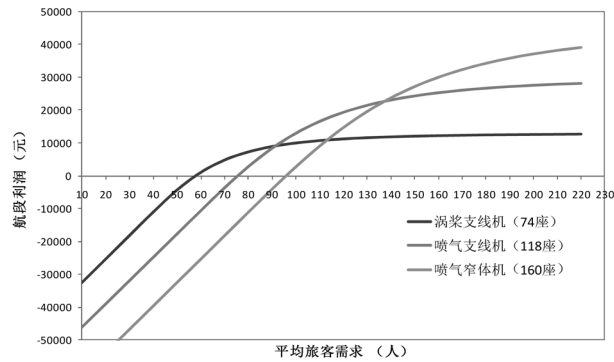


图4 商用飞机经济性

### 3 结论

本文结合商用飞机运营成本模型以及收益预估模型,提出了能够衡量飞机对于不同市场需求经济性的分析方法。本文还通过典型涡桨支线机、喷气支线机以及喷气窄体机案例分析,比较了不同机型对于不同市场的经济适应性以及竞争优势,为航空公司选型以及制造商优化设计提供评估依据。

为了进一步完善经济性分析方法,还需要采集商用飞机实际运营成本以及不同市场的需求数据,建立详实的运营成本以及收益管理数据库。此外还需要针对特定市场,对商用飞机的经济性进行深入分析。

### 参考文献:

- [1]叶叶沛. 民用飞机经济性[M]. 成都:西南交通大学出版社,2013:2-3.
- [2]保罗·克拉克. 大飞机选购策略[M]. 北京:航空工业出版社,2009:97-100.
- [3]王修方. 干线飞机直接使用成本的计算方法[J]. 民用飞机设计与研究,1995,3:39-43.
- [4]都业富. 民用飞机经济评价新方法[J]. 航空学报,1995,16(4):509-511.
- [5]ATA. Standard Method of Estimating Comparative Direct Operating Costs of Turbine Powered Transport Airplanes[R]. Washington DC,1967.
- [6]Liebeck R. H. Advanced Subsonic Airplane design and Economic Studies. NASA CR-195443, April 1995. Curran, R., Value-Driven Design and Operational Value, in Encyclopedia of Aerospace Engineering. 2010, John Wiley & Sons.
- [7]陈迎春,宋文滨,刘洪. 民用飞机总体设计[M]. 上海:上海交通大学出版社,2010.

(上接第72页)

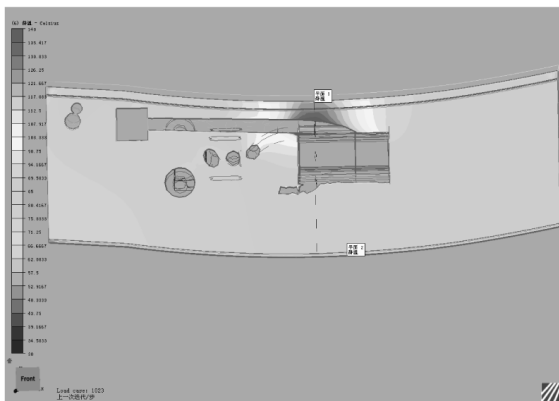


图8 空调组件安装区温度分布(Z方向)

通风冷却都能够显著降低区域温度。

### 参考文献:

- [1]陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1998:109-113.

- [2]杨世铭,陶文铨. 传热学(第三版)[M]. 西安:高等教育出版社,1998:130-135.
- [3]余建祖. 电子设备热设计及分析技术[M]. 北京:高等教育出版社,2001:166-169.
- [4]寿荣中,何慧姍. 飞行器环境控制[M]. 北京:高等教育出版社,2001:166-169.
- [5]Yue Ma, Chung J N. An experimental study of critical heat flux (CHF) in microgravity forced-convection boiling[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2001, 27(10): 1753-1767.
- [6]Seghir-Ouali S., Saury D., Harmand S., et al. Convective heat transfer inside a rotating cylinder with an axial air flow[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2006, 45(12): 1166-1178.
- [7]Huang Zhiyao. Application of electrical capacitance tomography to the void fraction measurement of two-phase flow[J]. Transactions on Instrumentation and Measurement, 2003, 52(1): 7-12.