

# 基于微流道技术的电磁功能结构 防除冰系统流场与传热特性分析

陈晓宇<sup>1</sup>, 司源<sup>1</sup>, 陈龙<sup>2</sup>

(1. 航空工业济南特种结构研究所高性能电磁窗航空科技重点实验室, 济南, 250023;  
2. 山东大学机械工程学院高效洁净机械制造教育部重点实验室, 济南, 250100)

**摘要** 基于微流道技术的电磁功能结构气热防除冰系统设计与其内/外流场的流体流动行为及传热特性密切相关。为了实现微流道气热防除冰系统设计, 提出了一种流场-传热耦合数值分析方法, 以气热空心石英纤维增强树脂基复合材料为微流道实现手段, 进行了典型翼面前缘电磁功能结构的流场与传热特性仿真分析。结果表明: 在-15℃的外部条件下, 基于微流道的防除冰方案具备满足防除冰需求的潜力, 为后续进行气热防除冰方案优化设计提供了理论支持。

**关键词** 防除冰; 微流道; 流-热耦合; 传热分析

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.03.006

**中图分类号** TK124 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)03-0036-05

## An Analysis of Flow Field and Heat Transfer Characteristic for Anti-Icing/Deicing System of Electromagnetic Functional Structure Based on Micro-Channel Technology

CHEN Xiaoyu<sup>1</sup>, SI Yuan<sup>1</sup>, CHEN Long<sup>2</sup>

(1. Aviation Key Lab of Science and Technology on High Performance Electromagnetic Windows, AVIC Research Institute for Special Structures of Aeronautical Composite, Jinan 250023, China;  
2. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China)

**Abstract** In order to realize the design of gas-thermal anti-icing/deicing system by the technology of micro-channel based on the design of electromagnetic function structure gas-thermal anti-icing/deicing system based on micro-channel technology closely related to the fluid flow behavior and heat transfer characteristics of the internal/external flow field, a coupled flow field-heat transfer analysis method is proposed. The flow field and heat transfer characteristic of typical wing-front edge electromagnetic functional structures are simulated and analyzed by using gas-thermal hollow quartz fiber reinforced resin matrix composites as the micro-channel implementation method. The results show that with ambient temperature being at 15℃, the anti-icing/deicing scheme based on the technology of micro-channel is satisfied with the needs of anti-icing/deicing potential, and a theoretical support is provided for the subsequent optimization design of gas-thermal anti-icing/deicing scheme.

**收稿日期:** 2023-07-03

**作者简介:** 陈晓宇(1996-), 女, 山东聊城人, 工程师, 硕士, 研究方向为飞行器设计。E-mail: 568622406@qq.com

**引用格式:** 陈晓宇, 司源, 陈龙. 基于微流道技术的电磁功能结构防除冰系统流场与传热特性分析[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(3): 36-40. CHEN Xiaoyu, SI Yuan, CHEN Long, et al. An Analysis of Flow Field and Heat Transfer Characteristic for Anti-Icing/Deicing System of Electromagnetic Functional Structure Based on Micro-Channel Technology[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(3): 36-40.

**Key words** anti-icing/deicing; micro-channel; fluid-thermal coupling; heat transfer analysis

随着我国新型运输机、特种飞机、无人机等航空装备在复杂极端气象条件下执行任务的要求不断提高,各类电磁功能结构尤其是安装在翼面(包括机翼、垂直尾翼、水平尾翼等)前缘的电磁功能结构的防除冰需求也越发紧迫。翼面前缘表面结冰将引起气动外形改变、飞行升力降低、天线罩信号传输受阻、透波性能下降等诸多问题,严重时会导致飞机失控坠机,造成不可估量的严重经济损失。为保证飞行安全,上述部位必须采取合理有效的防除冰措施,以应对愈发严酷复杂的作战环境和任务需求。

气热防除冰是目前应用最为广泛的一种防除冰方式,现代大型飞机的机翼前缘和发动机进气道都利用发动机引出的热气加热机翼前缘防止结冰<sup>[1]</sup>一方面,发动机进口支板距离热气源很近,引源比较方便;另一方面,通过引气管道材料及设计方案优化,引气防除冰对于电磁功能结构的电磁透波/隐身性能影响较小,可以有效满足翼面前缘天线罩透波/隐身/防除冰功能一体化需求。空心石英纤维增强氰酸酯复合材料具有较好的力学性能和优异的介电性能<sup>[2-4]</sup>,其内部空心石英纤维可作为气热微通道满足翼面前缘电磁功能结构的防除冰需求。对翼面前缘气热防除冰系统建立流-热-固多场耦合条仿真模型并完成内外流场及传热特性分析是设计基于微通道技术的防除冰方案重要环节,能够为气热空心石英纤维增强树脂基复合材料的制备及气热防除冰方案优化设计提供理论指导。

在复合材料热力耦合性能研究方面,国内外许多学者通过数值仿真研究手段获取材料本构模型及热力学特性,为新型复合材料的设计提供了新的研究思路。Li等<sup>[5]</sup>通过完善仿真模型预测了导热氮化硼填料含量对氮化硼/双环戊二烯双酚氰酸酯/双酚A双氰酸酯复合材料热导率的影响。Wu等<sup>[6]</sup>以碳纤维/氰酸酯作为承载层,石英纤维/氰酸酯作为隔热层,通过有限元数值仿真的方法研究了石英纤维/碳纤维/氰酸酯三元复合材料的力学和热学性能。Gao等<sup>[7]</sup>提出了一种基于常态近场动力学理论的全耦合热力学模型,测试了单层和多层复合材料在均匀和线性温度变化下复合材料的热力学特征,另外仿真了经受压力冲击的复合材料的热力学性能。Li等<sup>[8]</sup>对双冷却锂铅毯的流固耦合场中的共轭传热进行了三维模拟,计算了温度分布、热变形和热应力,分析了热导率、对流传热系数和流速的影响。Sun等<sup>[9]</sup>为了预测高速气热环境中飞行器前缘的碳系复合材料的表现建立了多物理场耦合模型,考虑了流场、传热以及材料烧蚀的热化学不平衡。关鹏等<sup>[10]</sup>研究了冷气流量对气孔周围热应力的影响,通过改变气孔的孔径,并建立有限元模型,结合有限元/边界元理论,通过流固热三

场耦合技术获得热冲击后的叶片最大温度、温度不均衡程度及最大热应力。

超高压微通道流动的研究主要采用数值仿真技术与实验研究相结合的手段实现。叶建军等<sup>[11]</sup>基于单元格压力线性假设提出了一种处理微通道压力边界的新方法,对在4种压力边界条件下的微通道气体流场进行了数值模拟,获得了微尺度流场的速度和压力分布,并比较了在各种压力边界条件下微流场的稀薄特性和沿程压力的线速度分布。Li等<sup>[12]</sup>建立了一个包括热导率变化的模型来研究传热规律,从理论上分析了微通道内气体层流对流传热的壁效应。Turner等<sup>[13]</sup>开展了层流气流通过微通道的对流传热实验研究,开发一种用于直接测量微通道壁温的传感器。Takahashi等<sup>[14]</sup>设计并分析了利用等熵膨胀超音速气流的微通道散热器冷却装置,对设计的微通道流动和传热分析进行了数值模拟,并与实验结果进行了比较,100~300 μm的设计对于集成微通道宽度选择具有最高的热传递。Lei等<sup>[15]</sup>分析了微通道结构对传热系数、压降、浮力效应、流场和整体热性能的影响,为微通道气体冷却器设备的优化设计提供参考。

本文以气热空心石英纤维增强树脂基复合材料为实现手段,建立基于微通道技术的电磁功能结构气热防除冰系统的流场与传热特性分析方法,结合ANSYS软件建立流体域-固体域耦合求解流程,实现防除冰系统传热特性及温度场预报。

## 1 流场与传热特性耦合分析方法

### 1.1 物理模型

本文算例翼面选取NACA0012翼型,取其前缘部分,沿Z轴方向拉伸100 mm作为含微流道的翼面前缘电磁功能结构防除冰系统典型样段。微通道内径为1 mm,外径为1.5 mm,复合材料翼面厚度为5 mm,模型如图1所示。

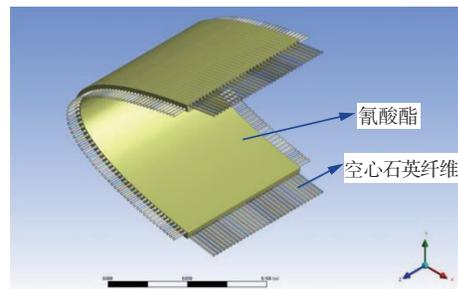


图1 翼面前缘防除冰结构模型

### 1.2 数值方法

对于外流场气动环境的预测,采用三维Navier-Stokes(N-S)方程作为控制方程。考虑到边界层附

近的流动剪切作用,为了提高计算准确性,翼型前缘外部流场数值计算选择为 Standard  $k-\epsilon$  (SST) 湍流模型。对于内流场的温度及压力场预测,考虑到微流道内气体的稀薄效应,运动方程需采用经速度滑移和温度跳跃边界修饰的 N-S 方程。固体域采用热传导控制方程,能量方程采用滞止焓+温度双物理量单变量方程。将流场求解结果与固体域耦合作为其初始边界条件,采用牛顿-拉普森法进行耦合求解,实现含微流道的电磁功能结构气热防除冰系统多场耦合条件下温度场及应力场的预报。

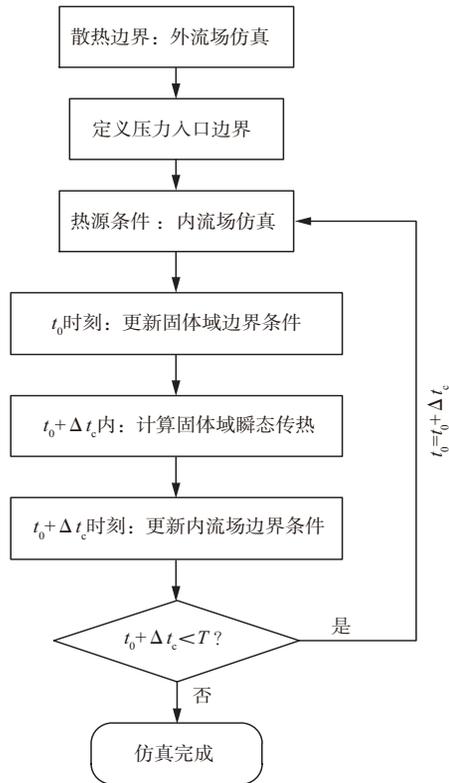


图2 翼面前缘防除冰结构模型

流场-传热耦合分析如图2所示,具体步骤如下:

**步骤1** 对外流场进行有限元数值仿真,获得外表面流场气动热环境;

**步骤2** 赋予内流场进出口边界条件,获得微流道内压力及温度场分布;

**步骤3** 将初始时刻定义为  $t_0$ , 计算总时长定义为  $T$ , 将步骤1中求解结果赋予固体域作为散热边界条件,并将步骤2中获得的流固交界面温度传输至微流道内壁作为热源边界条件;

**步骤4** 基于内/外气动热边界条件,分别赋予微流道管路和蒙皮物性参数,计算  $t_0$  至  $t_0 + \Delta t_c$  时刻的固体域瞬态传热;

**步骤5** 将计算所得的  $t_0 + \Delta t_c$  时刻流固交界面温度传输至流体域,并作为新的内流场边界条件进行流场计算;

**步骤6** 重复以上步骤2~5,直至完成  $T$  内的所有时间步计算。

## 2 仿真分析

### 2.1 翼面前缘外流场分析

模拟机翼外部流场模型网格划分参数如表1所示,整个外流场共计 231 790 个单元,78 744 个节点。外流场模型如图2(a)所示。外流场边界层网格划分结果以及相关参数设置如图2(b)和图2(c)所示。

表1 外流场参数设置

流场参数	参数设置
外流场尺寸	800 mm × 900 mm × 100 mm
外流场网格尺寸/mm	20
边界层层数/层	8
边界层增长率	1.2
边界层总厚度/mm	8
边界层网格尺寸/mm	2

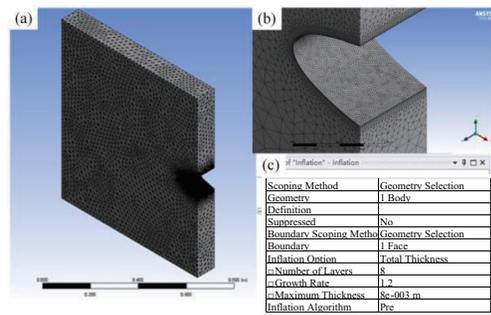


图3 翼面前缘防除冰结构模型

外流场的边界条件进口方式选择速度入口,大小设置为 40 m/s;出口方式选择压力出口。仿真时流体温度设置为  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。外流场仿真结果如图3所示,机翼前缘部分的对流换热系数最大,为  $480\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  左右,沿  $x$  方向对流换热系数减小至  $287\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  左右。

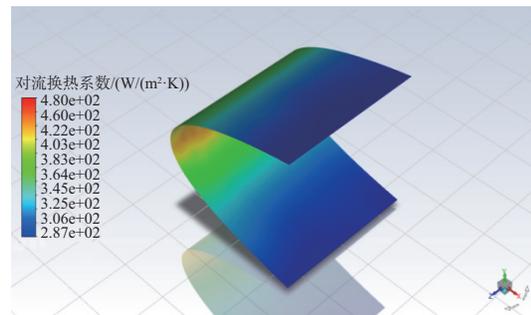


图4 翼型表面对流换热系数

### 2.2 微流道内流场分析

基于第2.1节中建立的含微流道的翼面前缘电磁功能结构防除冰系统典型样段,对其内部空心石英纤维构成的微流道内流场进行仿真分析。根据翼型形状正交分布的微流道内部流场如图4(a)所示,沿每一条内流场径向以及整体的网格划分情况如图4(b)和图4(c)所示。

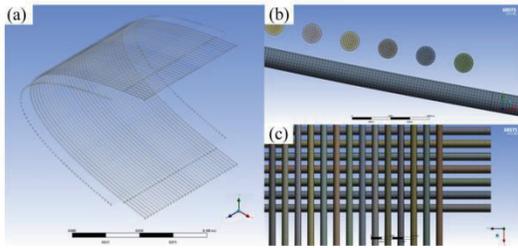


图 5 内流场模型及网格划分情况

根据管内流动气体雷诺数计算公式(1):

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta} = \frac{0.589 \times 20 \times 1 \times 10^{-3}}{2.18 \times 10^{-5}} = 540.37 < 2\ 300 \quad (1)$$

式中: $\rho$ 、 $v$ 、 $\eta$  分别为管内流体的密度、流速和黏性系数; $d$  为特征长度。因流体雷诺数小于 2 300,所以流动方式为层流,流体流动模型选用 Laminar。进口边界条件设置为压力入口,出口边界条件设置为压力出口,给定相对压强的值。进口与出口不同压强时管内流体的流速及温度变化见表 2,速度云图、温度云图及压力云图见图 5~图 10。由仿真结果可知,施加的进出口压力越大,气体在石英纤维流道中的流速越高;而气体在弦向方向石英纤维比展向方向流程长,故仅需较小的进出口压力驱动即可完成内流场流动,符合微流道内部的流动特性关系。另外从表中可以看出,在弦向流到进出口压强设置为  $\pm 20\ 000\ \text{Pa}$  时,仿真获得微流道内流速为  $100\ \text{m/s}$ ,此时雷诺数超过 2 300,但根据相关工程经验,在微流道内的流动模拟仍可作适当简化<sup>[16]</sup>,满足 Laminar 模型的表述范围,因此结果具备可信度。

表 2 弦向流道内流场仿真结果

参数	弦向流道		展向流道	
进出口压强/Pa	$\pm 10\ 000$	$\pm 20\ 000$	$\pm 1\ 000$	$\pm 2\ 000$
入口温度/K	495	495	350	350
出口温度/K	300	340	315	324
最小流速/(m/s)	77	100	30	50

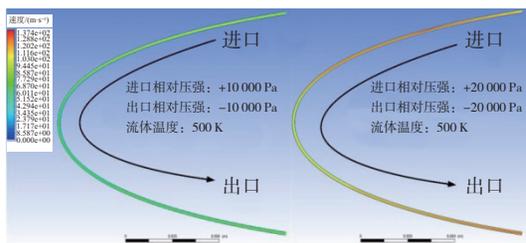


图 6 弦向方向石英纤维流道速度云图

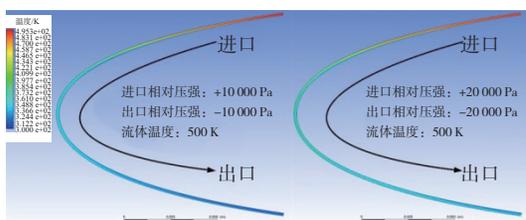


图 7 弦向方向石英纤维流道温度云图

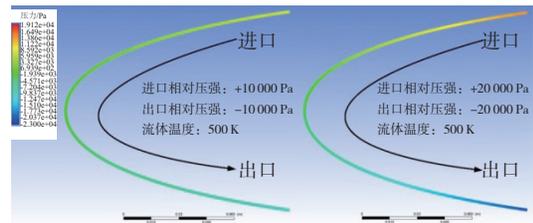


图 8 弦向方向石英纤维流道压力云图



图 9 展向方向石英纤维流道温度云图



图 10 展向方向石英纤维流道速度云图



图 11 展向方向石英纤维流道压力云图

### 2.3 传热特性分析

将第 2.1 节中机翼蒙皮外表面的外流场求解结果作为瞬态传热的散热边界条件,将微流道内壁面赋予第 2.2 节中计算所得的温度分布作为热源,蒙皮内表面及侧边界均默认为隔热边界,蒙皮材料为氰酸酯树脂,微流道管路材料为石英纤维。周围环境温度以及模型初始温度均为  $-15\ ^\circ\text{C}$ ,求解整个模型 60 s 内的温度场。外流场计算结果导入翼面前缘电磁功能结构防除冰系统典型样段外表面后如图 11 所示。

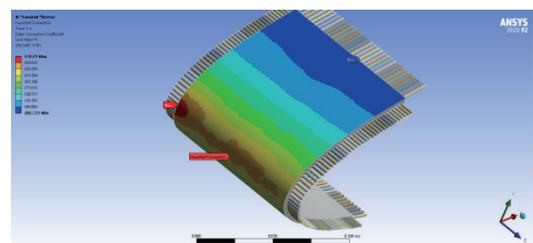


图 12 模型表面换热系数

机翼典型样段表面温度随时间的变化过程如图 12 所示,由于前缘部分对流换热系数较大,故其升温较慢。除翼面最前端外,在 5 s 内典型样段模型

温度基本达到稳定状态,内表面温度稳定在 27 °C 左右,外表面温度稳定在 22 °C 左右。外表面最高温度与最低温度随时间的变化趋势如图 13 所示,最高温度升高较快,在 2 s 内即升至 22 °C 左右达到稳定状态;最低温度即翼面最前端处温度升温较慢,在 10 s 内温度缓慢升高至 10 °C 左右达到稳定状态。

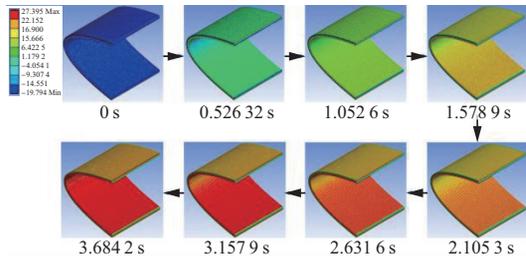


图 13 翼面外表面温度分布变化

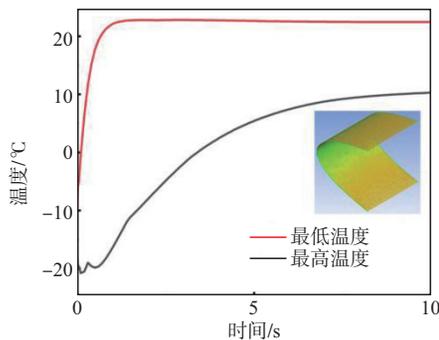


图 14 翼面外表面最高/最低温度变化

### 3 实验对比

为验证本文仿真方法的有效性,制作含微流道的平板试验样件并进行冷库内(室内温度 $-15\sim 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ )加热试验。由于氰酸酯树脂为密品材料,采用材料特性相近的环氧树脂来进行试验,试验件微流道管径为 1 mm,管路间距为 5 mm,采用红外热像仪记录温度升高过程,最终温度稳定在 20 °C 左右,与仿真结果趋势相符。



图 15 含微流道平板验证试验红外温升图

### 4 结语

本文通过对含微流道的电磁功能结构气热防除冰系统进行建模仿真,分析流道内部流场压强、速度以及温度分布的相互影响,获得了在部流场影响下电磁功能结构气热防除冰系统典型样段的传热特性

和温度场分布并与试验结果进行了对比,证明了计算方法的有效性。相较于目前大部分超高压微流道流动的研究更偏重于实际工程应用,提出的计算方法所作的简化也可满足工程问题的误差要求。研究结果表明,在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的外部条件下,当前基于微流道的防除冰方案具备满足防除冰需求的潜力,为后续优化设计基于微流道的电磁功能结构防除冰系统提供了理论支持。

### 参考文献

- [1] SAEED F, PARASCHIVOIU I. Optimization of a Hot-Air Anti-Icing System [C]//41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2003: 733.
- [2] 孟庆杰,石军威,徐亮,等. 空心石英玻璃纤维增强氰酸酯基低介电复合材料的制备及性能分析 [J]. 材料导报, 2018, 32(S1): 110-112.
- [3] 梁秀华,扈艳红,杜磊,等. 异氰酸酯基硅烷偶联剂改性石英纤维/含硅芳炔复合材料界面 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2013(S3): 44-50.
- [4] 兰天,孟庆杰,裴雨辰. 超临界  $\text{CO}_2$  技术对空心/实心石英混编纤维表面改性 [J]. 航空材料学报, 2020, 40(1): 46-52.
- [5] LI Y, XU G J, GUO Y Q, et al. Fabrication, Proposed Model and Simulation Predictions on Thermally Conductive Hybrid Cyanate Ester Composites with Boron Nitride Fillers [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 107: 570-578.
- [6] WU Z H, XIAO J Y, JIANG D Z. Mechanical and Thermal Simulation of a Multi-Functional Hybrid Composite [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 190/191: 509-512.
- [7] GAO Y, OTERKUS S. Fully Coupled Thermomechanical Analysis of Laminated Composites by Using Ordinary State Based Peridynamic Theory [J]. Composite Structures, 2019, 207: 397-424.
- [8] LI M J, PAN J H, NI M J, et al. Heat Transfer and Thermal Stress Analysis in Fluid-Structure Coupled Field [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 88: 473-479.
- [9] SUN X W, YANG H B, MI T. Heat Transfer and Ablation Prediction of Carbon/Carbon Composites in a Hypersonic Environment Using Fluid-Thermal-Ablation Multiphysical Coupling [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2020, 2020: 9232684.