基于 Gyroid 结构空气加热管道 设计技术



叶世伟¹,戴宁¹,程筱胜¹,崔艳超²,李泽²
1.南京航空航天大学,江苏南京 210016
2.天津航空机电有限公司,天津 300308

摘 要:在高空飞行时,飞机处于较为极端的环境下,舱内工作人员的生活环境需要保障,采用空气加热设备对机组人员 的生活环境进行调控是十分必要的。传统空气加热设备体积往往较大,且其加热的空气存在局部过热的情况。因此,本 文提出了一种基于极小曲面结构的空气加热管路,通过3D打印技术制造加热模块,并将热源安置在其内部,减少了整体 占地空间,同时增强了空气加热效果。该空气加热管道以出口空气的温度均匀性作为设计目标,并以结构的压降需求及 外壁面最高温度作为约束条件,采用计算流体力学(CFD)仿真工具(Fluent)进行设计仿真,进而构建出结构各参数与设计 目标的响应函数,并通过数学分析软件求得结构的最优解。最后,将其与传统加热设备结构进行仿真对比,发现新式极 小曲面空气加热管可在保证压降的条件下实现整体结构热点温度的降低,且能均匀加热流经的空气。通过仿真数据,其 出口处空气的温差保持在了3.3℃以下,相较于传统加热管道出口最大温差减少了94.9%,极大地提高了出口空气的温度 均匀性。

关键词:热交换;极小曲面;数值仿真;响应曲面;结构设计

中图分类号:V211

文献标识码:A

在高空飞行状态下,载人飞行器外部飞行环境是较为 恶劣的,因而机组人员的生活环境往往需要进行温度调控。 此时,不同的机舱其升降温需求也不尽相同,当面向空气加 热这一需求时¹¹⁻⁴¹,传统的加热手段往往存在结构占地面积 大、结构不够紧凑等众多问题(特别是在一些振动工况下使 用,传统的空气加热管道的加热设备由于多采用螺纹连接, 其连接可靠性也存在问题)。且由于功率限制等条件,空气 加热的效果存在较大的局限性,尤其是加热的空气存在较 大的温差以及加热系统的高热点等问题,通常会导致使用 体验不好以及安全问题。

近年来,随着电子产品的快速发展,其散热设备也越 发多样化,3D打印技术为新式散热结构的制造提供了可 能,多种多样的热交换结构被应用于散热器的设计,而这 些新式的热交换结构为空气加热管道的设计提供了新的

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.02.002

思路。众多学者对新式的热交换结构进行了研究,其中H. B. Yan 等^[5]研究了X形状晶格金属散热结构在强迫对流中的表现,发现该X形状晶格金属与传统的多孔结构相比表现出更加优秀的传热能力与机械载荷性能。此外,J.Y. Ho等^[6]研究了4种不同尺寸的菱形八面体晶格单元的热交换能力,通过选择性激光熔化(SLM)制造了4种尺寸的晶格结构,并通过物理试验验证了该八面体晶格单元在热交换结构中的应用前景。最近,Wang等^[7]又从叶片的叶脉分布得到灵感,将其映射至网格换热器当中,通过计算流体力学(CFD)验证了该状态下的换热器响应速度要优于无梯度的换热器。

对此,作为点阵结构一类代表的极小曲面结构,由于其 优良的力学性能以及较小的比密度等特性被应用于航空航 天设备的轻量化设计当中^[8]。极小曲面(TPMS)结构除了

收稿日期: 2022-06-28; 退修日期: 2022-12-18; 录用日期: 2023-01-15 基金项目: 国家自然科学基金(52275255)

引用格式: Ye Shiwei, Dai Ning, Cheng Xiaosheng, et al. Design technology of air heating pipe based on Gyroid structure[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(02): 10-18. IT世伟, 戴宁, 程筱胜, 等. 基于Gyroid 结构空气加热管道设计技术[J]. 航空科学技术, 2023, 34(02): 10-18.

在力学性能上的优异表现外,较大的比表面积以及相互贯 通的内部结构使其具备了成为优秀热交换结构的潜力,姜 钰等¹⁹就通过将结构的散热问题转化为定体积约束和梯度 约束的极小化散热弱度问题,建立起了数学模型,进而设计 出梯度变化的极小曲面散热器,证明了极小曲面结构在热 传导结构上的能力。Navya等¹⁰⁰将极小曲面结构应用于蒸 馏膜设计,旨在增强其传热性能。Cheng等¹¹¹研究了多种 极小曲面结构,以确定其几何参数与多孔结构性能(流动阻 力、传热和强度)之间的关系。因此,本文拟将极小曲面结 构应用于空气加热管的设计当中,旨在设计出更加优秀的 空气加热管道结构。

1 空气加热管道的设计

1.1 加热过程分析

空气加热管道加热空气主要分为加热阶段和稳态阶段 两个过程。

(1) 加热阶段

此时系统还未达到稳态阶段,内置加热棒功率为

 $P_{\rm in} = P_1 + P_2 + P_3 \tag{1}$

式中, P_{in} 为内置加热棒功率, P_1 为加热棒传递至热交换结构的能量, P_2 为加热棒直接与空气进行的热交换能量, P_3 为加热棒升温的能量。由于热交换结构与空气仍存在对流换热,则 $P_1 = P'_1 + P''_1$,其中 P'_1 为热交换结构升温的能量, P''_1 为热交换结构与空气对流换热量。则

$$P_{\rm in} = P_1' + P_1'' + P_2 + P_3 \tag{2}$$

(2) 稳态阶段

此时系统稳态,能量守恒,则在该条件下加热棒的温度 不再发生改变,即 $P_3 = 0$,且热交换结构温度也处于稳态, 即 $P'_1 = 0$ 。系统流入的热通量等于消耗掉的热量,此时为 0,则在该状态下公式改写为

 $P_{\rm in} = P_1'' + P_2 \tag{3}$

即在该状态下,空气加热管的内置热源的热量将全部 用于加热空气。在该状态下,此时的加热管道出口处的空 气状态是数值仿真的最终结果。

面对空气加热的过程,其涉及的基本原理主要分为以 下两部分。

(1)热传导公式[12]

$$P_1 = -kA \frac{\partial T}{\partial n} \tag{4}$$

式中, P_1 为热流量(单位为W),A为导热方向的横截面面积 (单位为m²),k为导热系数(单位为W/(m·K)), $\frac{\partial T}{\partial n}$ 为温度 梯度。其中,负号表示热量由高温区域流向低温区域的方向。热传导理论主要解释了能量在固体间的传导,由热传导公式分析可知材料的热传导率,合理的结构截面面积分 布等将会影响到系统的热传导能力。

(2) 热对流公式[12]

$$P_{1}^{''} + P_{2} = P_{\rm in} = h_{\rm f} A (T_{\rm S} - T_{\rm B})$$
(5)

式中, $h_{\rm f}$ 为对流传热系数(单位为W/(m²·K)),A为物体的换 热面积(单位为m²), $T_{\rm s}$ 为物体的表面绝对热力学温度值 (单位为K), $T_{\rm B}$ 为流体的热力学温度值(单位为K)。在达 到系统稳态状态后,尽管对流传热的总量不变,但是流经传 热结构的流体状态却有区别,显然,靠近固体区域的流体温 度高于远离部分的流体。此时,流体间也发生着热量的传 导,进而影响着流体出口处流体的最终状态。

由式(5)分析可知,影响流体最终状态的系数包括对流 传热系数 h_f ,传热面积A,两者的温差 $T_s = T_B$ 。此时空气加 热管道内流体与极小曲面结构的换热面积A近似等于极小 曲面结构的表面积S,影响其大小的主要变量由极小曲面的 建模决定。而传热系数 h_f 则由结构的湍流性能等因素决 定,其最终效果也与对应的热交换结构紧密相关。

1.2 设计目标确定

由于整个加热管道的进出口单一旦确定,因此,当系统 达到稳态时进出口的流体质量应当相同,即质量守恒。 则有

 $Q_{in} = Q_{out} = v \cdot S$ (6) 式中, Q_{in} , Q_{out} 为进出口的流体流量(单位为m²/s),v为进口 的流体速度(单位为m/s),S为进口流道截面积(单 位为m²)。又因为系统处于隔热的模拟条件,达到稳态时 内部热源的产热量应当等于流体带走的热量,此时能量守 恒。则有

$$P_{\rm in} = P_{\rm out} = Q_{\rm out} \cdot \rho \cdot C_{\rm p} \cdot \Delta\theta \tag{7}$$

式中, P_{in} , P_{out} 分别为系统的产热量以及耗热量(单位为W), ρ 为空气密度(单位为kg/m³), C_p 为空气比定压热容(单位为kg/kg·K)。将式(7)代入式(4),则有

$$\Delta \theta = \frac{P_{\rm in}}{v \cdot S \cdot \rho \cdot C_{\rm p}} \tag{8}$$

也就意味着当系统达到平衡时,系统的最终升温是有极限的(假设此时系统将空气均匀加热)。即当检测的出口均温保持不变时可以视为系统基本达到了稳态。由于空气密度与比热容随温度会发生变化,因此取极限的情况,即取50℃时密度为1.093kg/m³,比热容为1.005kJ/(kg·K),则可以计算得到Δθ≈21K(仿真出口温度稳定意味着系统达到

稳态,见图1)。

由式(8)可知,要提高出口均温应当增加产热量(增加 内部热源功率)或者降低流体的进口速度。然而在空气加 热管道的现实应用背景下,这些条件往往都是受限制的。 将其作为设计目标也缺乏理论上的支持,考察了空气加热 管道的应用背景后,笔者发现,目前的空气加热管道加热的 空气在出口时表现出了极大的温差,由于空气在加热后直 接通向人们的生活区域,局部过热的空气将会给人们带来 不好的使用体验,有时候甚至容易导致灼伤的情况。



Fig.1 Simulation results showing that the outlet temperature reaches steady state

既然均温地提升从结构改变上无法实现,传统的空气加热管出口流体的温差又较大,为改变这一应用缺陷,将流体出口状态作为设计目标,显然出口流体的最大温差 $\Delta\theta_{max}$ 体现了出口流体状态的均匀性,更小的温差意味着空气在管道内的加热更均匀,可以增加用户的空气加热管道使用体验。由于应用背景下一体式的空气循环管路,对空气加热部分的压降 Δp 提出了一定的要求,因此将其作为设计的约束条件。同时,由于管道的外侧温控要求,将管道外侧最高温度 $T_{pipe-max}$ 也作为设计约束,即在满足流体的压力损失以及管道外壁面最高温度需求的两个前提下,将空气加热得更加均匀。

2 极小曲面空气加热管道的数值模拟

本次研究对象为空气加热管道(其中流体部分为空 气),由于空气热管往往对入口速度有要求,且空气热管内 部的结构比较复杂,流体湍流现象比较明显,因此研究涉及 模型默认为湍流模型^[13-15]。

2.1 空气加热管道的结构尺寸

图2为空气加热管道整体结构图以及中心截面图,结构的主要构成部分包括内置式热源(加热棒)、热交换结构和管道外壳部分。其中结构的确定尺寸有管道内半径36.4mm;外围管道壁厚1.6mm;管道长度为240mm以及4个内置加热棒长度为100mm,半径为2mm。





除了确定尺寸,其余的设计变量将作为此次优化的设计 参数。其中,本次极小曲面结构的建模原理基于 Marching Cubes 算法,即等值面算法^[16],其大致原理是将空间分散为体 单元,然后判断等值面穿过体单元时的形态,从而提取与体 单元的交点,进而获得三角面片,最后将三角面片组成连续 曲面,生成极小曲面。构建出极小曲面后,需要对曲面进行 偏置进而获得厚度的极小曲面结构,如图3所示。图示的曲 面函数为

 $F(x, y, z) = \cos x \sin y + \cos y \sin z + \cos z \sin x = 0 \quad (9)$

极小曲面结构涉及的参数主要包括将获得周期为π的 曲面函数,如图4(a)所示,参数T即为周期长度;进而控制 结构的周期数,而偏置的距离t将控制整个极小曲面结构的 孔隙率,如图4(b)所示,参数t即为偏置距离。

为更加直观地调整结构,改写G曲面的函数公式为

$$F(x, y, z) = \cos(\frac{K}{94}x)\sin(\frac{K}{94}y) + \cos(\frac{K}{94}y)\sin(\frac{K}{94}zk) + \cos(\frac{K}{94}zk)\sin(\frac{K}{94}zk) = 0$$
(10)

此时K为设计软件中直观调整参数,即此时极小曲面 在非z方向上的周期为 $T = \frac{188}{K}\pi$,在z轴方向上周期T =







MC algorithm



(a) T参数示意





(b) t参数示意



(c) *k*参数示意图 4 极小曲面结构各个参数示意图Fig.4 Schematic diagram of each parameter of minimal

surface structure

 $\frac{188}{K_k} \pi_{\circ}$ 显然结构的表面积A直接与K、k(k为z轴方向上的 缩放率,见图4(c))成正相关。且由于设计区域长度为L, 因此结构在流道方向上的重复个数n可由下述公式计算: $n = \frac{KTk}{188\pi}$,显然整体表面积影响较大的三个参数即为K、L、 k。而偏置厚度t控制着结构的空隙率,直接影响到了结构 的流道状况,因此将K、L、t、k共4个参数作为设计参数,探 究其变化对结构造成的影响。图5为热交换结构设计 区域。



图5 热交换结构设计区域L

Fig.5 Design area L of heat exchange junction

此次的数值模拟边界条件设定如下:(1)将外部管道壁 面设置为隔热条件;(2)流体入口设置为速度入口(速度为 10m/s,入口空气温度为25°C),出口设置为outflow出口,监 测出口处空气的平均温度以及平均压力等;(3)流体与内部 热交换结构的接触区域设置为耦合条件,用于固体与流体 的共轭传热;(4)内部热源设置为固体热源,其功率大小为 1000W;(5)CFD的求解模型为*k* - ε,RNG模型^[17]。

2.2 网格无关性验证

为验证网格疏密程度对数值模拟结果的无关性,采用 不同数量的分析网格进行数值模拟,如图为设计参数为K = 15,t = 1.5,L = 120,k = 1的加热管道,此时通过改变网格尺 寸进而控制网格数量。通过监测出口处平均温度大小来反 映系统的能量方程是否收敛。由图6可知,当网格数量为 26万个左右时,此时系统求解结果已经基本保持稳定,即此 时的最小网格控制尺寸0.9mm已经能满足计算精度。故本 文的仿真网格最小控制尺寸取值为0.9mm,以保证在满足 计算精度的同时,减少数值迭代的时间。

3 空气加热管道的结构优化

3.1 优化数学模型构建

图7所示为极小曲面偏置厚度t变化对空气加热管道 出口温差、压降以及管道外壁面最高温的影响。

由折线图分析可知,当极小曲面偏置厚度从1mm增至 2mm时,目标变量以及两个约束量均在增加,可见t值对结



simulation results

构的影响是单向的,因此将原先4个设计变量中的变量*t*取 最优值,即*⊨*1mm。而剩余三个变量*K,L,k*取值范围则受增 材制造技术以及既定尺寸的约束(其中包括最小打印尺寸 以及自支撑需求等),为保证制造顺利进行,取 *K* ∈ [20,30],*L* ∈ [100,150],*k* ∈ [0.5,1]。其中 $T_{\text{pipe-max}}(K,L,k)$ 为管道的外测温度要求, $\Delta p(K,L,k)$ 为管道压降要求, $\Delta \theta_{\text{max}}(K,L,k)$ 为管道出口处流体最大温差。

即求解的数学模型表达式如下。

- find $K \in [20, 30];$ $L \in [100, 150];$ $k \in [0.5,1];$ min $\Delta \theta_{\max}(K, L, k)$ s.t. $\Delta p(K, L, k) \leq 700$ Pa
- $T_{\text{pipe-max}}(K,L,k) \leq 80^{\circ}\text{C}$

3.2 响应曲面构建与求解

表1为管道出口温差、压降以及管道外壳温度随结构参数变化获得的仿真数据。通过Design Expert软件进行响应面构建及公式拟合^[18],图8为各结构参数的响应曲面图。此时可获得 $\Delta \theta_{max}(K,L,k), \Delta p(K,L,k), T_{pipe-max}(K,L,k)$ 的拟合函数,将得到的拟合函数导入Matlab中,利用Fmincon优化函数将函数求解得到其最优解为K = 30, L = 150, k = 0.5838。

3.3 最优值数值模拟结果对比分析

将求解得到的最优解结构进行建模,并进行仿真计算。

表1 空气加热管响应曲面数据表

```
Table 1 Response surface data table of air heating pipe
```

| 组号 | K | L | k | 出口温差/℃ | 压降/Pa | 外壳最高温/℃ |
|----|----|-----|------|--------|--------|---------|
| 1 | 20 | 100 | 0.75 | 9.10 | 492.8 | 65.2 |
| 2 | 30 | 100 | 0.75 | 5.10 | 899.4 | 56.8 |
| 3 | 20 | 150 | 0.75 | 4.90 | 766.8 | 65.5 |
| 4 | 30 | 150 | 0.75 | 2.10 | 1248.9 | 53.8 |
| 5 | 20 | 125 | 0.50 | 14.30 | 242.6 | 73.5 |
| 6 | 30 | 125 | 0.50 | 7.50 | 396.8 | 63.1 |
| 7 | 20 | 125 | 1.00 | 3.60 | 1285.5 | 60.1 |
| 8 | 30 | 125 | 1.00 | 2.20 | 2196.0 | 52.8 |
| 9 | 25 | 100 | 0.50 | 14.80 | 241.4 | 67.8 |
| 10 | 25 | 150 | 0.50 | 7.50 | 342.6 | 66.1 |
| 11 | 25 | 100 | 1.00 | 9.50 | 1367.9 | 63.0 |
| 12 | 25 | 150 | 1.00 | 2.00 | 1889.7 | 56.8 |
| 13 | 25 | 125 | 0.75 | 4.70 | 763.2 | 60.8 |
| 14 | 25 | 125 | 0.75 | 4.80 | 759.4 | 60.8 |
| 15 | 25 | 125 | 0.75 | 4.60 | 763.2 | 60.7 |
| 16 | 25 | 125 | 0.75 | 4.72 | 768.6 | 60.9 |
| 17 | 25 | 125 | 0.75 | 4.62 | 763.1 | 60.8 |
| 18 | 25 | 125 | 0.75 | 4.50 | 757.8 | 60.7 |



(a) 厚度k=0.75时, K、L与出口温差构建的响应曲面



(b) K=25时, L、k与出口温差的响应曲面







Fig.8 The response surface is composed of each parameter of minimal surface and outlet temperature difference

表2为不同加热结构下数值仿真模拟的具体数值,图9所示为 极小曲面空气加热管道与线圈加热空气热管的仿真对比。

| 表2 | 不同结构的数值模拟结果对比表 | |
|----|----------------|--|
|----|----------------|--|

 Table 2
 Comparison of numerical simulation results of different structures

| 结构类型 | 出口最大温差/℃ | 压降/Pa | 外壳温度/℃ |
|-----------|----------|-------|--------|
| 极小曲面空气加热管 | 3.3 | 664.6 | 58.5 |
| 线圈加热空气热管 | 65.1 | 78.2 | 62.1 |

由图9与表2对比两种结构的仿真结果,可以发现传统 的线圈加热结构出口流体颜色出现了较大变化,且保持稳 定的状态,即出口流体保持着层流情况,出口气体温差较 大,最大温差高达65℃。而极小曲面空气加热管道在保证 了压降以及外壳最高温的要求下尽可能均匀地加热了流经 结构的空气,其出口的最大温差保持在了3.3℃以内,最大 温差减少了94.9%。显然,均匀加热的空气无疑会为使用 者带来更好的使用体验,且极小曲面空气加热管道外侧最 高温也低于传统加热管道,其安全性存在较高保证。



4 验证试验

为验证极小曲面结构在空气加热管道中的实际加热效 果,通过图10与图11所示的试验验证装置进行验证。



Fig.10 Schematic diagram of experimental principle



试验过程中,通过风扇控制空气的流速,并在出口处布

置风速测量仪测量出口的风速,使其与仿真的初始条件相符。温度传感器为热敏电阻,通过测量传感器的电阻值可以间接测量出传感器的温度值。试验时,传感器主要对出口的温度进行监测。如图10所示,编号1~4为出口处的4 个监测点。

由表3可知,当保持试验风速与仿真数据相近时,极小 曲面结构的出口均温保持在了43.6℃,与仿真结果是接近 的。且试验的出口温度的最大温差保持在了2.4℃内,这与 仿真结果也保持一致,可以说,试验基本验证了极小曲面结 构在空气加热管道上的作用,即均匀加热了流经的空气。

表3 试验结果与数值模拟结果对比表

Table 3 Comparison table of experimental results and numerical simulation results

| 数据类型 | 出口风速/(m/s) | 出口均温/℃ | 出口最大温差/℃ |
|------|------------|--------|----------|
| 仿真数据 | 10.0 | 45.5 | 3.4 |
| 试验数据 | 9.3 | 43.6 | 2.4 |

5 结论

通过研究,可以得出以下结论:

(1)热交换结构在空气加热管道中的作用可以理解为 扰动空气,由于热源功率恒定,加上封闭系统带来的热量守 恒以及质量守恒的限制,加热空气的能力存在极限情况,相 较于传统的空气加热管道,极小曲面结构可以利用其复杂 的内部流道以及较大的表面积帮助空气更好地扰动,进而 达到均匀加热的效果。

(2)管道内部添加复杂的热交换结构必然会导致流体 出现较大的压力损失,但是G形极小曲面结构曲率为零的 特点,能够尽可能降低流体的压力损失,进而在满足压降要 求的前提下,尽可能实现均匀加热空气这一目标。

(3)极小曲面结构具有优秀的热传导能力以及大表面 积这一特点,进而内置式加热棒的热量能够较快地传递至 极小曲面的整个结构,正是因为这一特点,整个系统的高热 点问题得以解决,这也是极小曲面空气加热管道外侧温度 能够保持较低温的主要原因。

参考文献

[1] 陈靖予,刘宇航,姜东晓,等.通用飞机的通风和加热系统:中 国,CN208453245U[P].2018-06-20.

Chen Jingyu, Liu Yuhang, Jiang Dongxiao, et al. Ventilation and heating system of general aircraft: China, CN208453245U [P].2018-06-20.(in Chinese)

[2] 王驰宇.飞机除冰液加热的异型管优化设计[D].天津:中国 民航大学,2018.

Wang Chiyu. Optimization design of special-shaped tube for aircraft deicing fluid heating[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2018. (in Chinese)

[3] 吴孟丽,李云鹏,聂琪,等.新型飞机除冰液加热管的优化设计[J].机床与液压,2020,48(3):141-145.

Wu Mengli, Li Yunpeng, Nie Qi, et al. Optimization design of new aircraftdeicing fluid heating tube[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(3): 141-145.(in Chinese)

- [4] 党晓民,成杰,林丽. 我国大型飞机环境控制系统研制展望
 [J].航空工程进展,2010,1(1): 21-24.
 Dang Xiaomin, Cheng Jie, Lin Li. Development prospect of environmental control system for large aircraft in China[J].
 Progress in Aeronautical Engineering, 2010, 1(1): 21-24. (in Chinese)
- [5] Yan H B,Zhang Q C,Lu T J,et al. A lightweight X-type metallic lattice in single-phase forced convection[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2015, 83: 273-283.
- [6] Ho J Y,Kcl A, Tnw B. Experimental and numerical investigation of forced convection heat transfer in porous lattice structures produced by selective laser melting[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 137: 276-287.
- [7] Wang C. Leaf vein-Inspired bionic design method for heat exchanger infilled with graded lattice structure[J]. Aerospace, 2021, 8(9):237-253.
- [8] 雷鹏福.点阵结构的航空构件轻量化设计及优化技术研究 [D].南京:南京航空航天大学,2020.

Lei Pengfu . Research on lightweight design and optimization technology of aviation components with lattice structure [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020. (in Chinese)

[9] 姜钰. 基于 TPMS 的多孔散热结构的优化设计[D]. 大连:大连理工大学,2020.

Jiang Yu. Optimal design of porous heat dissipation structure based on TPMS [D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese)

- [10] Navya T, Nurshaun S, Oraib A K, et al. 3D printed triply periodic minimal surfaces as spacers for enhanced heat and mass transfer in membrane distillation[J]. Desalination, 2018, 443: 256-271.
- [11] Cheng Z,Xu R,Jiang P X.Morphology, flow and heat transfer in triply periodic minimal surface based porous structuressciencedirect[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 170: 1-10.

- [12] 侍书成. 笔记本散热器的翅片形状对散热的影响[D]. 苏州: 苏州大学,2017.
 Shi Shucheng. Influence of fin shape on heat dissipation of notebook radiator[D]. Suzhou: Soochow University, 2017. (in Chinese)
- [13] Al-Ketan O, Ali M, Khalil M, et al. Forced convection CFD analysis of architected and 3D printable heat sinks based on triply periodic minimal surfaces[J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2020, 13(2):1-33.
- [14] 范涛峰,任童,彭孝天,等.机载电子散热设备气流分布均匀 性研究[J].航空科学技术,2020,31(8):42-47.
 Fan Taofeng, Ren Tong, Peng Xiaotian, et al. Study on air flow distribution uniformity of airborne electronic cooling equipment [J]. Aeronautical Science & Technology, 2020,31 (8): 42-47.(in Chinese)
- [15] 李顶河,郭永刚,孟宪明.复合材料层合结构热压罐固化过程的多物理场一热流固解耦数值求解[J].航空科学技术,2022, 33(2): 36-45.

Li Dinghe, Guo Yonggang, Meng Xianming. Multi physical field thermal fluid solid decoupling numerical solution for curing process of composite laminated autoclave [J]. Aeronautical Science & Technology, 2022,33(2): 36-45.(in Chinese)

[16] 江振彦.极小曲面的参数化生成与设计[D].南京:南京大学, 2018.

Jiang Zhenyan. Parametric generation and design of minimal surface [D]. Nanjing:Nanjing University, 2018. (in Chinese)

[17] 程显耀. 半导体制冷热端散热器传热特性研究[D]. 济南:山东大学,2016.

Cheng Xianyao. Research on heat transfer characteristics of hot end radiator of semiconductor refrigeration[D]. Jinan: Shandong University, 2016. (in Chinese)

[18] 刘锋,李吉泉,彭翔,等.限定加热管布局的快速热循环注塑成形模具电加热系统优化[J].中国机械工程,2020,31(22):2699-2707.
 Liu Feng, Li Jiquan, Peng Xiang, et al.Optimization of electric heating system for rapid thermal cycle injection molding die with limited heating tube layout [J]. China Mechanical Engineering, 2020,31(22):2699-2707.(in Chinese)

Design Technology of Air Heating Pipe Based on Gyroid Structure

Ye Shiwei¹, Dai Ning¹, Cheng Xiaosheng¹, Cui Yanchao², Li Ze²

1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

2. Tianjin Aviation Electromechanical Co., Ltd., Tianjin 300308, China

Abstract: When flying at high altitude, the aircraft is in an extreme environmental state, so the living environment of the cabin staff needs to be guaranteed, and it is very necessary to use air heating equipment to regulate the living environment of the crew. However, the traditional air heating equipment often occupies a large area, and the heated air often has local overheating. Therefore, this paper proposes an air heating pipeline based on minimal curved surface structure. The heating module is manufactured with 3D printing technology, and the heat source is placed inside it, which reduces the overall floor space and enhances the air heating effect. The air heating pipe takes the temperature uniformity of the outlet air as the design objective, and takes the pressure drop demand of the structure and the maximum temperature of the outer wall as the constraint conditions. The CFD simulation tool (Fluent) is used to carry out the design simulation, and then the response functions of the parameters of the minimal surface and the design objective are constructed. Finally, the optimal solution of the structure is obtained through the mathematical analysis software. By comparing the simulation of traditional heating equipment structure, it can be found that the new minimal curved surface air heating pipe can reduce the hot spot temperature of the overall structure under the condition of ensuring the pressure drop, and can heat the air flowing evenly. Through the simulation data, the temperature difference of the air at the outlet remains within 3.3°C. Compared with the traditional heating pipe, the maximum temperature difference at the outlet reduces by 94.9%, which greatly improves the temperature uniformity of the air at the outlet.

Key Words: heat exchange; minimal surface; numerical simulation; response surface; structural design