

# 某车载方舱轻质复合保温结构性能优化设计

曾小杰<sup>1</sup>, 王良模<sup>1</sup>, 陈刚<sup>1</sup>, 王陶<sup>1</sup>, 王伟利<sup>2</sup>, 李晓<sup>2</sup>

(1.南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094; 2.苏州江南航天机电有限公司, 江苏 南京 215300)

**摘要:**针对高热高寒等环境下车载方舱的保温隔热问题,以导热系数低的真空隔热板和气凝胶为芯材、聚氨酯泡沫为基材,提出了一种适用于车载方舱的新型双芯包覆式保温结构。基于 ANSYS 二次开发技术,实现对双芯包覆式保温结构样本点的批量 CFD 仿真,得出:随着芯材厚度的增加,其面密度呈线性增大、有效导热系数呈非线性减小,与气凝胶相比真空隔热板厚度对保温结构性能的影响更明显。采用代理模型和第二代非劣排序遗传算法进行了双芯包覆式保温结构性能多目标优化,优化后保温结构有效导热系数降低 55.56%,且隔热效果优于单芯保温结构。将新型双芯包覆式保温结构应用到某车载方舱中顶板,分析结果表明,在满足面密度指标要求下,中顶板传热系数降低 15.76%,显著提升了车载方舱大板的隔热性能。

**关键词:**车载方舱;保温结构;ANSYS 二次开发;CFD 仿真;多目标优化

**中图分类号:**TK124

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-2758(2022)01-0110-08

我国高热、高寒和高海拔地区面积广阔,自然灾害种类多、分布广而且频发,近年来新冠疫情在全球大爆发,国内也出现多点爆发,突发事件紧急医学救援面临严峻的形势。由于高机动性的特点,车载方舱被广泛应用于应急医疗救援,同时在边防作战、生化防护和旅游房车等领域也有广泛应用<sup>[1]</sup>。

车载方舱经常面临高热高寒等极端环境,而其保温隔热材料及结构热惰性普遍差,造成舱内环境热舒适性低和整舱能耗较高等,无法满足人们日益提升的热舒适性要求和节能环保要求。舱内环境的热舒适性和整舱能耗,不仅取决于环控系统的使用性能,还受到方舱自身隔热性能的直接影响。因此对车载方舱的隔热性能进行研究显得尤为重要。

围护结构的隔热性能一般用传热系数( $K$ 值)来表征,大量学者通过有限元分析方法展开隔热性能研究。丁华等<sup>[2]</sup>通过三维传热仿真对某军用方舱隔热性能的影响因素进行研究,结果表明保温芯材导热系数对方舱的 $K$ 值影响最大。万小鹏等<sup>[3]</sup>

对金属多层隔热结构中的反射屏展开数值分析发现其辐射热阻和位置布局会影响隔热效果。崔海英等<sup>[4]</sup>将某高速列车的内外热交换系统简化为车体壁和冷桥,针对 $K$ 值较高的子区域进行铺层优化,将整车 $K$ 值降低 10%。李伟光等<sup>[5]</sup>通过稳态传热分析发现空气层厚度对船舶甲板围壁的 $K$ 值影响较大,对垂直围壁的 $K$ 值影响较小。

为了提高车载方舱等围护结构的隔热性能,很多学者做了大量研究。Isaia 等<sup>[6]</sup>通过分析建筑物中真空隔热板(VIP)连接时的热桥效应评估了热桥对建筑物节能性能影响。Fang 等<sup>[7]</sup>对二氧化硅气凝胶微观结构进行重构,建立了考虑辐射换热的有效导热系数预测模型,并通过实验研究验证其正确性。郭靛<sup>[8]</sup>提出一种包覆式隔热材料,并分析了芯材类型及几何参数等对复合材料有效导热系数和面密度的影响。近年来,VIP 和气凝胶等先进隔热材料在建筑和集装箱等领域的成功应用为车载方舱的隔热设计提供了新的可能<sup>[9-11]</sup>。

**收稿日期:**2021-05-14

**基金项目:**国家自然科学基金(51975295)、国家重点研发计划(2017YFC0806300)与江苏省自然科学基金(BK20190462)资助

**作者简介:**曾小杰(1997—),南京理工大学硕士研究生,主要从事车载方舱 CAD/CAE 研究。

**通信作者:**王良模(1963—),南京理工大学教授,主要从事汽车系统动力学、车辆动态模拟与仿真研究。

e-mail:liangmo@njtu.edu.cn

本文以聚氨酯泡沫(PU)为基材、VIP 和气凝胶为芯材,提出一种新型双芯包覆式保温结构。以某车载方舱中顶板 3 种尺寸规格的保温结构为对象,基于 ANSYS 二次开发和 CFD 仿真分析探究该复合保温结构的特性。其次,采用代理模型技术和第二代非劣排序遗传算法对其进行性能多目标优化。最后,将优化的复合保温结构应用到某车载方舱中顶板进行性能验证,为车载方舱热工性能的优化设计提供参考。

车载方舱新型双芯包覆式保温结构的研究,可提升舱内人员的舒适性,延长舱内设备使用寿命,增强系统可靠性和降低能耗等,具有重要的理论意义和工程应用价值。

## 1 新型双芯包覆式保温结构

### 1.1 方舱几何模型

图 1 为某车载方舱的三维模型,由复合大板、包边、包角和螺栓等构成,经简化后得到中顶板、斜顶板 1、斜顶板 2、左侧板和右侧板等。

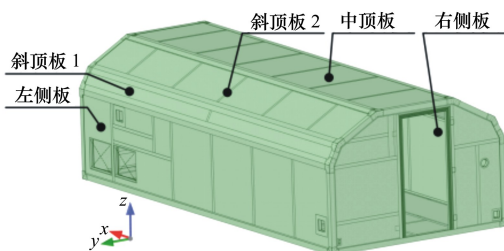


图 1 某车载方舱三维模型

本文以中顶板为例,进行轻质复合保温结构的优化设计。图 2 为中顶板结构示意图,主要包括 2 个典型区域:夹芯层区域(内蒙皮-保温芯-外蒙皮)和 5 层复合结构区域(外蒙皮-外隔热桥-骨架-内隔热桥-内蒙皮),其保温芯为 PU 材料构成的单层均质结构。由于骨架布置的不均匀,保温芯有 3 种尺寸规格,详细的几何尺寸和数量见表 1。

表 1 单层均质保温芯的几何尺寸及数量

规格	几何尺寸/mm	数量
1	800×1 184×49	1
2	960×1 184×49	5
3	588×1 184×49	1

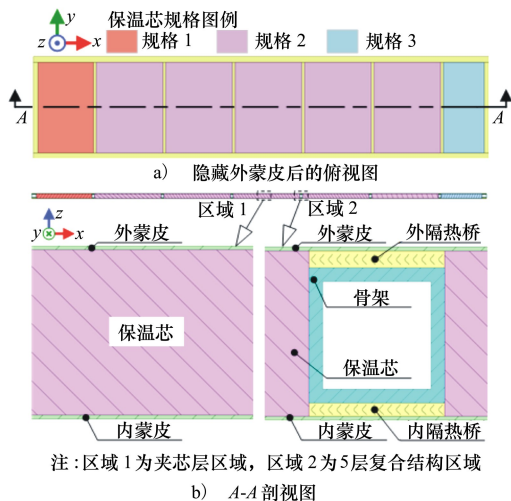


图 2 中顶板结构示意图

### 1.2 双芯包覆式保温结构设计

单层均质保温结构热工特性单一,越来越难以胜任恶劣环境的隔热需求。本文选用 3 种常见隔热材料进行复合,其物理特性见表 2。

表 2 常见隔热材料的物理参数

材料名称	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	导热系数/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	比热容/ ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
PU	60	0.036	1 045
VIP	300	0.005	1 280
气凝胶	180	0.013	549

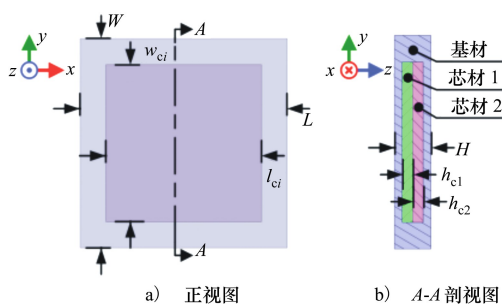


图 3 双芯包覆式保温结构示意图

考虑到材料的机加工能力和环境适应性,本文用机械性能更好的材料对导热系数较低的 2 种材料进行包覆,提出一种新型双芯包覆式保温结构(见图 3),即以 PU 为基材、VIP 和气凝胶为芯材的复合保温结构,简称双芯保温结构。为了保证双芯保温结构各向具有良好的力学性能和环境适应性,取两芯材的长宽为单层均质保温结构的 90%,即存在

(1)式所示关系:

$$l_{ci} = 0.9L, w_{ci} = 0.9W \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

与中顶板的单层均质保温芯相对应,双芯保温结构也有3种规格,分别记为规格1、规格2、规格3双芯保温结构。下面以规格1双芯保温结构为对象,进行该复合保温结构的特性仿真分析。

## 2 双芯保温结构特性 CFD 仿真分析

### 2.1 评价指标

双芯保温结构的评价指标主要包括有效导热系数和面密度。

#### 1) 有效导热系数

有效导热系数表征着双芯保温结构的热工性能,指稳态传热条件下,保温结构单位厚度、单位温度梯度下单位面积传递的热量。本文提出的双芯保温结构并非简单的多层均质结构,难以通过热阻理论准确计算等效导热系数。故参考文献[8],采用仿真分析与理论计算相结合,首先根据傅里叶定律得出等效导热系数理论公式(见(2)式),再通过CFD仿真获得稳态环境下保温结构内外表面间的热流量,然后基于理论公式计算等效导热系数。

$$K_{\text{eff}} = \frac{Q \cdot H}{S \cdot (T_i - T_o)} \quad (2)$$

式中: $Q$ 为保温结构厚度方向的热流量; $H$ 为保温结构的厚度; $S$ 为保温结构的横截面积; $T_i$ 和 $T_o$ 分别为内外表面温度。

#### 2) 面密度

为了获得更加轻质的双芯保温结构,将面密度也纳入重要的评价指标之一,其定义为固定厚度下,双芯保温结构单位面积的质量,计算公式如下

$$\rho_s = \frac{\sum_{i=1}^2 \rho_{ci} \cdot S_{ci} \cdot h_{ci} + \rho_b \cdot (S \cdot H - \sum_{i=1}^2 S_{ci} \cdot h_{ci})}{S} \quad (3)$$

式中: $\rho_{ci}$ 为第*i*种芯材的密度; $\rho_b$ 为基材的密度; $S_{ci}$ 为第*i*种芯材的横截面积; $h_{ci}$ 为第*i*种芯材的厚度。

### 2.2 双芯保温结构 CFD 仿真分析

本文设计了一系列不同几何参数的双芯保温结构,详见表3。通过CFD仿真方法建立其稳态传热模型,分析该复合保温结构的特性。

表3 不同几何参数的双芯保温结构设计方案

系列号	芯材长宽/	VIP厚度 $h_{c1}$ /			气凝胶厚度 $h_{c2}$ /		
	mm	mm			mm		
1	720×1 065	5	10	15	10		
		20	25	30			
2	720×1 065	10			5 10 15		
					20 25 30		

双芯保温结构两侧分别接触内外蒙皮,主要以热传导方式进行热的传递,故将其简化为第一类热边界条件,取两侧温度分别为 $T_i = 30^\circ\text{C}$ 和 $T_o = 20^\circ\text{C}$ 。

采用ANSYS-Fluent建立双芯保温结构稳态传热模型。基于Python脚本对ANSYS进行二次开发,实现CFD仿真分析的参数化建模。以不同的几何参数组合为输入,在Fluent中指定模型的热边界条件和材料物理属性,按(2)式和(3)式自定义模型的输出,实现快速高效的仿真模拟。

根据表3不同几何参数的结构设计方案进行仿真试验,得到双芯保温结构芯材性能曲线,如图4所示。可以看出,随着芯材厚度的不断加大,双芯保温结构的有效导热系数呈非线性减小,面密度呈线性增大;其中,VIP芯材的厚度对复合保温结构的隔热性能和质量性能影响更明显。因此,如何平衡2种性能的要求,综合3种材料的物理特性优点,以最小的质量获得更好隔热性能的双芯保温结构成为接下来要解决的关键问题。

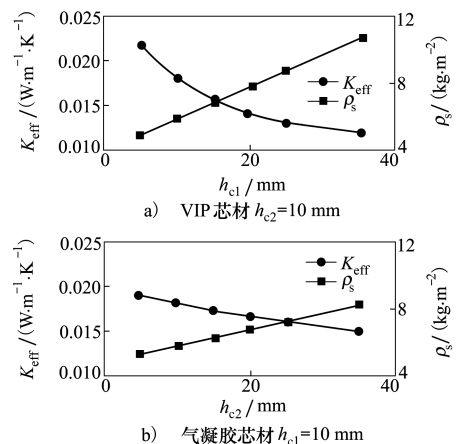


图4 双芯保温结构性能曲线

## 3 双芯保温结构性能多目标优化

### 3.1 多目标优化模型

以2种芯材的厚度为设计变量,双芯保温结构

的有效导热系数和面密度最小为目标进行多目标优化,为消除量纲及数量级影响,采用 min-max 标准化方法对 2 个目标值进行归一化处理。

因此,优化问题的数学模型描述为

$$\begin{aligned} \min N_K &= \frac{K_{\text{eff}} - \min(K_{\text{eff}})}{\max(K_{\text{eff}}) - \min(K_{\text{eff}})} \\ \min N_\rho &= \frac{\rho_s - \min(\rho_s)}{\max(\rho_s) - \min(\rho_s)} \quad (4) \\ \text{s.t.} &\begin{cases} l_{ci} = 0.9L, w_{ci} = 0.9W \quad (i = 1, 2) \\ 3 \leq h_{c1} \leq 20 \\ 3 \leq h_{c2} \leq 20 \end{cases} \end{aligned}$$

式中:  $N_K$  为归一化后的有效导热系数;  $N_\rho$  为归一化后的面密度; 考虑到实际加工和面密度, 取 2 个设计变量的上限为 20、下限为 3。

### 3.2 代理模型

为了减少优化过程中的计算量, 分别构建  $N_K$  和  $N_\rho$  的代理模型。以规格 1 双芯保温结构为对象, 根据各代理模型样本数量要求, 确定样本量为 20 组, 并使用优化拉丁超立方试验设计方法进行随机采样, 将样本点输入到 ANSYS 的参数集中进行批量仿真, 归一化处理后得到的部分结果如表 4 所示。

表 4 双芯保温结构的部分响应结果

样本点	$h_{c1}$	$h_{c2}$	$N_K$	$N_\rho$
1	11.05	3.89	0.374	0.333
2	6.58	3	0.649	0.140
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
19	19.11	6.58	0.094	0.702
20	7.47	19.11	0.333	0.491

根据生成的响应量, 分别构建响应面模型 (RSM)、径向基神经网络 (RBF)、克里金模型 (Krig-

ing) 和正交多项式 (Chebyshev) 4 种代理模型, 并随机选择 10 个样本点进行交叉验证, 使用决定系数 ( $R^2$ )、平均相对误差 (ARE)、最大误差 (MRE) 和均方根误差 (MRSE) 对比分析 4 种模型的精度。代理模型精度如表 5 所示, 4 种模型的各项系数均满足工程分析的使用要求, 其中, 克里金模型各项响应的  $R^2$  相对较小, 其他 3 种模型拟合精度均相对较高; 正交多项式模型各项响应的  $R^2$  更接近 1, MRSE 更接近 0, 拟合精度最高, 故最终选用正交多项式模型。同理优选其他规格双芯保温结构的代理模型。

表 5 代理模型精度

模型	响应	模型精度			
		$R^2$	ARE	MRE	MRSE
RSM	$N_K$	0.98	0.031	0.084	0.041
	$N_\rho$	1	$8.4 \times 10^{-9}$	$2.1 \times 10^{-8}$	$1.1 \times 10^{-8}$
RBF	$N_K$	0.98	0.022	0.079	0.031
	$N_\rho$	1	$1.8 \times 10^{-6}$	$7.3 \times 10^{-6}$	$3.0 \times 10^{-6}$
Kriging	$N_K$	0.90	0.062	0.261	0.098
	$N_\rho$	0.92	0.061	0.240	0.091
Chebyshev	$N_K$	0.99	0.007	0.013	0.008
	$N_\rho$	1	$1.3 \times 10^{-8}$	$3.0 \times 10^{-8}$	$1.6 \times 10^{-8}$

### 3.3 优化结果

采用第二代非劣排序遗传算法 (NSGA-II) 进行优化计算。设置种群大小为 20, 迭代次数为 100, 得到 Pareto 解集如图 5 所示。由图可知, 若要满足  $N_K$  最小, 则  $N_\rho$  会增大; 若要满足  $N_\rho$  最小, 则  $N_K$  会增大。一般通过赋权重的方式将多目标转化为单目标, 为使隔热性能相对更好, 以  $\min(0.6 N_K + 0.4 N_\rho)$  为目标选取最优解, 结果见图 5。

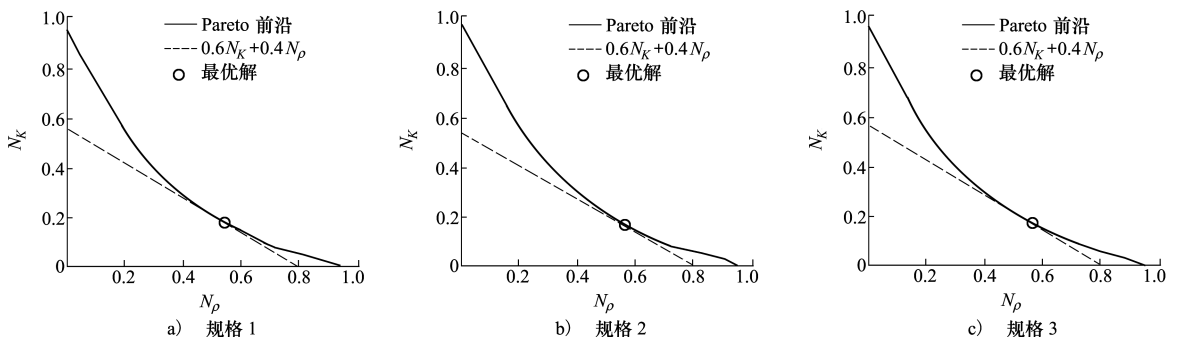


图 5 双芯保温结构的 Pareto 解集

将优化后的参数分别输入到代理模型和仿真模型中,  $N_K$  和  $N_\rho$  的计算结果如表 6 所示, 代理模型预

测结果的拟合误差均很小, 验证了所建立代理模型的正确性。

表 6 双芯保温结构芯材厚度最优解

规格	最优解 ( $h_{c1}, h_{c2}$ )	代理模型预测结果 ( $N_K, N_\rho$ )	CFD 仿真结果 ( $N_K, N_\rho$ )	拟合误差/%
1	(16.587 6, 3.601 5)	(0.177 7, 0.544 6)	(0.179 8, 0.544 7)	(-1.17, -0.02)
2	(17.095 1, 3.704 5)	(0.163 8, 0.566 6)	(0.166 2, 0.566 5)	(-1.44, +0.02)
3	(17.243 6, 3.618 9)	(0.163 4, 0.570 7)	(0.164 9, 0.570 6)	(-0.91, +0.02)

考虑到制造工艺的精度水平, 将优化结果精确到小数点后一位, 得到双芯保温结构的最终设计尺寸如表 7 所示。表 8 为图 2 中顶板保温结构优化前后的性能对比, 保温结构面密度增加 3.65 kg/m<sup>2</sup> 左右, 有效导热系数降低 55.56%, 隔热性能增强。

表 7 双芯保温结构的最终设计尺寸

规格	VIP 芯材尺寸/mm	气凝胶芯材尺寸/mm
1	720×1 065×16.6	720×1 065×3.6
2	864×1 065×17.1	864×1 065×3.7
3	529×1 065×17.2	529×1 065×3.6

表 8 保温结构优化前后性能对比

规格	$K_{eff}$	$\rho_s$
1(原设计)	0.036	2.94
1(优化后)	0.016	6.51
2(原设计)	0.036	2.94
2(优化后)	0.016	6.62
3(原设计)	0.036	2.94
3(优化后)	0.016	6.63

为进一步验证优化后双芯保温结构的隔热性能, 与单芯保温结构(仅以 VIP 或气凝胶中的一种为芯材)进行了对比分析。以规格 1(优化后)的保温芯为例, 取芯材的长宽为单层均质保温结构的 90%, 控制面密度为 6.51 kg/m<sup>2</sup>, 求解单芯保温结构的最优性能。表 9 为单芯-双芯保温结构的性能对比情况, 可以看出 PU-VIP、PU-气凝胶单芯保温结构比双芯结构导热系数分别增大了 6.25% 和 25%, 双芯保温结构比单芯保温结构具有更好的隔热效果。

表 9 单芯-双芯保温结构隔热性能对比

保温结构	芯材尺寸/mm	$K_{eff}$
PU-VIP-气凝胶 (双芯)	720×1 065×16.6(VIP) 720×1 065×3.6(气凝胶)	0.016
PU-VIP(单芯)	720×1 065×18.3	0.017
PU-气凝胶(单芯)	720×1 065×36.7	0.020

## 4 优化后中顶板性能验证

### 4.1 评价指标

将优化的双芯保温结构应用于中顶板展开性能验证, 评价指标主要包括传热系数和面密度。

#### 1) 传热系数

方舱大板等围护结构以传热系数来衡量其隔热性能。常见的仿真模拟方法有 2 种: 一种是搭建完整的舱内外流体环境, 通过给定进出口空气流速、温度等边界条件进行模拟计算; 一种是将舱内外环境简化为内外表面的热对流换热系数。由于本文仿真工况为静置低温封闭室内环境, 故采用方法二, 同时忽略辐射传热的影响。

基于稳态传热原理建立三维传热模型, 仿真得到内外表面间的热流量, 传热系数  $K$  计算公式如(5)式

$$K = \frac{Q}{A \cdot (T_i - T_o)} \quad (5)$$

式中:  $Q$  为内外表面间热流量;  $A$  为名义内表面积, 等于内外表面积的算术平均值。

#### 2) 面密度

方舱大板面密度定义为固定厚度下, 大板单位面积的质量, 计算公式如(6)式

$$\rho_{大板} = \frac{m_{大板}}{A} \quad (6)$$

### 4.2 中顶板 CFD 仿真分析

本文采用 CFD 仿真方法对比分析优化前后中顶板的各项性能。经网格独立性验证后,取网格大小为 6 mm,基于 ANSYS-Fluent 建立中顶板三维稳态传热模型,并编写 UDF 函数获取传热模型热流密度。按照相关标准规定<sup>[12-13]</sup>,将中顶板内外热环境简化为第三类热边界条件,取内表面温度为 20℃、对流换热系数为 8 W/(m<sup>2</sup>·K),外表面温度-35℃、对流换热系数为 16 W/(m<sup>2</sup>·K);设置流体为理想

不可压缩空气、导热系数为 0.024 2 W/(m·K),并开启沿 Z 负方向的重力加速度;其他各构件使用的材料及导热系数如表 10 所示。

表 10 其他各构件使用的材料及导热系数

构件名称	使用材料	导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
内/外蒙皮	5052-H34 铝板	177
骨架	结构钢 Q235A	43
隔热板	胶合板 I 类	0.15

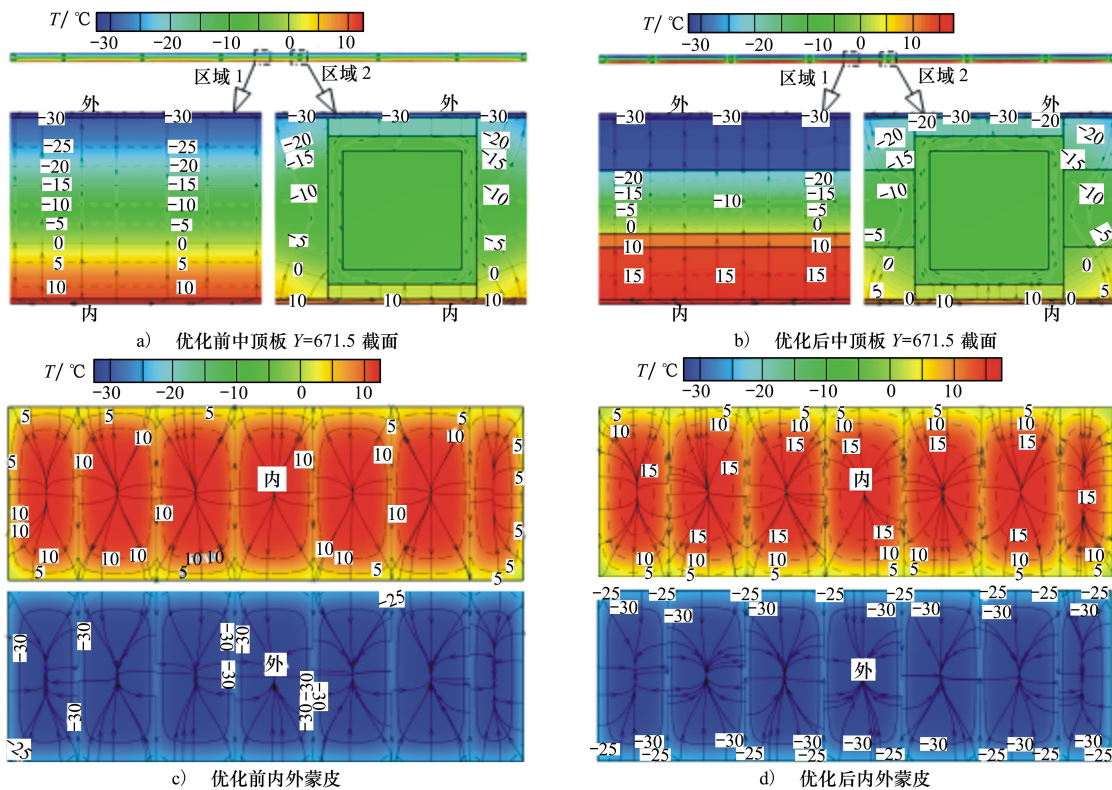


图 6 中顶板典型截面温度分布

经仿真得到中顶板典型截面温度分布如图 6 所示,其中,箭头方向表示热流密度方向。可以看到,中顶板在不同区域的传热路径不同:①区域 1 的传热路径为内蒙皮-保温芯-外蒙皮,温度由内到外变化相对均匀;②区域 2 的传热路径为内蒙皮-内隔热桥-骨架(空气)-外隔热桥-外蒙皮,温度由内到外呈“快-慢-快”变化趋势,骨架的温度相对较低,传热迅速。内蒙皮与保温芯接触的区域温度相对高,形成热源,与隔热桥接触的区域温度相对低,形成热汇,外蒙皮则刚好相反。

为-32.66℃~14.60℃,优化后两侧的温度范围为-33.96℃~17.28℃,优化后中顶板能够维持更大的内外温差,隔热性能更好。表 11 为中顶板性能优化结果,可看出,优化后中顶板虽然面密度有所增加,但仍满足固定厚度为 51.4 mm 时不超过 25.4 kg/m<sup>2</sup> 的设计要求,传热系数降低了 15.76%,隔热性能显著提高。另外,保温结构的优化设计使得骨架传热占比增加了 14.82%,可考虑对骨架结构进行改进以削弱其热桥效应。

在相同稳态传热条件下,优化前两侧温度范围

表 11 中顶板性能优化结果

状态	传热系数/ ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )	面密度/ ( $kg \cdot m^{-2}$ )	骨架传热 占比/%
优化前	1.448 7	18.07	66.50
优化后	1.220 4	21.12	81.32

## 5 结 论

本文以聚氨酯泡沫为基材、气凝胶和真空隔热板为芯材,提出了一种适用于车载方舱的新型双芯包覆式保温结构。基于 ANSYS 二次开发技术,实现对双芯包覆式保温结构样本点的批量 CFD 仿真,采用正交多项式代理模型和 NSGA-II 算法,进行了某车载方舱 3 种规格保温结构的性能多目标尺寸寻

优。通过研究得出:

1) 随着芯材厚度的不断加大,该复合保温结构的有效导热系数呈非线性减小,面密度呈线性增大;VIP 芯材厚度对其性能的影响更明显。

2) 优化后获得 3 种规格轻质复合保温结构,其有效导热系数均降低了 55.56%,面密度平均增大 3.65  $kg/m^2$  左右,且隔热效果优于单芯保温结构。

3) 在满足面密度设计要求下,将新型双芯包覆式保温结构应用到某车载方舱中顶板,中顶板传热系数降低了 15.76%,显著提升了车载方舱大板的隔热性能。但骨架的热桥效应有待进一步改进,后续可考虑增设断热桥等方式改进骨架结构,进一步优化方舱大板的热工性能。

## 参考文献:

- [1] 李岳彬,魏世丞,盛忠起,等.方舱技术发展综述[J].机械设计,2019,36(4):5-11  
LI Yuebin, WEI Shicheng, SHENG Zhongqi, et al. Summary of the development of shelter technology[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(4): 5-11 (in Chinese)
- [2] 丁华,李晨,王海军.军用方舱传热系数值的计算及优化研究[J].兵器装备工程学报,2019,40(7):25-29  
DING Hua, LI Chen, WANG Haijun. Research on calculation and optimization of the value of military shelter's heat transfer coefficient[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(7): 25-29 (in Chinese)
- [3] 王小朋,侯赤,赵美英.金属多层隔热结构反射屏阻对传热性能影响数值分析[J].西北工业大学学报,2009,27(3):310-315  
WAN Xiaopeng, HOU Chi, ZHAO Meiyong. Numerical analysis of multi-layer insulation foils' thermal resistance's influence on thermal conductivity[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2009, 27(3):310-315 (in Chinese)
- [4] 崔海英,李鑫.基于 Abaqus 的高速列车车体传热系数仿真优化计算[J].计算机辅助工程,2016,25(4):67-71  
CUI Haiying, LI Xin. Simulation and optimization calculation on heat transfer coefficient of high-speed train body based on Abaqus[J]. Computer Aided Engineering, 2016, 25(4): 67-71 (in Chinese)
- [5] 李伟光,李安邦,徐新华,等.复杂船舶围壁传热系数取值探讨[J].中国舰船研究,2014(2):78-83  
LI Weiguang, LI Anbang, XU Xinhua, et al. Heat transfer coefficient of complex ship casing walls[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2014(2): 78-83 (in Chinese)
- [6] ISAIA Francesco, STEFANO Fantucci, ALFONSO Capozzoli, et al. Thermal bridges in vacuum insulation panels at building scale[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability, 2017, 170(1): 47-60
- [7] FANG Wenzhen, HU Zhang, LI Chen, et al. Numerical predictions of thermal conductivities for the silica aerogel and its composites[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 115: 1277-1286
- [8] 郭靓.方舱热控与气流组织研究[D].长沙:中国科学技术大学,2019  
GUO Jing. Research on thermal control and airflow organization of transformable cabin[D]. Changsha: University of Science and Technology of China, 2019 (in Chinese)
- [9] THAPLIYAL P C, SINGH K. Aerogels as promising thermal insulating materials: an overview[J]. Journal of Materials, 2014, 2014(3): 1-10
- [10] KALNS S E, JELLE B P. Vacuum insulation panel products: a state-of-the-art review and future research pathways[J]. Applied Energy, 2014, 116(3): 355-375
- [11] ATIQAHA A, MASTURA M T, ALI B A, et al. A review on polyurethane and its polymer composites[J]. Current Organic

Synthesis, 2017, 14(2): 233-248

[12] 中国人民解放军总装备部. 军用方舱通用试验方法[S]. GJB 2093A-2012

[13] 中华人民共和国铁道部. 铁道客车采暖通风设计参数[S]. TB/T 1955-2000

## Performance optimization design of lightweight composite thermal insulation structure for vehicle shelter

ZENG Xiaojie<sup>1</sup>, WANG Liangmo<sup>1</sup>, CHEN Gang<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>,  
WANG Weili<sup>2</sup>, LI Xiao<sup>2</sup>

(1.School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; )  
(2.Suzhou Jiangnan Aerospace Mechanical and Electrical Industry Co., Ltd., Suzhou 215300, China )

**Abstract:** Aiming at the thermal insulation problem of vehicle shelter in high heat and cold environment, with polyurethane foam as the base material, vacuum insulation board and aerogel with low thermal conductivity as the core material, a new composite insulation structure called dual-core cladding thermal insulation structure suitable for vehicle shelter is proposed. Based on the secondary development of ANSYS, the batch CFD simulation of the sample points of the dual-core cladding thermal insulation structure is realized, and it is concluded that its surface density increases linearly and effective thermal conductivity decreases nonlinearly with the increasing of thickness of the core material. Comparing with aerogel, the thickness of the vacuum insulation board has a more obvious influence on the performance of the insulation structure. The proxy model and the second-generation non-inferior ranking genetic algorithm are used to perform the multi-objective optimization of performance of the dual-core cladding thermal insulation structure. After optimization, the effective thermal conductivity of the thermal insulation structure reduced by 55.56%, and the thermal insulation effect is better than that of the single-core thermal insulation structure. The new dual-core cladding thermal insulation structure was applied to the middle roof of a vehicle shelter, the analysis results showed that the heat transfer coefficient of the middle roof reduced by 15.76% under the requirement of surface density, which improved significantly the heat insulation performance of the vehicle shelter slab.

**Keywords:** vehicle shelter; insulation structure; ANSYS secondary development; CFD simulation; multi-objective optimization

**引用格式:**曾小杰,王良模,陈刚,等.某车载方舱轻质复合保温结构性能优化设计[J].西北工业大学学报,2022,40(1): 110-117

ZENG Xiaojie, WANG Liangmo, CHEN Gang, et al. Performance optimization design of lightweight composite thermal insulation structure for vehicle shelter[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(1): 110-117 (in Chinese)