

基于粒子群算法和遗传算法的特殊结构 多层绝热材料层密度优化研究

蒋晨辉^{1,3}, 周文杰^{2*}, 余家愿³, 邱一男¹

(1. 航天低温推进剂技术国家重点实验室, 北京 100190;

2. 浙江师范大学, 浙江 金华 321004; 3. 杭州电子科技大学自动化学院, 杭州 310018)

摘要: 针对特殊结构条件下多层绝热材料的层密度优化问题, 论文引入改进的层与层模型, 采用遗传算法和粒子群算法为优化手段, 对以多种金属涂层(铝、金、铜)为反射屏的多层绝热(MLI)结构进行了优化, 并探索了多层绝热材料在不同反射屏涂层和变密度条件下的绝热性能优化方法。采用遗传算法在不同反射屏涂层条件下对层密度的变化规律进行了研究, 结果表明, 与单金属涂层多层绝热结构进行对比, 三种金属涂层组合结构绝热性能提升 33.54%; 层密度(从冷端到热端)由大到小时比层密度由小到大时总漏热更小, 且层密度(从冷端到热端)由小到大时和由大到小的总漏热分别为 0.4109 W/m^2 和 0.3903 W/m^2 。应用粒子群算法对各分区的层密度参数进行优化, 得到了最优层间距组合参数; 对分区结构(低密度区、中密度区、高密度区)进行优化, 得到最小总漏热为 0.3916 W/m^2 , 绝热性能提升 2.27%。论文为多层绝热性能改进贡献了有益的优化方法和多种反射屏金属涂层结构的思路。

关键词: 多层绝热; 多种金属涂层; 层密度变化趋势; 粒子群算法; 遗传算法

中图分类号: TB79

文献标志码: A

文章编号: 1006-7086(2025)06-0732-08

DOI: 10.12446/j.issn.1006-7086.2025.06.008

Optimization of Layer Density in Specially-designed Multilayer Insulation Materials via Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm

JIANG Chenhui^{1,3}, ZHOU Wenjie^{2*}, YU Jiayuan³, QIU Yinan¹

(1. State Key Laboratory of Aerospace Cryogenic Propellant Technology, Beijing 100190, China;

2. Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, Zhejiang, China;

3. School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: This study addresses the critical challenge of layer density optimization in Multi-Layer Insulation (MLI) systems operating under specific structural constraints, a key factor for minimizing heat ingress in cryogenic applications. An enhanced inter-layer thermal radiation model, accounting for variable shield emissivity, is introduced. Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO) are rigorously employed as complementary optimization tools. This research systematically optimizes MLI structures utilizing diverse metal foil coatings (aluminum, gold, copper) as radiation shields and explores novel performance enhancement pathways under combined conditions of variable shield coatings and strategically designed non-uniform density distributions. The GA was first applied to analyze the intricate relationship between coating configurations and optimal layer density variation patterns. Simulation results demonstrate conclusively that the hybrid multi-metal coating structure achieves a significant 33.54% improvement in overall insulation performance compared to conventional single-metal-coated MLI. Crucially, configurations where layer density decreases monotonically from the cold end to the hot end exhibit substantially lower total heat leakage than those employing an increasing density gradient. Quantitatively, the total heat flux is measured at 0.3903 W/m^2 for the decreasing-density configuration versus 0.4109 W/m^2 for the increasing-density case, unequivocally validating the efficacy of directionally graded density design based on fundamental heat transfer

收稿日期: 2024-03-27

基金项目: 浙江省自然科学基金白马湖联合基金重点项目(LBMHZ24E060005); 推进剂国家重点实验室开放课题(SKLTSCP202203)

作者简介: 蒋晨辉, 硕士。E-mail: 13566430409@163.com

通信作者: 周文杰, 博士。E-mail: wenjiezh@163.com

principles. Building on this, the PSO algorithm was subsequently deployed to optimize individual layer spacing parameters within a segmented three-zone structure (low-density, medium-density, and high-density zones). This advanced optimization procedure yielded the globally optimal inter-layer spacing combination for the partitioned system. The resulting configuration achieves a remarkably low minimum total heat leakage of 0.3916 W/m^2 , representing a distinct 2.27% enhancement over the performance of a comparable uniform-density baseline or a non-optimized zoned structure. This work contributes robust, algorithm-driven optimization methodologies and delivers novel insights into synergistic multi-metal coating strategies combined with zoned density architectures. These findings provide a practical and significant framework for substantially advancing the thermal performance of next-generation, high-efficiency MLI systems in demanding thermal environments.

Key words: multi-layer insulation; diverse metal foil coatings; layer density variation trend; particle swarm optimization; genetic algorithm

0 引言

多层绝热材料(MLI)在航天及低温科学研究等领域扮演着至关重要的角色。其作用主要是通过多层结构减少热量的传导和辐射,以实现良好的绝热效果。随着科技的不断进步,对于多层绝热材料性能的要求不断提高。例如,在航天领域,太空舱内外温差巨大,需要高效的绝热材料来保护内部设备^[1]。而在低温科学研究中,如低温物理实验和超导应用,稳定的低温环境至关重要,多层绝热材料能够有效维持所需的低温条件。传统的多层绝热材料通常由同种金属箔和间隔层交替堆叠而成,并且采用变密度结构进行绝热^[2]。在更优绝热性能需求的牵引下,研究者们不断探索新的材料组合、结构设计以及工艺技术,以进一步提升多层绝热材料的性能,并且智能优化算法在材料设计中的应用为突破上述瓶颈提供了新思路。

20世纪50年代初,瑞典的Peterson^[3]首次研制成功真空多层绝热材料。该材料由多个高反射率的反射层组成,其中低热导率的间隔层放置在相邻反射层之间,应用时需把材料中的气压抽至 10^{-3} Pa 甚至更低,这种多层结构有效降低了辐射换热,使材料在高真空下具有极低的热导率,有着“超级绝热”之称。从1960年开始到1970年,Lockheed的Keller等^[4]进行了大量的实验测试与计算,为MLI的研究做出了重大贡献。1993年,Mcintosh^[5]假设多层绝热材料中固体导热、辐射换热和残余气体导热三种传热方式互不影响,建立了多层绝热材料逐层模型。2002年,马歇尔空间飞行中心采用一种变密度MLI泡沫塑料复合的新结构^[6],低温液体在轨45天的蒸发量比起MLI降低了58%。Johnson等^[7]根据已有的半经验公式,根据实验结果与理论计算的对比,得出了在一定的厚度下的最优层密度基本上为20层/cm。2014年,Hatakenaka

等^[8]研发出新的安装工艺,该工艺可以防止MLI材料漏气,实现了无缝连接。

国内关于MLI的研究也取得了不小的成就。浙江大学的李凡杰^[9]搭建大型MLI材料的测量平台,测试并研究了真空度和层数对于绝热性能的影响。兰州空间技术物理研究所的张安等^[10]利用Lockheed模型对变密度多层绝热材料(VD-MLI)进行理论分析。魏蔚等^[11]研究并测试了多层绝热被的性能,并且设计出大型工业化量热器。Jiang等^[12]研究了不同真空条件下泡沫多层绝热材料使用气冷屏(VCS)的情况,在热边界温度为320 K时总漏热降低了19.7%。

在优化算法方面,兰州空间技术物理研究所的苏晓宇等^[13]采用遗传算法对多层绝热材料的布置方式进行分析,与等密度多层绝热材料对比,其热流密度降低10.63%。Wu等^[14]针对变密度多层绝热结构,开展复杂约束下的多目标优化,采用正交分解和广义回归神经网络在限定总厚度与总层数的条件下实现了最优构型。

本文通过引入多种金属涂层的特殊结构(如铝、金、铜)和改进的层与层模型,结合遗传算法和粒子群算法,提出一种算法驱动的多层绝热材料优化框架,为低温绝热材料的算法设计和优化提供了新的思路。

1 传热模型的建立与验证

为了支持遗传算法(GA)和粒子群算法(PSO)对层密度的优化,需要建立总漏热 q_{tot} 与层间距 D 分布的模型。洛克希德-马丁公式^[15]因具有半经验性难以嵌入算法,而层与层模型^[5]通过逐层传热分析更适合参数化优化。所以本文选用层与层模型进行分析。但为了符合实际情况的要求,本文采用了改进后的层与层模型,如图1所示。

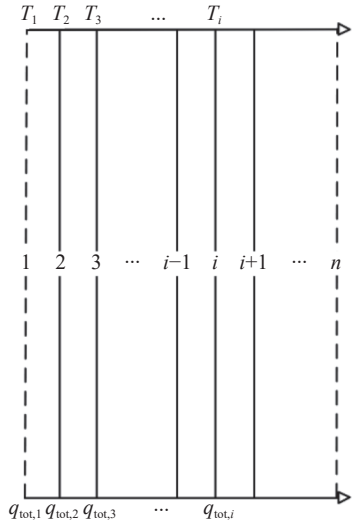


图 1 层与层模型图

Fig. 1 Layer-to-layer Model Diagram

在多层绝热结构中,间隔层的主要作用是维持多层结构的稳定性,防止层与层之间的直接接触,从而保持绝热效果的持续性。然而,间隔材料的引入会改变热阻特性。为了更准确地描述间隔层对热传导的影响,本文引入了参数 f ,定义为间隔层与反射层的实际接触面积 A_{real} 与间隔层的总面积 A_{tot} 之比。

$$f = \frac{A_{\text{real}}}{A_{\text{tot}}} \quad (1)$$

基于此,改进后的总漏热计算如式(2)。

$$q_{\text{tot},i} = q_{\text{rad},i} + q_{\text{cond},i}f + q_{\text{gas},i}(1-f) \quad (2)$$

式(2)中的辐射漏热 $q_{\text{rad},i}$ 按式(3)计算。

$$q_{\text{tot},i} = \frac{\sigma(T_{i+1}^4 - T_i^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{i+1}} + \frac{1}{\varepsilon_i} - 1} + \left[\frac{x(T_{i+1} - T_i)}{D} + \frac{y(T_{i+1}^{z+1} - T_i^{z+1})}{D(z+1)} \right] f + pa \frac{\gamma+1}{\gamma} \sqrt{\frac{R}{8\pi MT}} (T_{i+1} - T_i)(1-f) \quad (8)$$

根据式(8),利用 Matlab 工具来进行迭代,通过迭代计算每一层的热传递过程,来求解整个多层结构的温度分布和漏热,迭代流程如图 2 所示。

为了验证模型的正确性,本文将模拟的结果与实验数据进行对比,如图 3 所示。图中的实测数据来自文献 [17],模拟计算起始温度与冷端温度等设定条件与实测数据一致,间隔物材料使用玻璃纤维纸^[16],其热导率 λ_p 按式(9)计算,使用反射屏铝 ε_a 的发射率按式(10)^[18]确定。

$$\lambda_p = 2.074 \times 10^{-4} + (3.083 \times 10^{-11})T^3 \quad (9)$$

$$\varepsilon_a = (3.5 \times 10^{-3})T^{0.5} \quad (10)$$

从图 3 中可以看出改进后的层与层模型所计

$$q_{\text{rad},i} = \frac{\sigma(T_{i+1}^4 - T_i^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{i+1}} + \frac{1}{\varepsilon_i} - 1} \quad (3)$$

式中: σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数,值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$; ε 为金属发射率; T 为温度。

Hofmann^[16]指出在低温真空条件下,间隔层材料的热导率可由经验式(4)来进行拟合。在相邻反射层之间,间隔材料的平均热导率可由在该区域的积分平均来代替。平均热导率 $\lambda_m|_{T_i}^{T_{i+1}}$ 由式(5)进行计算,式中的 x 、 y 和 z 均代表拟合常数。

$$\lambda = x + yT^z \quad (4)$$

$$\lambda_m|_{T_i}^{T_{i+1}} = \frac{\int_{T_i}^{T_{i+1}} \lambda dT}{(T_{i+1} - T_i)} = x + \frac{y}{z+1} \left(\frac{T_{i+1}^{z+1} - T_i^{z+1}}{T_{i+1} - T_i} \right) \quad (5)$$

根据傅里叶导热定律及式(5),式(2)中固体漏热 $q_{\text{cond},i}$ 可由式(6)求得。其中 D 为相邻反射层之间的距离。

$$q_{\text{cond},i} = \frac{\lambda_m|_{T_i}^{T_{i+1}}(T_{i+1} - T_i)}{D} = \frac{x(T_{i+1} - T_i)}{D} + \frac{y(T_{i+1}^{z+1} - T_i^{z+1})}{D(z+1)} \quad (6)$$

式(2)中残余气体导热 $q_{\text{gas},i}$ 的计算方法与层与层模型一致,如式(7)所列。

$$q_{\text{gas},i} = pa \frac{\gamma+1}{\gamma} \sqrt{\frac{R}{8\pi MT}} (T_{i+1} - T_i) \quad (7)$$

式中: p 为传热结构中的压力; a 为相邻反射层之间的气体适应系数,通常取 0.8; γ 为气体比热容比; R 为气体常数; M 为气体摩尔质量。

将式(3)、(6)和(7)代入式(2)得到式(8),即为每层的总漏热 $q_{\text{tot},i}$ 表达式。

算出的每层温度比层与层模型更加贴近实测数据,这印证了改进后的层与层模型可以更准确反映 MLI 的实际性能。改进后的层与层模型与实测数据还有些差距的原因可能是传热方式不能等同于一维传热模型,且在实际中的残余气体可能会导致压力的变化从而改变温度分布。

2 用遗传算法和粒子群算法优化绝热结构

2.1 算法中多种金属涂层特殊结构的参数设置与验证

由于反射层材料的发射率对辐射漏热至关重要,本文采用了多种金属涂层的特殊结构,其特殊之处为,靠近冷端的反射层用发射率较小的金属铝

涂层,中间部分用发射率居中的金涂层,靠近热端的部分使用发射率最小的铜涂层;把温度区划分为冷端层、中间层和热端层三个部分,每部分占比为三分之一。

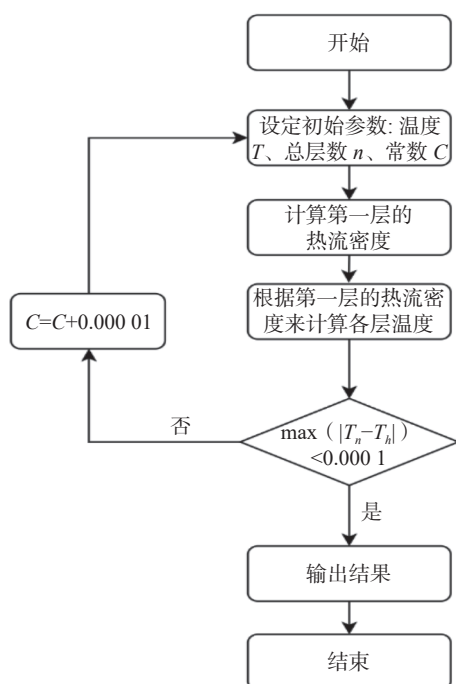


图2 层与层模型迭代流程

Fig. 2 Layer-to-layer iteration process

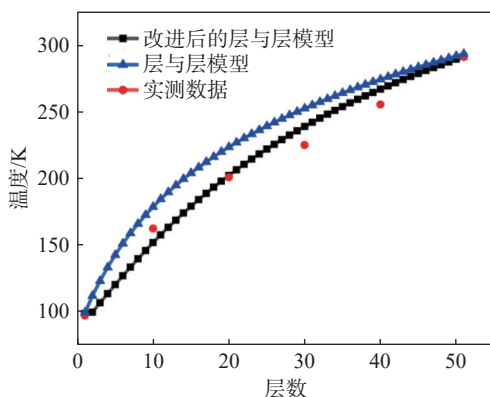


图3 理论模型与实测数据对比

Fig. 3 Theoretical model and practical verification

三种金属的发射率可由式(10)、(11)和(12)^[19]计算。

$$\varepsilon_g = (1.188 5 \times 10^{-3}) T^{0.509} \quad (11)$$

$$\varepsilon_c = (1.51 \times 10^{-4}) T^{0.687} \quad (12)$$

ε_a 、 ε_g 、 ε_c 分别为铝、金、铜涂层的表面发射率。

本文采用总层数 50 层、总厚度 0.05 m 的绝热结构,冷端温度 20 K、热端温度 300 K,层间距采

用 0.001 m/层等密度,参数 f 为 0.3,压力为 0.001 Pa,间隔物使用前述的玻璃纤维纸。在此条件下计算出不变金属涂层的 MLI 的总漏热 q_{tot} 为 0.602 9 W,改变金属涂层 VM 的 MLI 的总漏热 q_{tot} 为 0.400 7 W,VM-MLI 比 MLI 的总漏热减少了 33.54%。证明 VM-MLI 特殊结构可以提高多层绝热材料性能,进一步优化层密度结构十分必要。

2.2 利用遗传优化算法计算最优层密度

考虑到 VD-MLI 是改进 MLI 绝热性能的有效方式,本文也针对变密度 VD-VM-MLI 进行研究。研究表明 VD-MLI 在冷端需布置较多的间隔材料^[2],在热端需布置较少的间隔材料,即层密度变化为小到较大。对于 VM-MLI 的变化是否等同于 VD-MLI,本文利用遗传优化算法进行计算。

遗传优化算法流程如图 4 所示,具体步骤如下。

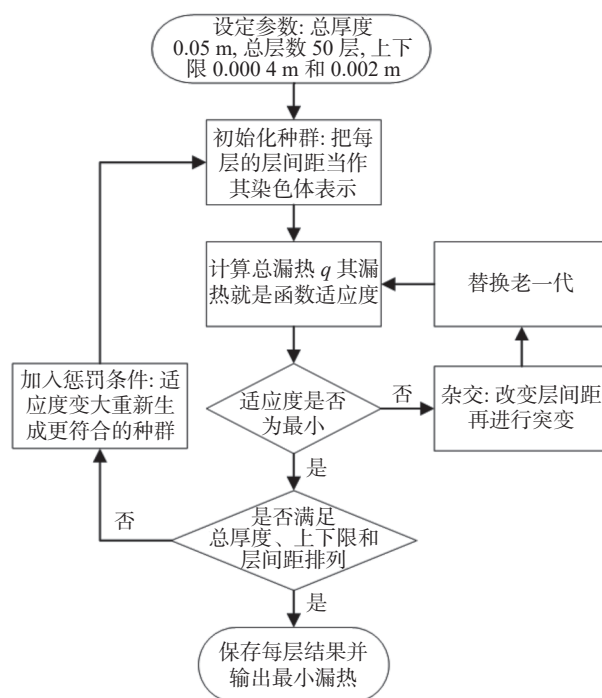


图4 遗传优化算法流程

Fig. 4 Genetic optimization algorithm process

(1) 设定算法关键参数

关键参数包括总厚度、总层数、层间距的上下限,种群数取 100,最大迭代次数 G_{max} 取 200 次,交叉概率 p_c 取 0.8,精英保留数为 2、自适应突变概率 p_m 为 0.1。

(2) 初始化种群

a) 每个个体为长度为 50 的向量 $D=[d_1, d_2, \dots, d_{50}]$,表示每层层间距的矩阵。

b) 对每个个体,在层间距约束下随机生成层间

距,通过归一化强制满足总厚度约束,不然就增加惩罚条件。

c)保留随机性以探索全局解空间。

(3)适应度计算

以总漏热 q_{tot} 作为适应性函数,目标是 최소화总漏热。对于每个个体,根据其层间距分布,利用改进后的层与层模型计算总漏热,并将其作为适应度值。

(4)选择、交叉和突变

a)选择:种群中随机选取 $k=2$ 个体,保留适应度较高者作为父代。

b)交叉:随机选择父代基因位置组合生产子代。

c)突变:对子代按概率 $p_m=0.1$ 添加随机扰动,确保突变后 $D_i \in [0.0004, 0.002]$ 。

(5)迭代终止

a)终止条件:达到最大迭代次数 $G_{\text{max}}=200$ 或者最佳适应度连续 10 代变化小于 10^{-5} 。

b)结果验证:层间距的单调递减或者递增和总厚度的误差小于 10^{-6} 。

(6)结果输出:输出最优个体的层间距分布方案 D 和该方案对应的总漏热 q_{tot} 。

当总厚度为 5 cm,总层数为 50,每层层间距上/下限制为 0.04/2 mm 时,经计算,层密度由大到小和由小到大的最优结构,总漏热分别为 0.3903 W/m^2 和 0.4109 W/m^2 。所得层密度由大到小和由小到大的每层层间距曲线如图 5 所示。数据表明不同于 VD-MLI,层密度由大到小可以提升绝热性能。为了探究是什么原因造成层密度不同于 VD-MLI 的变化规律,本文利用计算的数据,对比层密度由大到小、由小到大和等密度时辐射漏热和固体漏热的变化,由于残余气体漏热很小,所以不分析气体漏热,结果如图 6 和图 7 所示。

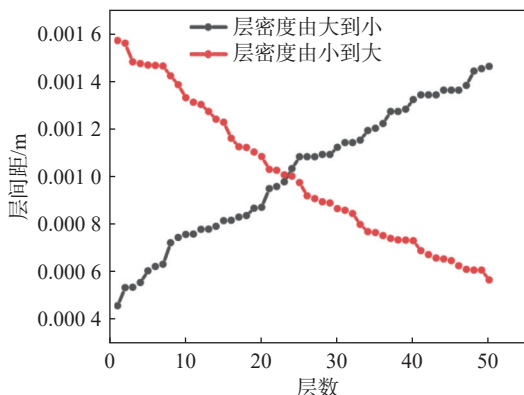


图 5 两种层密度的层间距

Fig. 5 Layer spacing between two layer densities

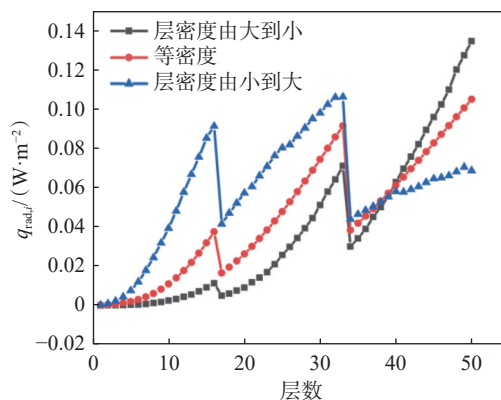


图 6 辐射漏热随着层数变化

Fig. 6 Radiative heat leakage varies with the number of layers

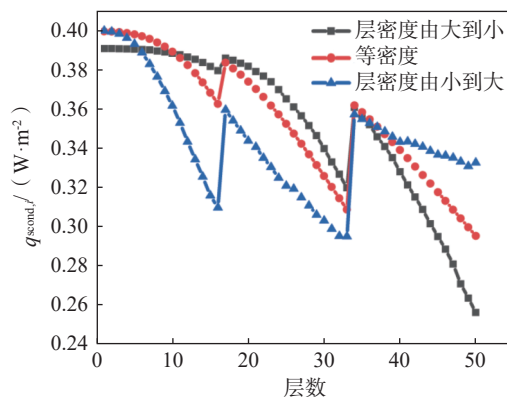


图 7 固体导热随着层数变化

Fig. 7 The thermal conductivity of a solid varies with the number of layers

由图 6 可知层密度由大到小的情况下,辐射漏热在低中温段时都是低于其他两种层密度方案,但在高温段后其厚度远大于其他两种方案,导致了辐射漏热的上升。由图 7 可知层密度由大到小的情况下,固体导热虽然在中温段时高于其他两种方案,但在高温段后固体导热急剧下降,远低于其他两种方案。两图结合起来看,虽然辐射漏热是大于其他方案,但由于固体导热的值远小于其他两者,因此总体上来说总漏热是降低的。为了清楚了解辐射漏热和固体漏热为什么这样变化,本文计算了三种层密度的温度分布并进行对比,如图 8 所示。

由图 8 可知,在层密度由大到小变化的温度分布普遍低于其他两种方案,其总漏热更小。这些数据表明了层密度由大到小变化不同于 VD-MLI 之前的结构,对于变金属箔层是正确的结构,其结构如图 9 所示,能使绝热性能提升 2.60%。

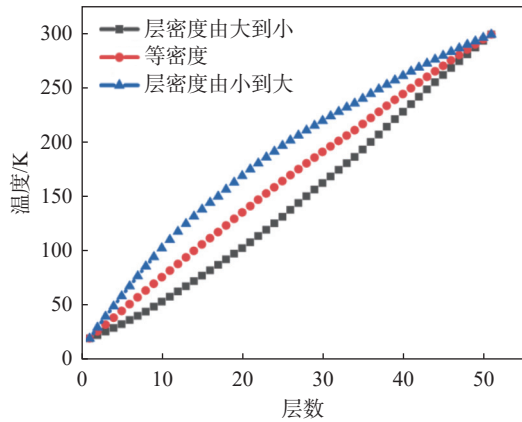


图 8 温度在不同层位置的分布数变化

Fig. 8 The temperature varies with the number of layers

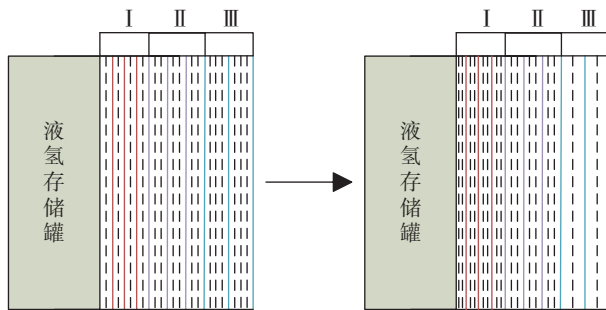


图 9 层密度由大到小的多金属箔涂层结构

Fig. 9 Multi-metallic foil coating structure with large to small layer densities

2.3 利用粒子群算法进行优化

由于层密度由大到小的结构在工程上不好实

$$q_{\text{tot}} = 0.451683 - 72.578806x - 50.419575y + 42678.068493x^2 + 4545.146194xy + 18307.853450y^2 \quad (14)$$

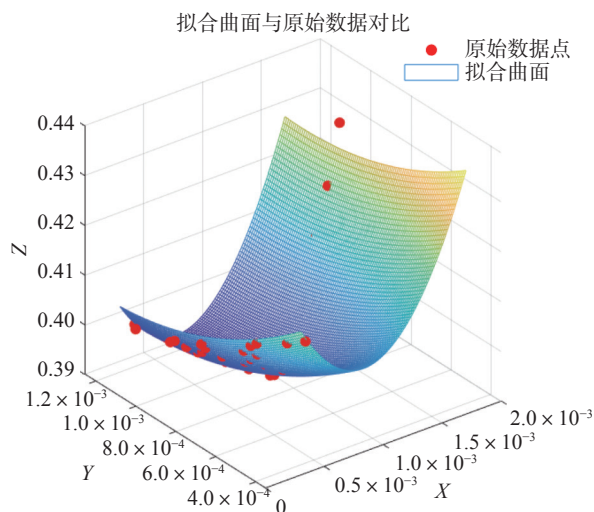


图 11 拟合函数三维图

Fig. 11 Three-dimensional plot of the fitting function

施, 需要把 VDVM-MLI 分为三个区域: 高密度区 (I)、中密度区 (II)、低密度区 (III), 其中每个区域都是等密度。把 I 区、II 区、III 区的每层层间距设置为 xyz , 单位为 m , 其中 x 、 y 、 z 的关系如式 (13) 所示, 其结构如图 9 所示。

$$z = \frac{0.05 - 16x - 17y}{17} \quad (13)$$

为了实现粒子群算法的快速优化流程, 首先本文利用最优拉丁超立方采样方法^[14]进行样本的采集, 如图 10 所示。

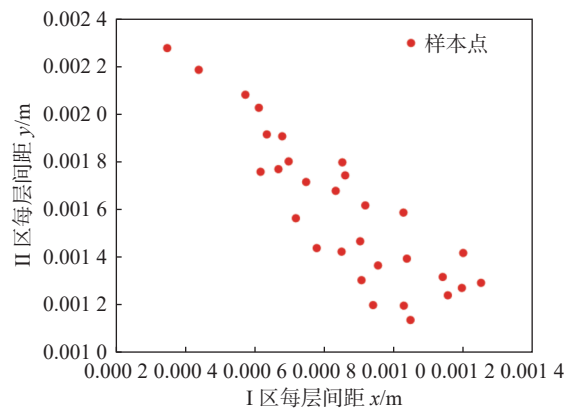


图 10 拉丁超立方采样样本

Fig. 10 Latin hypercube sampling sample

采用 Matlab 工具对这些样本进行最小二乘多项式拟合, 拟合式如式 (14) 所示, 其拟合优度 R^2 为 0.98801, 其三维图如图 11 所示。

函数 PSO 算法优化总流程如图 12 所示。

根据上述流程, 计算的最终结果显示为 $x=0.000782 m$ 、 $y=0.001080 m$ 、 $z=0.001125 m$ 、 $q_{\text{tot}}=0.3920 W/m^2$, 利用 matlab 画出粒子群迭代图, 如图 13 所示。

在得到 x 、 y 、 z 的值之后, 将其代入改进后的层与层模型中, 得到理论计算值为 $0.3916 W/m^2$, 与 PSO 拟合值 $0.3920 W/m^2$ 相差 0.10%, 其计算值可信。

尽管高-中-低密度分区结构在数值模拟中表现出较优的绝热性能, 但其在工程实施过程中仍面临一定挑战。该结构对每个区域的层间距控制要求较高, 制造及装配过程中需保证分区厚度与密度均达到设定精度, 也增加了生产工艺的复杂性和成本, 因此未来可探索基于近似分区或柔性分布策略的工程可行性优化方法。

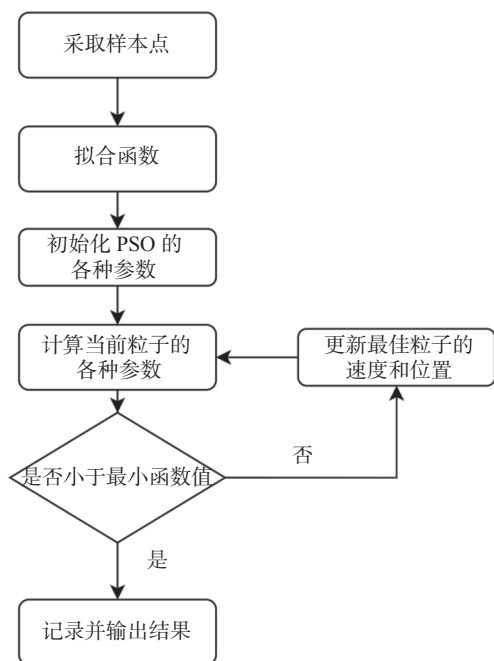


图 12 PSO 优化算法流程

Fig. 12 PSO optimization algorithm flow

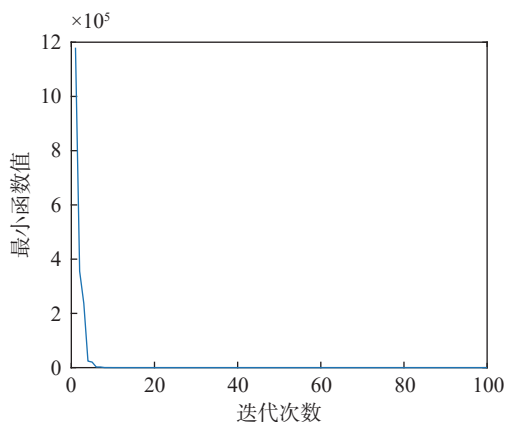


图 13 粒子群迭代过程

Fig. 13 Particle swarm iterative process

3 总结

本文针对多层绝热材料在特殊结构条件下的层密度优化问题,引入改进的层与层模型,采用遗传算法和粒子群算法为优化手段,对多种金属箔涂层(铝、金、铜)为反射屏的多层绝热(MLI)结构进行了优化。探索了多层绝热材料在变反射屏涂层和变密度条件下的绝热性能优化方法。采用遗传算法在不同反射屏涂层条件下对层密度的变化规律进行了研究,结果表明在特殊结构下层密度(从冷端到热端)由大到小时比层密度由小到大时总漏热更小;应用粒子群算法对各分区的层密度参数进

行优化,得到了最优层间距组合参数。同时得到了一些结论性数据。

(1)多金属箔涂层结构在 50 层、10 层/cm 等密度条件下的总漏热为 0.4007 W/m^2 ,较传统单一金属箔结构(0.6029 W/m^2)降低 33.54%,表明多金属组合具有显著的绝热性能优势。

(2)根据遗传算法,在变层密度条件下,该特殊结构的层密度由大到小分布时的总漏热为 0.3903 W/m^2 ,相较等密度结构时的总漏热 0.4007 W/m^2 ,其绝热性能提高了 2.60%。

(3)采用分区结构(高、中、低密度区),粒子群算法得到的最优层间距组合为 $x=0.000782 \text{ m}$ 、 $y=0.001080 \text{ m}$ 、 $z=0.001125 \text{ m}$,对应总漏热为 0.3920 W/m^2 ,与理论最优值误差仅 0.10%,验证了优化方法的可靠性。

参考文献:

- [1] 胡伟峰,申麟,杨建民,等. 低温推进剂长时间在轨的蒸发量控制技术进展 [J]. 导弹与航天运载技术, 2009, 38(6): 28-34.
- [2] 朱浩唯,黄永华,许奕辉,等. 变密度多层绝热的理论分析 [J]. 低温工程, 2011(6): 42-46.
- [3] PETERSON P. The heat-tight vessel [R]. University of Lund, Sweden, 1951.
- [4] KELLER C W, CUNNINGTON G R, GLASSFORD A P. Thermal performance of multilayer insulations[R]. NASA-CR-134477, 1974.
- [5] MCINTOSH G E. Layer by layer MLI calculation using a separated mode equation[M]//Advances in cryogenic engineering, Boston, MA: Springer US, 1994: 1683-1690.
- [6] HEDAYAT A, HASTINGS L J, BROWN T. Analytical modeling of variable density multilayer insulation for cryogenic storage[C]//AIP Conference Proceedings, American Institute of Physics, 2002, 613(1): 1557-1564.
- [7] LOUIS J W. Thermal performance of cryogenic multilayer insulation at various layer spacings[R]. NASA Report 181, 2010.
- [8] HATAKENAKA R, MIYAKITA T, SUGITA H, et al. Development and testing of a zero stitch MLI blanket using plastic pins for space use[J]. Cryogenics, 2014, 64(11): 121-134.
- [9] 李凡杰. 复合多层材料绝热性能研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [10] 张安,闫春杰,陈联,等. 基于 Lockheed 模型的变密度多层绝热理论分析与实验 [J]. 真空与低温, 2013, 19(2):

- 90–94.
- [11] 魏蔚, 汪荣顺. 多层绝热被性能测试及在 LNG 罐箱中的应用 [J]. [天然气工业](#), 2007, 27(6): 109–111.
- [12] JIANG W, YANG Y, HU C, et al. Experimental study on composite insulation with foam, multilayer and vapor cooled shield for cryogen storage under different vacuum conditions[J]. *Cryogenics*, 2023, 129(1): 103604.
- [13] 苏晓宇, 朱建炳, 马晓勇. 空间用多层绝热材料性能测试及优化布置改进分析 [J]. *真空与低温*, 2024, 30(2): 206–213.
- [14] WU H, TAN H, XU Z, et al. Multi-objective optimization of variable density multi-layer insulation for liquid hydrogen containers based on reduced-order surrogate model[J]. *Processes*, 2023, 11(5): 1383.
- [15] HEDAYAT A, BROWN T, HASTINGS L, et al. Variable density multilayer insulation for cryogenic storage[C]//36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2000: 3790.
- [16] HOFMANN A. The thermal conductivity of cryogenic insulation materials and its temperature dependence[J]. *Cryogenics*, 2006, 46(11): 815–824.
- [17] ZHENG J, CHEN L, CUI C, et al. Experimental study on composite insulation system of spray on foam insulation and variable density multilayer insulation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 130(2): 161–168.
- [18] CHOROWSKI M, GRZEGORY P, PARENTE C, et al. Optimisation of multilayer insulation: An engineering approach [R]. Geneva: CERN, 2001.
- [19] 陈国邦, 张鹏. 低温绝热与传热技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- (责任编辑: 杨建斌)

引文信息: 蒋晨辉, 周文杰, 余家愿, 等. 基于粒子群算法和遗传算法的特殊结构多层绝热材料层密度优化研究[J]. *真空与低温*, 2025, 31(6): 732–739.

JIANG C H, ZHOU W J, YU J Y, et al. Optimization of layer density in specially-designed multilayer insulation materials via particle swarm optimization and genetic algorithm[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2025, 31(6): 732–739.