

PDMS薄膜光谱调控及多层结构优化研究

邓静茹, 俞耀兴, 俞诚杨*, 朱靖宇, 林壮壮, 赵柄皓

温州大学数理学院, 浙江 温州

收稿日期: 2026年6月23日; 录用日期: 2026年7月16日; 发布日期: 2026年7月27日

摘要

为明确聚二甲基硅氧烷(PDMS)薄膜厚度及复合层状结构对被动辐射冷却性能的影响规律, 本文基于传输矩阵法构建一类薄膜光谱响应模型, 结合AHP-熵权法综合评价体系和模拟退火-粒子群混合算法, 系统探究PDMS基冷却薄膜的光谱调控特性与结构优化策略。结果表明: 随膜厚增加, PDMS薄膜在8~13 μm 大气窗口内的光谱发射率由明显干涉振荡逐渐趋于平稳, 平均发射率先快速升高后趋于饱和, 膜厚超过50 μm 后性能增益显著减小。综合评价显示: 30~50 μm 为单层PDMS薄膜较优厚度区间, 其中50 μm 方案在冷却性能、材料消耗与工程制备可行性间平衡最佳。优化得到的Ag/SiO₂/PDMS复合结构, 可通过金属反射层、介质调控层与聚合物发射层的协同作用, 有效提升太阳波段反射能力并保持高红外发射能力, 且具备一定工艺鲁棒性。这些研究可为PDMS基被动辐射冷却薄膜的设计与优化提供一定的理论参考。

关键词

聚二甲基硅氧烷, 被动辐射冷却, 传输矩阵法, SA-PSO算法, 多层薄膜结构

Spectral Control and Multilayer Structure Optimization of PDMS Thin Films

Jingru Deng, Yaoxing Yu, Chengyang Yu*, Jingyu Zhu, Zhuangzhuang Lin, Binghao Zhao

School of Mathematics and Physics, Wenzhou University, Wenzhou Zhejiang

Received: June 23, 2026; accepted: July 16, 2026; published: July 27, 2026

Abstract

To clarify the influence of the thickness and composite layered structure of polydimethylsiloxane (PDMS) films on the passive radiation cooling performance, this paper constructed a film spectral response model based on the transfer matrix method, combined the AHP entropy weight method comprehensive evaluation system and simulated annealing particle swarm optimization method,

*通讯作者。

文章引用: 邓静茹, 俞耀兴, 俞诚杨, 朱靖宇, 林壮壮, 赵柄皓. PDMS 薄膜光谱调控及多层结构优化研究[J]. 应用数学进展, 2026, 15(7): 241-253. DOI: 10.12677/aam.2026.157319

and systematically explored the spectral control characteristics and structural optimization strategies of PDMS based cooling films. The results showed that as the film thickness increased, the spectral emissivity of PDMS thin films in the 8~13 μm atmospheric window could gradually stabilize from obvious interference oscillation, and the average emission first rapidly increased and then tended to saturation. At the same time, the performance gain significantly decreased after the film thickness exceeded 50 μm . The comprehensive evaluation shows that 30~50 μm was the optimal thickness range for single-layer PDMS films, with the 50 μm scheme achieving the best balance between cooling performance, material consumption, and engineering preparation feasibility. The optimized Ag/SiO₂/PDMS composite structure could effectively enhance the solar band reflection ability and maintain high infrared emission ability through the synergistic effect of the metal reflection layer, dielectric control layer, and polymer emission layer, and had certain process robustness. In summary, these studies could provide theoretical references for the design and optimization of passive radiative cooling films for PDMS.

Keywords

Polydimethylsiloxane, Passive Radiative Cooling, Transmission Matrix Method, SA-PSO Algorithm, Multilayer Thin Film Structure

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着建筑能耗和制冷需求的持续增长,传统压缩式空调等主动制冷方式面临能耗高、运行成本大及环境负荷增加等问题。被动辐射冷却技术能够以外太空作为低温热沉,通过材料自身热辐射将热量释放至宇宙空间,在无需额外能量输入或低能耗条件下实现降温,因此近年来在建筑冷却、光伏降温、可穿戴热管理等领域受到广泛关注。已有研究指出,辐射冷却材料需要在大气透过率较高的 8~13 μm 波段具有较强红外发射能力,同时在太阳辐射波段尽可能降低吸收,以减少太阳热增益[1][2]。

聚合物基材料因具有柔性好、制备成本较低、易于大面积加工等特点,成为辐射制冷薄膜和涂层研究的重要方向[3][4]。其中,聚二甲基硅氧烷(PDMS)具有良好的柔性、透明性、化学稳定性和成膜性能,是典型的聚合物基辐射冷却材料。已有研究表明,PDMS 基材料具有较强的中红外发射能力,并可通过多孔结构、复合结构等方式改善其太阳反射和红外发射性能。例如,刘凯和贺军辉制备的 PDMS 多孔膜表现出良好的辐射冷却性能,并在高温环境下实现了平均 5.8℃ 的亚环境降温效果[5]。然而,PDMS 薄膜的辐射冷却性能不仅取决于材料本征光学性质,还受膜厚、基底及层状结构影响。对于薄膜体系,多重反射和干涉效应会改变其光谱反射、透射和发射特性;膜厚增加虽有助于提高红外吸收和发射稳定性,但也会增加材料消耗和制备成本。目前,关于 PDMS 膜厚变化下光谱响应演化规律及其与综合冷却性能之间权衡关系的研究仍相对不足。因此,本文结合传输矩阵法、综合评价方法和多层结构优化模型,分析不同膜厚及复合层状结构下 PDMS 薄膜的光谱响应与辐射冷却性能,为 PDMS 基被动辐射冷却薄膜的结构设计与性能优化提供参考。

2. 单层 PDMS 薄膜光谱发射率模型

2.1. 理论分析

为表征单层 PDMS 薄膜在中远红外波段的辐射特性,本文将其近似视为由空气(0) - PDMS 薄膜(1) -

基底(2)构成的三层介质体系。在垂直入射条件下, 电磁波在膜层中的传播行为可由特征矩阵法描述。设入射波长为 λ , 膜厚为 d , PDMS 的复折射率记为:

$$\tilde{n}_1(\lambda) = n_1(\lambda) + i\kappa_1(\lambda), \quad (1)$$

其中, $n_1(\lambda)$ 为折射率实部, $\kappa_1(\lambda)$ 为消光系数。

由薄膜干涉理论, PDMS 层内的相位厚度可写为

$$\delta(\lambda, d) = \frac{2\pi}{\lambda} \tilde{n}_1(\lambda) d. \quad (2)$$

对应地, 单层薄膜的特征矩阵为

$$M_1 = \begin{bmatrix} \cos \delta & \frac{i}{\eta_1} \sin \delta \\ i\eta_1 \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, η_1 为膜层光学导纳。记空气层与基底层的光学导纳分别为 η_0 和 η_2 , 则三层体系的等效导纳为

$$Y(\lambda, d) = \frac{M_{21} + M_{22}\eta_2}{M_{11} + M_{12}\eta_2}, \quad (4)$$

其中, M_{ij} 为矩阵 M_1 的对应元素。

依据界面处电磁场切向分量连续条件, 可得体系的振幅反射系数与透射系数分别为

$$r(\lambda, d) = \frac{\eta_0 - Y(\lambda, d)}{\eta_0 + Y(\lambda, d)}, t(\lambda, d) = \frac{2\eta_0}{\eta_0 + Y(\lambda, d)} \quad (5)$$

由此可进一步得到光谱反射率与透射率:

$$R(\lambda, d) = |r(\lambda, d)|^2, T(\lambda, d) = \operatorname{Re} \left(\frac{\eta_2}{\eta_0} \right) |t(\lambda, d)|^2 \quad (6)$$

根据能量守恒定律, 体系的光谱吸收率满足

$$A(\lambda, d) = 1 - R(\lambda, d) - T(\lambda, d). \quad (7)$$

结合基尔霍夫定律, 在热平衡条件下光谱发射率等于光谱吸收率, 因此单层 PDMS 薄膜的光谱发射率可表示为

$$\varepsilon(\lambda, d) = A(\lambda, d) = 1 - R(\lambda, d) - T(\lambda, d). \quad (8)$$

当 PDMS 薄膜沉积于高反射金属基底上时, 由于金属基底在中远红外波段的透射贡献极小, 故可近似取 $T(\lambda, d) \approx 0$, 于是上式可简化为

$$\varepsilon(\lambda, d) \approx 1 - R(\lambda, d). \quad (9)$$

考虑到 PDMS 的光学常数通常以离散数据形式给出, 为得到连续可计算的模型输入, 本文对折射率数据 $n(\lambda)$ 与消光系数数据 $\kappa(\lambda)$ 进行插值和平滑处理, 分别构造连续函数

$$n_1(\lambda) = \mathcal{I}_n(\lambda), \kappa_1(\lambda) = \mathcal{I}_\kappa(\lambda), \quad (10)$$

其中, $\mathcal{I}_n(\cdot)$ 和 $\mathcal{I}_\kappa(\cdot)$ 表示插值拟合算子。基于上述连续化处理结果, 即可计算不同厚度条件下单层 PDMS 薄膜在 8~13 μm 大气窗口内的光谱发射率曲线。

2.2. 光学常数处理与数值计算

本文所用 PDMS 复折射率数据来源于专业光学常数数据库 RefractiveIndex.INFO

(<https://refractiveindex.info/>), 选取 PDMS 数据(10:1; n, k ; $0.4 \sim 20 \mu\text{m}$)作为模型输入。该数据覆盖可见光至中红外波段, 能够满足太阳波段及 $8 \sim 13 \mu\text{m}$ 大气窗口内的光谱计算需求。由于数据库给出的光学常数为离散波长采样点, 为保证传输矩阵法在连续波长区间内的计算稳定性与模型连续性, 本文采用三次样条插值方法对折射率 $n_1(\lambda)$ 和消光系数 $\kappa_1(\lambda)$ 进行连续化处理, 得到

$$n_1(\lambda) = S_n(\lambda), \kappa_1(\lambda) = S_\kappa(\lambda), \quad (11)$$

其中, $S_n(\lambda)$ 和 $S_\kappa(\lambda)$ 分别为折射率和消光系数的三次样条插值函数。随后, 将复折射率

$$\tilde{n}_1(\lambda) = S_n(\lambda) + iS_\kappa(\lambda) \quad (12)$$

代入传输矩阵模型, 计算不同膜厚下的光谱反射率、透射率和发射率。

本文选取 $d = 3, 10, 20, 30, 40, 50, 80, 100, 150 \mu\text{m}$ 作为典型厚度样本, 计算其在 $8 \sim 13 \mu\text{m}$ 大气窗口内的发射率曲线。为表征薄膜在该波段内的整体辐射能力, 定义平均发射率为

$$\bar{\varepsilon}(d) = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, d) d\lambda, \lambda_1 = 8, \lambda_2 = 13 \quad (13)$$

实际计算中, 对各典型厚度下的 $\varepsilon(\lambda, d)$ 进行数值积分, 得到对应的平均发射率计算值。为直观表征平均发射率随膜厚变化的连续趋势, 进一步对离散计算点进行曲线拟合, 用于趋势展示和厚度区间判断。

2.3. 结果分析

2.3.1. 不同厚度 PDMS 薄膜发射率的波长响应特征

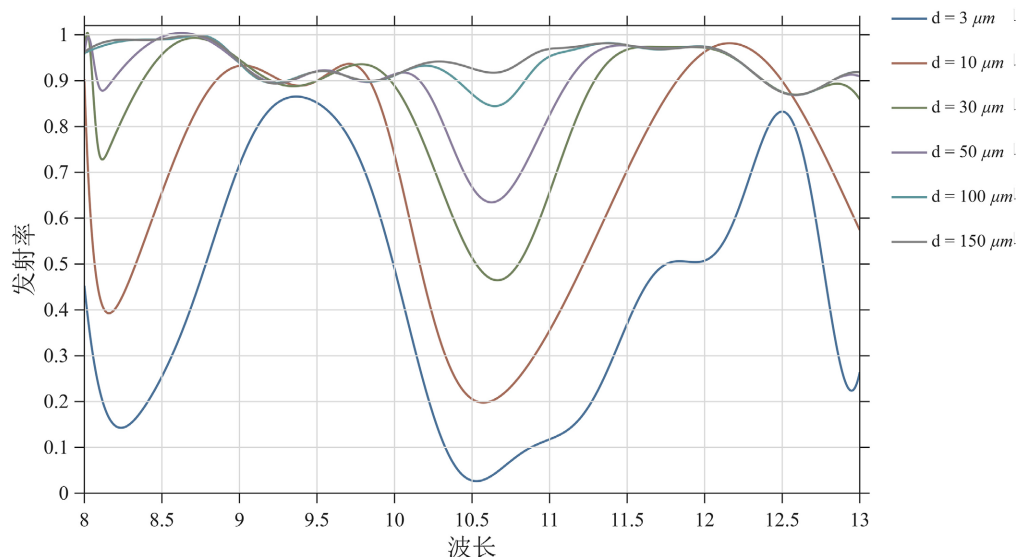


Figure 1. Spectral emissivity curves of PDMS films with different thicknesses in the $8 \sim 13 \mu\text{m}$ atmospheric window

图 1. 不同厚度 PDMS 薄膜在 $8 \sim 13 \mu\text{m}$ 大气窗口内的光谱发射率曲线

图 1 选取 6 种代表性膜厚, 给出了不同厚度 PDMS 薄膜在 $8 \sim 13 \mu\text{m}$ 大气窗口内的光谱发射率曲线。由图可见, 膜厚对发射率曲线形态具有明显调制作用。对于 $d = 3 \mu\text{m}$ 、 $d = 10 \mu\text{m}$ 和 $d = 30 \mu\text{m}$ 的薄层样本, 光谱曲线起伏较大, 局部波段存在明显发射率谷值, 尤其在约 $10.5 \mu\text{m}$ 附近衰减较为显著, 说明薄膜内部多重反射和干涉效应对局部波段的辐射能力具有较强抑制作用。当膜厚增至 $d = 50 \mu\text{m}$ 左右时, 发射率曲线的振荡幅度明显减小, 局部谷值深度降低, 表明薄膜光谱响应的稳定性较薄层样本有所改善。但该厚度下

曲线仍保留一定干涉波动,说明干涉效应尚未完全消除,部分波段仍存在发射率损耗。进一步增大膜厚至 $d = 100 \mu\text{m}$ 和 $d = 150 \mu\text{m}$ 时,发射率曲线在 $8 \sim 13 \mu\text{m}$ 波段内整体趋于平滑,多数波段发射率维持在较高水平,表明材料本征吸收逐渐占据主导,干涉效应的影响相对减弱。总体来看,PDMS 薄膜的光谱响应随厚度增加呈现由强干涉振荡向稳定高发射过渡的特征:薄层膜波动明显,中厚膜稳定性改善,厚层膜发射率较高且曲线更平稳。

2.3.2. 平均发射率随厚度的变化规律

图 2 给出了平均发射率随膜厚变化的拟合结果。由图可见,平均发射率随厚度增加呈现先快速上升、后逐渐趋于饱和的变化趋势。当膜厚较小时,增加厚度能够显著增强 PDMS 薄膜在大气窗口内的整体辐射能力;当膜厚增至 $30 \sim 50 \mu\text{m}$ 后,平均发射率已达到较高水平,继续增厚带来的提升幅度开始减小。当膜厚超过 $50 \mu\text{m}$ 后,平均发射率曲线逐渐趋于平缓,说明继续增加膜厚的边际收益有限。结合图 1 的光谱响应特征可知, $50 \mu\text{m}$ 左右是 PDMS 薄膜由干涉主导向吸收主导过渡的重要厚度区间。综合光谱稳定性与平均发射率水平, $30 \sim 50 \mu\text{m}$ 可作为单层 PDMS 薄膜进一步评价与优化的重点厚度范围。

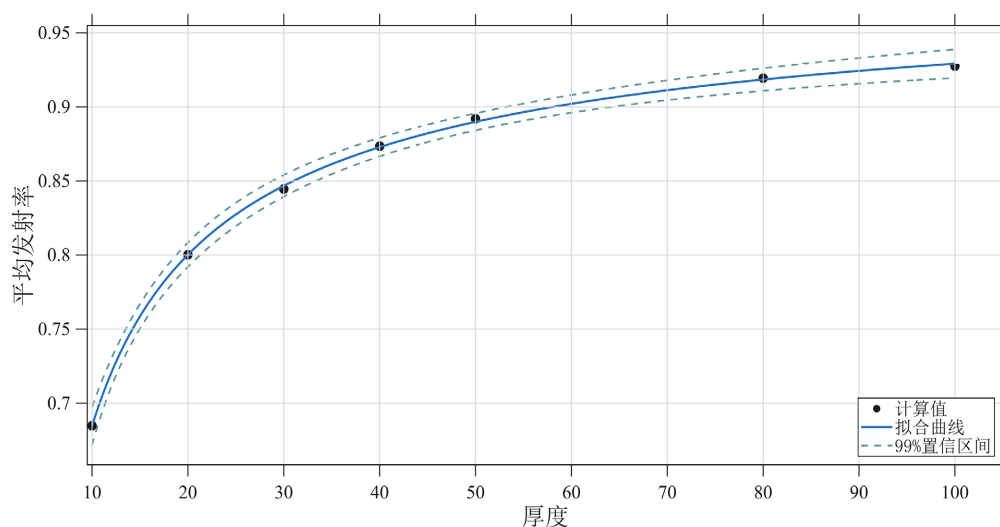


Figure 2. Curve showing the variation of the average emissivity of PDMS films with thickness

图 2. PDMS 薄膜平均发射率随厚度变化曲线

3. PDMS 薄膜辐射冷却性能评价模型

3.1. 净冷却功率与光学评价指标

为进一步从工程应用角度筛选合理厚度,本文建立由热学指标与光学指标共同构成的综合评价体系。其中,净冷却功率 P_{cool} 是衡量辐射冷却性能的核心指标,其由表面辐射、大气辐射、太阳吸收及非辐射传热共同决定,即

$$P_{\text{cool}}(d) = P_{\text{rad}}(d) - P_{\text{atm}}(d) - P_{\text{solar}}(d) - P_{\text{cond+conv}}(T_s). \quad (14)$$

考虑到非辐射传热项与器件结构、安装方式及环境条件密切相关,为突出厚度因素对材料本征冷却能力的影响,本文在后续横向比较中忽略该项,从而采用如下简化模型:

$$P_{\text{cool}}^*(d) = P_{\text{rad}}(d) - P_{\text{atm}}(d) - P_{\text{solar}}(d). \quad (15)$$

其中,表面辐射功率可表示为

$$P_{\text{rad}}(d) = \pi \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, d) B(\lambda, T_s) d\lambda, \quad (16)$$

大气辐射吸收功率为

$$P_{\text{atm}}(d) = \pi \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, d) \varepsilon_{\text{atm}}(\lambda) B(\lambda, T_{\text{amb}}) d\lambda, \quad (17)$$

太阳吸收功率为

$$P_{\text{solar}}(d) = \int_{0.3}^{2.5} [1 - R(\lambda, d)] I_{\text{AM1.5}}(\lambda) d\lambda, \quad (18)$$

非辐射传热功率为

$$P_{\text{cond+conv}}(T_s) = h_c (T_{\text{amb}} - T_s). \quad (19)$$

式中, $\varepsilon(\lambda, d)$ 和 $R(\lambda, d)$ 分别表示厚度为 d 的 PDMS 薄膜在波长 λ 处的光谱发射率和光谱反射率; $B(\lambda, T)$ 为普朗克黑体辐射函数; $\varepsilon_{\text{atm}}(\lambda) = 1 - t(\lambda)$ 为大气发射率, $t(\lambda)$ 为大气透过率; $I_{\text{AM1.5}}(\lambda)$ 为标准 AM1.5 太阳光谱辐照度; h_c 为综合换热系数; T_s 与 T_{amb} 分别表示薄膜表面温度和环境温度。

除净冷却功率外, 本文进一步引入可见光波段平均透射率 $\bar{T}_{\text{visible}}$ 、大气窗口平均发射率 $\bar{\varepsilon}_{8-13}$ 和太阳波段平均反射率 $\bar{R}_{\text{solar}}$ 三项光学指标, 以分别表征薄膜的透光性能、大气窗口红外发射能力和太阳热增益抑制能力。其定义如下:

$$\begin{aligned} \bar{T}_{\text{visible}}(d) &= \frac{1}{0.38} \int_{0.40}^{0.78} T(\lambda, d) d\lambda \\ \bar{\varepsilon}_{8-13}(d) &= \frac{1}{5} \int_8^{13} \varepsilon(\lambda, d) d\lambda \\ \bar{R}_{\text{solar}}(d) &= \frac{1}{2.2} \int_{0.30}^{2.50} R(\lambda, d) d\lambda \end{aligned} \quad (20)$$

上述四项指标分别对应净散热能力、透光性能、红外辐射能力和太阳热增益抑制能力, 能够从不同侧面刻画不同厚度 PDMS 薄膜的辐射冷却性能。

3.2. 组合赋权与综合评价

由于各评价指标在物理意义和量纲上存在差异, 且不同指标对薄膜综合性能的贡献程度并不相同, 本文采用 AHP-熵权法进行主客观结合赋权。其中, AHP 用于体现净冷却功率及关键光学指标的机理重要性, 熵权法则从样本离散程度出发给出客观权重, 二者等权融合后形成综合评价向量。

设第 i 个样本在第 j 个指标下的原始数据为 x_{ij} 。为消除量纲影响, 先对各指标进行无量纲标准化处理。对于正向指标, 采用极差标准化公式

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}}. \quad (21)$$

根据层次分析法可得到主观权重向量

$$\mathbf{w}^A = (w_1^A, w_2^A, w_3^A, w_4^A)^T, \quad (22)$$

并通过一致性检验保证判断矩阵满足 $CR < 0.1$ 。

进一步利用熵权法确定客观权重。令

$$p_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^m x'_{ij}}, \quad (23)$$

则第 j 个指标的信息熵为

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}, \quad (24)$$

相应的客观权重为

$$w_j^E = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^4 (1 - E_j)}. \quad (25)$$

于是得到客观权重向量

$$\mathbf{w}^E = (w_1^E, w_2^E, w_3^E, w_4^E)^T. \quad (26)$$

为兼顾主观机理判断与客观数据特征, 本文采用等权融合策略确定最终组合权重, 即 $\mathbf{w} = 0.5\mathbf{w}^A + 0.5\mathbf{w}^E$ 。根据原始计算结果, 最终综合评分模型可表示为

$$S_i = 0.40[P_{\text{cool}}^*(d_i)]' + 0.19[\bar{T}_{\text{visible}}(d_i)]' + 0.13[\bar{\varepsilon}_{8-13}(d_i)]' + 0.28[\bar{R}_{\text{solar}}(d_i)]'. \quad (27)$$

其中, 上标'表示无量纲标准化结果。综合评价值 S_i 越大, 表明该厚度方案在多项性能指标下的总体表现越优。

3.3. 不同厚度综合评分与推荐厚度

基于前述综合评价模型, 计算不同厚度 PDMS 薄膜的性能指标与综合评分, 结果见表 1。综合评价结果显示, 不同厚度方案的综合评分差异相对有限。这主要是由于各厚度样本在大气窗口平均发射率、可见光透射率等指标上均处于较高水平, 经无量纲化处理后, 方案间的综合评分差距有所压缩。尽管如此, 综合评分由 30 μm 时的 0.48 提高至 100 μm 时的 0.54, 增幅约为 12.5%, 表明膜厚变化仍会对 PDMS 薄膜的综合辐射冷却性能产生可辨别影响。

Table 1. Comprehensive evaluation results of PDMS films with different thicknesses

表 1. 不同厚度 PDMS 薄膜综合评价结果

厚度(μm)	净冷却功率 得分	可见光透射率 得分	大气窗口发射率 得分	太阳波段反射率 得分	综合评分
30	0.15	0.93	0.85	0.48	0.48
40	0.16	0.94	0.88	0.55	0.51
50	0.17	0.95	0.90	0.57	0.53
80	0.17	0.95	0.92	0.59	0.53
100	0.18	0.96	0.93	0.60	0.54

由图 3 可得, PDMS 薄膜性能提升主要集中在 30~50 μm 范围内。当膜厚由 30 μm 增至 50 μm 时, 综合评分由 0.48 提高至 0.53, 增量为 0.05; 而膜厚由 50 μm 继续增至 100 μm 时, 综合评分仅由 0.53 提高至 0.54, 增量为 0.01。由此可见, 50 μm 以前增加膜厚能够较为有效地提升综合性能, 而超过 50 μm 后, 继续增厚所带来的边际增益明显降低。

因此, 综合考虑辐射冷却性能、材料消耗及工程制备因素, 30~50 μm 可作为单层 PDMS 薄膜的推荐厚度区间, 其中 50 μm 左右方案在性能提升与工程可实现性之间具有较好的平衡。

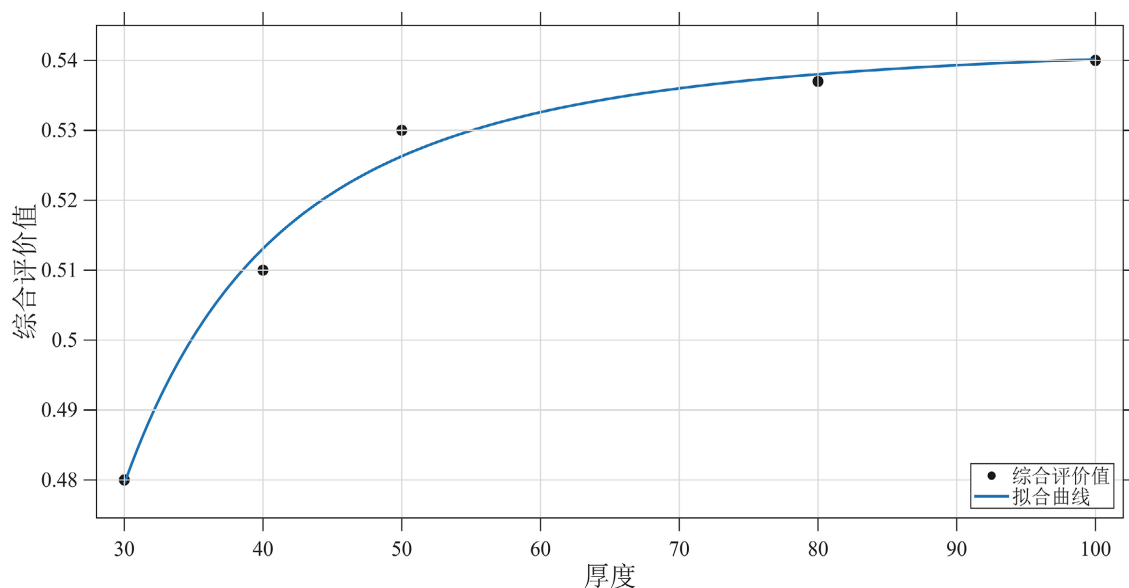


Figure 3. Curve of comprehensive evaluation value versus thickness

图 3. 综合评价价值随厚度变化曲线

4. 多层复合 PDMS 薄膜结构优化

4.1. 多层薄膜光谱模型

设多层结构为

$$\text{Air} | m_1(d_1) | m_2(d_2) | \cdots | m_N(d_N) | \text{Substrate} \quad (28)$$

其中, m_j 和 d_j 分别为第 j 层材料及厚度, N 为功能膜层数。候选材料包括顶层材料 PDMS、TPX、SiO₂, 中介质材料 SiO₂、TiO₂、Si₃N₄、HfO₂, 底层金属材料 Ag、Al。

第 j 层材料的复折射率为

$$\tilde{n}_j(\lambda) = n_j(\lambda) + ik_j(\lambda) \quad (29)$$

相位厚度为

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} \tilde{n}_j(\lambda) d_j \quad (30)$$

由第 2 节单层传输矩阵模型可推广得到, 第 j 层薄膜的特征矩阵为

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \quad (31)$$

其中, η_j 为第 j 层材料的光学导纳。

多层体系的总特征矩阵为各层特征矩阵的有序乘积:

$$M = \prod_{j=1}^M M_j = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (32)$$

设入射介质和基底的光学导纳分别为 η_0 和 η_s , 则多层结构的等效导纳为

$$Y = \frac{M_{21} + M_{22}\eta_s}{M_{11} + M_{12}\eta_s} \quad (33)$$

由边界处电磁场切向分量连续条件, 可得多层结构的振幅反射系数为

$$r(\lambda, \mathbf{m}, \mathbf{d}) = \frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \quad (34)$$

其中, $\mathbf{d} = [d_1, d_2, \dots, d_N]^T$ 为层厚向量, $\mathbf{m} = [m_1, m_2, \dots, m_N]^T$ 为材料组合向量。

实际制备过程中, 膜层表面粗糙度、界面不平整及颗粒散射等因素会引起非理想散射损失。设吸收系数、散射系数和消光系数分别为 $\kappa_a(\lambda)$ 、 $\kappa_s(\lambda)$ 和 $\kappa_e(\lambda)$, 则

$$\kappa_e(\lambda) = \kappa_a(\lambda) + \kappa_s(\lambda). \quad (35)$$

在一维近似下, 光谱辐射强度 $I_\lambda(z, \mu)$ 满足

$$\frac{\partial I_\lambda(z, \mu)}{\partial z} = -\kappa_e(\lambda) I_\lambda(z, \mu) + \kappa_s(\lambda) \int_{-1}^1 p(\mu, \mu') I_\lambda(z, \mu') d\mu' + \kappa_a(\lambda) I_{b,\lambda}. \quad (36)$$

其中, z 为膜层厚度方向坐标, μ 为方向余弦, $p(\mu, \mu')$ 为散射相函数, $I_{b,\lambda}$ 为黑体光谱辐射强度。采用离散坐标法求解上述方程, 可得到散射引起的反射率修正项 $\Delta R_{\text{sca}}(\lambda)$ 。因此, 修正后的光谱反射率为

$$R(\lambda, \mathbf{m}, \mathbf{d}) = R_{\text{TMM}}(\lambda, \mathbf{m}, \mathbf{d}) + \Delta R_{\text{sca}}(\lambda) \quad (37)$$

对应发射率为

$$\varepsilon(\lambda, \mathbf{m}, \mathbf{d}) = 1 - R(\lambda, \mathbf{m}, \mathbf{d}) - T(\lambda, \mathbf{m}, \mathbf{d}) \quad (38)$$

金属基底条件下可简化为

$$\varepsilon(\lambda, \mathbf{m}, \mathbf{d}) \approx 1 - R(\lambda, \mathbf{m}, \mathbf{d}) \quad (39)$$

4.2. 多层薄膜优化模型

基于 4.1 节得到的多层结构光谱反射率与发射率, 进一步建立多层复合薄膜结构优化模型。多层结构的评价指标沿用第 3 节的辐射冷却性能评价体系, 将单层结构中的 $\varepsilon(\lambda, d)$ 、 $R(\lambda, d)$ 替换为多层结构对应的 $\varepsilon(\lambda, \mathbf{m}, \mathbf{d})$ 、 $R(\lambda, \mathbf{m}, \mathbf{d})$ 。由于多层复合结构底层采用 Ag 或 Al 等高反射金属基底, 结构透射率可近似忽略, 因此本节不再将可见光平均透射率作为主要优化指标, 而重点考察净冷却功率、大气窗口平均发射率和太阳波段平均反射率。

由第 3 节指标定义可得, 多层结构的大气窗口平均发射率和太阳波段平均反射率分别为

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_{8-13}(\mathbf{m}, \mathbf{d}) &= \frac{1}{5} \int_8^{13} \varepsilon(\lambda, \mathbf{m}, \mathbf{d}) d\lambda, \\ \bar{R}_{\text{solar}}(\mathbf{m}, \mathbf{d}) &= \frac{1}{2.2} \int_{0.30}^{2.50} R(\lambda, \mathbf{m}, \mathbf{d}) d\lambda. \end{aligned} \quad (40)$$

简化净冷却功率沿用第 3 节的能量平衡形式:

$$P_{\text{cool}}^*(\mathbf{m}, \mathbf{d}) = P_{\text{rad}}(\mathbf{m}, \mathbf{d}) - P_{\text{atm}}(\mathbf{m}, \mathbf{d}) - P_{\text{solar}}(\mathbf{m}, \mathbf{d}). \quad (41)$$

由于多层金属基底结构不再以透光性能为主要目标, 本文在第 3 节组合权重的基础上去除可见光平均透射率对应权重, 并对剩余三项指标重新归一化, 得到 $w_1 = 0.49$, $w_2 = 0.16$, $w_3 = 0.35$ 。

于是, 得到多层复合薄膜结构优化模型如下

$$\begin{aligned}
\max_{\mathbf{m}, \mathbf{d}} F(\mathbf{m}, \mathbf{d}) &= 0.49 [P_{\text{cool}}^*(\mathbf{m}, \mathbf{d})]' + 0.16 [\bar{\varepsilon}_{8-13}(\mathbf{m}, \mathbf{d})]' + 0.35 [\bar{R}_{\text{solar}}(\mathbf{m}, \mathbf{d})]' \\
\text{s.t. } &\begin{cases} \varepsilon_{8-13}(\mathbf{m}, \mathbf{d}) \geq \varepsilon_0, \\ \bar{R}_{\text{solar}}(\mathbf{m}, \mathbf{d}) \geq R_0, \\ P_{\text{cool}}^*(\mathbf{m}, \mathbf{d}) \geq 0, \\ d_j^{\min} \leq d_j \leq d_j^{\max}, j = 1, 2, \dots, N, \\ \sum_{j=1}^N d_j \leq D_{\max}, \\ m_1 \in \Omega_{\text{top}}, \\ m_j \in \Omega_{\text{mid}}, j = 2, 3, \dots, N-1, \\ m_N \in \Omega_{\text{sub}}, \\ m_j \neq m_{j+1}, j = 1, 2, \dots, N-1. \end{cases} \quad (42)
\end{aligned}$$

其中, $\Omega_{\text{top}} = \{\text{PDMS, TPX, SiO}_2\}$, $\Omega_{\text{mid}} = \{\text{SiO}_2, \text{TiO}_2, \text{Si}_3\text{N}_4, \text{HfO}_2\}$, $\Omega_{\text{sub}} = \{\text{Ag, Al}\}$ 。 ε_0 和 R_0 分别为大气窗口平均发射率和太阳波段平均反射率阈值; $D_{\max}$ 为多层结构总厚度上限; Ω_{top} 、 Ω_{mid} 和 Ω_{sub} 分别表示顶层材料集合、中介质材料集合和底层金属材料集合。该优化模型同时包含离散材料变量和连续厚度变量, 且目标函数和约束条件均依赖多层结构的光谱响应, 因此属于混合整数非线性规划问题。

4.3. 求解方法

由于多层薄膜优化模型同时包含离散材料组合变量和连续膜层厚度变量, 直接求解难度较大。本文采用模拟退火算法与粒子群算法相结合的 SA-PSO 协同求解方法: 首先利用模拟退火算法在材料组合空间中进行全局搜索, 筛选较优材料组合; 随后在材料组合固定的条件下, 采用粒子群算法对各层厚度进行连续优化。

在材料组合筛选阶段, 固定初始厚度向量 $\mathbf{d}_0$, 以材料组合 $\mathbf{m}$ 作为模拟退火算法的状态变量。定义能量函数为

$$E(\mathbf{m}) = -F(\mathbf{m}, \mathbf{d}_0) \quad (43)$$

由当前材料组合随机扰动生成新组合, 依据 Metropolis 准则判断是否接受新状态。若新组合对应目标函数值更优, 则直接接受; 否则按概率(44)接受。

$$P_{\text{acc}} = \exp\left(-\frac{\Delta E}{T_k}\right) \quad (44)$$

其中 ΔE 为能量差, T_k 为当前退火温度。退火温度按(45)逐步降低。

$$T_{k+1} = \alpha T_k, 0 < \alpha < 1 \quad (45)$$

经过多轮搜索后, 保留目标函数值较高且满足材料拓扑约束的材料组合。

在厚度优化阶段, 固定筛选得到的材料组合, 采用粒子群算法优化厚度向量。粒子位置表示一组候选厚度方案, 每次迭代后将其代入多层薄膜光谱模型, 计算 $\bar{\varepsilon}_{8-13}$ 、 $\bar{R}_{\text{solar}}$ 和 P_{cool}^* , 并根据目标函数 $F(\mathbf{m}, \mathbf{d})$ 更新适应度值。对超出厚度边界或总厚度约束的粒子进行边界修正或罚函数处理。

当达到最大迭代次数, 或连续若干次迭代中最优适应度变化小于设定阈值时, 停止计算, 输出最优材料组合及其对应的厚度向量。通过上述两阶段求解, 可将离散材料筛选与连续厚度优化分离处理, 从而提高多层复合薄膜结构优化的求解效率。

4.4. 优化结果与可靠性分析

基于 SA-PSO 协同优化方法, 得到的较优多层复合结构为 Ag/SiO₂/PDMS, 对应厚度约为 0.15 μm、0.80 μm 和 50.00 μm。其中, Ag 层用于增强太阳波段反射, SiO₂ 用于调控层间干涉效应, PDMS 层主要提供 8~13 μm 大气窗口内的红外发射能力。该结果表明, 多层结构能够通过金属反射层、介质调控层和聚合物发射层的协同作用, 提高薄膜的光谱选择性。

图 4 给出了 SA-PSO 算法的优化结果。由图 4(a)可得, 模拟退火阶段的适应度在迭代初期存在一定波动, 随后最优适应度逐渐提高并趋于稳定, 这说明材料组合搜索过程能够有效获得较优候选结构。由图 4(b)可得, 粒子群优化阶段的适应度呈现先快速提高、后逐渐收敛的变化趋势, 这表明在材料组合确定后, 膜层厚度参数得到进一步优化。两阶段收敛结果说明, SA-PSO 方法能够较好地处理多层薄膜结构中离散材料选择与连续厚度优化相耦合的问题。

为检验优化结构对制备误差的敏感性, 本文对最优厚度向量 $\mathbf{d}^{\text{opt}}$ 引入符合正态分布的工艺误差, 构造扰动样本

$$\mathbf{d}^{(s)} = \mathbf{d}^{\text{opt}} + \Delta \mathbf{d}^{(s)}, s = 1, 2, \dots, S. \quad (46)$$

其中, $S = 1000$ 为蒙特卡洛样本数。考虑各膜层厚度存在约 5% 的随机工艺误差, 令

$$\Delta d_j^{(s)} = d_j^{\text{opt}} \delta_j^{(s)}, \delta_j^{(s)} \sim N(0, 0.05^2). \quad (47)$$

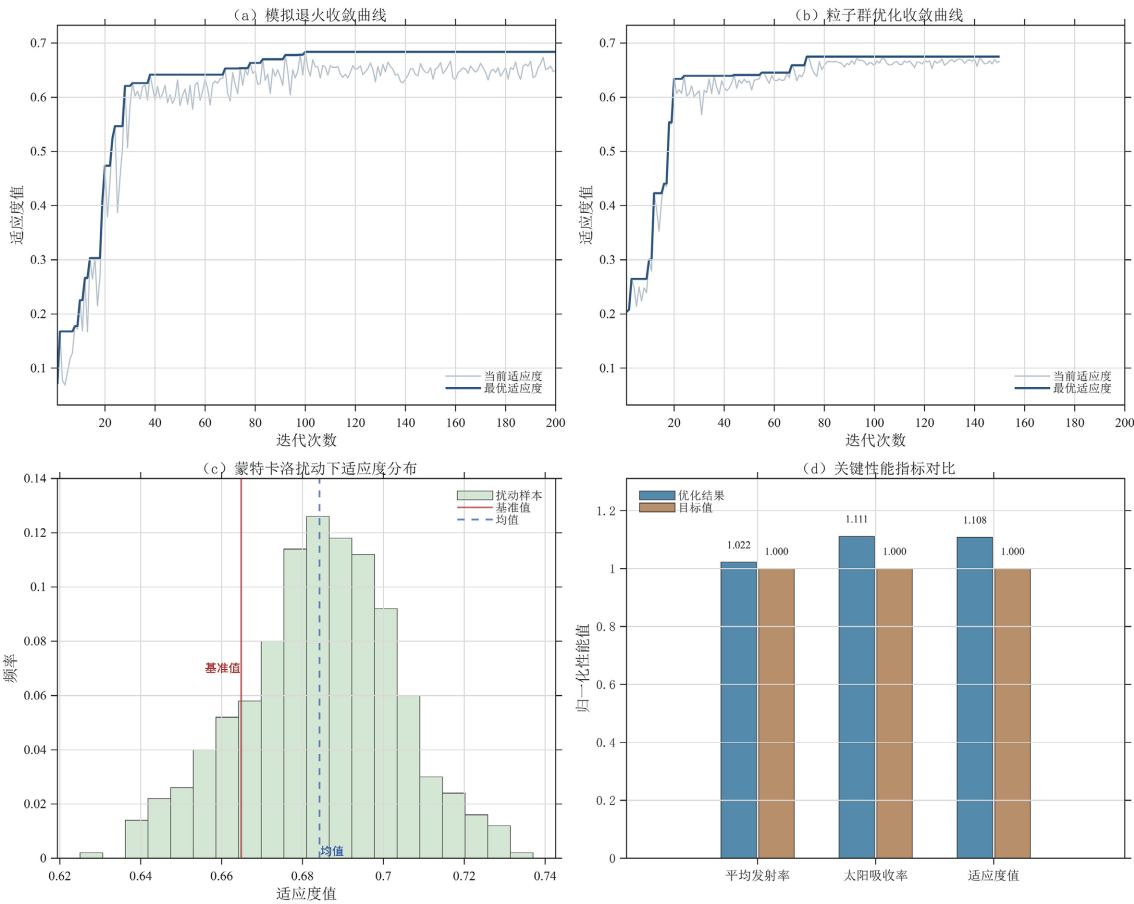


Figure 4. Optimization results for multilayer films

图 4. 多层薄膜优化结果

对 1000 组扰动样本重新计算综合适应度,并统计其分布特征。由图 4(c)可见,扰动样本主要集中在均值附近,且均值与基准值处于相近水平,这说明该结构在一定厚度误差范围内仍能保持较稳定的综合性能,具有一定的工艺鲁棒性。

图 4(d)给出了优化结构部分关键性能指标及综合适应度相对于目标值的归一化对比。其中,平均发射率和综合适应度采用实际值与目标值之比,太阳吸收率作为上限型指标,采用目标上限与实际值之比。因此,各项归一化性能值大于 1 均表示相应性能达到并优于预设目标。结果表明,所得 Ag/SiO₂/PDMS 结构具有较强的大气窗口红外发射能力和较低的太阳吸收水平,其综合适应度亦达到预设要求。

综上,Ag/SiO₂/PDMS 三层复合结构能够在有限厚度范围内实现太阳反射与红外发射的协同优化。收敛过程、厚度扰动分析和性能指标对比共同表明,该结构具有较好的优化稳定性和工程可实现性,可为 PDMS 基辐射冷却薄膜的多层结构设计提供参考。

5. 结论

本文围绕 PDMS 基被动辐射冷却薄膜的光谱调控与结构优化问题,提出了由单层光谱发射率模型、厚度综合评价模型和多层复合结构优化模型构成的分析框架。基于传输矩阵法计算不同厚度 PDMS 薄膜的光谱响应,并结合净冷却功率及光学评价指标对薄膜性能进行综合分析,主要结论如下。

首先,PDMS 薄膜厚度对 8~13 μm 大气窗口内的光谱发射率具有明显调制作用。较薄膜层受干涉效应影响较强,发射率曲线波动明显,局部波段存在发射率下降;随着膜厚增加,光谱曲线逐渐趋于平稳,大气窗口平均发射率呈现先快速上升、后逐渐趋于饱和的变化规律。当膜厚超过约 50 μm 后,继续增厚带来的发射率提升幅度明显减小,说明单纯增加膜厚的边际收益有限。

其次,基于净冷却功率、可见光平均透射率、大气窗口平均发射率和太阳波段平均反射率,建立综合评价模型。求解结果表明,不同厚度样本的综合评分随膜厚增加整体提高,性能提升主要集中在 30~50 μm 区间;当膜厚继续增加至 80~100 μm 时,综合评分增幅趋缓。综合考虑辐射冷却性能、材料消耗和工程制备因素,30~50 μm 可作为单层 PDMS 薄膜的推荐厚度区间,其中 50 μm 左右方案具有较好的性能与制备可行性平衡。

最后,在单层膜分析基础上,进一步构建多层复合 PDMS 薄膜结构优化模型,并采用 SA-PSO 协同优化方法进行求解。优化得到的较优三层复合结构为 Ag/SiO₂/PDMS,对应厚度分别约为 0.15 μm 、0.80 μm 和 50.00 μm 。其中,Ag 层主要用于增强太阳波段反射,SiO₂ 层用于调控层间干涉效应,PDMS 层主要提供大气窗口内的红外发射能力。该结构能够通过金属反射层、介质调控层和聚合物发射层的协同作用,在保持较高红外发射能力的同时有效抑制太阳热吸收,从而改善薄膜的综合冷却性能。蒙特卡洛扰动分析表明,该结构在一定厚度误差范围内仍具有较稳定的综合性能,说明其具备一定的工艺鲁棒性。

综上,本文提出的模型与优化方法能够较好地描述 PDMS 薄膜厚度及多层结构对辐射冷却性能的影响,可为 PDMS 基辐射冷却薄膜的厚度选择和复合结构设计提供一定的指导参考。

基金项目

温州大学国家级大学生创新创业训练计划项目(JWDC2025108)。

参考文献

- [1] 孙晓洁,高梦宇,郑玉祥,等. 辐射冷却材料的研究进展及应用[J]. 红外与毫米波学报, 2022, 41(1): 230-247.

-
- [2] 任首龙, 陆庭中, 唐波, 等. 辐射冷却材料研究进展[J]. 化工进展, 2022, 41(4): 1982-1993.
 - [3] 刘熙远, 傅强, 邓华. 多功能聚合物基辐射制冷材料的发展近况及应用[J]. 高分子通报, 2025, 38(4): 572-589.
 - [4] 郭煜, 付慧坛, 岳东钰, 等. 聚合物基辐射制冷材料的研究进展[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(5): 177-185.
 - [5] 刘凯, 贺军辉. 复合模板法制备高效防水、透湿及辐射冷却 PDMS 多孔膜[J]. 复合材料学报, 2026, 43(2): 845-856.