

基于辐射制冷与电致变色的可调节 多层膜性能研究*

王宇泉[#] 成泽帅[#] 江可扬 魏琳扬[†] 历秀明[‡]

(东北大学冶金学院, 沈阳 110819)

(2024 年 6 月 22 日收到; 2024 年 7 月 24 日收到修改稿)

针对车用空调的高能耗问题, 设计了一种将辐射制冷膜和电致变色膜结合的可调节多层膜. 为研究多层膜的降温与温度调节性能, 搭建了贴膜方箱装置, 并在室内对贴膜装置进行太阳光模拟器照射实验, 结果表明, 多层膜相比单层辐射制冷膜最大箱内降温提升约 9.8 °C, 且能通过改变多层膜透过率实现约 4.6 °C 的温度调节, 具有较强的降温与温度调节潜力. 为研究多层膜的环境适应性, 在夏季和冬季的室外对贴膜装置进行实际太阳照射实验, 结果表明: 夏季多层膜降温效果明显, 最大箱内降温高达 12.9 °C; 而冬季多层膜降温效果较弱, 最大箱内降温仅有 1.9 °C, 具有良好的环境适应性. 综上, 该多层膜可为降低汽车空调能耗提供一种新的解决方案.

关键词: 辐射制冷, 电致变色, 温度调节

PACS: 44.40.+a, 92.60.Vb, 82.47.Jk, 88.05.Ec

DOI: 10.7498/aps.73.20240863

CSTR: 32037.14.aps.73.20240863

1 引言

我国正面临着日益严重的能源与环境问题, 化石能源的消耗仍然占据主导地位, 其中汽油和柴油的消耗量约占化石能源总消耗量的 5% 左右. 交通运输是其最主要的消费领域 (汽油 44%、柴油 65%)^[1], 而汽车空调的使用会使汽车的总油耗增加 10%—30%^[2]. 为了应对节能减排的迫切需求并缓解上述压力, 必须采取措施降低现有车辆空调的能耗.

现阶段车内温度调节系统除了依赖空调调控等主动式方法外, 一些零能耗被动式降温方法也日

益受到青睐, 如停车时用遮阳帘覆盖车顶、车窗贴膜、使用玻璃涂层等^[3]. 另外, Mousavi 和 Azzopardi^[4]提出在车窗上使用辐射制冷材料, 以减少调节车内温度所需能量消耗. 辐射制冷作为一种无需能源输入的制冷技术^[5-7], 借助 8—13 μm 的中红外波段大气窗口, 将地表物体释放的热辐射导向宇宙空间, 从而实现被动降温, 具有低成本、实用性强、无污染等优点^[8-10].

然而, 上述技术虽然能够实现一定程度的降温, 但无法在车辆行驶过程中主动智能调节车内温度. 在主动智能调控的技术中, 通过电致变色材料^[11]实现智能温控的技术逐渐走进大众视野. 电致变色材料通过改变表面特性来动态控制太阳能增益^[12],

* 国家自然科学基金 (批准号: 52106079)、辽宁省自然科学基金联合基金 (批准号: 2023-MSBA-059) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: N2325021) 资助的课题.

[#] 同等贡献作者.

[†] 通信作者. E-mail: weilinyang@smm.neu.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: lixiuming@smm.neu.edu.cn

可以改善车内热舒适性以及提升其能源效率^[13]. 如今, 电致变色材料已经发展出众多类别, 比如电致变色发光材料^[14]、柔性电致变色材料^[15]、一体化凝胶型电致变色器件^[16]、聚合物分散液晶 (polymer dispersed liquid crystal, PDLC)^[17] 和悬浮粒子器件^[18] 等. 为满足汽车的实际使用需求, 材料必须具备适当的可见光透过率. 相比其他变色材料, PDLC 具备自由变色、驱动电压较低, 响应速度快 (约 40 ms)^[19]、成本低及技术成熟等优势, 可成为理想的变色材料^[20].

综上所述, 本研究创新地提出将辐射制冷膜与 PDLC 电致变色膜两种单层膜结合形成多层膜的设计, 使辐射制冷膜被动制冷, 同时电致变色膜主动调节太阳辐射的进入, 结合主被动调节能力可以辅助车用空调系统对车内温度实现动态调节. 本文通过实验方法, 研究多层膜结构在制冷效能上的潜在优势, 在多样化的环境条件下测试了多层膜的性能, 验证其温度调控功能的可靠性. 本工作可以为降低车用空调能耗与提高乘客舒适度提供一条新的路径.

2 实验设计

2.1 实验原理

本研究使用市面上常见的辐射制冷膜和 PDLC 电致变色膜两种单层膜结合形成多层膜. 为减少辐射制冷膜制冷量向外散失, 多层膜的结合方式为电致变色膜在外侧, 辐射制冷膜在内侧, 使用时只需要给电致变色膜施加电压. 为便于进行原理描述, 对理论模型进行简化, 如图 1 所示, 将所研究的汽车不规则体简化为一个方箱, 方箱一侧开口, 依次覆盖多层膜与玻璃, 模拟贴膜的汽车车窗, 其余五面覆盖隔热材料.

基于能量平衡, 多层膜的净制冷功率 P_{net} 可表示为

$$P_{\text{net}} = P_{\text{rad}} - P_{\text{solar}} - P_{\text{atm}} - P_{\text{nonrad}}, \quad (1)$$

式中, P_{rad} 为膜的总辐射功率, P_{solar} 为吸收的太阳辐射功率, P_{atm} 为吸收的大气辐射功率, P_{nonrad} 为非辐射换热损失功率. 方程 (1) 表明, 通过施加不同电压改变多层膜的表面特性, 可以改变进入箱内的太阳辐射 P_{solar} , 实现制冷功率的动态变化, 从而使多层膜具备一定的调节功能, 因此多层膜相对两种单层膜应该具有更好的制冷及温度调节的能力.

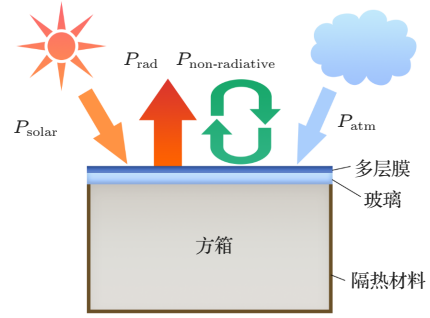


图 1 理论模型示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the theoretical model.

2.2 实验材料

组成多层膜的两种单层膜主要参数信息如表 1 和表 2 所列. 电致变色膜的工作机理及状态变化如图 2 所示. 在没有电场作用的情况下, 液晶分子随机无序排列, 电致变色膜处于不透明状态, 即全雾状态; 当通入交流电时, 液晶分子实现有序排列, 电致变色膜从不透明状态转换为透明状态. 通过电场作用, 电致变色膜能够在透明与不透明状态之间的多档转换: 当外加电压分别为 0, 15 和 30 V 时, 电致变色膜呈现全雾、半透和全透状态.

表 1 辐射制冷膜主要参数

Table 1. Main parameters of radiation cooling film.

参数	百分数/%	参数	百分数/%
反射率	8	光太阳能增益系数	1.24
穿透率	66	太阳能总隔断率	47
紫外线阻隔率	99.9	热增益减少率	28.67
太阳能辐射吸收系数	0.53	炫光减少率	26

表 2 电致变色膜主要参数

Table 2. Main parameters of electrochromic film.

参数	数值	参数	数值
穿透率(30 V)%	73.5	功耗/(W·m ⁻²)	6
穿透率(15 V)/%	65.5	使用寿命/h	>50000
穿透率(0 V)/%	10.4	工作温度/℃	-20—70
紫外线隔断率/%	98	可视角度/(°)	120
工作电压/V	0—30	基材厚度/μm	600±50

2.3 实验装置与过程

理想情况下多层膜性能分析实验在室内进行. 实验装置如图 3 所示, 主体是 14 cm × 30 cm × 33 cm 的方箱, 方箱外部贴上隔热棉以形成隔热效果, 方箱一侧有一 5 cm × 10 cm 的方口, 并安装 8 mm 厚玻璃, 同时在方箱内部放置热电偶以测量箱内温度, 并使用太阳光模拟器来施加热负荷.

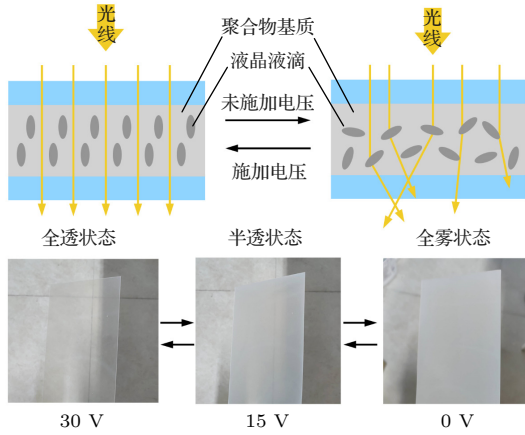


图 2 PDLC 电致变色膜机理图及实物状态变化图
Fig. 2. PDLC schematic and physical state change diagram.

为研究多层膜相对于辐射制冷膜和电致变色膜两种单层膜是否具有更佳的制冷性能, 通过在玻璃上贴多层膜、两种单层膜及不贴膜进行对照实验; 为研究多层膜的温度调节性能, 在玻璃上贴多层膜后对多层膜施加不同的控制电压进行多组对照实验. 实验在室内环境中进行, 各组实验的起始温度为 $23.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 控制电压取 0, 15 和 30 V, 为使温度变化显著的同时避免方箱内温度过高, 以 1 min 的时

间间隔连续测量并记录 40 min 后装置内温度变化, 并以该时间段内装置内温度变化情况表征不同条件下的制冷性能.

实际情况下多层膜性能分析实验在中国沈阳市东北大学 (北纬 $41^{\circ}77'$, 东经 $123^{\circ}42'$) 的空旷广场上进行, 该部分实验对多层膜在实际情况下的制冷和温度调节性能进行研究. 本实验选取夏季、秋季和冬季中季节特征明显的几天, 共进行 10 余天的实验. 实验装置如图 4 所示, 由两个铁质方箱、普通玻璃、热电阻、多层膜、辐射制冷膜和检测仪器组成. 实验测量装置为两个尺寸 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 300\text{ mm}$, 厚 1 mm 的铁质方箱, 上表面正中间各有 $200\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 的开口, 开口处均装上等面积的 5 mm 厚普通玻璃, 方箱内部均使用 10 mm 的隔热棉. 其中一个铁质方箱的开口仅装有玻璃, 另一个铁质方箱除装有玻璃外, 还覆盖有与玻璃尺寸相同的多层膜, 两个方箱内部均放有热电阻来测量箱内温度. 此外, 本实验还设置了气象传感器, 实时测量环境温度、太阳辐射强度、风速和相对湿度等物理量, 并用数据采集器进行记录. 本研究将贴膜组作为实验组, 不贴膜组作为空白对照组.

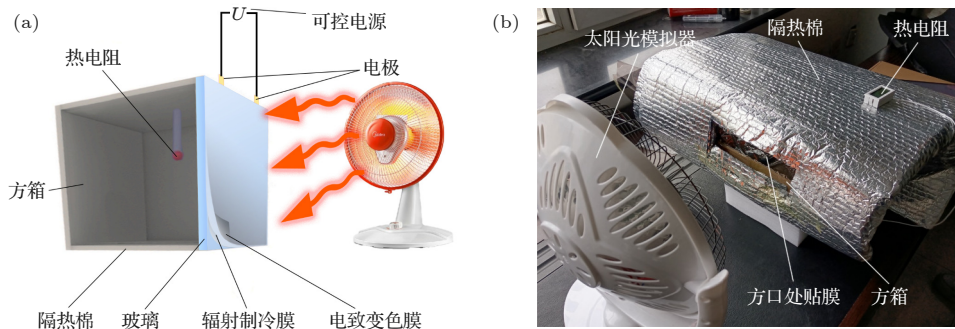


图 3 室内实验装置图 (a) 模型图; (b) 实物图
Fig. 3. Indoor experimental setup: (a) Physical model; (b) real setup.

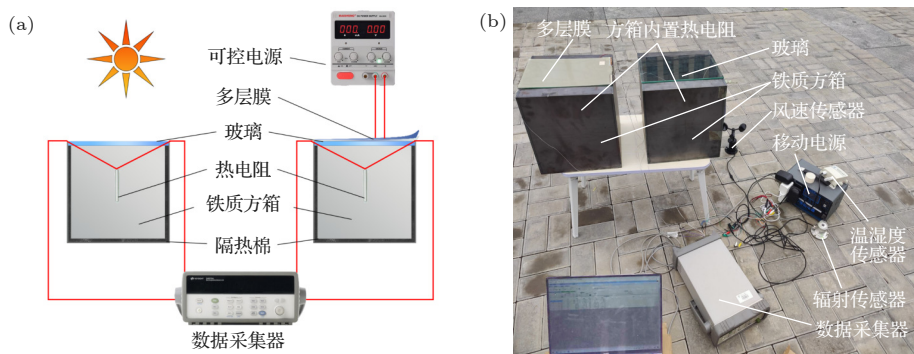


图 4 室外实验装置 (a) 模型图; (b) 实物图
Fig. 4. Outdoor experimental setup: (a) Physical model; (b) real setup.

本研究对实验组的多层膜施加 0 或 30 V 的电压, 并通过比较实验组和对照组两个方箱内的温度差异, 以此表征多层膜的制冷性能.

3 结果与分析

3.1 室内理想情况下多层膜性能分析

为探究所提出的多层膜是否具有更佳的制冷性能, 在室内理想情况下, 对贴有不同膜的箱内温度在 40 min 内的变化情况进行测量, 测量结果如图 5 所示. 从图 5 可看出, 两种膜作为单层膜单独使用时, 其降温性能明显不如多层膜. 其中, 仅使用全雾状态的电致变色膜时, 尽管其第 40 min 时的箱内温度略低于空白对照组, 但其初期升温速率却大于不贴膜空白对照组, 在第 14 min 时电致变色组温度箱内温度甚至高于贴膜对照组温度 2.5 °C, 这说明电致变色膜不适宜单独实现降温功能; 仅使用辐射制冷膜时, 与不贴膜空白对照组的箱内温度差稳定在 5.2—5.6 °C; 然而, 当电致变色膜与制冷膜结合形成多层膜时, 其降温性能显著增强, 在第 40 min 时与不贴膜对照组相比, 最大箱内温差达到 15.4 °C, 比单辐射制冷膜组低约 9.8 °C, 表明多层膜相对于单层膜具有更佳的制冷性能.

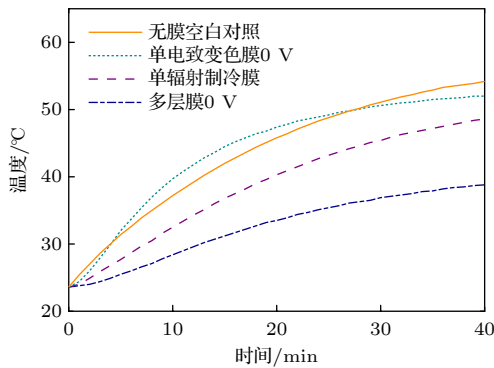


图 5 多层膜与单层膜制冷性能对比

Fig. 5. Cooling performance between multilayer film and single-layer film.

此外, 为进一步探究多层膜是否具备动态温度调节的能力, 还测量了在对多层膜施加不同电压的情况下, 装置内温度的变化情况. 测量结果如图 6 所示, 随着施加电压的增大, 装置内部在第 40 min 时的温度也逐渐上升. 其中, 多层膜在 0 V 全雾状态与 30 V 全透状态时, 降温幅度相差 4.6 °C, 这一现象验证了多层膜具备在一定范围内调节温度的

能力. 同时, 本研究还使用热成像仪在实验第 40 min 时对各组装置的表面温度进行测量, 结果如图 7 所示, 使用全雾状态多层膜的表面温度相对于未使用多层膜的表面温度, 最高温差可达 13.6 °C, 由此可以显示出多层膜良好的降温性能.

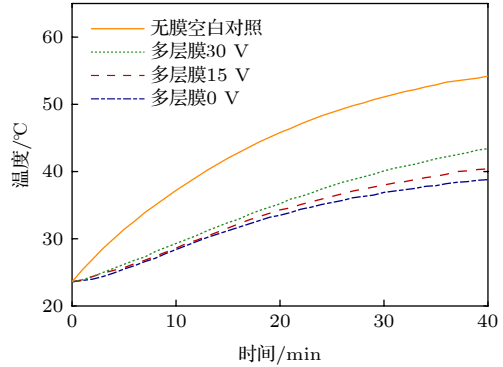


图 6 不同电压下多层膜制冷性能

Fig. 6. Cooling performance of multilayer film at different voltages.

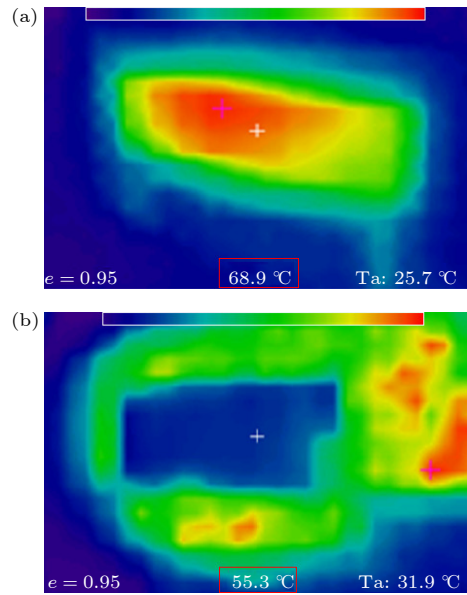


图 7 第 40 min 时热成像仪画面 (a) 未使用多层膜; (b) 使用多层膜

Fig. 7. Thermal imaging camera display at 40th minute: (a) Without multilayer film; (b) with multilayer film.

综上所述可以看出, 多层膜的降温性能明显优于单层膜, 此外, 在不同的控制电压条件下, 装置内温度也呈现出一定的差异性, 验证了多层膜具备在一定范围内调节温度的能力.

3.2 室外实际情况下多层膜性能分析

在 7 月底到 12 月初共 10 余天的测试中, 本研究

对各种工况下两对组照实验的结果进行比较. 下列各图展示了部分实验期间两装置的温度变化与实时的太阳辐射强度, 实验结果均经过降噪预处理.

在夏季的测试结果如图 8 所示. 图 8(a) 显示在 2023 年 7 月 31 日, 平均降温幅度最明显. 根据实验数据显示, 在当天环境温度 34.4—41.0 °C, 平均湿度 79%, 平均太阳辐射强度 634.1 W/m² 的情况下, 相较于不贴膜空白对照组, 处于 0 V 全雾状态下的多层膜能使箱内温度相对空白对照组最多降低 13.0 °C, 平均降温为 7.6 °C; 图 8(b) 显示在 2023 年 8 月 1 日, 在当天实验环境温度 34.9—39.8 °C, 平均湿度 65%, 平均太阳辐射强度 548.2 W/m² 的情况下, 多层膜处于 30 V 透明状态下与空白对照组相比最大箱内温差为 7.7 °C, 低于 0 V 全雾状态下的制冷幅度. 上述结果说明该多层膜在夏季能够实现有效降温, 同时表明通过改变多层膜的状态可以在一定范围内实现温度调节.

在秋冬季的测试结果如图 9 所示, 贴膜组的箱

内温度与对照组的相比差异不大, 显示出该膜在秋冬季的降温性能较弱. 图 9(a) 显示在 2023 年 11 月 15 日, 在当天实验环境温度 8.0—14.1 °C, 平均湿度 56%, 平均太阳辐射强度 471.5 W/m² 的情况下, 与不贴膜空白对照组相比, 当多层膜处于 0 V 全雾状态时, 最大箱内降温幅度仅有 1.9 °C, 远低于夏季相同条件下的 13.0 °C; 图 9(b) 显示在 2023 年 11 月 29 日, 在当天实验平均环境温度 1.5 °C, 平均湿度 41%, 平均太阳辐射强度 363.5 W/m² 的情况下, 与不贴膜空白对照组相比, 当多层膜处于 30 V 全雾状态时, 最大箱内降温幅度仅有 1.6 °C, 明显低于夏季相同条件下的 7.7 °C. 上述结果表明, 多层膜在秋冬季时没有过强的制冷效果, 不会导致内部温度过低.

综上所述, 在夏季强太阳辐射和高环境温度条件下, 结合了电致变色膜与辐射制冷膜的多层膜能够有效地降低装置内部温度, 并实现一定范围内的温度调控, 提高能源利用效率和舒适度. 同时,

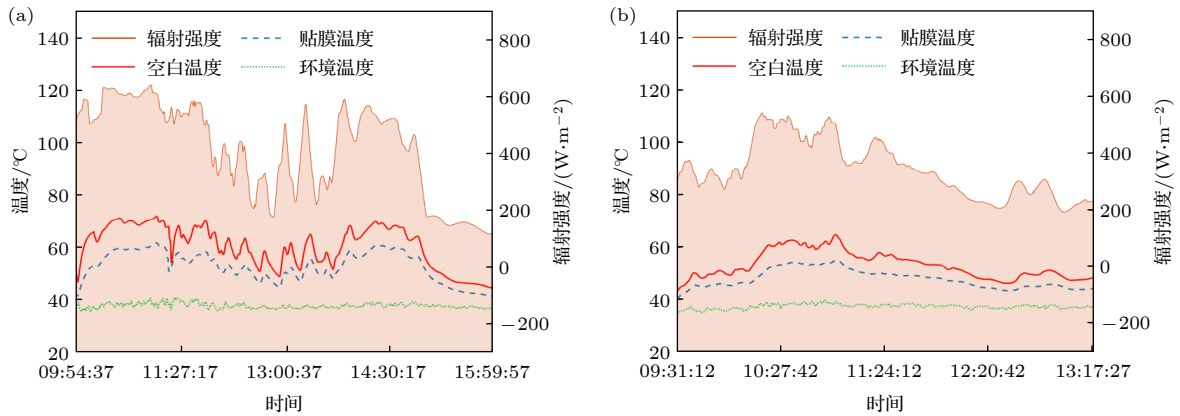


图 8 夏季实验结果 (a) 2023 年 7 月 31 日 0 V 全雾; (b) 2023 年 8 月 1 日 30 V 全透

Fig. 8. Summer experimental results: (a) July 31st, 2023, 0 V, fully foggy; (b) August 1st, 2023, 30 V, fully clear.

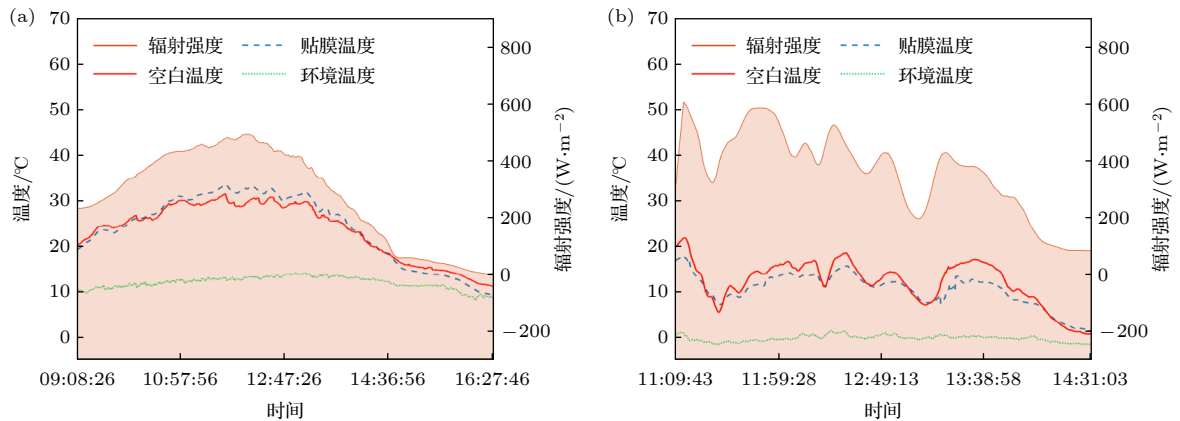


图 9 秋冬季实验结果 (a) 2023 年 11 月 15 日 0 V 全雾; (b) 2023 年 11 月 29 日 30 V 全透

Fig. 9. Autumn/Winter experimental results: (a) November 15th, 2023, 0 V, fully foggy (b) November 29th, 2023, 30 V, fully clear.

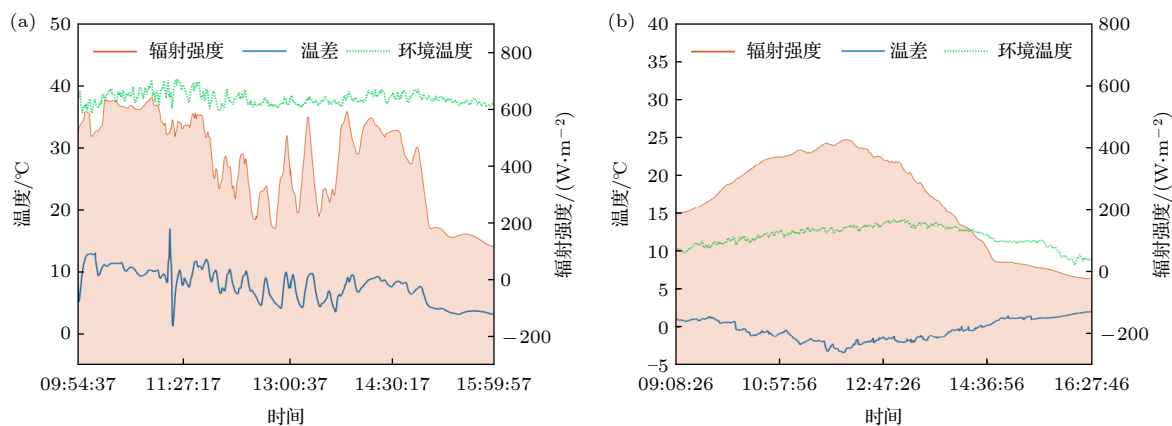


图 10 太阳辐射强度及环境温度对制冷性能的影响 (a) 7 月 31 日制冷性能; (b) 11 月 15 日制冷性能

Fig. 10. Effects of solar radiation intensity and ambient temperature on the cooling performance: (a) Cooling performance on July 31st; (b) cooling performance on November 15th.

在秋冬季弱太阳辐射和低环境温度条件下, 多层膜不会导致过度降温, 具有良好的环境适应性.

3.3 多层膜制冷性能的影响因素分析

图 10 显示了在 7 月 31 日和 11 月 15 日, 多层膜都处于 0 V 全雾状态的情况下, 贴膜箱体和不贴膜空白对照箱体两个装置内的温度差与太阳辐射强度的变化情况. 从图 10 可见, 无论夏季还是秋冬季, 两装置温差的变化趋势与太阳辐射强度的变化趋势基本一致, 说明多层膜制冷性能与太阳辐射强度呈正相关; 此外, 在夏季平均气温为 37.6 °C 的高温环境下, 两方箱内的平均温差为 6.8 °C (见图 10(a)); 而在秋冬季平均气温为 11.9 °C 的低温环境下, 两方箱的平均温差仅有 0.4 °C (见图 10(b)), 说明环境温度也能影响多层膜的制冷性能. 因此, 太阳辐射强度及环境温度对多层膜制冷性能有重要影响.

4 结 论

本研究基于辐射制冷与电致变色原理提出了主被动结合的车内温度动态调节的多层膜设计, 通过对多层膜的性能进行实验分析, 得出以下结论:

1) 相较于单层膜, 多层膜展现出更优的制冷性能. 在室温条件下, 对箱体施加相同热辐射时, 多层膜比单层膜的最大箱内降温幅度高出约 10 °C.

2) 通过调整控制电压来改变多层膜的状态, 可以在一定范围内实现温度调节. 在室内环境中, 贴有全雾状态多层膜的箱体与贴有全透状态多层膜的箱体相比, 箱内降温幅度相差 4.6 °C.

3) 多层膜具有良好的环境适应性. 在室外夏季的高温环境条件下, 多层膜表现出优异的制冷性能. 当平均太阳辐射强度为 634.1 W/m² 时, 贴有全雾状态多层膜的箱体与不贴膜箱体相比, 其箱内最大降温幅度达 12.9 °C; 而在秋冬季低温环境条件下, 贴有全雾状态多层膜的箱体与不贴膜箱体相比, 最大箱内降温幅度仅有 1.9 °C, 远低于夏季相同条件下的 12.9 °C. 这说明多层膜不会导致冬季车内温度过低, 确保了乘客舒适度, 同时也避免了额外能耗.

参考文献

- [1] National Bureau of Statistics 2023 *China Stat. Yearbook* **42** 284 (in Chinese) [国家统计局 2023 中国统计年鉴 **42** 284]
- [2] Mogro A E, Huertas J I 2021 *Int. J. Interact. Des. Manuf.* **15** 271
- [3] Tuchinda C, Srivannaboon S, Lim H W 2006 *J. Am. Acad. Dermatol.* **54** 845
- [4] Mousavi N S S, Azzopardi B 2023 *Energies* **16** 5256
- [5] Catalanotti S, Cuomo V, Piro G, Ruggi D, Silvestrini V, Troise G 1975 *Sol. Energy* **17** 83
- [6] Lin K T, Han J H, Li K, Guo C S, Lin H, Jia B H 2021 *Nano Energy* **80** 105517
- [7] Li Z Z, Chen Q Y, Song Y, Zhu B, Zhu J 2020 *Adv. Mater. Technol.* **5** 1901007
- [8] Liu Y, Pan D, Chen W, Wang W Q, Shen H, Xu H X 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 036501 (in Chinese) [刘扬, 潘登, 陈文, 王文强, 沈昊, 徐红星 2020 物理学报 **69** 036501]
- [9] Liu S Y, Yao B, Tan Y S, Xu H T, Ji T, Fang Z B 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 248801 (in Chinese) [刘士彦, 姚博, 谭永胜, 徐海, 方泽波 2017 物理学报 **66** 248801]
- [10] Yu H T, Liu D, Yang Z, Duan Y Y 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 024209 (in Chinese) [于海童, 刘东, 杨震, 段远源 2018 物理学报 **67** 024209]
- [11] Cannavale A, Ayr U, Martellotta F 2018 *Energy Procedia* **148** 900
- [12] Hemaida A, Ghosh A, Sundaram S, Mallick T K 2020 *Sol. Energy* **195** 185

- [13] Jaksic N I, Salahifar C 2003 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **79** 409
 [14] Sun J W, Chen Y N, Liang Z Q 2016 *Adv. Funct. Mater.* **26** 2783
 [15] Wu Z X, Zhao Q, Luo X Y, Ma H D, Zheng W Q, Yu J W, Zhang Z L, Zhang K Y, Qu K, Yang R P, Jian N N, Hou J, Liu X M, Xu J K, Lu B Y 2022 *Chem. Mater.* **34** 9923
 [16] Ling H, Wu J C, Su F Y, Tian Y Q, Liu Y J 2021 *Nat. Commun.* **12** 1010
 [17] Zhang H M, Miao Z C, Shen W B 2022 *Composites Part A* **163** 107234
 [18] Lee S J, Song S Y 2023 *Energy Build.* **298** 113514
 [19] Casini M 2018 *Renewable Energy* **119** 923
 [20] Hakemi H 2017 *Liq. Cryst. Today* **26** 70

Performance of adjustable multilayer film based on radiation cooling and electrochromism^{*}

Wang Yu-Xiao[#] Cheng Ze-Shuai[#] Jiang Ke-Yang

Wei Lin-Yang[†] Li Xiu-Ming[‡]

(School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

(Received 22 June 2024; revised manuscript received 24 July 2024)

Abstract

Energy and environmental challenges caused by the excessive consumption of fossil fuels are major concerns worldwide, and the use of automotive air conditioning can increase total fuel consumption by 10% to 30%, thereby exacerbating these problems. To reduce the energy consumption for automotive air conditioning, a multilayer-film design based on radiative cooling and electrochromic modulation is proposed for regulating the temperature inside vehicles. The designed multilayer-film not only passively realizes temperature drop but also actively regulates the entry of solar radiation, which can help the vehicle air conditioning system to adjust the interior temperature autonomously. To verify its effectiveness, a film-applied empty box device is designed for radiometric temperature measurement. Experimental results indicate that the maximum interior temperature drop of the multilayer film increases by approximately 9.8 °C compared with that of single-layer films in the sunlight irradiation, and dynamic temperature regulation of about 4.6 °C can be achieved by adjusting the transmittance of the multilayer film. To study the environmental adaptability of the multilayer film, experiments are conducted on an outdoor film-applied device during the summer and winter in Shenyang, China (41°44'N, 123°39'E), the place which is characterized by a typical temperate continental climate. Results indicate that under high temperature conditions of 30–40 °C in summer, the maximum internal temperature drop of the multilayer film reaches 12.9 °C; while under low temperature conditions of 0–15 °C in autumn and winter, the maximum internal temperature drop is only 1.9 °C, preventing the interior temperature from being too low. In addition, the maximum interior temperature drop increases with the solar radiation intensity and ambient temperature increasing. Therefore, the proposed multilayer-film design, with its potential for temperature self-regulation, provides a promising solution for reducing energy consumption and improving passenger comfort.

Keywords: radiative cooling, electrochromism, temperature regulation

PACS: 44.40.+a, 92.60.Vb, 82.47.Jk, 88.05.Ec

DOI: 10.7498/aps.73.20240863

CSTR: 32037.14.aps.73.20240863

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52106079), the Joint Funds of the Natural Science Foundation of Liaoning Province of China (Grant No. 2023-MSBA-059), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. N2325021).

[#] These authors contributed equally.

[†] Corresponding author. E-mail: weilinyang@smm.neu.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: lixiuming@smm.neu.edu.cn



基于辐射制冷与电致变色的可调节多层膜性能研究

王宇泉 成泽帅 江可扬 魏琳扬 历秀明

Performance of adjustable multilayer film based on radiation cooling and electrochromism

Wang Yu-Xiao Cheng Ze-Shuai Jiang Ke-Yang Wei Lin-Yang Li Xiu-Ming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 214401 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240863

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240863>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

仿生辐射制冷的研究进展

Research progress of bio-inspired radiative cooling

物理学报. 2022, 71(2): 024401 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211854>

基于辐射制冷-温室效应的热电系统性能分析

Performance analysis of thermoelectric system based on radiative cooling and greenhouse effects

物理学报. 2021, 70(21): 214401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210356>

纳米光学辐射传热: 从热辐射增强理论到辐射制冷应用

Radiative heat transfer in nanophotonics: From thermal radiation enhancement theory to radiative cooling applications

物理学报. 2020, 69(3): 036501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191906>

三氧化钨晶体拓扑结构生长行为及其电致变色性能

Growth behavior of WO_3 crystal topological structure and its electrochromic properties

物理学报. 2022, 71(2): 028201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211555>

高功率激光辐照平面靶后辐射冷却效应对等离子体成丝的影响

Influence of radiative cooling effect on the plasma filamentations in the interaction of high-power laser with planar targets

物理学报. 2022, 71(23): 235202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220870>

限域相变对热致变色环氧绝缘材料介电松弛特性的影响

Influence of confined phase transition on dielectric relaxation characteristics of thermochromic epoxy insulating materials

物理学报. 2023, 72(10): 107701 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230253>