

·光电系统与amp;设计·

红外抑制新方法探讨

杨 辉¹, 谢 卫¹, 张拴勤¹, 潘家亮^{1,2}

(1. 总装工程兵科研一所, 江苏 无锡 214035; 2. 解放军理大学, 江苏 南京 210007)

摘要:从红外抑制原理入手, 通过红外抑制的原理分析, 探索性地提出了纳米周期结构红外辐射抑制和高效导热散热辐射抑制技术. 分析了纳米周期结构材料和热管抑制技术本身的技术特点, 建立了红外抑制模型, 并通过数值计算验证了其实现目标红外抑制的可行性.

关键词:红外抑制; 纳米周期结构; 热管

中图分类号: E 951.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2010)03-0006-04

Discussion on New Approach to Thermal Infrared Camouflage

YANG Hui¹, XIE Wei¹, ZHANG Shuan-qin¹, PAN Jia-liang^{1,2}

(1. The First Engineers Scientific Research Institute of the General Armaments Department, Wuxi 214035, China;

2. Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: Starting from the principle of infrared suppression, and through analyzing the approach of infrared suppression, the paper proposes periodic nanostructure infrared radiation suppression and efficient thermal conductivity heat radiation suppression exploratory. Analyzing the features of periodic nanostructure materials and heat pipe inhibition technology, and establishing the infrared suppression model, the feasibility of realization of target infrared suppression was verified by numerical calculation.

Key words: infrared suppression; periodic nanostructure; heat pipe

1 红外抑制原理

从红外物理学可知, 物体红外辐射能量由斯蒂芬-玻尔兹曼定律决定

$$W = \epsilon\sigma T^4 \quad (1)$$

式中, W 为物体的辐射发射量; ϵ 为玻尔兹曼常数; σ 为物体的比辐射率; T 为物体的绝对温度.

物体辐射红外能量不仅决定于物体的温度, 还决定于物体的发射率. 温度相同的物体, 由于比辐射率的不同, 而在红外探测器上显示出不同的红外图像. 鉴于一般目标的辐射都强于背景, 所以采用低发射率的涂料可显著降低目标的红外辐射能量. 另一方面, 降低目标表面的温度, 可以降低目标和背景的

辐射对比度, 减小目标的被探测概率.

针对上述原理, 提出 2 种红外抑制的新方法. 一是利用纳米周期结构材料降低目标在红外探测器工作波段 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 的发射率; 二是借鉴热管工作的原理, 利用高效导热散热模块降低目标的温度.

2 纳米周期结构红外辐射抑制

2.1 红外抑制原理

根据普朗克定律, 黑体的光谱辐射出射度 M_λ 与物体表面的绝对温度 T 和波长 λ 有如下关系

$$M_\lambda = c_1 \left\{ \lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right] \right\}^{-1} (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}) \quad (2)$$

收稿日期: 2010-05-03

作者简介: 杨辉(1984-), 男, 硕士研究生. 主要研究领域为材料技术.

式中, $c_1 = 2\pi hc^2$ 称为第一辐射常数, $c_1 = 3.743 \times 10^{16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$; $c_2 = ch/k$ 称为第二辐射常数, $c_2 = 1.4378 \times 10^{-23} \text{ m} \cdot \text{K}$; h 是普朗克常数, $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; k 是波尔兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}$; c 是光速, $c = 2.99 \times 10^8 \text{ m/s}$. 对式(2)在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段范围进行积分, 得到图 1.

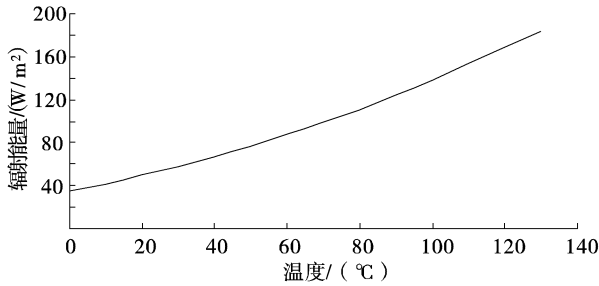


图 1 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 内, 黑体辐射能量随温度的变化

由图 1 可见, 温度的升高使得红外辐射能量迅速地升高.

表 1 给出了计算得到黑体的 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 范围内的辐射能量和 $0 \sim \infty$ 范围内的辐射能量及它们的比值.

表 1 黑体在不同温度下的辐射功率

温度 / (°C)	$8 \sim 14 \mu\text{m}$ 辐射能量 / (W/m ²)	$0 \sim \infty$ 辐射能量 / (W/m ²)	百分比 / (%)
50	77.135	618.30	12.48
60	87.79	698.46	12.57
70	99.225	786.17	12.62
80	111.437	881.90	12.64
90	124.419	986.11	12.62
100	138.163	1099.3	12.57

由此可以看出, 黑体在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段范围内的辐射能量只占黑体全波段辐射能量的 12.6% 左右.

2.2 理论分析

纳米周期结构材料是一种新型光子晶体材料, 能调控光子的传输特性, 可通过纳米尺度的结构调控, 实现其 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段范围内低发射率的红外辐射抑制特征, 而在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 以外的其他红外波段具有高度透过的特性^[13]. 纳米周期结构材料由于周期势场的作用, 在半导体材料中电子会形成能带结构, 带与带之间可能存在能隙. 将具有不同折射系数的介质在空间按周期排列, 当空间周期与光波长相当时, 由于布拉格散射, 该体系将会在一定频率范

围内产生光子禁带, 如果光子的能量落入光子禁带光谱范围内, 就不能在介质中传播.

辐射抑制就是通过纳米栅格结构或多层纳米复合结构材料调整材料固有的辐射特性, 实现相干发射现象, 改变材料在特定波段和特定方向上的发射率(或反射率), 使人们可以根据应用的需要来调整体系参数, 人为地控制材料的辐射特性. 通过纳米结构对材料辐射特性的改变, 使材料的发射率在特定波段出现较低值, 或者抑制材料在较宽波段内的发射.

2.3 理论计算

在基底表面镀上光子晶体 pc1, pc1 采用 $A | (L^1 H^1) S^1 | | (L^2 H^2) S^2 | B$ 的结构, 其中, A 表示空气, B 表示基底; 膜系 1 禁带中心波长 $\lambda_1 = 10.0 \mu\text{m}$, 膜系 2 禁带中心波长为 $\lambda_2 = 4.0 \mu\text{m}$; s^1 与 s^2 表示光子晶体的周期数, $s^1 = s^2 = 5$; 高低折射率介质分别采用 Si 及 KCL; 基底为理想表面, 其发射率为 1, 吸收率为 1, 反射率始终为 0. 考虑介质折射率随波长变化的情况, 及其消光系数对组合表面及自发辐射的影响, 图 2 表示的是非理想介质组成光子晶体时, 组合表面的光谱半球向发射率 ϵ_λ 随波长变化的关系.

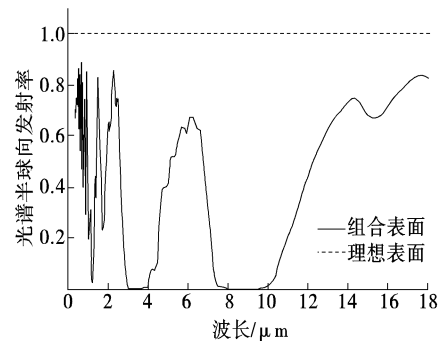


图 2 组合表面的光谱半球向发射率与波长的变化关系

通过图 2 可以看出, 在 $3 \sim 4 \mu\text{m}$ 、 $7.9 \sim 10.2 \mu\text{m}$ 内, 光子晶体 pc1 对理想表面的辐射抑制效果非常明显, 组合表面的发射率趋近于零; 在 $4 \sim 5 \mu\text{m}$ 、 $10.2 \sim 14 \mu\text{m}$ 内组合表面的发射率随着波长的增大而逐渐增加. 计算表明: 当基底为处于 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 的理想表面时, 在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 内, 组合表面的发射功率为 2.779 W/m^2 , 作为比较, 同温度下理想表面在相应波段内的发射功

率为 15.765 W/m^2 ; 在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 内, 采用纳米周期结构材料后, 可将理想表面的发射功率从 138.658 W/m^2 降至 30.621 W/m^2 .

在数值计算中发现, 一维光子晶体具有多个禁带, 通过合理选择材料(例如增加组分的折射率比), 设计周期厚度和填充比(对于一维光子晶体, 填充比是指各组分的厚度比), 可以扩展带隙, 使中远红外双波段实现高反射. 但单一结构的光子晶体在中远红外双波段全部区域同时实现就很困难. 异质结光子晶体, 也称为复合光子晶体, 通过将具有不同带隙的光子晶体叠加实现带隙的展宽, 可以较好地实现中远红外双波段的高反射.

3 高效导热散热结构辐射抑制

3.1 热管原理

热管是一种传热效率很高的新型高效节能传热元件, 1963 年由美国 Los Alamos 国家实验室的 G. M. Grover 发明. 热管基本的构成由 3 部分组成: a) 密闭容器; b) 毛细管结构物(管芯); c) 工作液(水、甲醇、氨等). (见图 3)

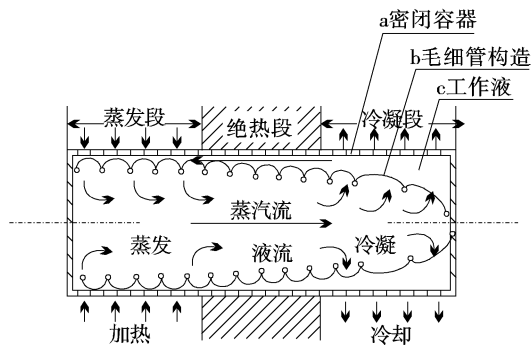


图 3 毛细管式热管构造及工作原理

加热热管的蒸发段, 靠近容器内壁的工作液就会被蒸发, 此时蒸发段的蒸汽压就会提高, 以致在压力低的冷凝段之间形成蒸汽流, 在冷凝段蒸汽被冷却, 重新凝结. 被冷凝的工作液通过毛细管力返回到蒸发段, 再进行蒸发, 这样就形成了一个闭合的循环.

3.2 理论模型

高效导热散热结构是指结合热管和高效散热肋片的复合结构, 其特点是能够迅速将热源部位的热量转移到散热肋片上, 利用散热肋片的高效散热特

性将热量迅速散发到周围环境背景中.

目前热管技术已经成为航天器热控制的一项重要技术. 热管的应用可解决卫星高热流部件的散热温控问题, 从而提高卫星热控制的水平及可靠性. 热管具有“近等温导热”的特点, 它是利用工作介质气液相变的原理传递热量, 无需动力装置驱动, 传热能力是金属材料的上千倍. 可使热量不在目标的发热部位积累, 配合以散热设施, 能将热量迅速扩散到环境背景中. 据报道^[7], 一种新型平板热管, 热管的当量导热系数在水平状态下最大为 $1274 \text{ W/m}\cdot\text{C}$, 在垂直状态下最大为 $2284 \text{ W/m}\cdot\text{C}$. 热管的第二个特点是根据需要可做成各种形状的, 由于在某些场合, 普通的刚性热管在应用上受到了限制, 柔性热管应运而生. 1999 年日本的 SHIMIZU Akihiro 报道了他的碳纤维束作干道芯的柔性热管, 碳纤维束结构细密, 柔性好, 化学性质稳定, 是制作柔性热管干道芯的合适材料. 目标红外抑制模型见图 4.

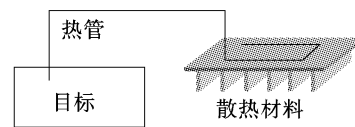


图 4 红外抑制模型

3.3 理论计算

热目标经过热管模块高导热系统将热量传输到散热材料上. 假设目标的热功率为 1000 W , 平衡时, 目标表面与环境自然对流, 对流换热系数 $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$, 环境温度 T_∞ 取为 20 C , 目标表面发射率为 0.93 .

无热管散热时, 平衡方程为

$$q = [h(T_s - T_\infty) + \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{\text{sky}}^4)](\pi DH + \pi D^2/2) \quad (3)$$

$$T_s = 233.8 \text{ C} \quad (4)$$

有热管散热时, 假定热管的散热功率 q_{pipe} , 平衡方程为

$$q - q_{\text{pipe}} = [h(T_s - T_\infty) + \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{\text{sky}}^4)](\pi DH + \pi D^2/2) \quad (5)$$

表 2 根据平衡方程计算了目标的热功率为 1000 W , 不使用热管时与使用不同功率热管的情况下目标表面的温度情况.

通过表 2 可以看出, 有热管情况下热源表面的温度可以无限接近环境温度, 而无热管情况下, 热源

表面温度竟达到 233.8 °C。由此可以看出,目标经过热管温控后,其热特征基本与静态目标的热特征相似。

表2 不同热管散热器功率下目标表面温度

热管散热器功率/(W)	目标表面温度/(°C)
985	20.1
980	21.8
975	23.5
950	32
925	40.1
900	48.1
875	55.8
850	63
825	70.5
800	77
775	84.4
0	233.8

4 结 束 语

提出了纳米周期结构辐射抑制和高效导热散热结构辐射抑制,通过理论分析、模型建立及数值计算,验证了其应用于红外抑制的可行性。使用纳米周期结构材料可以明显地抑制目标在红外探测器工作波段(8~14 μm)范围的红外辐射;通过借鉴热管原理的高效导热散热结构可以快速地传导目标热源处的热量。

(上接第5页)

3 结 束 语

结合高光谱成像遥感试验数据,用目标与背景最佳分离变换、最小噪声分离变化对试验中布设的目标进行了检测,实现了从背景中提取目标的目的,高光谱成像遥感数据探测效果显著。用目标解混探测算法对某试验数据进行了处理,证明材料 *a* 和材

参考文献

- [1] 张建奇,方小平.红外物理[M].西安:西安电子科技大学出版社,2004.
- [2] 刘必鏊,时家明.一种基于光子晶体的红外伪装材料[J].红外技术,2008,30(9):512-515.
- [3] Supco R F. Blue-gray low infrared emitting coating [M]. US Pat. 4311623A1, 1982.
- [4] Shan Y, Zhou Y, Cao Y, et al. Preparation and infrared emissivity study of collagen-g-PMMA/In₂O₃ nanocomposite[J]. Mater. Lett. 2004, 58(10): 1655-1660.
- [5] 唐晋发,顾培夫,刘旭,等.现代光学薄膜技术[M].杭州:浙江大学出版社,2007.
- [6] F P Incropera, D P DeWitt, T L Bergman, et al. 传热和传质的基本原理. 6版. 葛新石,叶宏.北京:化学工业出版社,2007.
- [7] 李时娟,杨彬.新型平板热管传热性能的实验研究[C]//第十一届全国热管会议论文集,2008:288-292.
- [8] 崔丽萍.柔性热管的传热试验研究与分析[C]//第十一届全国热管会议论文集,2008:293-298.
- [9] 康建英.热管技术简介[J].中国特种设备安全,2006,22(9):65.
- [10] 魏新宇.热管技术的应用展望[J].甘肃冶金,2006,28,(3):98-102.
- [11] 莫才颂,李权.热管传热及散热分析[J].茂名学院学报,2006,16(3):31-34.
- [12] 宣益民,韩玉阁.地面目标与背景的红外特征[M].北京:国防工业出版社,2004.
- [13] Li Jin, Ye Hong, Wei Mengliu. The suppression of the atmospheric window band emission using photonic crystals, proceedings of the Inaugural US-EU-China Thermophysics Conference(ASME), 2009(5):28-30, Beijing, China.

料 *b* 模拟相应背景的效果更好。

参考文献

- [1] 浦瑞良,宫鹏.高光谱遥感及其应用[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [2] ENVI User's Guide, 2001. 9.
- [3] 童庆禧,张兵,郑兰芬.高光谱遥感——原理、技术与应用[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [4] 耿修瑞.高光谱遥感图像目标探测与分类技术研究[D].北京:中国科学院研究生院,2005.