

强辐照下光子晶体红外隐身薄膜的隐身特性

刘瑞煌, 时家明*, 赵大鹏, 张继魁, 刘志伟

国防科技大学电子对抗学院脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037

摘要 分别将光子晶体薄膜、红外隐身涂层和普通迷彩布作为待测样品贴在 60 °C 热源上, 并置于室外环境进行红外隐身实验。研究表明, 太阳光对光子晶体薄膜 8~14 μm 波段隐身效果影响较小, 在绝大部分角度范围内, 对 3~5 μm 波段隐身效果影响也较小; 墙壁和大气辐射对光子晶体薄膜 3~5 μm 和 8~14 μm 波段隐身效果影响都较小。光子晶体薄膜在中、远红外双波段隐身效果优于另外两种传统红外隐身材料。

关键词 材料; 光子晶体; 红外隐身; 太阳辐照; 墙面辐射; 辐射温度

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.031601

Preparation and Characteristics of Middle and Far Infrared Stealth of Photonic Crystal Film under Intense Irradiation

Liu Ruihuang, Shi Jiaming*, Zhao Dapeng, Zhang Jikui, Liu Zhiwei

State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei, Anhui 230037, China

Abstract Photonic crystal (PC), conventional camouflage fabric and infrared stealth coating are used as testing sample, which is attached tightly to a heater with a temperature of 60 °C respectively, to perform infrared stealth experiment in outdoor environments. Experimental results show that sunlight affects 8-14 μm waveband stealth effect of PC slightly, while 3-5 μm waveband is also the same in most angle range. Radiation from walls and atmosphere has a little effect on 3-5 μm and 8-14 μm stealth effects of PC. The PC has better infrared stealth performance in both middle and far infrared wavebands, compared with the other two conventional infrared stealth materials.

Key words materials; photonic crystal; infrared stealth; solar irradiance; wall radiation; radiation temperature

OCIS codes 160.5298; 310.6188; 310.6845

1 引言

当前, 红外制导和雷达侦察是最成熟和广泛应用的探测跟踪手段, 这对隐身材料提出了实现红外与雷达兼容隐身的新要求。红外探测器通过接收来自不同物体的辐射功率识别目标, 因而通过在热物体表面涂覆低发射率材料的方法即可进行红外隐身。发射率^[1]是指物体在指定温度下的辐射量与同温度下黑体相应辐射量之比。根据基尔霍夫定律可知, 相同温度下物体的吸收率在数值上与发射率相等。不透明材料的发射率越低, 反射率就越高, 这说

明热红外隐身材料应对红外具有高反射率^[2]。雷达探测器通过接收目标的散射回波发现目标, 一般要求隐身材料对微波具有低反射率。因此, 红外与雷达兼容隐身材料应同时对红外具有高反射率, 并对微波具有低反射率。

传统的低红外发射率隐身涂层虽然在对抗红外探测方面取得了较大进展, 但其金属成分对电磁波的强反射特性限制了雷达隐身性能^[3-6]。值得注意的是, 作为一种新型人工微结构材料, 光子晶体^[7-8]可以抑制或增强物体特定波段的辐射, 该特性为研制新型隐身材料提供了思路。Wang 等^[9]利用 Ge

收稿日期: 2018-08-02; 修回日期: 2018-08-23; 录用日期: 2018-08-31

基金项目: “十三五”计划预研项目(HJJ2017-0671)

* E-mail: sjmeei@yahoo.com.cn

和 ZnS 材料设计并制备了红外与雷达兼容隐身的光子晶体薄膜,其对 2~18 GHz 雷达波几乎透明,在 3~5 μm 和 8~12 μm 波段的发射率分别为 0.073 和 0.042;Zhang 等^[10]利用 Te 和 ZnSe 材料设计和制备了中、远红外双波段兼容隐身的光子晶体薄膜,其在 3~5 μm 和 8~14 μm 红外波段的反射率分别为 86.72% 和 72.91%。由此可见,光子晶体红外隐身材料对热红外具有高反射率,同时对雷达波具有低反射率,完全能够满足红外与雷达兼容隐身的要求,在隐身方面具有潜在应用价值。

目前,大多数科研工作者致力于研究具有高反射率的光子晶体红外隐身材料,使其具有强抑制红外辐射的能力。但在实际应用时,红外隐身材料的反射率并非越高越好^[11]。因为隐身材料通常暴露于外界环境中,晴天时受到太阳、大气和地物等较强热辐射源的照射,高反射率特性会使照射在表面的热辐射反射被探测器接收后成为红外波段的亮目标,这样反而容易被敌发现和识别。因此,在较强环境辐照下,光子晶体红外隐身材料隐身特性亟待进一步研究。

为了更好地验证光子晶体红外隐身的性能,本文选取红外隐身涂层和普通迷彩布,与光子晶体红外隐身材料作为实验样品,并粘贴于电热板表面。将样品置于室外区域,电热板设置并保持在 60 $^{\circ}\text{C}$,在太阳、天空和地物等较强环境辐照条件下,从上午 7:00 到 18:00,每隔 1 h,用热像仪分别测量三种材料在东、南、西、北方向的辐射温度。结合室外环境的红外辐射特性,研究较强环境辐照对光子晶体红外隐身材料中红外和远红外波段隐身特性的影响。

2 理论基础

2.1 光子晶体理论

光子晶体最基本的特征是具有光子带隙^[12],频率落在带隙范围内的电磁波被禁止传播。特别是对于具有完全带隙结构的光子晶体,所有方向的入射都会发生全反射。调制周期性的微观结构可以把光子带隙置于特定波段,这样就能得到热红外波段上具有高反射、低发射特性的光子晶体。

一维光子晶体的光学特性一般利用传输矩阵法^[13]进行研究。根据薄膜光学理论,光在分层介质中的传输特性可以用一个 2×2 的特征矩阵表示。对于第 l 层媒质,其特征矩阵可表示为

$$\mathbf{M}_l = \begin{bmatrix} \cos \delta_l & j(\sin \delta_l) / \eta_l \\ j\eta_l \sin \delta_l & \cos \delta_l \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 δ_l 和 η_l 分别为两位置的相位变化和光学导纳,且

$$\begin{cases} \delta_l = 2\pi\lambda^{-1} n_l d_l \cos \theta_l \\ \eta_l = \begin{cases} n_l / \cos \theta_l, & \text{TM,} \\ n_l \cos \theta_l, & \text{TE} \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中 TM 和 TE 分别表示电磁波的 p 波和 s 波, λ 为电磁波的波长, n_l 、 d_l 和 θ_l 分别为第 l 层媒质的折射率、厚度和折射角,由折射定律可知:

$$n_l \sin \theta_l = n_{l-1} \sin \theta_{l-1} = \dots = n_0 \sin \theta_0, \quad (3)$$

当薄膜由 k 层组成时,总特征矩阵为

$$\mathbf{M} = \prod_{l=1}^{l=k} \mathbf{M}_l, \quad (4)$$

如果将该特征矩阵记作

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

则入射光的反射率为

$$R = \left| \frac{m_{11} + \eta_{k+1} m_{12} - \eta_0^{-1} (m_{21} + \eta_{k+1} m_{22})}{m_{11} + \eta_{k+1} m_{12} + \eta_0^{-1} (m_{21} + \eta_{k+1} m_{22})} \right|^2, \quad (6)$$

透射率为

$$T = 4\text{Re}(\eta_{k+1} \eta_0^{-1}) / |m_{11} + \eta_{k+1} m_{12} + \eta_0^{-1} (m_{21} + \eta_{k+1} m_{22})|^2, \quad (7)$$

吸收率 A 为

$$A = 1 - R - T, \quad (8)$$

至此,得到了光子晶体薄膜在热红外波段的反射光谱。

2.2 辐射温度与真实温度以及发射率之间的关系

辐射源单位面积向半球空间内辐射的功率称为辐射出射度,表征物体的辐射本领。目标处于室外环境时,其红外特征不仅包括自身辐射,还包括对环境辐射的反射。对于热红外侦察探测,热像仪工作在大气窗口 3~5 μm 和 8~14 μm 两个波段,热红外隐身主要关心热像仪工作波段辐射的能量。根据普朗克公式^[1],目标在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内的有效辐射出射度可以表示为

$$M_{\text{eff}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_\lambda \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(c_2/\lambda T_t) - 1} d\lambda + (1 - \epsilon_t) E_0 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(c_2/\lambda T_{\text{tr}}) - 1} d\lambda,$$

$$c_1 = (3.7415 \pm 0.0003) \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-2},$$

$$c_2 = (1.43879 \pm 0.00019) \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}, \quad (9)$$

式中 ϵ_λ 为目标在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内的光谱发射率, c_1 和 c_2 分别为普朗克第一和第二常数, E_0 为目标单

位面积接收的处在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内的环境辐射功率,称为辐射照度,包括太阳辐射照度、大气辐射照度和地物辐射照度等, T_r 为目标的真实温度, T_{ir} 为目标的有效辐射温度,即与目标具有相同辐射出射度黑体的温度。

对于光子晶体薄膜,中远发射率 ϵ_r 通常较小,能较好地抑制自身辐射。在室外环境中,如果辐射照度 E_0 较大,则 $(1 - \epsilon_r)E_0$ 较大,这样可能会使光子晶体的有效辐射温度较大,因此,较强的环境辐射对光子晶体红外隐身材料隐身特性的影响不可忽略。

3 光子晶体薄膜设计与制备

选择在红外区具有高折射率的 Te 材料和低折射率的 ZnSe 材料,平均折射率分别为 4.8 和 2.4,根据传输矩阵法和异质结构法设计一种光子晶体薄膜,膜系结构可表示为 $\{\text{Air} | B_1 (A_1 B_1)_3 (A_2 B_2)_3 | \text{Sub}\}$,其中 Sub 代表基底, Air 代表空气, A_1 和 A_2 分别代表厚度为 1225 nm 和 225 nm 的 ZnSe 材料, B_1 和 B_2 分别代表厚度为 620 nm 和 270 nm 的 Te 材料。结合实际应用情景,当入射光角度分别为 0° 、 30° 和 60° 时,利用特征矩阵法计算该光子晶体的反射率曲线,结果如图 1 所示。

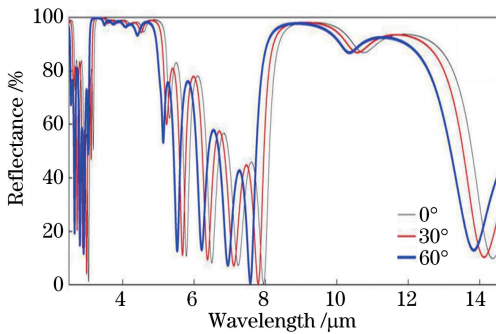


图 1 不同入射角下光子晶体的反射率曲线

Fig. 1 Spectral reflectance curves of photonic crystal at different incident angles

由图 1 结果可知,当入射光角度为 0° 、 30° 和 60° 时,该光子晶体在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 中红外波段的反射率分别为 93.6%、95.3% 和 95.2%;在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 远红外波段的反射率分别为 86.6%、85.2% 和 81.1%。由此可见,在中红外和远红外波段,入射角对该光子晶体薄膜反射率的影响都很小。

按照所设计的膜系结构,以柔性纺织布为基底,采用电子束蒸发镀膜法,在镀膜机(ZZX-700 型,国投南光,成都)上制备光子晶体薄膜,整个镀制过程

采用石英晶振对膜层厚度进行实时监控。

图 2 所示为利用冷场发射电子扫描显微镜(SEM, S-4800 型,日立,日本)拍摄的光子晶体薄膜微观截面图。由图 2 可知, A 和 B 材料交替分布,分层结构明显,上面 7 层对应 $\{B_1 (A_1 B_1)_3\}$, A、B 材料厚度分别为 1228 nm 和 619 nm,与设计相符;下面 6 层对应 $\{(A_2 B_2)_3\}$, A、B 材料厚度分别为 223 nm 和 268 nm,与设计也相差较小。

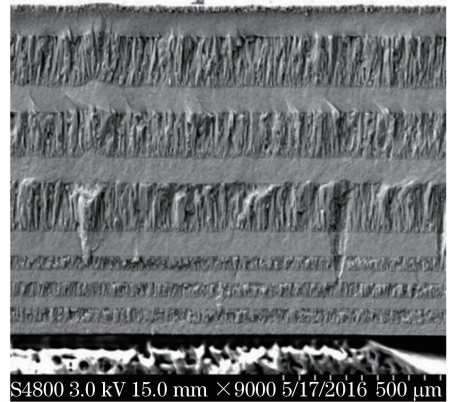


图 2 光子晶体样品横截面的 SEM 图

Fig. 2 Cross-sectional SEM image of photonic crystal sample

利用矢量网络分析仪测试光子晶体薄膜样品对雷达波的透过性能。图 3 所示为实验装置示意图,雷达发射喇叭型天线正面为接收喇叭型天线,中间留有较小间隙。首先,将未放置样品薄膜的雷达波吸收率进行归一化,然后把薄膜样品放置于两个喇叭天线之间,得到该样品薄膜对雷达波的衰减曲线,结果如图 4 所示。图中,横坐标为波段频率,纵坐标为衰减强度(一个格子代表 4 dB)。

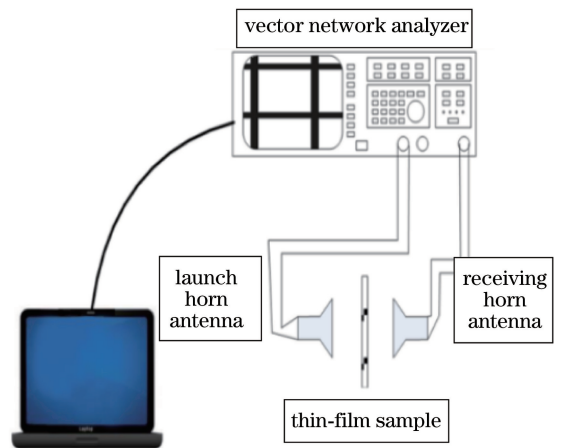


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic of experimental device

由图 4 可知,该薄膜样品对雷达波具有与空气相近的高透射率(即低反射率),能与雷达吸波材料兼容。

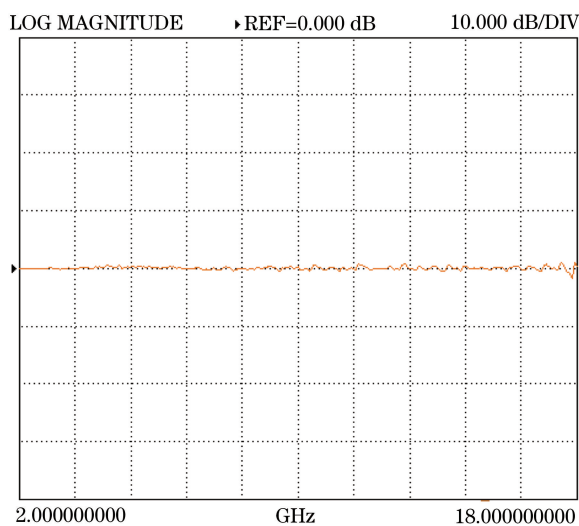


图4 薄膜样品对雷达波的衰减曲线

Fig. 4 Attenuation curve of radar wave by photonic crystal sample

4 室外红外隐身特性实验

4.1 红外隐身材料的选取

为了验证光子晶体红外隐身的实际性能,选取具有不同光谱特性的红外隐身涂层和常规迷彩布进行对比实验。利用傅里叶变换红外光谱仪分别测量三种隐身材料的反射光谱曲线,结果如图5所示,其中m1、m2和m3分别代表光子晶体薄膜、普通迷彩布和红外隐身涂层的反射率曲线。

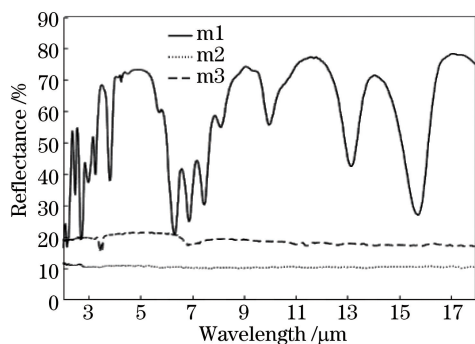


图5 三种隐身材料的实际红外反射率曲线

Fig. 5 Measured infrared reflectance curves of three stealth materials

由图5可知,光子晶体薄膜在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段存在光子带隙,反射率分别为66%和63%,比理论计算值略低,这主要是由于光子晶体表面特性使光谱测量产生了误差。承载光子晶体的基底为表面粗糙的纺织材料,测量反射率时,发射光束在样品表面发生漫反射,无法完全被处于镜像位置的探测器接收,而在标定时,反射板为镜反射,必然

导致测得的光谱反射率比实际值低。但是,对于中红外和远红外波段,光子晶体薄膜的反射率最高,红外隐身涂层次之,常规迷彩布最低。

4.2 红外隐身实验的内容和步骤

在图6所示的模型下进行实验,实验地点为合肥市,时间为2018年4月18日,晴天,少云,风力4级,湿度39%。以东、西两侧空旷,南、北两侧有房屋的室外区域为实验场地,把三种材料拼接成半径为15 cm的圆形,紧密粘贴在电热板表面作为实验样品,并将样品水平放置于高0.5 cm的隔热平台,电热板表面设置并保持为 $60\ ^\circ\text{C}$ 。利用两台工作中在中红外和远红外波段的红外热像仪测量三种材料的有效辐射温度,从7:00到18:00,分别从东、南、西、北四个方位每隔1 h测量一次。观察点位于目标斜上方 $1.2\ \text{m}$ 处,与目标中心的连线和目标表面法线约为 60° 。同时,使用电子温度计和热电偶测温仪实时记录大气温度和房屋的墙壁温度。

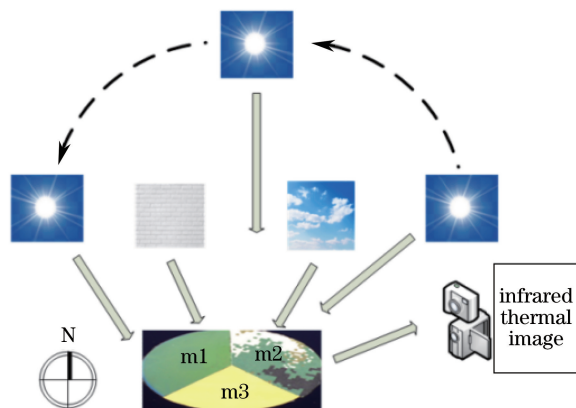


图6 红外隐身特性测试模型示意图

Fig. 6 Schematic of testing infrared stealth characteristics

5 结果及分析

5.1 环境红外辐射特性

实验中环境辐射能量主要来自太阳、天空和墙壁等,这些辐射源具有不同的辐射特性,对隐身材料隐身效果的影响也不一样。

据现有资料^[1,14],太阳是自然界中最强的红外辐射源。在距太阳日-地平均距离处,太阳光在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段的辐照度分别为 $2.278\ \text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 $0.133\ \text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。实验中三种材料在两波段的反射率之比接近于1,所以前者经光子晶体反射到热像仪的辐射能量约为后者的17倍。

另外,在白天,地物表面的红外辐射主要由两部分组成,即地物本身的热辐射和反射的太阳辐射。在波长 $3\ \mu\text{m}$ 下,地物辐射以反射太阳辐射为主,在

波长 $8\ \mu\text{m}$ 以上,以地物自发辐射为主。值得注意的是,白云和天空的背景辐射与地物具有类似的形状特征,在 $3\ \mu\text{m}$ 以下主要为大气或云层散射的太阳辐射, $8\ \mu\text{m}$ 以上为大气或云层的本征热辐射。

综上所述,该实验场景下,隐身材料接收外界环境的中红外波辐射照度主要来自太阳光的直接照射、大气散射或地物反射的太阳辐照。与此相反的是,隐身材料接收外界环境的远红外辐射照度是以地物、云层和大气等物体的本征热辐射为主,太阳光对其贡献很小。

另外,墙壁和大气本征辐射的强度与自身温度有关,其峰值波长位于远红外波段。图7所示为实

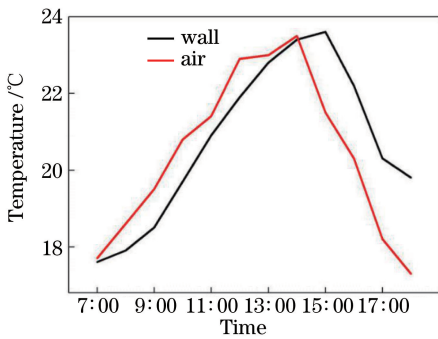


图7 空气与墙壁温度随时间的变化曲线

Fig. 7 Temperature line diagrams of air and wall

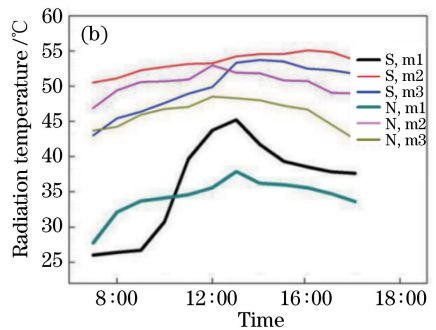
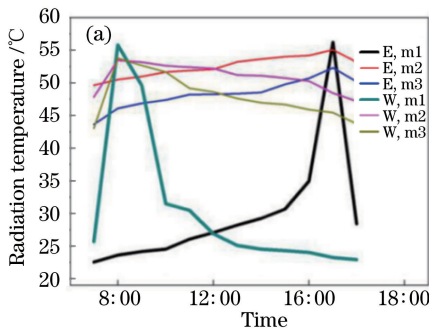


图8 四个方向实时测量的三种材料中红外有效辐射温度曲线。(a)探测器位于东面和西面;(b)探测器位于南面和北面

Fig. 8 Middle-infrared radiation temperature curves of three stealth materials measured

in real time from four directions. (a) Detector is located in east or west; (b) detector is located in south or north

如图8(b)所示,探测器位于南、北两面时,三种隐身材料的中红外辐射温度曲线都呈现先升后降的趋势。与图8(a)不同的是,对于同一材料,特别是m1,图8(b)的辐射温度曲线变化幅度较小,而且所有曲线峰值都位于13:00附近。这是因为探测器位于南、北两面时,太阳始终没有与热像仪形成镜像反射关系,三种隐身材料主要依靠南、北两侧的房屋反射太阳辐照,而且晴天中,太阳辐照强度先逐步增强,至13:00左右达到最大值,而后逐步减弱。同样

验场景的大气温度和南、北两侧房屋墙壁温度随时间变化的折线图。

由图7可知,大气温度和墙壁温度都呈现先上升后下降的趋势,并在15:00左右达到最大值。由于两者比热容不同,墙壁温度变化比大气温度变化略有延迟。

5.2 中红外隐身特性分析

图8所示为7:00至18:00,分别从四个方向观测三种隐身材料的中红外有效辐射温度曲线。图8(a)中,探测器位于东面时,三种隐身材料的中红外辐射温度曲线都在17:00左右达到峰值,而探测器位于西面时,8:00左右达到峰值,这是因为随着太阳东升西降,位于西面和东面的热像仪分别在8:00和17:00左右与太阳形成镜像反射关系,而太阳光大部分能量集中在较小的镜像立体角,可以看到这时三种材料的中红外辐射温度都明显增大。值得注意的是,当热像仪位于太阳镜像立体角里时,m1的变化最明显,m3次之,m2最小,与隐身材料的反射率成正比。由于光子晶体具有较强的抑制热源自发辐射的能力,在绝大多数角度下,m1的辐射温度都最低。相对于热源温度 $60\ ^\circ\text{C}$,m1、m2和m3的平均降温值为 $29.4\ ^\circ\text{C}$ 、 $8.3\ ^\circ\text{C}$ 和 $11.9\ ^\circ\text{C}$,可见m1降温效果明显优于m2和m3。

地,m1的辐射温度始终最低,其中m1、m2和m3的平均降温值分别为 $24.8\ ^\circ\text{C}$ 、 $8.2\ ^\circ\text{C}$ 和 $12.0\ ^\circ\text{C}$,m1降温效果明显优于m2和m3。

综上所述,太阳光是影响光子晶体薄膜中红外隐身效果的主要因素,与4.1节的分析相符。光子晶体隐身薄膜抑制中红外辐射的能力最强,使其在绝大多数时间内辐射温度明显低于红外隐身涂层和普通迷彩布。在太阳与热像仪恰好满足镜像反射关系时(这种情况很不常见),光子晶体薄

膜的辐射温度明显增大,一定程度影响了光子晶体薄膜的中红外隐身效果。但是,这种情况需要满足苛刻的镜像反射条件,所以负面影响可以忽略不计。

5.3 远红外隐身特性分析

图9所示为7:00至18:00,分别从四个方向观测得到的三种隐身材料的远红外有效辐射温度。如

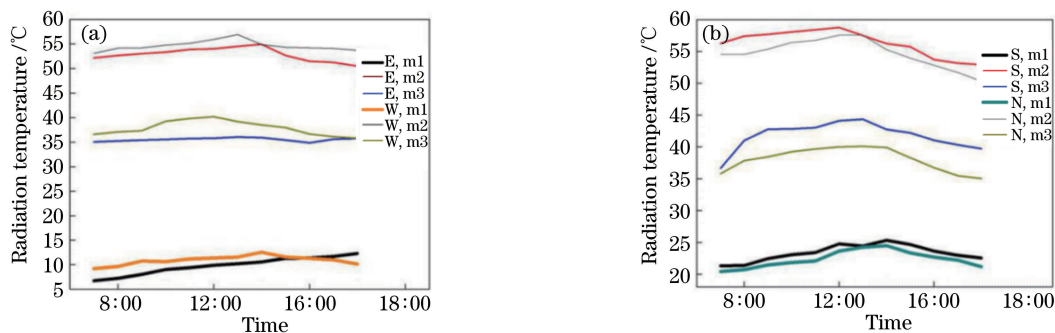


图9 四个方向实时测量的三种隐身材料远红外辐射温度曲线。(a)探测器位于东面和西面;(b)探测器位于南面和北面

Fig. 9 Far-infrared radiation temperature curves of three stealth materials measured

in real time from four directions. (a) Detector is located in east or west; (b) detector is located in south or north

如图9(b)所示,探测器位于南、北两面时,三种隐身材料的辐射温度曲线都呈先上升后下降的趋势,其峰值都出现在13:00附近,与墙壁和大气温度变化趋势相吻合。与图9(a)不同的是,三种隐身材料辐射温度曲线的起伏较明显,这是因为与东、西两面空旷的场景相比,位于南、北两侧的热像仪同时接收隐身材料反射的墙壁自身辐射远红外能量。这也说明地物的本征辐射对隐身材料的影响比大气明显。同样地,m1的辐射温度始终最低,m1、m2和m3的平均降温值分别为37.2 °C、4.5 °C和22.1 °C,m1降温效果优于m2和m3。

综上所述,在远红外波段,光子晶体薄膜具有最强的抑制红外辐射的能力,能明显地降低热源的辐射温度。在高温热源和较强环境辐照的共同作用下,光子晶体薄膜在全部角度范围和时间段的远红外隐身效果都最好。

6 结 论

为了研究光子晶体薄膜在室外环境下的红外隐身特性,设计和制备了在中、远红外波段具有较高反射率的光子晶体薄膜。选取隐身涂层和常规迷彩布进行对照实验,结果表明,太阳光对光子晶体薄膜8~14 μm波段隐身效果影响较小,在绝大部分角度范围内对3~5 μm波段隐身效果影响也较小;墙壁和大气辐射对光子晶体薄膜3~5 μm和8~14 μm

图9(a)所示,探测器位于东、西两面时,三种隐身材料的辐射温度曲线都没有出现高峰,而且曲线最大值都出现在13:00附近,与大气温度变化趋势相吻合。这说明太阳光对隐身材料远红外隐身效果的影响很小,而且m1的辐射温度始终最低,m1、m2和m3的平均降温值分别为48.2 °C、6.3 °C、24.3 °C,可见m1降温效果远优于m2和m3。

波段隐身效果影响都较小。虽然在特定极小角度范围内可以观察到对太阳的反射,但光子晶体薄膜中、远红外双波段的室外隐身效果依然大幅优于另外两种传统红外隐身材料,具有明显的实用价值。

参 考 文 献

- [1] Zhang J Q, Fang X P. Infrared physics[M]. Xi'an: Xi'an Electronic Science and Technology University Press, 2007: 115-124.
张建奇,方小平. 红外物理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2007:115-124.
- [2] Zhang J K, Zhao D P, Wang J C, *et al.* Thermal infrared pattern painting based on photonic crystals [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1216001.
张继魁,赵大鹏,汪家春,等. 基于光子晶体的热红外迷彩[J]. 光学学报,2016,36(12):1216001.
- [3] Yuan L, Weng X L, Deng L J. Influence of binder viscosity on the control of infrared emissivity in low emissivity coating [J]. Infrared Physics & Technology, 2013, 56: 25-29.
- [4] Zhang F Y, Zhou Y M, Sun Y Q, *et al.* Preparation and characterization of Chitosan/Konjac glucomannan/CdS nanocomposite film with low infrared emissivity[J]. Materials Research Bulletin, 2010, 45(7): 859-862.
- [5] Yu H J, Xu G Y, Shen X M, *et al.* Effects of size, shape and floatage of Cu particles on the low infrared

- emissivity coatings [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2009, 66(2): 161-166.
- [6] Li Y B, Zhu H L, Zhang B Q, *et al.* Research status and development trend of stealth coating [J]. *Materials Review*, 2015, 29(S2): 358-360.
李永波, 朱洪立, 张宝琴, 等. 隐身涂料研究现状及发展趋势[J]. *材料导报*, 2015, 29(S2): 358-360.
- [7] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(20): 2059.
- [8] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [9] Wang Z X, Cheng Y Z, Nie Y, *et al.* Design and realization of one-dimensional double hetero-structure photonic crystals for infrared-radar stealth-compatible materials applications [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(5): 054905.
- [10] Zhang J K, Shi J M, Zhao D P, *et al.* One-dimensional photonic crystal with spectrally selective low infrared emissivity fabricated with Te and ZnSe [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(7): 077110.
- [11] Yu D B, Tang K, Zou J W, *et al.* Effect of infrared emissivity of coatings on the camouflage effectiveness of targets [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2): 194-197.
余大斌, 唐坤, 邹继伟, 等. 红外迷彩伪装涂料发射率对目标伪装效率的影响[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(2): 194-197.
- [12] Fink Y, Winn J N, Fan S, *et al.* A dielectric omnidirectional reflector [J]. *Science*, 1998, 282(5394): 1679-1682.
- [13] Zhang W F, Fang Q, Cheng Y H, *et al.* Narrow band interleaver based on one-dimensional photonic crystal with positive-negative index alternant multilayer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(9): 1695-1699.
张文富, 方强, 程益华, 等. 正负折射率交替一维光子晶体窄带梳状滤波器[J]. *光学学报*, 2007, 27(9): 1695-1699.
- [14] Ye Y T, Liu S. Infrared and low light level technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 48-58.
叶玉堂, 刘爽. 红外与微光技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 48-58.