

·测试、试验与仿真·

涂料发射率与相变层在伪装中的要求分析

何梓健, 孙 锐, 刘 晖, 张 威, 柴伟亮

(酒泉卫星发射中心, 甘肃 酒泉 735000)

摘要: 为了对相变层的厚度以及伪装涂料8~14 μm 波段发射率值在不同季节对目标的伪装效率影响, 结合太阳辐射, 植被温度以及气温变化, 建立目标及单一植被背景在晴朗天气情况下不同季节的一日辐射温度变化模型。先后改变相变层的厚度和涂料发射率值, 得出相应的目标辐射温度。计算采用不同相变层厚度和发射率值时目标的伪装效率, 结合伪装效率及实际使用的考虑, 认为相变层厚度为1.5 mm时最佳, 且在春夏秋配合选用发射率值为0.5、0.3和0.4时可得最高白天伪装效率, 选用发射率为0.9、0.8和0.9时可得最高的晚上伪装效率和全天伪装效率。

关键词: 红外伪装; 相变材料; 发射率; 数值分析

中图分类号: TN219

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2018)-05-0061-08

Research on Camouflage Requirement of PCM Layer and Coating Emissivity

HE Zi-jian, SUN Rui, LIU Hui, ZHANG Wei, CHAI Wei-liang

(Jiuquan Satellite Launch Centre, Jiuquan 735000, China)

Abstract: To analyze the seasonal camouflage requirements of the coating average emissivity at 8~14 μm waveband and the thickness of phase change material (PCM) layer, with the investigation on solar radiation, the vegetative cover's temperature and the air temperature in one day, a temperature model of target that display the changing of its radiation temperature in one day of different seasons is built. The thickness of the PCM layer and the coating emissivity are changed to obtain the the target radiation temperature. The camouflage efficiency is calculated with different PCM layer thickness and coating emissivity, taking the camouflage efficiency and actual application into account, when PCM layer's thickness reaches 1.5 mm, the result is suitable. In this condition, in order to obtain the best camouflage efficiency in the daytime, the coating emissivity should reach 0.5, 0.3, and 0.4 respectively in spring, summer and autumn. To obtain the best camouflage efficiency of the night and whole day, the coating emissivity should reach 0.9, 0.8 and 0.9 respectively.

Key words: infrared camouflage; phase change material (PCM); emissivity; numerical analysis

红外成像探测对目标的发现和识别能力很强, 为了应对红外成像探测, 目前主要的思路是使目标表面的不同区域具有高、中、低三种辐射温度, 从而使其红外辐射图像呈现迷彩分割。由于各个季节的气候差异较大, 在不同季节选择合适的中等辐射温度对目标实现迷彩分割并延长目标的有效伪装时间具有一定的参考意义。由辐射温度的定义可知, 其主要由目标的真实温度和表面发射率决定, 战场上的军事目标大部分由金属构成, 热惯量较

小, 表面温度昼夜变化较大, 通常比背景(如草地、树林等)的昼夜温度变化大得多。为了使目标与背景的红外特征能较好地融合, 可以利用相变材料的大热惯量在一定程度上减缓金属目标温度的变化速率, 但由于相变材料性能以及涂层厚度的限制, 其效果还不能完全满足目标的伪装要求。将相变材料与不同红外发射率的涂层配合使用, 可望增强目标的红外伪装效果。

目前国内外都对相变材料应用在红外伪装中

收稿日期: 2018-08-24

作者简介: 何梓健(1989-), 男, 广东东莞人, 硕士研究生, 助理工程师, 主要研究方向为红外伪装技术。

进行了相关的研究, Mckinney^[1]等人将不同熔点的相变微胶囊加入可见光迷彩涂料中, 分别涂覆于坦克的不同发热部位上, 呈现明显的红外迷彩效果; 国防科技大学的孙浩, 吴文健^[2]用石蜡和脲醛树脂制备相变微胶囊, 测试了微胶囊的各种性能, 并对其在红外伪装隐身上的应用进行了研究。结果表明, 相变微胶囊能有效地遮蔽目标的红外热特征。北京工业大学的杨爱弟等人^[3]提出了热红外相变-降温复合隐身涂层, 并对涂层的作用原理及可行性分析进行了论述, 数值分析表明, 该复合隐身涂层同时具有调节发射率和温度的功能, 有助于提高目标的红外伪装效果; 在涂料发射率取值的研究上, 电子工程学院的刘姜伟^[4]等人通过对目标发射率的取值范围与目标真实温度的关系以及红外分割对不同斑块间发射率差值的要求进行了数值分析。海军工程大学的陈翹^[5]等人通过建立温度模型并根据目标与背景的辐射对比度, 对单一隐身涂料的发射率、短波和长波吸收率进行了优化设计, 提高了目标的隐身效率。以上文献都单独对相变材料在伪装方面的应用以及伪装涂料的发射率进行了分析研究, 但对于两者之间的结合使用以及气候变化对其提出的不同要求还缺乏进一步的分析说明。

文中在前人的研究基础上, 针对不同季节气象条件的差异可能对目标伪装效果造成的影响, 建立目标和植被的温度计算模型, 模拟得出目标和草地背景在不同季节的一日辐射温度变化。针对春夏秋三个季节, 对相变层的厚度及伪装涂料的发射率值对目标的伪装效果的影响进行定量的分析研究, 并以计算所得的伪装效率为依据, 选择合适的相变层厚度和发射率值。

1 目标温度模型的建立

地面目标的温度变化实质上是由于自身与环境之间进行的能量交换引起, 其中主要的能量交换包括太阳和天空辐射、自身辐射以及与环境间的显热和潜热交换。事实上, 目标在环境中的温度变化是一个复杂的能量交换过程, 除了物体表面的发射率和初始温度, 还受周围空气的温度、湿度、大气条件等外界因素的影响, 由此可列出地面目标表面的热平衡方程^[6]为

$$\alpha_s \cdot Q_{\text{sun}} + \alpha_l \cdot Q_{\text{sky}} - M_t + H_t + LEt + G_t = 0 \quad (1)$$

①太阳辐射 Q_{sun} 为

$$Q_{\text{sun}} = Q_{\text{sd}} + Q_{\text{ss}} \quad (2)$$

$$Q_{\text{sd}} = E_0 \cdot P_a^m \cdot CCF \cdot \cos\theta \quad (3)$$

$$Q_{\text{ss}} = 0.5 \cdot E_0 \cdot \frac{1 - P_a^m}{1 - 1.4 \cdot \ln P_a} \cdot CCF \cdot \cos\theta \quad (4)$$

②天空辐射 Q_{sky} ^[7] 为

$$Q_{\text{sky}} = \sigma T_{\text{sky}}^4 = \sigma T_{\infty}^4 (0.61 + 0.05 \sqrt{e_a}) \quad (5)$$

$$e_a = RH \times 6.108 \exp\left(\frac{17.269(T_{\infty} - T_0)}{T_{\infty} - 35.86}\right) \quad (6)$$

③目标对外辐射为

$$M_t = \varepsilon_l \sigma T^4 \quad (7)$$

④显热交换为

$$H_t = h(T_{\infty} - T) \quad (8)$$

式中, Q_{sd} , Q_{ss} 分别为太阳直射辐射和散射辐射; θ 为太阳天顶角; E_0 为修正后的太阳常数; P_a 为大气透明度; m ^[8] 为大气质量数; CCF 为天空云率。 α_s , α_l 为目标的短波和长波吸收率; M_t 为目标对外辐射的能量; H_t 为地面目标与环境的显热交换; LEt 为地物与环境的潜热交换, 由于文中主要针对干燥的地物表面, 因此这一项为零; G_t 为热传导通量; σ 为玻耳兹曼常数, 其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; RH 为相对湿度; ε_l 为目标的长波发射率, 且 $\varepsilon_l = \alpha_l$; T_t 为地物的温度; T_{∞} 为环境温度; h 为传热系数。

文中对平行于地面的目标进行讨论, 由于垂直于目标表面方向上的温度梯度对目标表面的温度影响最大, 而水平方向上的温度梯度很小, 因此采用典型的一维瞬态导热模型模拟目标的温度变化, 即假定目标的热量交换只存在于垂直目标表面的方向。如图 1 所示。左侧为相变材料加入前的目标结构图, 右侧为加入后的目标结构图。

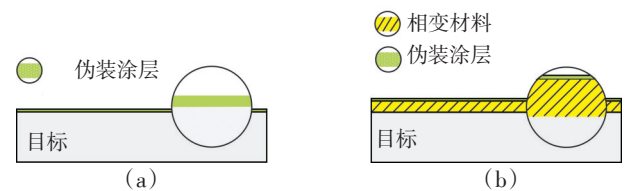


图1 目标示意图

考虑到表面伪装涂层的比热小、厚度薄, 为了便于计算, 忽略其厚度, 仅考虑目标表面发射率对目标温度的影响, 并认为目标底面绝热。

目标的温度场可以看作时间和厚度的函数, 加入相变材料前后目标的温度变化模型可以用表 1 的函数表示。

表1 目标温度的求解函数

	未加入相变材料	加入相变材料
控制函数	$\rho_m c_m \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = \lambda_m \frac{\partial^2 T_m}{\partial y^2}$	$\rho_p \frac{\partial H_p}{\partial \tau} = \lambda_p \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} \rho_m c_m \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = \lambda_m \frac{\partial^2 T_m}{\partial y^2}$
上表面边界条件	$-G_t = \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial y} \Big _{y=d_1}$	$-G_t = \lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial y} \Big _{y=d_2}$
下表面边界条件	$\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial y} \Big _{y=0} = 0$	$\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial y} \Big _{y=0} = 0$
初始条件	$T_m(y, 0) = T_0$	$T_p(y, 0) = T_m(y, 0) = T_0$

其中, T_m, T_p 分别为金属层和相变层的温度, ρ_m, ρ_p 分别为金属目标和相变材料的密度, λ_m, λ_p 分别为金属板和相变材料的导热系数, c_m 为金属的比热容, d_1 代表目标的厚度, d_2 代表加入相变层后的目标厚度, T_0 为初始温度, H_p 为相变材料的比焓, 根据焓法模型^[9]可用下面函数表示为

$$H_p = (T_p + 273.15) \times c_{ps} \quad (T_p < T_{min}) \quad (9)$$

$$H_p = (T_p + 273.15) \times c_{ps} + (T_p - T_{min}) \times q_l / (T_{max} - T_{min}) \quad (T_{min} \leq T_p \leq T_{max}) \quad (10)$$

$$H_p = (T_p - T_{max}) \times c_{pl} + (T_{max} + 273.15) \times c_{ps} + q_l \quad (T_{max} \leq T_p) \quad (11)$$

式中, c_{ps} 和 c_{pl} 分别是相变材料相变前和相变后的比热容; q_l 是相变材料的相变潜热; $[T_{min}, T_{max}]$ 为相变材料的相变温度区间。

2 植被地表的温度模型的建立

为了对比目标与植被背景的温度差异, 建立植被地表的温度模型, 植被地表的能量交换可由以下热平衡方程表示为

$$e_s Q_{sun} + e_l Q_{sky} - M - H - LE = 0 \quad (12)$$

其中, e_s 和 e_l 分别为植被的短波和长波吸收率; M 为植被表面的辐射出射度; H 为植被层和大气的显热交换; LE 为植被层和大气的潜热交换, 分别可以用以下方程^[10]求出。

$$M = e_l \sigma T^4 \quad (13)$$

$$H = C_p \rho_a \frac{T - T_\infty}{r_a} \quad (14)$$

$$LE = \frac{C_p \rho_a k_d (T - T_\infty) + D_a}{Y r_a + r_s} \quad (15)$$

$$r_a = \frac{1}{c_f v} \quad (16)$$

$$k_d = \frac{24\ 630.93}{(235 + T_\infty)^2} \times 10^{\frac{7.45 T_\infty}{235 + T_\infty}} \quad (17)$$

$$D_a = (1 - RH) \times 0.610\ 8 \exp\left(\frac{17.27 T_\infty}{T_\infty + 273.3}\right) \quad (18)$$

式中, r_a, r_s 分别为植物边界层阻力和植被组分群体气孔阻力; C_p 为空气定压比热; ρ_a 为空气密度; Y 为干湿表常数; $Y = 0.66 \text{ Pa}^\circ\text{C}^{-1}$; D_a 参考高度处空气温度 T_∞ 时的比湿; k_d 为参考高度处空气温度 T_∞ 的饱和比湿斜率; c_f 为植被热量与水汽无量纲传输系数。

3 环境气温变化模型的建立

为了模拟四季环境温度的变化模型, 以春分、夏至、秋分、冬至四个节气为代表, 采取正弦法^[11]对其一日温度变化进行模拟, 使用五年来中国地面国际交换站气候资料日值数据集 (SURF_CLI_DAY_CES) 采集的合肥地区日最高温和最低温的温度数据, 如表2所示。

表2 合肥近5年温度数据

	2012		2013		2014		2015		2016	
	T_{min}	T_{max}	T_{min}	T_{max}	T_{min}	T_{max}	T_{min}	T_{max}	T_{min}	T_{max}
春分	4.2 °C	11.2 °C	7.3 °C	15.0 °C	3.1 °C	16.2 °C	8.4 °C	19.1 °C	9.0 °C	20.7 °C
夏至	22.1 °C	32.0 °C	25.4 °C	28.5 °C	22.3 °C	28.9 °C	21.2 °C	27.3 °C	26.9 °C	30.2 °C
秋分	19.1 °C	26.7 °C	25.3 °C	29.8 °C	19.4 °C	28.4 °C	20.7 °C	29.3 °C	20.1 °C	29.7 °C
冬至	-9.0 °C	4.3 °C	-6.2 °C	5.5 °C	-1.7 °C	12.3 °C	5.5 °C	11.4 °C	1.6 °C	12.0 °C

对表2中的历年的温度数据进行平均,并利用正弦法,由式(19)、式(20)得出合肥地区四个季节的温度模拟式(其中 ω 为太阳时角)如下

$$T_{\infty} = a\sin\omega + \beta \tag{19}$$

$$\alpha = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \quad \beta = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \tag{20}$$

春分为

$$T_{\infty} = 5.02\sin\omega + 11.42 \tag{21}$$

夏至为

$$T_{\infty} = 2.9\sin\omega + 26.48 \tag{22}$$

秋分为

$$T_{\infty} = 2.01\sin\omega + 24.85 \tag{23}$$

冬至为

$$T_{\infty} = 5.53\sin\omega + 3.57 \tag{24}$$

4 参数设定及计算分析

设定表面伪装涂层的长波和短波吸收率 α_s 、 α_l 分别为0.5和0.8,目标的厚度 d_l 为10 mm,导热系数 λ_m 为 $49.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,密度 ρ_m 为 7840 kg/m^3 ,比热容为 465 J/kg ;植被的长波吸收率 $e_l=0.95$,短波吸收率 $e_s=0.80$ ^[12],植被组分群体气孔阻力 $r_s=250 \text{ m/s}$,植被热量与水汽无量纲传输系数 $c_t=0.02$;计算太阳辐射,设定观察地区为合肥,纬度为北纬 31.52° ,天气条件设置为:天空晴朗, $CCF=0.8$, $P_1=0.85$ ^[6],风速 $v=1 \text{ m/s}$,相对湿度 $RH=50\%$,取空气密度 $\rho_a=1.13 \text{ kg/m}^3$,空气定压比热 $C_p=1.013 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$,时间为上午6:00至翌日6:00。

首先对伪装涂层中没有加入相变材料的目标进行计算,设定目标在春夏秋冬四季的初始温度分别为 10°C , 20°C , 15°C , 0°C ,得出其在四季中的一日温度变化,具体结果如图2所示。

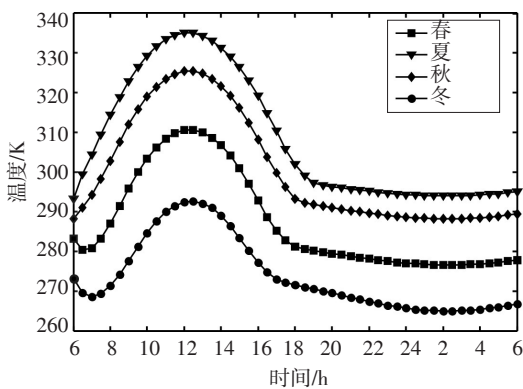


图2 目标温度变化曲线

如图2所示,目标在春夏秋三季的温度变化幅度较大,而冬季的温度变化幅度较小,因此文中主要针对春夏秋三季进行研究。依据不同季节的气候特征,选用不同相变温度区间的相变材料,春秋两季选用相变材料A,相变温度区间为 $[15^\circ\text{C}, 25^\circ\text{C}]$,夏季选用相变材料B,相变温度区间为 $[25^\circ\text{C}, 35^\circ\text{C}]$,其他热学性质一致,如:导热系数均为 $0.25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,密度为 900 kg/m^3 ,相变前后比热容分别为 3200 J/kg , 2800 J/kg ,相变潜热为 220 J/g 。

计算可得,加入相变层前后的目标以及草地背景的日辐射温度变化曲线,如图3所示。

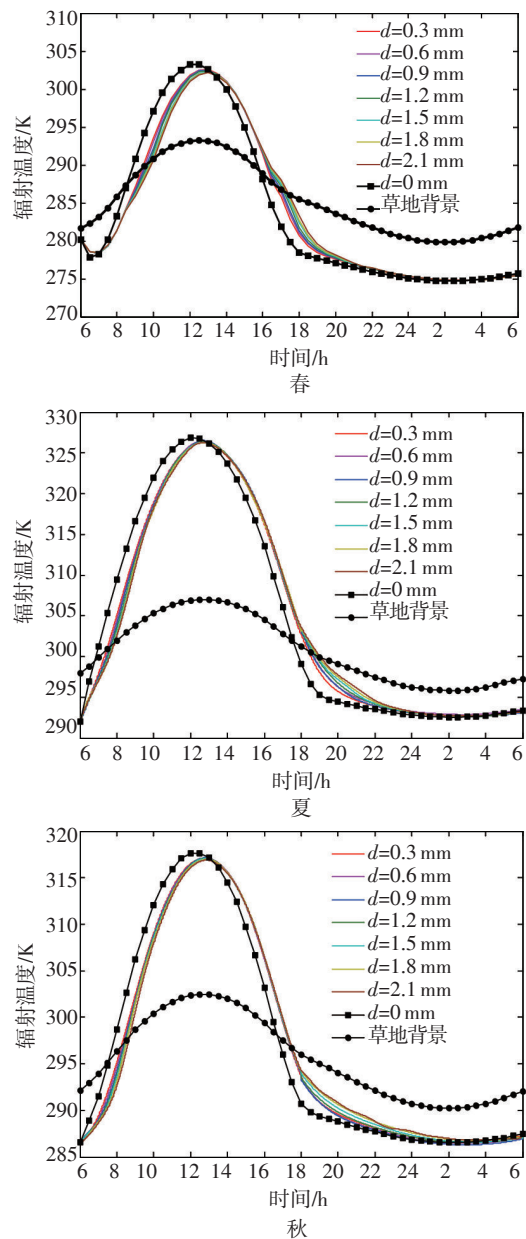
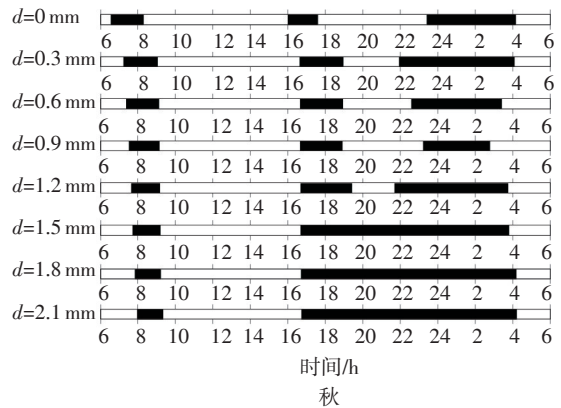


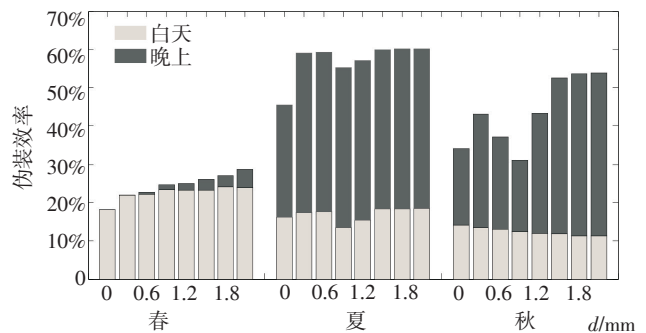
图3 背景及加入不同厚度相变层前后目标的辐射温度变化曲线

从图3可以看出,三个季节日标及背景的辐射温度有所差异,主要由于气候条件的不同,但存在以下规律:①对于草地背景和日标,辐射温度先升高后减低而后缓慢回升,最高辐射温度都出现在中午12~13时,最低温出现在晚上2时左右;②对于草地背景,升温 and 降温速率比较缓慢,一天的辐射温度变化不大,在白天大部分时间低于日标,而晚上则高于日标;③对于日标,相变层的加入使其温度变化速率明显减低,上午辐射温度普遍低于普通日标,而下午乃至晚上,辐射温度高于普通日标直至晚上24时左右逐渐相等;⑤相变层的厚度影响日标温度变化速率,相变层越厚,温度变化速率越慢。

目前通常认为日标和背景的辐射温差在4 K以内即可实现有效伪装,计算得到,加上不同厚度的相变层后的日标实现有效伪装的时间段分布及伪装效率,如图4a、图4b所示,图4a中黑色和白色分别代表日标与背景辐射温度差在4 K以内和4 K以上的时间段;图4b表示日标选用不同厚度相变层在不同季节时的伪装效率,以长条形代表一天的时间,其中黑色和白色部分分别代表夜晚和白天的伪装效率。

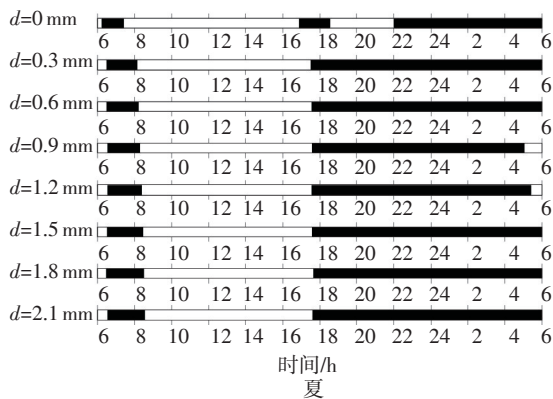
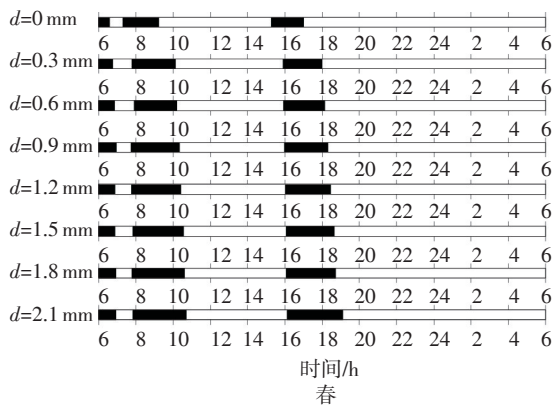


(a) 日标与背景辐射温差在4 K以内的时间分布



(b) 日标在不同季节的伪装效率

图4 加上不同厚度的相变层后的日标实现有效伪装的时间段分布及伪装效率计算结果



从图4a可以得出,①由于气候条件的差异,不同季节日标实现有效伪装的时间段有所不同,春天主要在白天,夏秋两季则集中在晚上;②即使运用不同厚度的相变层后,日标在太阳辐射最强烈的中午依然不能实现有效伪装;③日出和日落期间日标与背景辐射温度相近能实现有效伪装,且随着相变层厚度的增加,这个时间得以加长,但总体会有所延后。从图4b中可以得出,①在春天相变层厚度增加时日标在白天和夜晚的伪装效率都有所提高,但提高有限;②在夏天,相变层的加入使日标夜晚的伪装效率有明显的提高,但白天提高并不明显,甚至有所降低;③在秋天,相变层的加入使日标白天的伪装效率有所减低,夜晚的伪装效率则随着相变层厚度的增加普遍有所提高,但个别厚度值的伪装效率有所降低;④就总体而言,加入相变层后日标的伪装效率都有所提高,尤其是晚上的提高较大。

由于相变层的加入对日标伪装效率的提高有限,选择合适的发射率值与之配合使用能对伪装效

率有进一步的提高,通过表3可以得出不同厚度相变层在三个季节的平均伪装效率。考虑涂层的厚度不宜过厚,下面对相变层为1.5 mm时与不同表面发射率值的表面涂层配合使用的伪装效果进行研究。

表3 不同厚度相变层的伪装效率

d/mm	0	0.3	0.6	0.9
春	18.10%	21.97%	22.75%	24.78%
夏	45.57%	59.13%	59.24%	55.23%
秋	34.16%	43.11%	37.19%	31.10%
平均	32.61%	41.40%	39.73%	37.04%
d/mm	1.2	1.5	1.8	2.1
春	25.14%	26.11%	27.08%	28.66%
夏	57.11%	60.01%	60.08%	60.20%
秋	43.29%	52.59%	53.60%	53.76%
平均	41.85%	46.24%	46.92%	47.54%

计算了在不同季节使用不同长波发射率 α_l 的表面涂层与相变层配合使用后的目标以及草地背景的一日辐射温度变化,结果如图5所示。

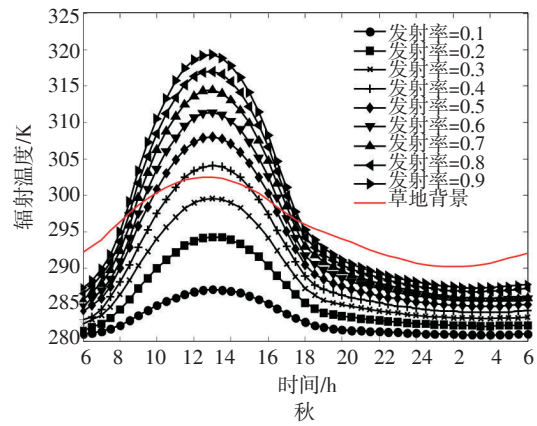
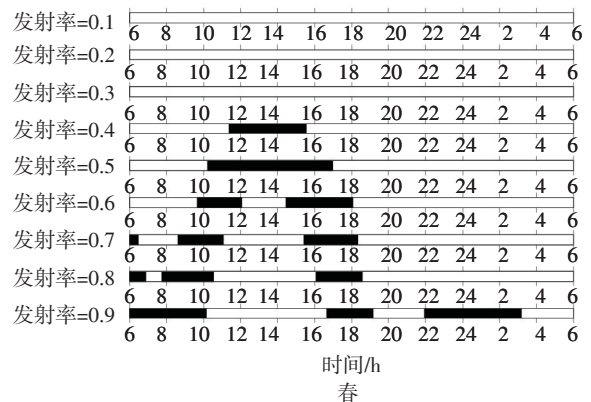
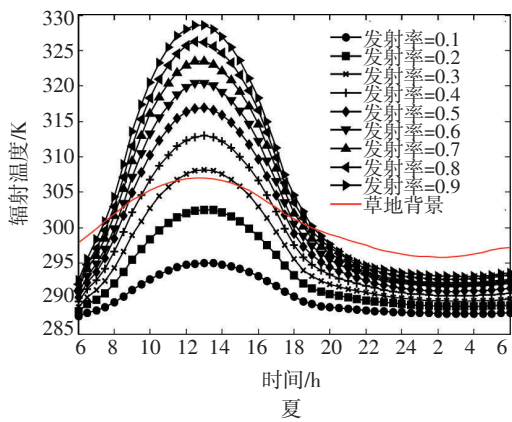
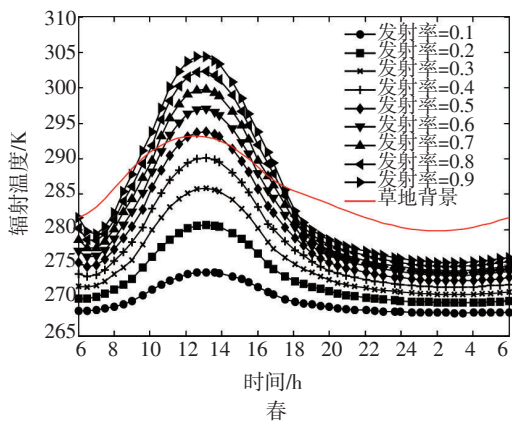
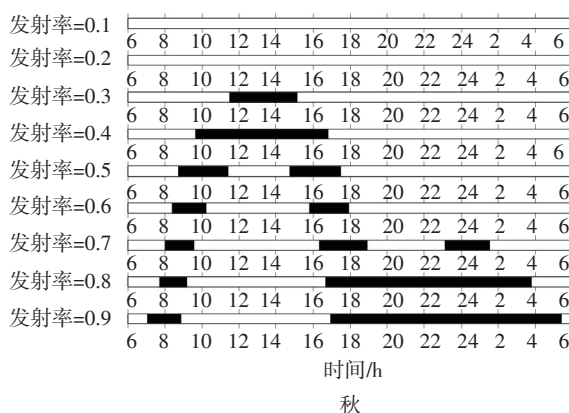
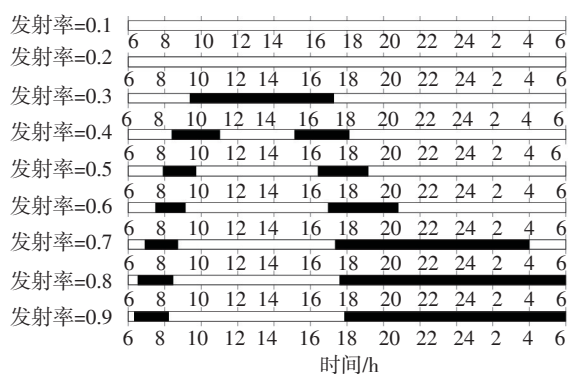


图5 目标及植被背景辐射温度变化曲线

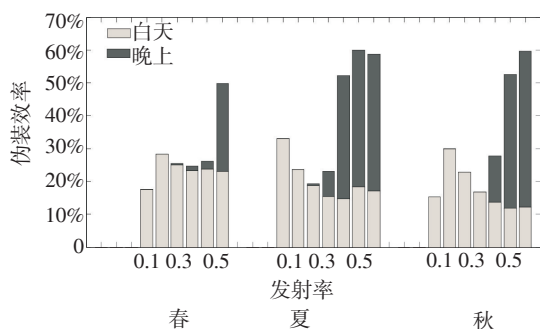
对图5的目标和背景的辐射温度变化曲线进行分析可得,①目标和背景的辐射温度整体趋势一致,随着时间先升高后降低,在中午时分辐射温度达到最高,且晚上目标的辐射温度普遍比植被的要低;②由于不同季节的气候条件有所不同,目标和植被背景的辐射温度也表现出不同的特征,表现为在夏季目标和植被的辐射温度最高,春秋次之;③发射率越大,目标的辐射温度越大,温度的变化速率也越快;④就白天而言,不同发射率值的目标与背景的接近程度不一,伪装效率也有所不同,而夜晚则发射率值高的目标与背景较为接近。

为了对不同长波发射率的目标实现有效伪装的时间段分布及伪装效率进行分析,对其进行了计算,结果如图6a、图6b所示。图6a中黑色和白色分别代表辐射温度差在4 K以内和4 K以上的时间段;图6b表示目标选用不同发射率值在不同季节时的伪装效率,其中黑色和白色分别代表夜晚和白天的伪装效率。





(a) 目标与背景辐射温差在4 K以内的时间段分布



(b) 不同发射率值目标的伪装效率

图6 对不同长波发射率的目标实现有效伪装的时间段分布及伪装效率计算结果

由图6a可以得出,①过低的发射率使目标的辐射温度低于草地背景,不利于目标实行伪装;②在中午时分实现有效伪装的发射率值并不能满足其他时段的伪装要求,尤其是在晚上气温较低的时候;③较高的发射率值能使目标在晚上实现时间相对较长的有效伪装。由图6b可以得出,①目标的表面发射率并不是越低越好,太低的发射率反而不利于目标的伪装,如图中发射率为0.1、0.2时在春夏秋三季的伪装效率都为0;②在春夏秋三季发射率取

值为0.5、0.3和0.4时目标的白天伪装效率最高,取值为0.9、0.8和0.9时目标的夜晚伪装效率最高;③就整天而言,在春夏秋三季发射率取值分别为0.9、0.8和0.9时目标可以获得最高的伪装效率。

5 结论

通过建立目标及单一植被背景在不同季节晴天条件下的一日辐射温度变化模型,利用该模型分别对加入相变层前后的目标和背景的辐射温度进行了计算分析,得出以下结论:

(1)由于不同季节的气候条件有所不同,目标和植被背景的辐射温度也表现出不同的特征,表现为在夏季目标的辐射温度最高,春秋次之,冬季最低,且目标与植被背景的辐射温度总体趋势一致。由于目标温度变化速率大于背景,目标在中午的辐射温度大于植被背景,而晚上则低于植被背景;

(2)目标加入相变层前后的温度变化趋势总体不变,但温度变化速率得到一定的减缓,使目标在加入相变层后的伪装效率在三个季节都得到了明显的提高,尤其是晚上的伪装效率。就春夏秋三季而言,厚度为2.1 mm的相变层达到最高的平均伪装效率47.54%,但结合实际使用情况,并考虑到厚度为1.5 mm的相变层达到的平均伪装效率为46.24%,认为1.5 mm的厚度更符合实际使用;

(3)相变层的加入并不能解决目标在中午时分温度过高的问题,需要和具有合适的发射率值的伪装涂料配合使用,文中选取的1.5 mm厚的相变层在春夏秋三季选用发射率为0.5、0.3和0.4时可得最高白天伪装效率,选用发射率为0.9、0.8和0.9时可得最高的晚上伪装效率,选用0.9、0.8和0.9时可得最高的全天伪装效率;

由于采用的模型是在前人所建立的模型上进行整合,但模型中选取地点仅限在合肥地区,研究结果存在一定的局限性。在实际应用中若选用不同相变材料,其厚度及发射率的取值也应有所调整,因此以上结果仅对于在各个季节的红外伪装中相变层厚度及表面伪装涂料长波发射率的选取提供研究方法及参考依据。

参考文献

[1] Mickinney R A, Bryant Y G, Colvin D P. Method of reducing

- infrared view ability of objects[P]. US6373058. 2002-04-16.
- [2] 孙浩, 吴文健. 石蜡微胶囊及其红外伪装隐身性能研究[J]. 光电技术应用, 2005, 20(3): 41-44.
- [3] 杨爱弟, 王智慧, 张存, 等. 热红外降温一相变复合隐身涂层的研究[J]. 现代防御技术, 2009, 37(5): 21-24.
- [4] 刘姜伟, 时家明, 陈宗胜, 等. 红外迷彩伪装对发射率要求的数值分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 442-445.
- [5] 陈翻, 杨立. 基于辐射对比度的涂料隐身性能优化与评估[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 1043-1047.
- [6] 王长胜. 典型地物表面温度特性研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
- [7] 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, 110-111.
- [8] 王世喜, 朱永豪. 用光谱辐射计测量大气光学厚度的研究[J]. 量子电子学报, 1998, 15(3): 326-331.
- [9] Volle Vr, Cross M. Accurate solutions of moving boundary problems using the enthalpy method [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1981, 24(5): 545-556.
- [10] 邵晓鹏. 红外纹理生成方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- [11] 姜会飞, 温德永, 李楠, 等. 利用正弦分段法模拟气温日变化[J]. 气象与减灾研究, 2010, 33(3): 61-65.
- [12] 杨德贵, 黎湘, 庄钊文. 基于统一模型的典型地表红外辐射特性对比研究[J]. 红外与毫米波学报, 2001, 20(4): 263-266.

(上接第30页)

图中横坐标是管道内上下的温差, ○表示大气相干长度的变化, ■表示到达角起伏方差。

从图6中可以看出, 随着管道内温差的增加, 到达角起伏方差也随之增加, 湍流强度(以相干长度值 r_0 衡量)逐渐减小, 其变化范围(r_0 值)从35 cm下降到5 cm。

4 结论

阐述了一种可以同时模拟激光大气传输湍流效应、衰减效应和热晕效应装置的设计, 从大气湍流模拟性能的测试结果来看, 该装置可以比较准确的模拟Kolmogorov湍流, 湍流强度的范围覆盖5~35 cm。

对于大气分子吸收和气溶胶衰减的性能测试尚未开展, 不过, 对于大气分子吸收而言, 由于特定大气分子浓度在指定气压和温度条件下与其吸收系数存在固定的已知关系。因此, 只要准确测量管道内的气压、温度和气体分子浓度, 则该种气体对激光的吸收系数则可以精确确定。对于气溶胶而言, 由于管道内气溶胶发生器产生的气溶胶的物理化学特征参数均为已知, 根据相关理论^[11]可知, 其散射系数和吸收系数均可以通过经典Mie散射理论计算得到。文中重点测试了反映大气随机特性的湍流模拟效果, 其他性能的测试工作待设备研制完成

后将逐一开展。

参考文献

- [1] 张智露. 室内大气湍流模拟系统的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [2] 李华, 陈前荣, 王彦斌, 等. 利用液晶空间光调制实现激光大气湍流效应动态仿真[J]. 光电子·激光, 2016, 27(7): 709-715.
- [3] 艾勇, 段梦云, 徐洁洁, 等. LC-SLM激光大气传输湍流模拟及通信实验分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 3103-3109.
- [4] 遆培培. 大气湍流动态模拟控制平台的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- [5] 段梦云, 艾勇, 熊准, 等. 激光大气传输室内模拟研究[J]. 大气与环境光学学报, 2014, 9(3): 188-193.
- [6] 王奇涛. 基于空间光调制器的大气湍流模拟与校正技术[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.
- [7] 段梦云, 单欣, 艾勇. 激光大气湍流模拟装置的研究与进展[J]. 光通信技术, 2014, 38(1): 49-52.
- [8] 李晨, 杨建昌, 李鉴. 大气湍流与气溶胶环境室内模拟方法的研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(8): 973-977.
- [9] 曹百灵, 邬承就, 魏合理, 等. 碘激光的大气衰减特性[J]. 光学学报, 2003(4): 496-500.
- [10] 曹百灵, 邬承就, 饶瑞中, 等. HF/DF激光传输的大气衰减特性[J]. 强激光与粒子束, 2003(1): 17-20.
- [11] Liou K N. An Introduction to Atmospheric Radiation(Second Edition)[M]. USA: Elsevier Science, 2002.