

毫米波迷彩隐身涂层发射率分布数值计算

徐记伟, 周 军

(解放军陆军军官学院 三系, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 推导得出了毫米波隐身涂层发射率随着目标表面真实温度以及几种典型环境发射率之间的关系; 在此基础上, 以地面为典型环境, 将其发射率作为主色发射率, 推导了三色毫米波迷彩发射率取值范围表达式, 分三种情况讨论了三色毫米波迷彩发射率的取值范围, 及其随着目标表面真实温度变化之间的关系。结果表明, 在 300~400 K 温度范围内, 迷彩主色发射率应与环境发射率相近(对于地面来说为 $\varepsilon_g=0.935$), 配色发射率取值随着目标表面真实温度的变化单调变化; 且它们的取值范围相同, 并随着目标表面真实温度的升高而减少。所得到的结论对毫米波隐身迷彩涂层色斑发射率分布设计具有指导意义。

关键词: 发射率; 毫米波; 隐身涂层; 迷彩

中图分类号: TN972⁺.43 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0321002

Numerical calculation of millimeter wave pattern painting stealthy coat emissivity

Xu Jiwei, Zhou Jun

(Third Department, Army Officer Academy, PLA, Hefei 230031, China)

Abstract: The relationship between the emissivity of millimeter wave stealthy coat, the real temperature of target surface and some typical environment emissivity was calculated; based on that, the emissivity value range expression of three color millimeter wave stealthy coat was deduced with the typical environment emissivity. The relationship between the color block emissivity value ranges with the real temperature of target surface was discussed in three different cases. The result shows that in the 300–400 K, the main color emissivity value should be similar to the environmental emissivity (for the ground, $\varepsilon_g=0.935$), the harmonize emissivity value changes monotonically with the target surface real temperature; they have the same value range, and decrease with the increase of the target surface real temperature. The conclusion plays a guiding role in designing the millimeter wave stealthy coat.

Key words: emissivity; millimeter wave; stealthy coat; pattern painting

收稿日期: 2016-07-11; 修订日期: 2016-08-13

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41406109)

作者简介: 徐记伟(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要从事隐身技术方面的研究。Email: 2501068786@qq.com

0 引言

毫米波波长介于红外与微波之间,因其较好的传输特性以及抗干扰能力,被越来越多地用于侦察和制导。伴随着毫米波固态器件以及嵌入式电路的不断发展进步,毫米波探测系统的研制和发展突飞猛进,以毫米波主动雷达和被动辐射计为代表的毫米波侦察制导装备已经被广泛地应用。近年来,毫米波被动探测技术发展迅速,主要利用目标自身的辐射亮温度来实现发现包括具备雷达隐身能力的军事目标的目的^[1-3]。研究表明,毫米波被动探测技术用于发现、识别金属表面具有特殊的优势,并且其对于涂覆雷达吸波材料的军事目标也有较好的发现能力。此外,毫米波被动成像不受闪烁效应影响,不会像毫米波主动成像系统要受闪烁效应等影响,在近距离时会产生较严重的误差;与此同时,毫米波被动成像不发射电磁波,不易被发现,因而很适于隐密的侦察工作^[9-11]。也正因此,越来越多的反装甲制导弹药以及末敏弹采用了毫米波主动、被动或者主/被动复合的制导方式。这对装甲目标构成极大的威胁,因此,装甲目标在毫米波频谱范围内的隐身,特别是针对毫米波被动探测的隐身就显得尤为重要了。

通过在军事装备表面涂覆隐身涂层,可以有效降低被发现的概率;同时,隐身涂层具有工艺简单、使用方便、适宜现场及在野战条件下对武器装备实施快速隐身、对武器装备的外形不需做任何改动等优势,广泛地应用于新装备隐身性能提高和老旧装备隐身性能改进。目前,毫米波隐身涂层主要针对主动毫米波雷达的探测,并且以单纯吸波为主,针对毫米波被动探测的毫米波迷彩隐身涂层发射率分布的研究还比较少。毫米波迷彩伪装的基本思路是在目标表面不同部位涂覆不同发射率的涂层,从而使目标的不同部位在相同条件下具有不同的辐射温度,在毫米波被动成像系统中产生图像分割效果,一定程度上实现与背景的融合。文中正是通过研究毫米波隐身涂层发射率的分布,据此选择相应发射率材料并按照迷彩设计的要求进行涂装,实现毫米波迷彩隐身涂层提高地面装甲目标对抗毫米波被动探测隐身能力的目标。

1 基本理论

高于绝对零度的物体都会向外界辐射电磁波,物体在毫米波段向外辐射电磁波的能量较弱,只能

使用高灵敏度的毫米波辐射计接收。毫米波被动探测正是利用目标与背景的辐射差异,来实现探测识别目标的目标。在毫米波段,辐射功率和温度存在对应关系,因此在毫米波被动探测领域,主要采用温度概念来描述物体的辐射能量。物体的辐射能量可以用表观温度表示,如下式所示:

$$T(\theta, \varphi) = \varepsilon(\theta, \varphi)T_0 + \rho(\theta, \varphi)T_s \quad (1)$$

式中: T_0 为物体真实温度; ε 为物体的发射率; ρ 为物体的反射率; T_s 为环境真实温度。对于毫米波被动辐射计来说,当接收机仅接收地面或水面的辐射时,天线附近辐射温度可如下式所示:

$$T_{Bg}(\theta, \varphi, p_i, \Delta f) = \rho_g(\theta)T_s + \varepsilon_g(\theta)T_g + \varepsilon_{at}(\theta)T_{at} + \rho_g(\theta)\varepsilon_{at}T_{at} \quad (2)$$

式中: θ 为入射角; φ 为方位角(可认为它的变化不影响探测); p_i 为极化方式; Δf 为接收机的带宽; ρ_g 为地面的反射系数; ε_{at} 、 ε_g 分别为大气和地面的发射率; T_s 、 T_g 、 T_{at} 分别为天空、地面和大气的真实温度。假设天空无云,则 $T_{at}=0$,于是上式可简化为:

$$T_{Bg}(\theta, \varphi, p_i, \Delta f) = \rho_g(\theta)T_s + \varepsilon_g(\theta)T_g \quad (3)$$

2 毫米波隐身涂层发射率与环境发射率的相关性分析

通常认为装甲目标表面可以看成是涂覆一定厚度隐身涂层的金属表面。毫米波被动探测设备天线附近辐射温度可以表示为:

$$T_T(\theta, \varphi, p_i, \Delta f) = \rho_T(\theta)T_s + \varepsilon_T(\theta)T_T \quad (4)$$

式中: $\varepsilon_T(\theta)$ 和 T_T 分别为金属表面隐身涂层的发射率以及目标表面真实温度。由公式(3)和(4)可以得到目标和背景的辐射温度差异:

$$\Delta T = T_T(\theta, \varphi, p_i, \Delta f) - T_{Bg}(\theta, \varphi, p_i, \Delta f) = \rho_T(\theta)T_s + \varepsilon_T(\theta)T_T - [\rho_g(\theta)T_s + \varepsilon_g(\theta)T_g] \quad (5)$$

对于没有吸收的表面, $\rho=1-\varepsilon$,于是公式(5)可变为:

$$\Delta T = (1 - \varepsilon_T(\theta))T_s + \varepsilon_T(\theta)T_T - [(1 - \varepsilon_g(\theta))T_s + \varepsilon_g(\theta)T_g] = \varepsilon_T(\theta)(T_T - T_s) - \varepsilon_g(\theta)(T_g - T_s) \quad (6)$$

通过对公式(6)的观察不难看出,可以将 $T_T - T_s$ (或 $T_g - T_s$)当作某一等效物体,该物体的真实温度为目标(或环境)真实温度扣除以天空为背景真实温度的差值,但是发射率仍然为目标(或环境)自身的发射率。对于水面来说,仅将上式中的地面发射率 $\varepsilon_g(\theta)$

换成水面发射率 $\epsilon_w(\theta)$, 地面真实温度 T_g 换成水面真实温度 T_w 即可。

对于隐身涂层来说, 其任务就是尽可能使得目标与环境的辐射温度的差值 ΔT 尽可能接近 0。令 $\Delta T=0$, 公式(6)可以变为:

$$\epsilon_T(\theta) = \epsilon_g(\theta)(T_g - T_s)/(T_T - T_s) \quad (7)$$

假设环境(地面、沙地、水面)的真实温度为 300 K, 军事目标表面真实温度在 300~400 K 范围内变动; 地面、沙地、水面的发射率依次为 $\epsilon_g=0.935$, $\epsilon_{sand}=0.90$, $\epsilon_{water}=0.38$, 目标表面材料的发射率为 ϵ_T 。利用公式(7)可以得到目标表面材料发射率的选取与真实温度之间的关系, 如图 1 所示。

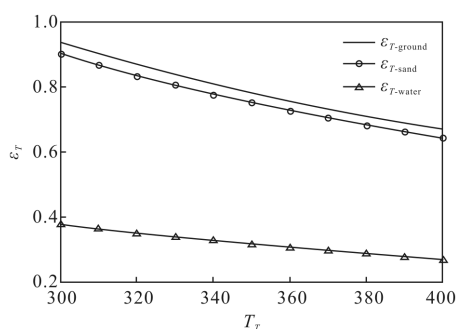


图 1 目标真实温度对材料发射率选取的影响

Fig.1 Effect of target real temperature on emissivity selection

可以看出, 在 300~400 K 温度范围内, 对于某一固定温度, 欲使目标表面材料与环境的辐射温度相近, 选取涂覆在目标表面材料的发射率与环境发射率同趋势变化; 而对于某单一环境, 目标表面真实温度升高, 欲使目标与环境的辐射温度相近, 则必须在一定程度上降低涂覆在目标表面材料的发射率。进一步的数值分析发现, 在 300~400 K 温度范围内, 当环境的发射率越低, 涂覆在目标表面材料的发射率可选择范围越小。

3 三色毫米波隐身迷彩涂层发射率与环境发射率的相关性分析

但是, 实际上无法做到仅通过单一隐身涂层实现目标和背景的辐射温度差异总是为零。此时, 通常比较好的做法是, 一方面将目标总体的辐射温度尽量控制在与背景相近的一定范围之内, 另一方面, 在目标表面形成辐射温度不同的斑块, 让目标外形被分割, 从而降低目标被发现、识别的概率。普遍认为,

目标与背景的辐射温差控制在 4 K 内就可以实现隐身, 而超过 10 K 则不能达到伪装的效果^[12-13]; 另一方面, 为达到外形分割的目的, 应在目标表面按照一定规则涂覆不同发射率的材料, 使得目标本身毫米波辐射特征呈现出迷彩斑块的效果。将上述两个方面结合, 并假设一定范围内的目标表面温度近似相等为 T_T , 于是由公式(4)可得到下面配色辐射温度差的公式:

$$\begin{cases} 4 \leq |\epsilon_1 - \epsilon_T| T_T \leq 10 \\ 4 \leq |\epsilon_2 - \epsilon_T| T_T \leq 10 \\ 4 \leq |\epsilon_1 - \epsilon_2| T_T \leq 10 \end{cases} \quad (8)$$

式中: ϵ_T 为涂覆在目标表面主色材料发射率(应与环境发射率相近, 以下以地面发射率为例计算); ϵ_1 和 ϵ_2 表示涂覆在目标表面配色不同的发射率。

下面分三种情况讨论。

3.1 当 $\epsilon_1 > \epsilon_2 > \epsilon_T$ 时

由公式(8)可得到:

$$\begin{cases} 4 \leq |\epsilon_1 - \epsilon_T| T_T \leq 10 \\ 4 \leq |\epsilon_2 - \epsilon_T| T_T \leq 10 \\ 4 \leq |\epsilon_1 - \epsilon_2| T_T \leq 10 \end{cases} \quad (9)$$

将公式(9)中前两式相减并整理可得到下式:

$$\begin{cases} 4 \leq |\epsilon_1 - \epsilon_T| T_T \leq 10 \\ 4 \leq |\epsilon_2 - \epsilon_T| T_T \leq 10 \\ 4 \leq |\epsilon_1 - \epsilon_2| T_T \leq 10 \end{cases} \quad (10)$$

利用公式(10)可以得到目标真实温度对材料发射率 ϵ_1 和 ϵ_2 选取的影响分别如图 2 和图 3 所示。图中, ϵ_{max} 和 ϵ_{min} 分别代表材料发射率可以选取的最大和最小值(下同)。通过图 2 和图 3 不难发现, 对于一

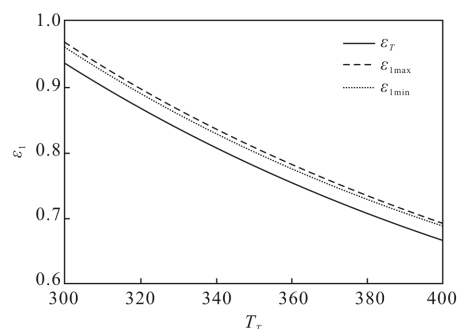


图 2 目标真实温度对材料发射率 ϵ_1 选取的影响

Fig.2 Effect of target real temperature on material emissivity ϵ_1 selection

定主色材料发射率, 配色材料发射率可选取的数值随着目标表面真实温度的升高而降低; 进一步对比

发现, 配色材料发射率 ε_1 和 ε_2 的可选取范围 (即 $\varepsilon_{1\max} - \varepsilon_{1\min}$ 或 $\varepsilon_{2\max} - \varepsilon_{2\min}$, 下同) 在同一目标表面真实温度情况下是一致的, 并且, 该范围随着目标表面真实温度的增加而减小。

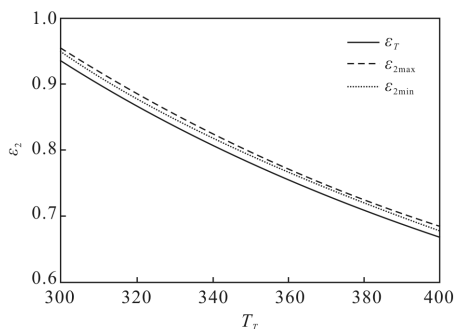


图 3 目标真实温度对材料发射率 ε_2 选取的影响

Fig.3 Effect of target real temperature on material emissivity ε_2 selection

3.2 当 $\varepsilon_1 < \varepsilon_2 < \varepsilon_T$ 时

由公式(8)可以得到:

$$\begin{aligned} -10 &\leq (\varepsilon_1 - \varepsilon_T)T_T \leq -4 \\ -10 &\leq (\varepsilon_2 - \varepsilon_T)T_T \leq -4 \\ -6 &\leq (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)T_T \leq -4 \end{aligned} \quad (11)$$

利用公式(11)可以得到目标真实温度对材料发射率 ε_1 和 ε_2 选取的影响分别如图 4 和图 5 所示。

通过图 4 和图 5 不难发现, 对于一定主色材料发射率, 配色材料发射率选取数值随着目标表面真实温度的升高而降低; 进一步对比发现, 配色材料发射率 ε_1 和 ε_2 的可选取范围在同一目标表面真实温度情况下是一致的; 并且, 该范围随着目标表面真实温度的增加而减小。

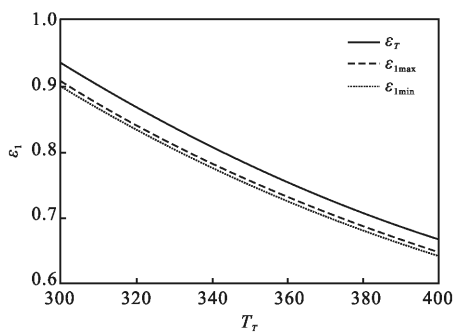


图 4 目标真实温度对材料发射率 ε_1 选取的影响

Fig.4 Effect of target real temperature on material emissivity ε_1 selection

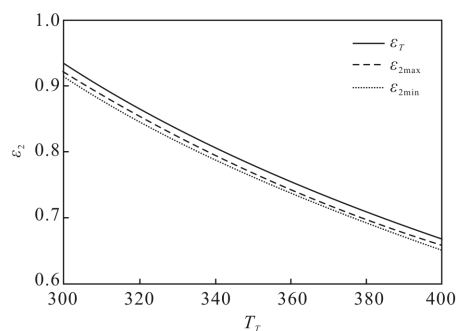


图 5 目标真实温度对材料发射率 ε_2 选取的影响

Fig.5 Effect of target real temperature on material emissivity ε_2 selecting

3.3 当 $\varepsilon_1 > \varepsilon_T > \varepsilon_2$ 时

由公式(8)可以得到:

$$\begin{cases} 4 \leq (\varepsilon_1 - \varepsilon_T)T_T \leq 10 \\ -10 \leq (\varepsilon_2 - \varepsilon_T)T_T \leq -4 \\ 8 \leq (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)T_T \leq 10 \end{cases} \quad (12)$$

利用公式(12)可以得到目标真实温度对材料发射率 ε_1 和 ε_2 选取的影响分别如图 6 和图 7 所示。

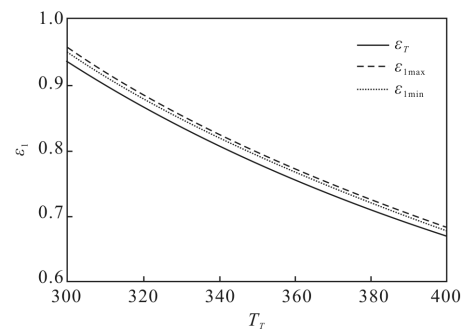


图 6 目标真实温度对材料发射率 ε_1 选取的影响

Fig.6 Effect of target real temperature on material emissivity ε_1 selection

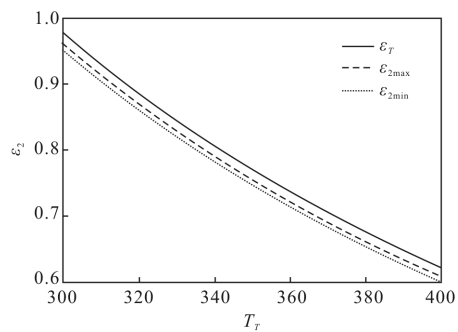


图 7 目标真实温度对材料发射率 ε_2 选取的影响

Fig.7 Effect of target real temperature on material emissivity ε_2 selection

通过图6和图7不难发现,对于一定主色材料发射率,配色材料发射率的选取数值随着目标表面真实温度升高而降低;进一步对比发现,配色材料发射率 ε_1 和 ε_2 的可选取范围在同一目标表面真实温度情况下是一致的;并且,该变化范围随着目标表面真实温度的增加而减小。

4 结论

文中通过数值计算的方法得到了在典型环境情况下,毫米波隐身涂层发射率随着目标表面真实温度之间的关系,并计算得到三色毫米波隐身迷彩斑块发射率取值范围,得到以下结论:

(1) 对于单一毫米波隐身涂料,其发射率应尽可能与所处环境发射率相近;此外,其数值在300~400 K范围内应随着目标表面真实温度的增加而降低。

(2) 对于由三种不同发射率材料组成的毫米波隐身迷彩涂层,主色材料发射率应尽可能与环境发射率相近,其它两配色材料发射率取值随300~400 K范围内目标表面真实温度的变化单调递减;且它们的取值范围相同,并随着目标表面真实温度的升高而减少。文中分了三种情况分别讨论,究竟哪种情况下对目标表面分割效果较好,还需要进一步研究。除此之外,文中主色发射率在计算的时候采用的是300 K时地面发射率的取值,结论(1)中不同目标表面真实温度对主色材料发射率取值的影响可依据本文提供的方法针对具体应用进行计算。由于实际材料的发射率可能并不能完全按照文中计算的曲线随温度变化,因此,在实际应用中,只能做到尽量选取材料发射率随温度变化趋势与文中曲线近似。

文中采用数值方法对毫米波迷彩隐身涂层发射率分布进行了初步研究,上述计算分析过程和数值模型可为毫米波迷彩隐身涂层发射率分布设计提供理论依据,对于涂层的制备以及实验研究具有指导意义。

参考文献:

- [1] Ding Yong, Xiao Zelong, Xu Jianzhong. Design of millimeter wave radiometer hardware-in-the-loop simulation system [J]. *Acta Armamentar II*, 2015, 36(10): 1867-1874. (in Chinese)
- [2] Feng Jianli, Zhang Xiaomi. Study on statistical properties of passive millimeter wave detection background and armored target [J]. *Computer Measurement & Control*, 2015, 23(4): 1235-1237. (in Chinese)
- [3] Han Yusheng, Yao Ling, Wang Shuo. Jamming and counter technology of millimeter guidance weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S): 444-448. (in Chinese)
- [4] Zhao Hua, Yao Hongfei, Ding Peng. A full W-band low noise amplifier module for millimeter-wave applications [J]. *Journal of Semiconductors*, 2015, 36(9): 1-6.
- [5] Yuan Linguang, Xue Zhanli, Li Hongguang, et al. Measurement of normal emissivity of materials at low temperature [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(1): 59-64. (in Chinese)
- [6] Yuan Linguang, Xue Zhanli, Li Hongguang, et al. Measurement of normal emissivity of materials at low temperature [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(1): 59-64. (in Chinese)
- [7] Fang Qianqian, Fang Wei, Wang Kai. Calculation of effective emissivity of blackbody cavities by Monte-Carlo method [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(2): 167-173. (in Chinese)
- [8] Li Bo. Application and development trend of infrared stealth technology [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 818-823. (in Chinese)
- [9] Feng Jianli, Zhang Xiaomin. Research on armored target radiation characteristics with passive millimeter wave detection based on multiple reflection [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2015, 33(1): 135-140. (in Chinese)
- [10] Shi Xiang, Lou Guowei, Li Xingguo. Analysis of ground target stealth based on passive millimeter-wave detection [J]. *Journal of Electronics(China)*, 2008, 25(4): 477-481.
- [11] Nie Jianying, Li Xingguo, Lou Guowei. Analysis and calculation of coating stealth targets with passive millimeter wave detection system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(5): 1-7. (in Chinese)
- [12] He Zijian, Shi Jiaming, Wang Jiachun. Seasonal requirement of the infrared Camouflage Paint's emissivity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(3): 1-6. (in Chinese)
- [13] Liu Jiangwei, Shi Jiaming, Chen Zongsheng. Numerical analysis of requirement of emissivity for infrared pattern painting camouflage [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 442-445. (in Chinese)