

# 采用瞬态球状热斗篷方法的浅层地下目标红外隐身技术\*

夏 舸, 杨 立, 寇 蔚, 杜永成

(海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要:**由于浅层地下目标与背景土壤的热物性不同,影响了整个区域表面的温度场分布,容易被敌方探测系统发现并击毁。针对这一问题,考虑太阳辐射、天空辐射以及风速的影响,建立了埋藏地下目标的区域温度分布传热模型,揭示了不同时段埋藏地下目标对区域表面温度场的影响。在变换热力学的基础上,通过坐标变换的方法,推导出球状瞬态热斗篷的导热系数的通解表达式。根据等效介质理论,对设计的热物性参数进行均质化,并通过数值实验方法验证了基于热斗篷地下目标红外隐身技术的可行性。

**关键词:**浅层地下目标;红外探测;热斗篷;温度场

**中图分类号:**TK124 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2018)01-126-06

## Infrared stealth for subsurface target using transient spherical thermal cloak method

XIA Ge, YANG Li, KOU Wei, DU Yongcheng

(College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Because of the difference of thermal physical properties between subsurface target and the soil, the temperature field distribution on the surface of the whole soil area is under its influence and the target is easily detected and destroyed by enemy. To solve this problem, taking into account the influence of solar radiation, sky radiation and wind speed, the heat transfer model of temperature distribution of the region containing buried target was established, which revealed the impact of buried target on the regional temperature field during different time. Based on the transformation thermodynamics, the thermal conductivity general expressions of spherical transient thermal cloak was derived by the means of coordinate transformation. According to the equivalent medium theory, the designed thermal physical parameters were homogenized and the feasible of target infrared stealth technology was verified based on the thermal cloak by numerical method.

**Key words:** subsurface target; infrared detection; thermal cloak; temperature field

随着地下目标红外探测技术的发展与成熟,浅层地下目标受到的红外威胁日益严重<sup>[1]</sup>,世界各国都积极研究各种新型红外隐身技术对目标进行伪装<sup>[2]</sup>。目前,热斗篷作为一种热超构材料,通过设计材料热物性参数可以使得热流平滑地绕过保护区域,并且不影响斗篷外部温度场,从而达到热隐身的效果<sup>[3]</sup>。

2008年,Fan等<sup>[4]</sup>发现热传导方程在变换的坐标系下具有形式不变性,并设计了球形和扁球形的稳态热斗篷。热流进入这种热斗篷后会绕过内部目标区域,最终返回到原来的路径传递出去。2012年,Narayana等<sup>[5]</sup>根据多层复合材料的构建方法,设计出一类人工超材料来控制热流的传递方向,并通过实验验证其正确性。在此基础上,Schittny等<sup>[6]</sup>利用铜片和聚二甲基硅氧烷(又称

有机硅)两种材料交替排列构建10个等厚度的环,从而实现热斗篷热物性参数均质化。2015年,Hu等<sup>[7]</sup>通过类比光学折射定律,设计并制造出地毯热斗篷。相比于变换热力学设计出的热斗篷参数,地毯热斗篷更容易制造。后来,他们在考虑对流换热的影响下,寻找合适的二维热斗篷实验条件,并通过数值实验进行验证<sup>[8]</sup>。最近,各种不同的新功能的热超构材料被提出和设计验证,如热集中器<sup>[9-14]</sup>、热旋转器<sup>[15-16]</sup>、热透镜<sup>[17]</sup>等。

### 1 地下目标的表面土壤温度场模型

红外成像探测技术通过提取红外图像上目标区域与背景区域表面不同的灰度值(即温度)来对浅层地下目标进行探测与识别<sup>[18]</sup>。

由于地下目标所处的环境复杂,做出假设:①

\* 收稿日期:2016-11-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11504426);国家部委基金资助项目(1010502020202)

作者简介:夏舸(1989—),男,江苏东台人,博士研究生,E-mail:xiage123123@163.com;

杨立(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:lyang39@hotmail.com

探测区域地表平整(无粗糙度),并且具有各项同性的热物性参数;②在探测时段内,忽略土壤的湿度变化、土壤表面风速变化以及土壤内部水分蒸发与凝结的影响;③目标全部埋入土壤里且不含内热源。

选取体积为  $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$  的土壤区域作为探测对象,如图1所示。整个正方体区域记为  $\Omega$ ,埋藏目标区域记为  $\Omega_1$ (只假设埋藏一个目标,但是实际对于埋藏多个目标),则背景土壤区域记为  $\Omega \setminus \Omega_1$ 。以目标的中心为原点,建立三维笛卡尔直角坐标系,其中点坐标由  $\mathbf{u} = (x, y, z)$  表示。本文假设整体区域  $\Omega = \{x: l_{x1} \leq x \leq l_{x2}, y: l_{y1} \leq y \leq l_{y2}, z: l_{z1} \leq z \leq l_{z2}\}$ 。土壤与空气交界面(外表面)记为  $A, A = \{z: z = l_{z2} \cap \mathbf{u} \in \Omega\}$ ,这是区域内唯一能进行红外测量的部分。底部表面记为  $B, B = \{z: z = l_{z1} \cap \mathbf{u} \in \Omega\}$ 。假设观测时间区间为  $(0, \tau_e)$ ,区域内  $\Omega$  任意一点的温度记为  $T(\mathbf{u}, t), (\mathbf{u}, t) \in \chi_e = \Omega \times (0, \tau_e)$ 。

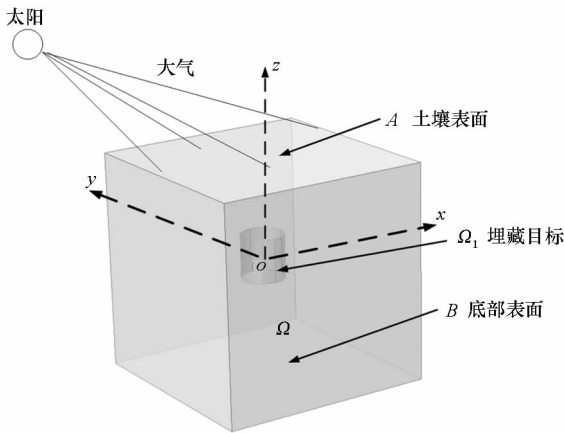


图1 埋藏地下目标的土壤传热模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of heat transfer model of soil for subsurface target

区域无内热源的土壤或目标的导热方程<sup>[19]</sup>为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (1)$$

式中: $\rho$ 和 $c$ 分别表示物体的密度和比热容; $T$ 和 $\lambda$ 分别表示物体的温度和导热系数; $\tau$ 表示时间; $\nabla$ 表示梯度算符。

在初始时刻 $t=0$ ,假设土壤温度分布已知,即

$$T(\mathbf{u}, 0) = g(\mathbf{u}), \mathbf{u} \in \Omega \quad (2)$$

初始土壤温度分布 $g(\mathbf{u})$ 并不确定,在实际计算过程中,有两种确定方法。第一种方法是假设土壤的温度模型为在稳定的天气条件下的热模型。因此,土壤的温度可以看成以日为周期的稳定变化。在这种假设下,热模型的稳定周期解可以通过迭代过程来计算得出。这种方法的优点是

不管初始条件的近似如何,都可以得到稳定周期解。但是这种方法并不能准确地描述土壤的初始温度分布,应用范围不够广泛。第二种方法是通过初始时刻测量出土壤表面温度和某些深度上的温度,利用插值处理的方法近似处理得到。这种方法比较灵活,可以大大缩短计算时间。由于缺乏实验数据,选取第一种方法近似。

通过实验观察,当深度达到50 cm时,在一天内不同时刻土壤的温度已经几乎保持不变<sup>[20-22]</sup>。也就是说,对于浅层掩埋对象的探测区域来说,在区域底部温度一直保持不变,即

$$T(\mathbf{u}, t) = T_B = T_\infty = \text{const} \quad (3)$$

土壤表面在不考虑水分蒸发潜热的情况下,边界条件可表示为:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z}(\mathbf{u}, t) = q_{\text{net}}(\mathbf{u}, t), (\mathbf{u}, t) \in A \times (0, \tau_e) \quad (4)$$

由于土壤表层主要受到太阳的短波辐射、大气的长波辐射以及空气与土壤之间的对流换热的影响,表层热量平衡方程可简化为:

$$q_{\text{net}}(\mathbf{u}, t) = q_{\text{sun}}(t) + q_{\text{sky}}(t) + q_{\text{conv}}(\mathbf{u}, t) - q_{\text{emis}}(\mathbf{u}, t), (\mathbf{u}, t) \in A \times (0, \tau_e) \quad (5)$$

式中: $q_{\text{sun}}(t)$ 表示 $t$ 时刻土壤吸收太阳短波辐射的能量,在天气条件与地理位置固定的情况下,仅与时间有关,可以由Modtran计算得出; $q_{\text{sky}}(t)$ 表示 $t$ 时刻土壤吸收大气长波辐射的能量; $q_{\text{conv}}(\mathbf{u}, t)$ 表示 $t$ 时刻土壤不同位置与大气之间的对流换热量; $q_{\text{emis}}(\mathbf{u}, t)$ 表示 $t$ 时刻土壤不同位置的自身热辐射,根据斯蒂芬玻尔兹曼定律<sup>[23]</sup>:

$$q_{\text{emis}}(\mathbf{u}, t) = \varepsilon_{\text{soil}} \sigma T^4(\mathbf{u}, t), (\mathbf{u}, t) \in A \times (0, \tau_e) \quad (6)$$

气温具有逐日、逐年周期性变化的特性,其变化规律与简谐波近似。因此,将 $t$ 时刻的气温 $T_{\text{air}}(t)$ 的表达式展开为两阶傅里叶级数的形式<sup>[24]</sup>。

$$T_{\text{air}}(t) = T_{\text{av}} + a_1 \cdot \Delta T \cos \omega(t - b_1) + a_2 \cdot \Delta T \cos 2\omega(t - b_2) \quad (7)$$

式中: $T_{\text{av}}$ 为日平均气温, $\Delta T$ 为一天之中最高气温与最低气温的温差; $a_1, a_2, b_1, b_2$ 均为常数,且与当地的经纬度和天气情况有关; $\omega = 2\pi/T$ 为角频率,周期 $T=24\text{ h}$ (一昼夜)。

大气有效辐射温度<sup>[25]</sup>为:

$$T_{\text{sky}}(t) = 0.9 \times T_{\text{air}}(t) \quad (8)$$

则土壤吸收的大气长波辐射能量为:

$$q_{\text{sky}}(t) = \varepsilon_{\text{sky}} \sigma T_{\text{sky}}^4(t) \quad (9)$$

大气与土壤表面之间的对流换热量<sup>[26]</sup>近

似为:

$$q_{\text{conv}}(\mathbf{u}, t) = \varepsilon_{\text{conv}} [T_{\text{air}}(t) - T^4(\mathbf{u}, t)],$$

$$(\mathbf{u}, t) \in A \times (0, \tau_e) \quad (10)$$

由于土壤是均匀的,所选取的探测区域比较大,目标对其余四个垂直边界的影响几乎可以忽略不计。因此垂直边界可以看作绝热,表示为:

$$\frac{\partial T(\mathbf{u}, t)}{\partial n} = 0 \quad (11)$$

式中,  $\mathbf{n}$  为面向土壤外表面的法向量。

假设目标是一个半径为 3 cm, 高为 8 cm 的圆柱体铜块, 埋藏深度为 5 cm。选取铜块的具体热物性参数为: 密度  $\rho = 8960 \text{ kg/m}^3$ , 导热系数  $\lambda = 400 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ , 常压热容  $c_p = 385 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。土壤的具体热物性参数为: 密度  $\rho = 2050 \text{ kg/m}^3$ , 导热系数  $\lambda = 0.52 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ , 常压热容  $c_p = 1840 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。选取武汉地区的时间为 2016 年 6 月 5 日, 位置为东经  $114^\circ 18'$ , 北纬  $30^\circ 31'$ 。天气晴朗无云, 大气温度在  $22 \sim 32 \text{ }^\circ\text{C}$ , 风速为  $2 \text{ m/s}$ 。

采用有限元法对埋藏地下目标进行数值模拟。选取 12 点时的土壤温度分布做网格无关性检验和时间独立性验证。当计算域网格数为 106 662 和 410 496 时, 从图 2 可以看出, 两项计算的土壤表面温度基本一致, 最大温度偏差不到 0.02%。因此选取第一套网格即可满足精度要求。选取了步长为 10 min, 20 min, 30 min 以及 60 min 进行时间步长验证, 发现温度基本没有偏差。因此, 综合考虑计算量和精度, 选取 20 min 作为时间步长。

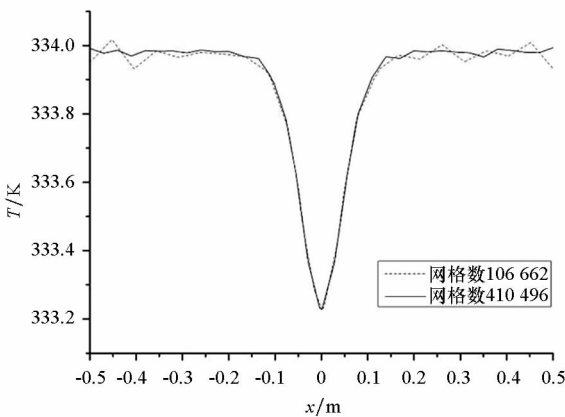


图 2 网格无关性验证结果

Fig. 2 Results of grid independent verification

由于白天太阳辐射的影响, 目标区域上方的土壤表面与背景土壤表面之间的温差比较明显, 因此选取 11 时, 13 时, 15 时和 17 时这四个时相作为探测时间。图 3 为这四个时间段未加热斗篷的土壤

表面  $y=0$  处不同位置的温度对比图。由图 3 可知, 在四个时相中, 目标区域上方的土壤表面温度明显比背景土壤表面温度要低, 差异基本在  $0.6 \sim 1.3 \text{ K}$  之间, 特别是在 17 时, 中心温度与背景温度差异达到  $1.3 \text{ K}$ 。这是因为目标铜块的导热系数远比背景土壤的高, 热量更容易传到土壤底部。

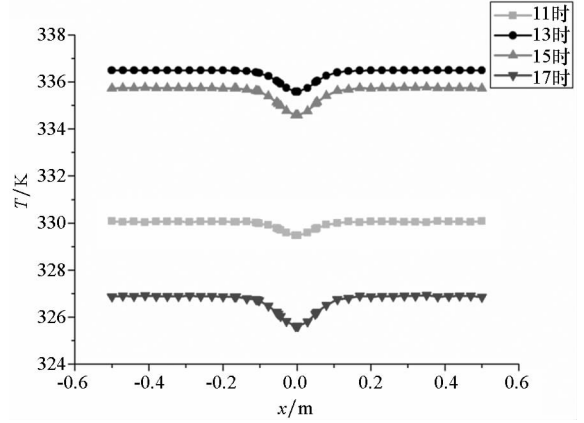


图 3 多个时段土壤外表面  $y=0$  处不同位置的温度分布(无热斗篷)

Fig. 3 Temperature distribution at different locations of soil surface  $y=0$  in different time intervals (no thermal cloak)

## 2 包围目标热斗篷模型设计

对于一般无内热源物体, 热传导方程用式(1)来描述, 式(1)具有形式不变性。假设变换空间为  $(x', y', z')$ , 导热方程在变换空间可表示为:

$$\rho' c' \frac{\partial T'}{\partial \tau} = \nabla' \cdot (\lambda' \nabla' T') \quad (12)$$

式中:  $\rho'$  和  $c'$  分别表示物体在变换空间中的密度和比热容;  $T'$  和  $\lambda'$  分别表示物体在变换空间中的温度和导热系数;  $\nabla'$  表示变换空间中的梯度算符。

变换空间与原空间介质的导热系数的关系<sup>[24]</sup>为:

$$\begin{cases} \lambda' = \frac{\mathbf{A} \lambda \mathbf{A}^T}{\det(\mathbf{A})} \\ \rho' c' = \frac{\rho c}{\det(\mathbf{A})} \end{cases} \quad (13)$$

其中:  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \partial x'/\partial x & \partial x'/\partial y & \partial x'/\partial z \\ \partial y'/\partial x & \partial y'/\partial y & \partial y'/\partial z \\ \partial z'/\partial x & \partial z'/\partial y & \partial z'/\partial z \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{A}$  为雅克比

矩阵;  $\mathbf{A}^T$  是  $\mathbf{A}$  的转置矩阵;  $\det(\mathbf{A})$  为矩阵的行列式的值。

对于球状热斗篷, 假设内外边界球面分别为  $r = R_1$  和  $r = R_2$ , 为了实现和保护区域的完美隐

形,把  $0 < r < R_2$  区域压缩到  $R_1 < r < R_2$  区域,得到保护区域  $r < R_1$ 。区域  $r > R_2$  保持不变。因此变换方程<sup>[27]</sup>为:

$$\begin{cases} r' = \frac{R_2 - R_1}{R_2} r + R_1 \\ \theta' = \theta \\ \varphi' = \varphi \end{cases} \quad (14)$$

把式(14)代入式(13),可以得到  $R_1 < r < R_2$  区域的参数<sup>[28]</sup>。

$$\begin{cases} \lambda'_{rr} = \frac{R_2}{R_2 - R_1} \left( \frac{r' - R_1}{r'} \right)^2 \lambda_0 \\ \lambda'_{\varphi\varphi} = \lambda'_{\theta\theta} = \frac{R_2}{R_2 - R_1} \lambda_0 \\ \lambda'_{r\varphi} = \lambda'_{r\theta} = \lambda'_{\varphi r} = \lambda'_{\theta r} = \lambda'_{\varphi\theta} = \lambda'_{\theta\varphi} = 0 \\ \rho'c' = \left( \frac{R_2}{R_2 - R_1} \right)^3 \left( \frac{r' - R_1}{r'} \right)^2 \rho_0 c_0 \end{cases} \quad (15)$$

计算出的参数虽然不存在奇异性,但是仍旧存在高度非均匀各向异性,在自然界很难找到匹配的材料。因此,通过大量导热系数是常数的层状材料来近似<sup>[29-30]</sup>。首先,把  $R_1 < r < R_2$  区域等分成  $M$  层均匀的同轴环,每一层环的材料参数用环的中心参数来近似;然后,把每一层环均匀质化成  $N$  个具有各项同性的子层,用这  $N$  个各项同性的子层来近似每一层环  $i, i = 1, 2, \dots, M$ 。为了简化计算,取  $N = 2$ ,即通过两种各项同性的物质 A 和 B 交替排列来做近似,如图4所示。

假设这两种物质导热系数分别为  $\lambda_A$  和  $\lambda_B$ ,密度分别为  $\rho_A$  和  $\rho_B$ ,比热容分别为  $c_A$  和  $c_B$ ,厚度分别为  $d_A$  和  $d_B$ ,厚度比  $\eta = d_B/d_A$ ,则根据等效介质理论公式可以推导<sup>[31-33]</sup>出:

$$\begin{cases} \lambda_A = \frac{-[(1-\eta^2)\lambda'_{rr} - (1+\eta)^2\lambda'_{\theta\theta}]}{2\eta(1+\eta)} + \frac{\sqrt{[(1-\eta^2)\lambda'_{rr} - (1+\eta)^2\lambda'_{\theta\theta}]^2 - 4\eta^2(1+\eta)^2\lambda'_{rr}\lambda'_{\theta\theta}}}{2\eta(1+\eta)} \\ \lambda_B = \frac{-[(1-\eta^2)\lambda'_{rr} - (1+\eta)^2\lambda'_{\theta\theta}]}{2\eta(1+\eta)} - \frac{\sqrt{[(1-\eta^2)\lambda'_{rr} - (1+\eta)^2\lambda'_{\theta\theta}]^2 - 4\eta^2(1+\eta)^2\lambda'_{rr}\lambda'_{\theta\theta}}}{2\eta(1+\eta)} \end{cases} \quad (16)$$

$$\langle \rho'c' \rangle = \frac{\rho_A c_A + \eta \rho_B c_B}{1 + \eta} \quad (17)$$

为了计算方便,假设 A 和 B 两种材料厚度相等,即  $\eta = 1$ ,则式(16)可以简化为:

$$\begin{cases} \lambda_A = \lambda'_{\theta\theta} + \sqrt{\lambda'_{\theta\theta}(\lambda'_{\theta\theta} - \lambda'_{rr})} \\ \lambda_B = \lambda'_{\theta\theta} - \sqrt{\lambda'_{\theta\theta}(\lambda'_{\theta\theta} - \lambda'_{rr})} \end{cases} \quad (18)$$

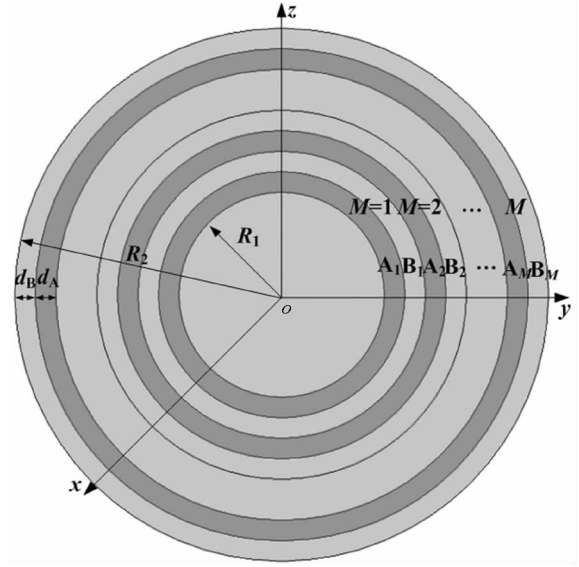


图4 2M层各项同性球状热斗篷示意图

Fig. 4 Schematic of 2M-layer spherical thermal cloak of homogeneous and isotropic thermal conductivity

这样就可以通过两种各项同性物质叠加等效成每一层环,进而构造出球状分层热斗篷。只要把目标完全置于球状保护区域  $r < R_1$  中,则热流将会绕过保护目标流出,并且不会对斗篷外部的温度场产生任何影响,从而达到隐身的效果。

### 3 仿真实验与结果讨论

#### 3.1 仿真条件

以目标的中心为球心,保护区域半径  $R_1 = 6$  cm,热斗篷区域半径  $R_2 = 8$  cm。在热斗篷区域,材料的热导率  $\lambda, c$  和  $\rho$  可以由式(15)~(18)计算得出。具体参数见表1。

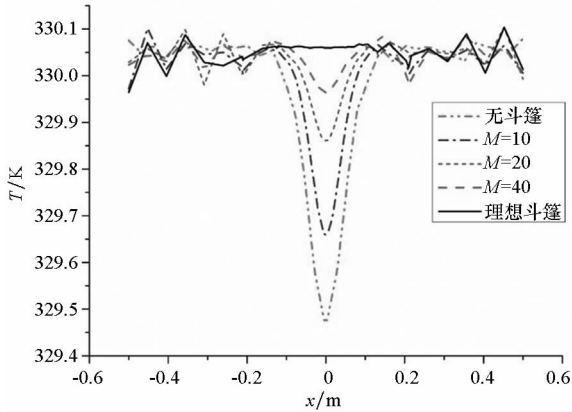
表1 热斗篷材料参数范围

Tab. 1 Range of parameters for thermal cloak

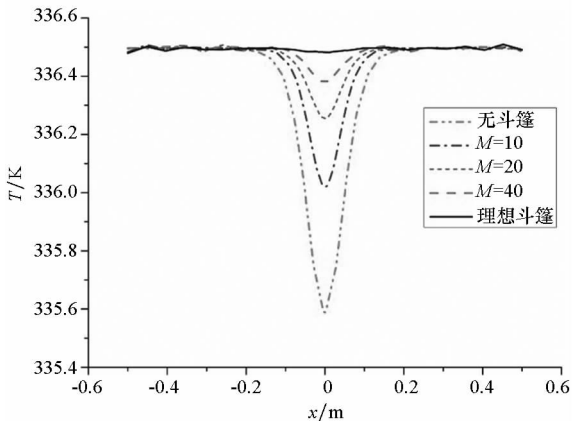
斗篷层数	材料A的导热系数的范围/ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	材料B的导热系数的范围/ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	A(或B)的密度与比热的积的范围/ ( $kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$ )
10	4.10 ~ 4.16	$2.80 \times 10^{-4} \sim 0.06$	$64.9 \sim 1.40 \times 10^4$
20	4.10 ~ 4.16	$7.10 \times 10^{-5} \sim 0.06$	$16.49 \sim 1.45 \times 10^4$
40	4.10 ~ 4.16	$1.79 \times 10^{-5} \sim 0.06$	$4.16 \sim 1.48 \times 10^4$
完美斗篷	4	$0 \sim 0.13$	$1.51 \times 10^4$

### 3.2 仿真结果分析

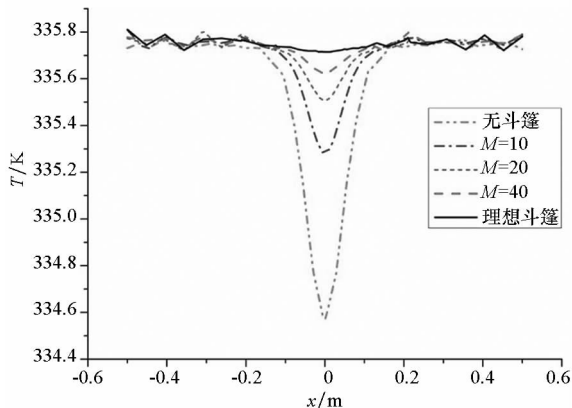
根据目标的大小结构,分别选择  $M = 10, M = 20$  和  $M = 40$  的同心圆环实现球状热斗篷的均质化。无热斗篷、加入  $M = 10, 20, 40$  热斗篷以及理想热斗篷后多个时段土壤外表面  $y = 0$  处不同位置的温度分布如图 5 所示。由图 5 可以看出,目标加上理想热斗篷后,中心区域与背景区域虽然存在差异,但并不明显,在这四个时段目标区域上方的土壤表面与背景土壤表面之间温度最大差异



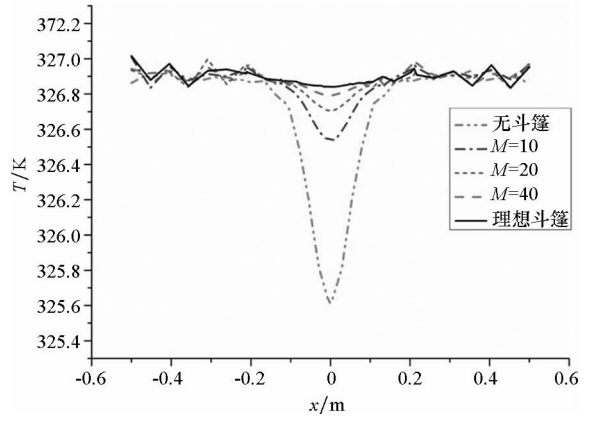
(a) 第一时相 (11 时)  
(a) The first phase (11:00)



(b) 第二时相 (13 时)  
(b) The second phase (13:00)



(c) 第三时相 (15 时)  
(c) The third phase (15:00)



(d) 第四时相 (17 时)  
(d) The fourth phase (17:00)

图 5 无热斗篷、加入  $M = 10, 20, 40$  热斗篷以及理想热斗篷后多个时段土壤外表面  $y = 0$  处不同位置的温度分布

Fig. 5 Temperature distribution at different locations of soil surface  $y = 0$  in different time intervals with no thermal cloak,  $M = 10, 20, 40$  and ideal thermal cloak

不超过 0.1 K。加入不同  $M$  层的热斗篷,土壤外表面  $x$  轴上各个点的温度分布趋势与理想热斗篷相似。随着热斗篷层数的增加,热斗篷的效果越来越接近理想热斗篷。以第四时相的土壤表面温度分布为例,目标在无斗篷、加入 10 层、20 层、40 层以及理想斗篷后,目标上方土壤表面与背景土壤温度之间温度最大差异分别为 1.30 K、0.47 K、0.29 K、0.15 K 和 0.1 K。因此,此种同质化热斗篷设计能够实现地下目标的红外隐身。

### 4 结论

将热斗篷应用到地下目标上,能够大大降低目标上方区域表面温度与背景表面温度。加入理想斗篷后,两者最大温差不到 0.1 K,具有良好的隐身效果。而随着  $M$  的不断增大,层状热斗篷的隐身效果越来越接近理想热斗篷。该技术作为热斗篷的一个工程实际应用,对地下目标的红外隐身有重要的军事应用价值。

### 参考文献 (References)

[1] Li M, Sun W G, Chen H X, et al. Counter-countermeasure identification based on multi-element dual band infrared detector [J]. Applied Optics, 2013, 52(21): 5201-5207.  
 [2] 郭冰涛, 王晓蕊, 王小兵, 等. 诱饵弹作用后导引头成像特征建模及跟踪性能分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2027-2033.  
 GUO Bingtao, WANG Xiaorui, WANG Xiaobing, et al. Analysis of imaging features and tracking performance of seeker after decoys jamming [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(7): 2027-2033. (in Chinese)

- [3] 沈翔瀛, 黄吉平. 变换热学: 热超构材料及其应用[J]. 物理学报, 2016, 65(17): 178103.  
SHEN Xiangying, HUANG Jiping. Transformation thermotics: thermal metamaterials and their applications [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(17): 178103. (in Chinese)
- [4] Fan C Z, Gao Y, Huang J P. Shaped graded materials with an apparent negative thermal conductivity [J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(25): 1780.
- [5] Narayana S, Sato Y. Heat flux manipulation with engineered thermal materials [J]. Physical Review Letters, 2012, 108(21): 214303.
- [6] Schittny R, Kadic M, Guenneau S, et al. Experiments on transformation thermodynamics: molding the flow of heat [J]. Physical Review Letters, 2013, 110(19): 195901.
- [7] Hu R, Xie B, Hu J Y, et al. Carpet thermal cloak realization based on the refraction law of heat flux [J]. Europhysics Letters, 2015, 111(5): 54003.
- [8] Hu R, Zhou S L, Yu X J, et al. Exploring the proper experimental conditions in 2D thermal cloaking demonstration[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2016, 49(41): 415302.
- [9] Shen X Y, Li Y, Jiang C R, et al. Thermal cloak-concentrator[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(3): 031907.
- [10] Dede E M, Nomura T, Schmalenberg P, et al. Heat flux cloaking, focusing, and reversal in ultra-thin composites considering conduction-convection effects [J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(6): 063501.
- [11] Hu R, Wei X L, Hu J Y, et al. Local heating realization by reverse thermal cloak [J]. Scientific Reports, 2014, 4(1): 3600.
- [12] 毛福春, 李廷华, 黄铭, 等. 圆柱形热集中器理论、仿真和实现[J]. 物理学报, 2014, 63(17): 105-112.  
MAO Fuchun, LI Tinghua, HUANG Ming, et al. Cylindrical thermal concentrator: theory, simulation, and implement [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(17): 105-112. (in Chinese)
- [13] 李廷华, 毛福春, 黄铭, 等. 基于变换热力学的任意形状热集中器设计与研究[J]. 物理学报, 2014, 63(5): 054401-1-054401-8.  
LI Tinghua, MAO Fuchun, HUANG Ming, et al. Research and design of thermal concentrator with arbitrary shape based on transformation thermodynamics [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(5): 054401-1-054401-8. (in Chinese)
- [14] Guenneau S, Amra S, Veynante D. Transformation thermodynamics: cloaking and concentrating heat flux [J]. Optics Express, 2012, 20(7): 8207-8218.
- [15] Kadic M, Bückmann T, Schittny R, et al. Metamaterials beyond electromagnetism [J]. Reports on Progress in Physics Physical Society, 2013, 76(12): 1672-1681.
- [16] Guenneau S, Amra C. Anisotropic conductivity rotates heat fluxes in transient regimes [J]. Optics Express, 2013, 21(5): 6578-6583.
- [17] He X, Wu L. Thermal transparency with the concept of neutral inclusion [J]. Physical Review E, 2013, 88(3): 033201.
- [18] 谷延锋, 丰炳波, 郑贺, 等. 基于多时相多光谱红外图像浅层地下目标探测[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(3): 14-19.  
GU Yanfeng, FENG Bingbo, ZHENG He, et al. Detection of subsurface targets based on multitemporal and multispectral infrared image [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(3): 14-19. (in Chinese)
- [19] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2010.  
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2010. (in Chinese)
- [20] Thành N T, Sahli H, Hao D N. Finite-difference methods and validity of a thermal model for landmine detection with soil property estimation [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2007, 45(3): 656-674.
- [21] Thành N T, Sahli H, Hao D N. Infrared thermography for buried landmine detection: inverse problem setting [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2008, 46(12): 3987-4004.
- [22] Thành N T, Sahli H, Hao D N. Detection and characterization of buried landmines using infrared thermography [J]. Inverse Problems in Science and Engineering, 2011, 19(3): 281-307.
- [23] Thành N T. Infrared thermography for the detection and characterization of buried objects [D]. Belgium: Vrije Universiteit Brussel, 2007.
- [24] 王炳忠. 太阳辐射能的测量与标准[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 34.  
WANG Bingzhong. Solar radiation measurements and standards [M]. Beijing: Science Press, 1993: 34. (in Chinese)
- [25] 杨林. 红外探雷理论模型的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.  
YANG Lin. Theory modelling of landmine detection in infrared technology [D]. Xi'an: Xi'an Electronic and Science University, 2008. (in Chinese)
- [26] 吉旭东. 掩埋地雷的红外辐射特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.  
JI Xudong. Research on infrared radiation characteristics of the buried mine [D]. Xi'an: Xi'an Electronic and Science University, 2009. (in Chinese)
- [27] Yang T Z, Huang L J, Chen F, et al. Heat flux and temperature field cloaks for arbitrarily shaped objects [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(30): 305102.
- [28] Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Controlling electromagnetic fields [J]. Science, 2006, 312(5781): 1780-1782.
- [29] Han T C, Wu Z M. Three-dimensional thermal cloak with homogeneous and nonsingular conductive materials [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2013, 143: 131-141.
- [30] Qiu C W, Hu L, Zhang B, et al. Spherical cloaking using nonlinear transformations for improved segmentation into concentric isotropic coatings [J]. Optics Express, 2009, 17(16): 13467-13478.
- [31] Chen M J, Pei Y M, Fang D N. An improved method of designing isotropic multilayered spherical cloak for electromagnetic invisibility [J]. Chinese Physics Letters, 2010, 27(3): 132-135.
- [32] Ooi E H, Popov V. Transformation thermodynamics for heat flux management based on segmented thermal cloaks [J]. European Physical Journal Applied Physics, 2013, 63(1): 10903.
- [33] Yuan X B, Lin G C, Wang Y S. Design of layered structure for thermal cloak with complex shape [J]. Modern Physics Letters B, 2016, 30(20): 1650256.