

# 大表面复杂结构伪装遮障表面温度的简化分析方法

陈锦成, 韩玉阁

(南京理工大学 能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 伪装遮障大都有复杂的表面结构, 直接建模计算对计算能力要求极高。表面结构对周围流场产生扰动影响对流传热, 进而影响伪装表面温度。文中通过不断调整参数得到对表面有相似影响的多孔介质, 实现伪装遮障表面结构到多孔介质的简化。采用局部建模的方法, 分析三种典型伪装遮障表面结构对周围流场以及其温度场的影响, 进而将其简化为对应的多孔介质。结果表明: 将伪装遮障表面结构类比为多孔介质, 大大减少了计算量, 能够模拟大表面覆盖伪装遮障之后的表面温度, 评估其伪装效果。将该简化模型用于室外平房这一具体情境中, 分别模拟平房不加表面伪装和外加不同伪装遮障情况下, 其表面温度和表观温度在全天不同时段的变化。

**关键词:** 红外辐射; 孔介质; 伪装遮障; 伪装效果

**中图分类号:** E951 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0304002

## Simplified analysis method of the surface temperature of complex structure camouflage screen with large surface

Chen Jincheng, Han Yuge

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The surface structure of camouflage screen is mostly complex, and modeling calculation has high requirements for computing power. Surface structure disturbs the flow field around to influence the convection heat transfer and affects the surface temperature of the camouflage. In this paper, porous medium parameters of different values were attempted to ensure it had the same effect on the surface to get the simplification from the camouflage screen surface model to the porous medium model. Local modeling was established to analyze the influence of three typical camouflage screen surface structure on flow field around and its temperature field so that the corresponding porous medium was found. The results show that this simplified method can greatly reduce the computational cost. This method can simulate the surface temperature of camouflage screen with large surface to evaluate the camouflage effect. The simplified model is used for outdoor bungalow situation. The infrared characteristics of outdoor bungalows and the ambient are simulated under natural conditions and the situation added and without camouflage simplified model respectively to analyze camouflage effect in day and night.

**Key words:** infrared radiation; porous media; camouflage screen; camouflage effect

收稿日期: 2017-10-10; 修订日期: 2017-11-20

作者简介: 陈锦成(1993-), 男, 硕士生, 主要从事地面目标红外特性方面的研究。Email: 1203576487@qq.com

导师简介: 韩玉阁(1967-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事目标红外辐射特性及其抑制技术以及热光伏发电技术方面的研究。  
Email: yugehan1111@sina.com

## 0 引言

在当今信息化战争的背景下,热红外探测以及热红外伪装技术已经越发成熟<sup>[1-2]</sup>。对于伪装遮障的伪装效果分析,当前研究主要集中于表面温度和表观温度的分析与计算。王自荣<sup>[3]</sup>等人给出了根据目标本身辐射和天空辐射计算有效辐射出射度进而求目标辐射温度的方法,但未考虑地面辐射的影响。严晨<sup>[4]</sup>等人在研究卷帘式遮障对抗红外成像制导武器的过程中,根据目标形状将整体伪装表面切分为几个伪装单元,对应目标的不同部位,计算相关结果。曹义<sup>[5]</sup>等人建立了野外测试模型,模型假设伪装遮障面、水平面以及天空背景组成三面系统,运用三面系统<sup>[6]</sup>求解辐射热阻。

在当前的伪装遮障分析模型中,将伪装表面单纯视为一个表面辐射层。其对表面温度场的影响,主要体现在表面发射率等表面特性参数上<sup>[7]</sup>,分析的结果更是对伪装图层的伪装效果的分析。

实际应用中,伪装遮障的结构会使得目标表面流场发生改变。目标表面的空气流速和流向都会不同于不加伪装遮障的情况,这在一定程度上会使得对流换热系数发生较大的变化,进而影响被探测目标的实际温度,最终影响其红外辐射特性。如果仅仅考虑伪装表面带来的导热系数的变化以及发射率的变化,其实是只考虑了辐射和热传导两种传热方式的影响,而忽略了对流换热这一因素的影响。外流场流速越大,忽视伪装外表面起伏结构带来的误差越明显,因此考虑伪装遮障表面结构至关重要。

伪装遮障对其周围流场的影响主要体现在伪装外表面的几何形状上,由于计算条件的限制,难以把整个外表面的几何形状都直接表征出来模拟计算。文中将伪装表面几何外形对周围流场的影响类比为多孔介质对其周围流场的影响。类比过程中,先将伪装表面切分为无数个相同的伪装结构单元,分析计算其对周围流场的影响,再得到影响效果与其类似的多孔介质的参数,然后将该多孔介质模型运用于整个表面,采用 Fluent 计算,简化了整个伪装模型的计算,并且考虑了周围流场的影响,使得模型评估更为高效。

## 1 确立简化模型

### 1.1 简化原理

由于伪装表面几何结构的排列大都有一定的规律,因此文中将其视为由无数相同的结构单元拼接而成,分析该特征结构单元在强迫对流条件下对流场和表面温度的影响。以此确定某一特定参数的多孔介质,对周围流场和表面温度场产生与结构单元相似的影响。

Fluent 内置的多孔介质模型中,在动量上叠加了一个动量源项,描述多孔介质对流场的影响。该源项包含两个部分,粘性损失项和惯性损失项。其计算方程如下:

$$S_i = - \left( \sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} |v| |v_j| \right) \quad (1)$$

式中: $S_i$ 为*i*(*x,y,z*)动量源项; $|v|$ 为速度; $D$ 和 $C$ 为作用矩阵。式中多孔介质前后因其内部阻力产生的压降,通过该动量源项描述,且与速度平方成正比。

模拟多孔介质内的热传导时,需要指定多孔介质的固体架构材料和内部气体物质材料的物理属性以及多孔介质的孔隙率,通过两种物质的质量加权平均求出其导热系数。修正之后的能量公式如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\gamma \rho_f E_f + (1-\gamma) \rho_s E_s) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho_f E_f + P)) = S_f^h + \nabla \cdot [k_{eff} \nabla T - (\sum_i h_i J_i) + (\vec{i} \cdot \vec{v})] \quad (2)$$

式中: $E_f$ 为流体总能量; $E_s$ 为固体材料总能量; $\rho_f$ 为流体密度; $\rho_s$ 为固体材料密度; $\gamma$ 为孔隙率; $k_{eff}$ 为多孔介质等效传热系数; $S_f^h$ 为流体热源项。

其中,多孔介质等效传热系数计算公式为:

$$k_{eff} = \gamma k_f + (1-\gamma) k_s \quad (3)$$

确定与某一伪装表面影响相似的多孔介质,本质上就是确定该多孔介质的内部惯性阻力,黏性阻力,材料属性,流体属性以及孔隙率等9个相关参数。固体架构材料参数初始值取伪装表面固体材料参数,流体参数为空气参数。在多孔介质固体架构材料和流体已知的前提下,模型的简化只需要确定多孔介质的两类阻力和孔隙率即可,如果无法实现较好的类比,可以继续调整固体架构材料的导热系数。

简化模型需要与伪装实体模型有相似的流场和

温度场<sup>[8-9]</sup>。如图 1 所示,在简化模型中,多孔介质的厚度和伪装遮障的叶片高度相当,将多孔介质内部和附近的气体组成的流场模拟伪装遮障周围的流场。由于 Fluent 中多孔介质只能为气体,因此在多孔介质底部添加一个表面固体层结构,表征伪装遮障底部与被伪装物体表面接触的伪装层,因此多孔介质底部的平均温度,可以表征伪装遮障表面的平均温度。如果左右两个模型在相同入口速度条件下

出口平均速度相似,在相同外界条件下表面平均温度相似,则该多孔介质模型可以评估其伪装效果。基于该简化标准,通过计算不同方向的来流条件,不停尝试代入不同的多孔介质参数,反复计算得到出口速度和表面温度与伪装表面结构模型相似的结果,可以确立多孔介质简化模型。该过程中优先考虑控制减少表面温度的误差,再考虑减少出口速度的误差。

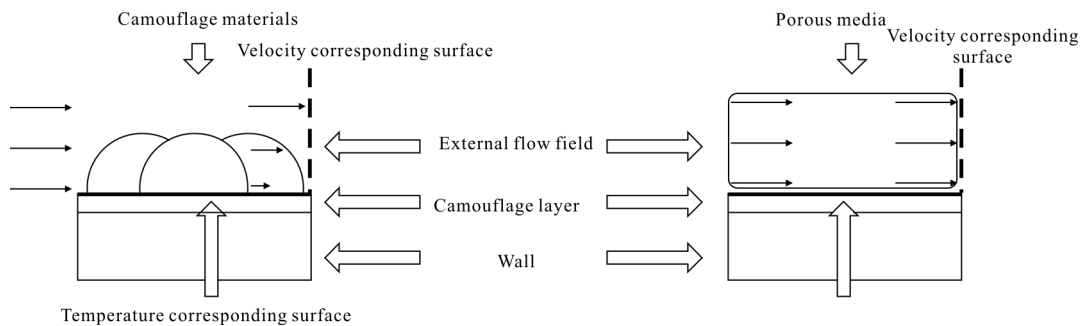


图 1 伪装实体模型类比多孔介质模型示意图

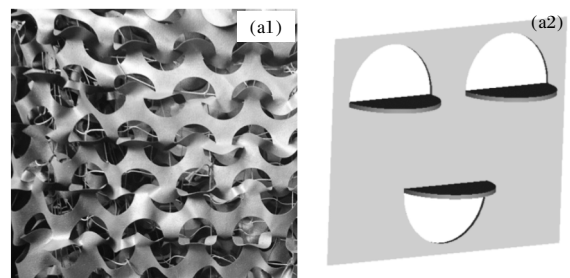
Fig.1 Schematic diagram of the porous media analogy model and camouflage model

1.2 确立多孔介质模型

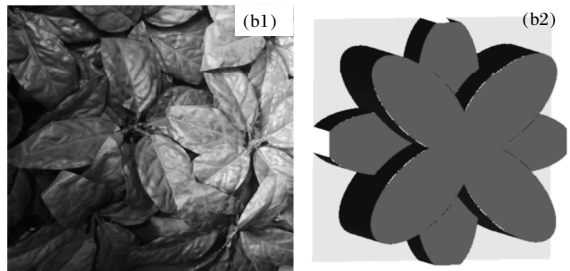
将伪装遮障表面划分为结构相同的最小单元,该单元可以视为伪装特性的最小承载单元。伪装遮障外表面呈规则凹凸状,其对流场的影响类似平板上带有规则凸台所产生的影响,而其对表面温度场的影响类似平板上带有规则肋板强化散热所产生的影响。实际伪装过程中,可以假设伪装遮障安放之后是类似静止的。因此,伪装遮障表面结构可以类比为不同厚度的平板上带有规则肋板和规则凹槽的固体元件。

文中主要分析 3 种伪装遮障的伪装效果,加以评估。基于不同伪装遮障的外形结构,文中分别建立如图 2 所示的最小单元。1 号伪装遮障表面呈规则凹凸状,其局部特性分析模型中,平板厚 0.002 m,其表面有规则挖出直径 0.05 m 的半圆形实体形成垂直肋片。2 号伪装遮障表面呈高低不平树叶状,其局部特性分析模型中,平板厚 0.002 m,其表面规则呈现高度分别为 0.03 m 和 0.06 m 的椭圆形凸台,并且不同凸台呈规则交叉重叠。3 号伪装遮障与 1 号结构相似,其局部特性分析模型中,平板厚 0.015 m,其表面有规则挖出直径 0.1 m 的半圆形实体形成垂直平板的肋片。其物性参数统一采用某一类聚合物的参数,传热系数为 0.09 W/(m·K),

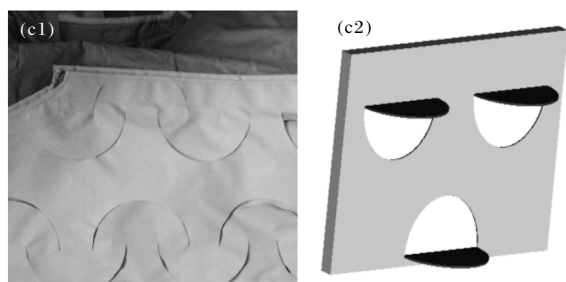
密度为 1 370 kg/m<sup>3</sup>,定压比热为 1 339 J/(kg·K)。



(a) 1 号伪装材料实体图片和局部特性分析模型最小单元  
(a) Entity picture and the local characteristic analysis model minimum unit of No.1 camouflage material



(b) 2 号伪装材料实体图片和局部特性分析模型最小单元  
(b) Entity picture and the local characteristic analysis model minimum unit of No.2 camouflage material



(c) 3 号伪装材料实体图片和局部特性分析模型最小单元

(c) Entity picture and the local characteristic analysis model minimum unit of No.3 camouflage material

图 2 3 种伪装遮障实体图片和局部特性分析模型最小单元

Fig.2 Three camouflage material entity picture and their local characteristic analysis model minimum unit

在计算条件允许下, 将上述最小单元多个叠加组成伪装表面, 覆盖在墙体外表面, 墙体内部模拟自然对流环境, 外部分别加以左右风, 上下风, 迎面风三种风向的强迫对流, 速度为 1.5 m/s, 采用 Fluent 分析模拟其上海(东经 121°, 北纬 31°)9 月 3 日上午 9 时整的太阳辐射条件下, 表面的温度场和周围的流场情况。三种风向的示意图如图 3 所示。类比伪

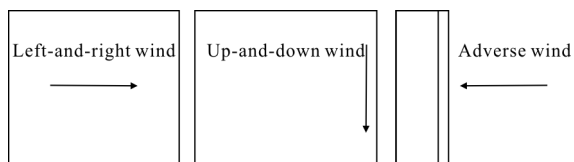


图 3 3 种风向示意图

Fig.3 Schematic diagram of three direction of the wind

装遮障的具体尺寸建立相应大小的多孔介质模型, 厚度分别设为 0.03、0.08、0.03 m, 代替伪装遮障覆盖在墙体表面, 进行相应的分析, 不断尝试得到对应的多孔介质参数。

由前文所述, 模型类比的标准可设为, 温度对应

表 1 不同遮障和类比多孔介质温度对应面平均温度、速度对应面平均速度的比较

Tab.1 Comparison of the average temperature and average velocity of corresponding surfaces in different camouflage screens and porous medium

Kind	Wind direction	Average velocity of camouflage screen/ $m \cdot s^{-1}$	Average velocity of porous media/ $m \cdot s^{-1}$	Velocity error	Average temperature of camouflage screen/K	Average temperature of porous media/K	Temperature error
1	Left-and-right	1.271 853	1.272 854	0.078 7%	320.288 6	320.208 4	-0.025 %
	Up-and-down	1.321 089	1.318 997	-0.158 4%	312.935 7	313.610 6	0.215 6%
	In-and-out	1.204 953	1.219 357	1.195 4%	305.126 4	305.718 5	0.194 %

面的平均温度相同<sup>[9]</sup>, 速度对应面的平均速度相同。如图 4 所示, 左图表征横向风条件, 伪装表面置于整个外部流场计算域中, 浅色部分为伪装表面, 其最后一个小单元为温度对应面, 深色部分为速度对应面, 是温度对应面的出口截面。右图表征迎面风条件, 该条件下伪装小单元呈正方形阵列排布, 其中浅色部分为伪装表面结构模型的中心小单元, 为温度对应面, 深色部分为速度对应面, 是温度对应面 4 个方向的出口截面。

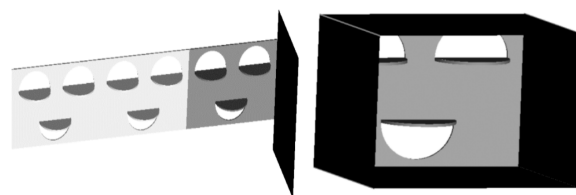


图 4 横向风和迎面风的温度对应面和速度对应面示意图

Fig.4 Schematic diagram of the temperature corresponding surface and velocity profiles for the lateral wind and the head wind

在多孔介质模型中, 代入不同的多孔介质参数, 选取相对应位置, 相同大小的面, 比较该参数下平均温度和平均速度与实体模型中对应数据的误差, 如果温度误差小于 1%<sup>[10]</sup>, 速度误差小于 3%, 可以认为该参数的多孔介质模型与其对应的伪装遮障伪装效果类似。伪装表面结构本身可以视为一种多孔介质, 在实际取值过程中, 简化模型有 9 个可调节参数, 分别为多孔介质的孔隙率, 高度, 固体材料导热系数以及各方向的惯性和粘性阻力。调节惯性和粘性阻力能较好地控制出口面对应的平均速度相同, 而调节孔隙率和固体材料导热系数能在此基础上较好地调节表面平均温度。3 种伪装遮障的计算结果如表 1 所示(第二种遮障上下, 左右结构对称, 因此只分析左右风, 上下风与左右风结果相同)。

其对应的多孔介质参数如表 2 所示。

续表 1

Kind	Wind direction	Average velocity of camouflage screen/ $m \cdot s^{-1}$	Average velocity of porous media/ $m \cdot s^{-1}$	Velocity error	Average temperature of camouflage screen/K	Average temperature of porous media/K	Temperature error
2	Left-and-right	0.688 403	0.704 716	2.369 5%	325.515 9	325.457 3	-0.018%
	In-and-out	0.961 738	0.966 752	0.521 4%	318.662 4	319.454 1	0.248 4%
3	Left-and-right	1.372 834	1.36 777	-0.368 9%	335.314 8	334.658 9	-0.195 6%
	Up-and-down	1.373 841	1.369 094	-0.345 5%	333.267 1	335.477 3	0.663 2%
	In-and-out	1.030 402	1.029 247	-0.112 1%	316.376 2	317.415 9	0.328 6%

表 2 不同伪装遮障和类比多孔介质参数

Tab.2 Parameters of different camouflage screens and porous media

Kind	Porosity	Thickness/m	Transverse viscous resistance/ $m^{-2}$	Longitudinal viscous resistance/ $m^{-2}$	Internal and external viscous resistance/ $m^{-2}$	Transverse inertia resistance/ $m^{-2}$	Longitudinal inertial resistance/ $m^{-2}$	Internal and external inertia resistance/ $m^{-2}$	Thermal conductivity of the solid material/ $W \cdot mK^{-1}$
1	0.4	0.03	20	20	19	0.48	0.3	0.27	0.25
2	0.2	0.08	5 500	5 500	30 000	55	55	300	0.1
3	0.5	0.03	28	28	40 000	0.28	0.28	40	0.05

## 2 伪装效果分析

运用上述简化方法,将多孔介质模型代替实际伪装遮障的结构模型,分析伪装遮障在裸沙地条件下对军用指挥平房的伪装能力,评估其在全天时段的伪装效果。模型示意图如图 5 所示,分析模型组中包含 4 个模型:对照模型和 3 种伪装分析模型。对照模型模拟平房在不加伪装条件下的温度分布,其余 3 个模型分别在房屋外加 3 种伪装遮障。分别得到每个模型中房屋与地面的平均温度和平均表观温度,并以其温度差来衡量伪装效果。对比对照组,伪装遮障使得温差降得越小,则其伪装效果越好。

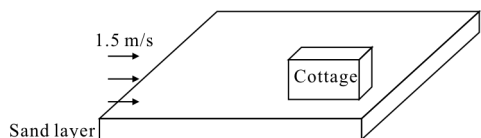


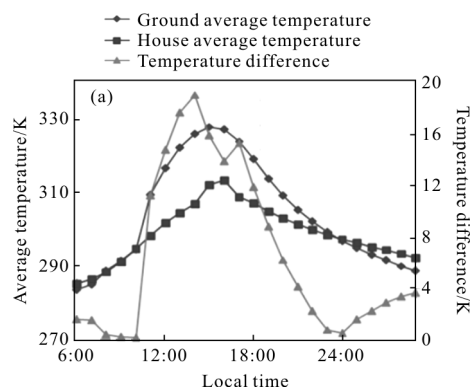
图 5 伪装效果分析几何模型示意图

Fig.5 Effect-analysis geometry models of camouflage

文中沙土层采用裸沙地参数,传热系数为  $0.69 W/(m \cdot K)$ ,密度为  $1450 kg/m^3$ ,比定压热容为

$882 J/(kg \cdot K)$ 。平房墙壁参数采用普通砖墙参数,传热系数为  $0.25 W/(m \cdot K)$ ,密度为  $1370 kg/m^3$ ,比定压热容为  $1339 J/(kg \cdot K)$ ,发射率为 0.6。考虑上海 9 月 3 日的辐射数据,当地从上午 5 点到 6 点之间开始接受太阳辐射,下午 6 点左右停止接受太阳辐射。因此下列所有统计图表都选取上午 6 点作为初始点。

物体表面温度直接影响其红外辐射量,根据史蒂芬-玻耳兹曼定律,黑体辐射量与其热力学温度的四次方成正比,再考虑物体的发射率以及其表面辐射量,可以求得其表观温度。不同模型的平均表面温度和表观温度如图 6~9 所示。



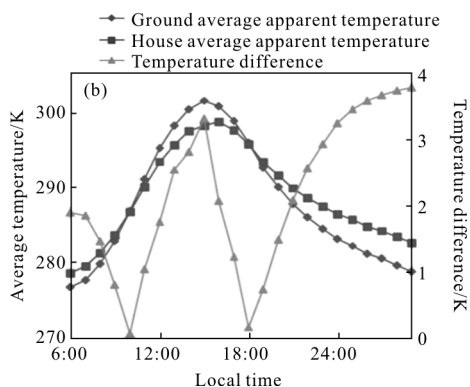


图 6 对照模型全天时段表面平均温度(a)和表观平均温度(b)示意图

Fig.6 Average temperature (a) and apparent average temperature (b) of the control model in the whole day

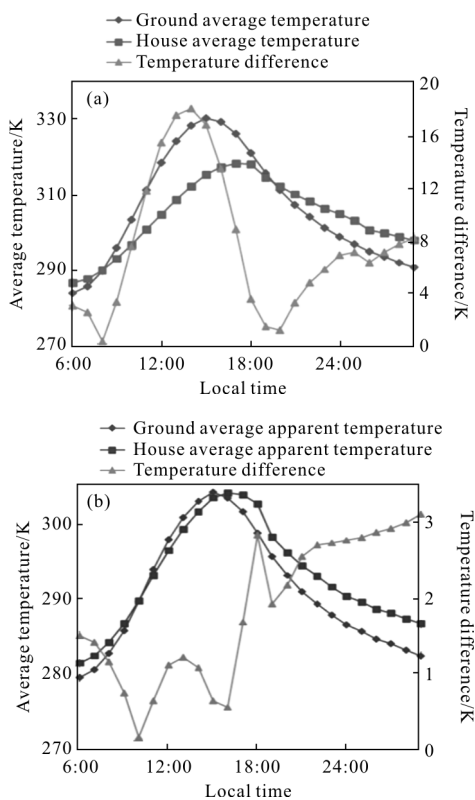


图 7 一号伪装遮障在全天时段表面平均温度(a)和表观平均温度(b)示意图

Fig.7 Average temperature(a) and apparent average temperature (b) of camouflage one in the whole day

对照模型中,在中午天气炎热时段,平房墙壁平均表观温度明显低于地面平均表观温度。地面平均温度的最大值在 14 时左右取到,而房屋侧面会在 14 点之后继续接受较强的光照,仍能持续上升 1~2 h。

房间内采取封闭气体环境模拟自然对流,白天会吸收来自窗户以及墙壁传导的一部分热量,由于无法模拟开门等过程,该部分热空气无法有效散热,因此墙壁温度的计算结果在夜间偏高。从温差角度分析,白天的平均温差为 9.48 K,夜间的平均温差为 3.29 K。从表观温度分析,白天和夜间的平均温差分别为 1.63 K 和 2.86 K,最大温差分别为 3.33 K 和 3.8 K。

三种伪装遮障全天表观温差如图 10 所示。

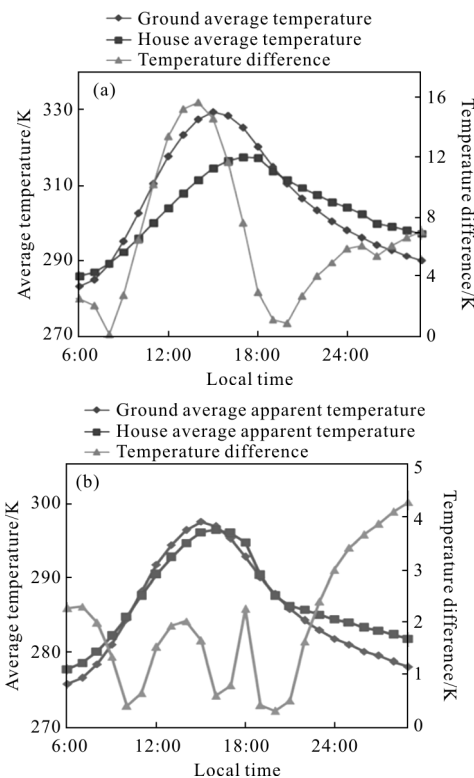
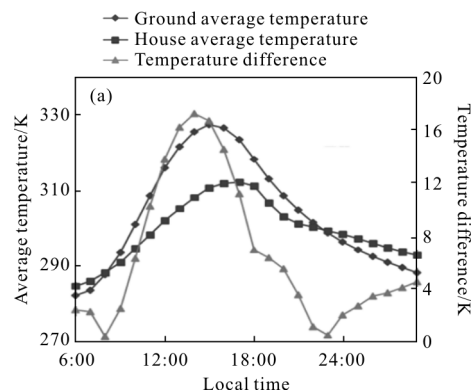


图 8 二号伪装遮障在全天时段表面平均温度(a)和表观平均温度(b)示意图

Fig.8 Average temperature (a) and apparent average temperature (b) of camouflage two in the whole day



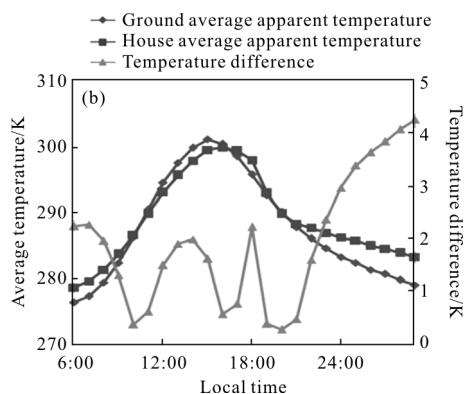


图 9 3 号伪装遮障在全天时段表面平均温度(a)和表观平均温度示意图(b)

Fig.9 Average temperature (a) and apparent average temperature (b) of camouflage three in the whole day

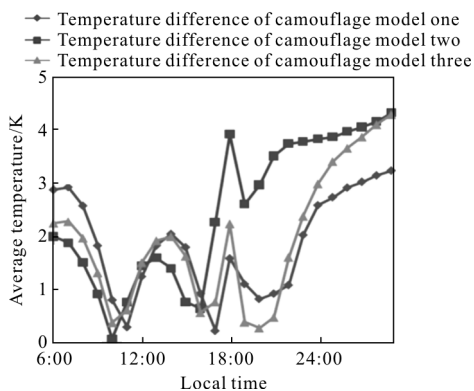


图 10 3 种伪装遮障地面和房屋全天表观温度差折线图

Fig.10 Apparent temperature difference curve of the ground and the house covered by three camouflage screens

该温差越小表示其对应的伪装遮障伪装效果越好。2 号伪装遮障在上午太阳辐射不是很强的阶段表观温差小于 2 K,但是在之后的时段,尤其是晚上,伪装效果很差,表观温差在 4 K 左右,综合来看,白天伪装效果最好的伪装遮障是 3 号伪装遮障,1 号伪装遮障夜间伪装效果很好,能将表观温差控制在 2 K 以下。运用多孔介质简化伪装模型,可以大大简化计算量,得到不同伪装遮障对大物体的伪装效果。

### 3 结论

将伪装表面类比为多孔介质,通过调节多孔介质的 9 个参数使其与对应的伪装遮障表面结构有相似的影响。如果将温度误差控制在 1% 以内,速度误差控制在 3% 以内,可以有效简化伪装模型,保证计算结果的可靠性。

该简化分析方法,考虑了伪装遮障对周围流场的

影响,不仅使其伪装效果的评估更为全面,而且还可以大大减少计算量,用于分析大表面物体的伪装特性,综合评估该类伪装遮障的适用情况和适用条件。

文中通过将伪装遮障简化为多孔介质,用于评估楼房等大型物体的表面伪装遮障的伪装效果。采用空旷沙地上的平房为伪装目标,分别分析 3 种伪装模型的伪装效果。结果表明:1 号伪装遮障适合在夏天,上海太阳辐射条件下的夜间进行伪装,2 号伪装遮障适合在夏天,上海太阳辐射条件下的上午进行伪装,3 号伪装遮障适合在夏天,上海太阳辐射条件下的白天进行伪装。

### 参考文献:

- [1] Zhang Xiaoxia, Zhang Shenghu, Ling Yongshun, et al. New thermal infrared camouflage system [J]. *Infrared Technology*, 2002, 24(1): 42-45. (in Chinese)
- [2] Zhang Weiping, Jie Wenbin, Cheng Xiqing. The research on the technique of artificial fog in camouflage infrared screen [J]. *Infrared Technology*, 2006, 28(10): 606-608. (in Chinese)
- [3] Wang Zirong, Sun Xiaoquan. Thermal camouflage condition of infrared pattern paint [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(4): 305-307. (in Chinese)
- [4] Yan Chen, Zhang Weiping, Li Jihui, et al. Shutter-camouflage nets against IR guided weapons [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2007, 22(4): 14-17. (in Chinese)
- [5] Cao Yi, Cheng Haifeng, Zheng Wenwei, et al. Calculation of camouflage screen's thermal IR radiation temperature [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(9): 852-855. (in Chinese)
- [6] Ge Xinshi, Ye Hong. Basic Principles of Heat Transfer and Mass Transfer [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [7] Fei Yiwei, Huang Zhijie, Sun Yuanbao, et al. Research for tiny particle of polymer a new type ingredient used for camouflage coating with thermal infrared property [J]. *Infrared Technology*, 2003: 55-59. (in Chinese)
- [8] Xuan Yimin, Han Yuge. Infrared Characteristics of Ground Targets and Background [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [9] Wu Wenjian, Hu Biru, Man Yahui. Thermal Infrared Characteristics of Ground Targets and Background [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [10] Tian Shaohui, Chen Hongshu, Hu Zhiyi, et al. An analysis on examination indexes of thermal infrared camouflage [J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(1): 57-60. (in Chinese)