

纤维增强复合材料热隐身斗篷设计

刘立悦, 刘书田*

(大连理工大学 工业装备与结构分析国家重点实验室, 大连 116024)

摘要:基于变换热动力学原理可获得具有热隐身性能的隐身结构(隐身斗篷)所需要的材料性质的空间分布。但这种材料性质的复杂分布形式以及局部热传导性能无限大等极值性质需求,使得隐身斗篷设计的实现非常困难,需要研究基于常规材料的隐身斗篷设计。本文基于常规材料的热隐身结构实现问题,提出了基于纤维增强复合材料圆环结构的实现热隐身的结构形式。首先,基于变换热动力学原理获得热隐身所需的热传导系数沿半径方向的变化规律;进而,通过设计复合材料不同位置的纤维铺设方式(含量和铺设方向)实现热隐身对材料性能的需求。选择金属银作为纤维,空气作为基体,设计出了具有热隐身性能的复合材料圆环结构纤维含量和铺设方向沿径向的分布方案。对该设计方案进行数值仿真,结果显示所设计的隐身结构具有良好的热隐身性能。由于设计方案基于常规材料,因此具有容易实现的优点。

关键词:热隐身;隐身斗篷;复合材料;热变换动力学;优化设计

中图分类号:O224

文献标志码:A

文章编号:1007-4708(2017)04-0453-06

1 引言

实现热隐身是目前很多领域,特别是军事领域的客观需求。随着热成像技术的日益成熟和热红外探测装置的快速发展,单兵以及各种军事目标的生存受到严重威胁,因此热红外伪装技术成为当下研究的热点问题。热隐身是实现伪装的主要途径之一。物体要实现热隐身,可以直观理解为物体外部探测热现象的装置不显示任何变化。换言之,该物体存在与否对原有温度场的分布状态没有影响。目前,实现热隐身的方法主要有三类,一是针对自发热的物体,采用冷却目标或改变目标辐射特性的方法,降低受热像仪等装置捕获的几率;二是在某些探测装置如红外对射探测器的探测下,利用防红外涂层来吸收或散射特定的红外线入射信号;三是给物体穿上热隐身斗篷,通过控制热流传播使其绕过物体后仍遵循原路径,从而对周围温度场的影响消失,实现热隐身。本文研究的是第三类——热隐身斗篷。

热隐身斗篷的研究是受到电磁隐身斗篷的启发。Pendry 等^[1]和 Leonhardt^[2]分别独立提出了

控制波的传播轨迹从而实现电磁隐身的方法,其中前者基于变换光学原理,选择合适的坐标变换,得到了实现电磁隐身斗篷所需的超材料性质分布规律;后者通过对亥姆霍兹方程采用共形变换,得到了电解质隐身装置的材料性质分布规律。关于是否可以通过控制热流的传播轨迹从而实现热隐身, Fan 等^[3]首先尝试了相关研究,并从理论上预言了人工控制热流实现热隐身等新奇的热学性质的可能性^[4]。此后文献^[5,6]在理论上进一步深入研究,给出了传导问题中坐标变换后材料性质的变化规律,并在热隐身问题中作出验证。Guenneau 等^[7]经过严格的数学推导明确提出了变换热动力学原理。理论上,基于变换热动力学原理并通过选择合适的坐标变换,就可以控制热流的传播,进而不仅可以实现热隐身,还可以实现热集中、热旋转、热回流、热伪装以及斗篷外热隐身等其他新奇现象^[3,7-11]。近年来,借鉴电磁隐身其他理论的热隐身实现新方法也开始出现,如消除散射^[12]和路径设计^[13]等。但本文的基础是变换热动力学原理。变换热动力学原理只给出了具有隐身功能的结构应该具有的材料性质(空间变化规律);热隐身斗篷的实现问题,也就是如何设计具有隐身所需要的超材料性质的材料或结构,是将原理应用到工程实际过程中更重要的问题。

参考文献^[7],圆环形热隐身斗篷所需材料性

收稿日期:2016-02-09;修改稿收到日期:2016-06-25.

基金项目:国家自然科学基金(11332004);中航工业产学研合作创兴工程(CXY2013DLLG32)资助项目.

作者简介:刘书田*(1962-),男,博士,教授,博士生导师
(E-mail:stliu@dlut.edu.cn).

质沿径向变化,且要求内侧的环向热传导系数为无穷大,即极值非均匀各向异性的要求。在自然界中找不到与要求完全相符的材料,所以需要研究基于常规材料的隐身斗篷设计方法。为解决这个问题,主要有三个思路,一是直接选用常规材料近似等效出所需材料性质;二是先放松对隐身结构材料性质的要求,再选用常规材料进行等效复合;三是利用拓扑优化的思想,通过常规材料在空间中的合理布置,以使结构具有隐身的特性。第一种思路下,需要采取合适的材料性质等效模型,如 Guenneau 等^[7]通过热传导方程的均匀化方法,设计了一个宽频多层且每层为均质材料的热隐身斗篷,类似的设计也可参考文献^[9]。此外,还可以采用体分比等效模型^[14,15]和 Bruggeman 形状相关模型^[5,16]等。第二种思路下,韩天成等^[17]根据圆环形隐身斗篷问题的解析解,提出了均匀各向异性热隐身斗篷,降低了对隐身结构材料性质的要求,且设计了可实现热隐身的结构^[18,19]。第三种思路下,目前关于采用拓扑优化的思想实现热隐身的工作甚少,但可以借鉴已有的采用拓扑优化方法设计热传导路径的工作^[20-23]进行进一步研究。

本文所研究的是基于变换热动力学原理的热隐身斗篷超材料设计,基于现有材料进行微结构设计,通过设计各种材料的含量等效设计热隐身超材料的材料性质;基于现有材料进行分布规律设计,实现了各子结构均为均质材料的热隐身结构模型。

2 基于变化热动力学原理的热隐身斗篷材料性质设计

2.1 可实现热隐身的圆环斗篷热传导系数分布

根据变换热动力学原理^[7],选择合适的坐标变换后,有变换关系 $\kappa' = \kappa T^{-1}$, 其中 κ 和 κ' 分别为原空间介质和变换后空间介质的热传导系数; $T^{-1} = J^{-T} J^{-1} |J|$, 为材料性质的转换矩阵, J 为坐标变换的雅各比矩阵。对于圆环斗篷,采用坐标变换 $r' = r(R_2 - R_1)/R_2 + R_1$, $\theta' = \theta$ (r 和 θ 为极坐标系下的两个坐标轴, R_1 和 R_2 为常数)。该坐标变换将原坐标系下 $r \leq R_2$ 的圆形区域映射到新坐标系下的环形区域 $R_1 \leq r' \leq R_2$, 环形区域为给物体穿上的热隐身斗篷(图 1)。该变换的逆变换就是将新坐标系下, $r' \leq R_1$ 的圆形区域映射为一个点,从而实现该区域内的物体隐身。

将坐标变换代入材料性质变换规律,得到在稳

态热传导问题中,圆环斗篷的热传导系数为

$$\kappa'_{r'} = \frac{r' - R_1}{r'}, \quad \kappa'_{\theta'} = \frac{r'}{r' - R_1} \quad (1)$$

式中 $\kappa'_{r'}$ 和 $\kappa'_{\theta'}$ 为 $r'(r)$ 和 $\theta'(\theta)$ 方向上的热传导系数与空间介质热传导系数 κ_{θ_g} 的比值。

也就是说,如果圆环形区域各位置具有式(1)给出的热传导系数,则区域内的物体将会隐身,即该圆环结构具有隐身斗篷的功能。可以看出圆环形热隐身斗篷的材料性质为非均匀各向异性,且在 $r' = R_1$ 时奇异($\kappa'_{\theta'}$ 无穷大)。由式(1)可知,实现热隐身,各位置环向和径向的热传导系数应满足关系 $\kappa'_{r'} \times \kappa'_{\theta'} = 1$ 。

2.2 热隐身性能的仿真验证

为了验证 2.1 节给出的隐身斗篷确有隐身性质,本文基于仿真技术分析圆环斗篷的热隐身性能。在 COMSOL MULTIPHYSICS 软件中,将式(1)定义的 $\kappa'_{r'}$ 和 $\kappa'_{\theta'}$ 作为圆环区域的材料性质输入,进行有限元仿真计算。模型及结果如图 2 所示。参数设定:正方形域边长 $a = 1$ m,介质为空气($\kappa_{\text{air}} = 0.026$ W/(m·K));内圆半径 $R_1 = 0.2$ m,内部材料为不锈钢($\kappa_{\text{steel}} = 16$ W/(m·K));外圆半径 $R_2 = 0.3$ m;圆环区域 $\kappa_r = \kappa'_{r'} \times \kappa_{\text{air}}$, $\kappa_{\theta} = \kappa'_{\theta'} \times \kappa_{\text{air}}$ 。边界条件设定:上下边界为隔热边界,以模拟无限大空间;左右边界为恒温边界, $T_{\text{left}} = 313.15$ K, $T_{\text{right}} = 293.15$ K。

可以看出,热量从左向右传播的过程中,图 2(a)空间中不存在物体时温度梯度均匀分布,等温线为一组等间距的平行线;图 2(b)空间中存在圆形不锈钢物体(因为是热的良导体,所以是等温体),其内部无其他等温线分布,物体圆心所在水平线上的温度分布规律是物体上游和下游的等温线间距减小,温度梯度增大;图 2(c)在图 2(b)的基础上增加了热隐身斗篷,可以看出图 2(c)等温线分

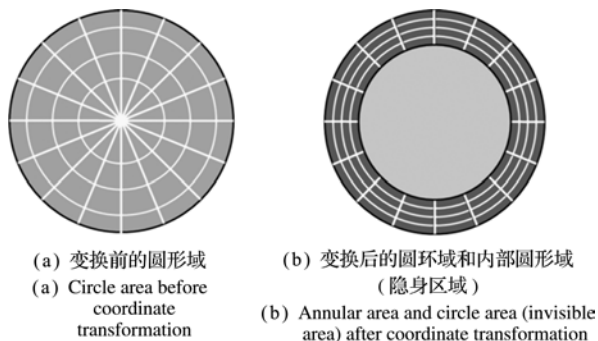


图 1 圆环斗篷示意图

Fig. 1 Annular cloak

布与图 2(a,b)的异同:物体仍是等温体,隐身斗篷内部等温线分布密集,温度梯度很大;热流在绕过物体后又恢复到原来的方向,隐身斗篷外部空间的等温线,仍为一组与空间中不存在物体时相同的等间距的平行线,从而实现了隐身。因此,圆环斗篷材料性质的热隐身性能得到验证。

3 纤维增强复合材料热隐身斗篷设计

式(1)要求的热隐身斗篷的材料性质具有奇异性,在自然界中找不到与之完全相符的材料。因此,基于常规材料的隐身斗篷设计的实现,成为具有挑战性的问题。以下探讨基于纤维增强复合材料,通过调整纤维的分布以调整材料的等效热传导系数,从而实现热隐身的可行性。选择两种常规材料,纤维材料 A(热传导系数为 κ_A) 和基体材料 B(热传导系数为 κ_B) 进行复合材料设计(设 $\kappa_A > \kappa_B$)。

对于纤维增强复合材料,取图 3 所示的纤维分布形式(纤维沿圆环径向和环向),则复合材料的微结构可由纤维材料 A 径向和环向的体分比 f_r 和 f_θ 描述。此时,复合材料的等效材料性能也可由两个方向的体分比确定。根据细观分析,等效的热传导系数可表示为

$$\begin{aligned}\bar{\kappa}_r &= \frac{1}{\kappa_{bg}} [f_r \kappa_A + (1 - f_r) \kappa_B^{(r)}] \\ \bar{\kappa}_\theta &= \frac{1}{\kappa_{bg}} [f_\theta \kappa_A + (1 - f_\theta) \kappa_B^{(\theta)}]\end{aligned}\quad (2)$$

式中 $\kappa_B^{(r)}$ 和 $\kappa_B^{(\theta)}$ 分别满足

$$\begin{aligned}\frac{1}{\kappa_B^{(r)}} &= f_\theta \frac{1}{\kappa_A} + (1 - f_\theta) \frac{1}{\kappa_B} \\ \frac{1}{\kappa_B^{(\theta)}} &= f_r \frac{1}{\kappa_A} + (1 - f_r) \frac{1}{\kappa_B}\end{aligned}\quad (3)$$

由式(2,3)可以求得 f_r 和 f_θ , 但结果较复杂。本文采用一种近似的求解方法,当式(2)的 $\kappa_B^{(r)}$ 和

$\kappa_B^{(\theta)}$ 都近似取 κ_B 时,令所得 $\bar{\kappa}_r^*$ 和 $\bar{\kappa}_\theta^*$ 分别等于式(1)的 κ'_r 和 κ'_θ (理论要求的热隐身斗篷的材料性质),得到近似的描述纤维分布的体分比,即

$$f_r^* = \frac{\kappa'_r \times \kappa_{bg} - \kappa_B}{\kappa_A - \kappa_B}, \quad f_\theta^* = \frac{\kappa'_\theta \times \kappa_{bg} - \kappa_B}{\kappa_A - \kappa_B}$$

代入式(3),近似得到 $\kappa_B^{(r)}$ 和 $\kappa_B^{(\theta)}$, 再代入式(2)最终求得等效的热传导系数为

$$\begin{aligned}\bar{\kappa}_r &= \frac{1}{\kappa_{bg}} \left[f_r \kappa_A + (1 - f_r) \frac{\kappa_A \kappa_B}{\kappa_A + \kappa_B - \kappa'_\theta \kappa_{bg}} \right] \\ \bar{\kappa}_\theta &= \frac{1}{\kappa_{bg}} \left[f_\theta \kappa_A + (1 - f_\theta) \frac{\kappa_A \kappa_B}{\kappa_A + \kappa_B - \kappa'_r \kappa_{bg}} \right]\end{aligned}$$

令上式 $\bar{\kappa}_r$ 和 $\bar{\kappa}_\theta$ 分别等于式(1)的 κ'_r 和 κ'_θ , 得

$$\begin{aligned}f_r &= \frac{\kappa'_r \kappa_{bg} (\kappa_A + \kappa_B) - \kappa_B^2 - \kappa_A \kappa_B}{\kappa_A (\kappa_A - \kappa'_\theta \kappa_{bg})} \\ f_\theta &= \frac{\kappa'_\theta \kappa_{bg} (\kappa_A + \kappa_B) - \kappa_B^2 - \kappa_A \kappa_B}{\kappa_A (\kappa_A - \kappa'_r \kappa_{bg})}\end{aligned}\quad (4)$$

由 f_r 和 f_θ 须为大于 0 且小于 1 的实数,可得选择材料 A 和 B 时需满足的条件。但不等式表示较为复杂,本文采用一种简单的方式,先选定 κ_{bg} 和 κ_A , 然后确定 κ_B 的取值范围,以满足 f_r 和 f_θ 均大于 0 且小于 1。

对于单向纤维增强复合材料,令式(2,3)中 $f_r = 0, f_\theta = f_A$, 此时隐身斗篷为环向纤维增强的复合材料。需要通过调整纤维含量沿径向的变化,以调整等效热传导系数的分布,实现热隐身。此时有

$$\begin{aligned}\bar{\kappa}_r &= \frac{1}{\kappa_{bg}} \frac{\kappa_A \kappa_B}{f_A \kappa_B + (1 - f_A) \kappa_A} \\ \bar{\kappa}_\theta &= \frac{1}{\kappa_{bg}} [f_A \kappa_A + (1 - f_A) \kappa_B]\end{aligned}\quad (5)$$

由式(5)分别求得 f_A 的表达式

$$f_A = \frac{\kappa_A (\kappa'_r \kappa_{bg} - \kappa_B)}{\kappa'_r \kappa_{bg} (\kappa_A - \kappa_B)}, \quad f_A = \frac{\kappa'_\theta \kappa_{bg} - \kappa_B}{\kappa_A - \kappa_B}\quad (6)$$

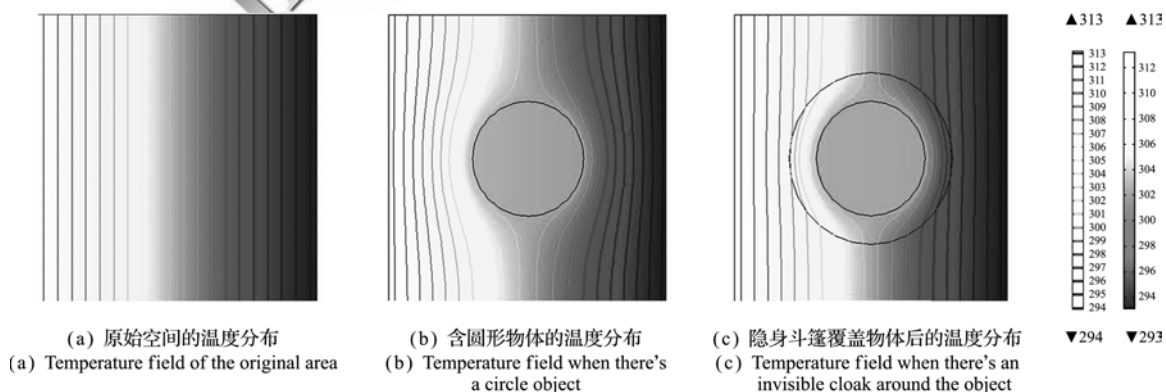


图 2 热隐身斗篷对温度场的影响示意图

Fig. 2 Temperature field before and after the thermal invisible cloak exists

令式(6)中两式相等,得

$$\kappa'_{r'} = \frac{\kappa_{bg}^2 + \kappa_A \kappa_B}{\kappa_{bg}(\kappa_A + \kappa_B)} \quad (7)$$

即在选择 κ_A 和 κ_B 时需满足式(7)关系。仍可采用选定 κ_{bg} 和 κ_A (或 κ_B) 来确定 κ_B (或 κ_A) 的方法,然后根据式(6)得到 f_A 的具体值。令式(5)的 $\bar{\kappa}_\theta \times \bar{\kappa}_r = 1$, 可得 f_A 的另一种表示形式为

$$f_A = \frac{\kappa_A(\kappa_{bg} + \kappa_B)(\kappa_{bg} - \kappa_B)}{(\kappa_A \kappa_B + \kappa_{bg}^2)(\kappa_A - \kappa_B)} \quad (8)$$

由式(6)及 f_A 须为大于 0 且小于 1 的实数,可得

$$\kappa_B < \bar{\kappa}'_{r'} \times \kappa_{bg}, \quad \kappa_A > \bar{\kappa}'_{\theta'} \times \kappa_{bg} \quad (9)$$

此时该范围也能满足式(8)的 f_A 为大于 0 且小于 1, 即选择材料 A 和 B 时, 也需满足式(9)条件。

实际设计制造时, 根据加工精度和成本的要求, 可将隐身斗篷分成若干个单胞。对于纤维增强形式, 可将圆环隐身斗篷沿径向均匀划分为 n 层同心圆环, 沿环向均匀划分为 m 个部分, 则图 3 中单胞的尺寸为 $a = (R_2 - R_1)/n$, $b = 2\pi r'/m$; 再根据纤维尺寸与体分比的关系(即 $f_r = x_A/b$, $f_\theta = y_A/a$) 得到每个单胞内铺设纤维的尺寸。类似地, 对于单向纤维增强形式, 图 4 中单胞的尺寸为 $d = (R_2 - R_1)/n$, 纤维尺寸与体分比的关系为 $f_A = d_A/d$ 。

4 纤维增强复合材料热隐身结构 隐身性能分析与仿真验证

对纤维增强复合材料微结构形式的热隐身结构进行性能分析验证。由式(1)可知, 圆环形热隐

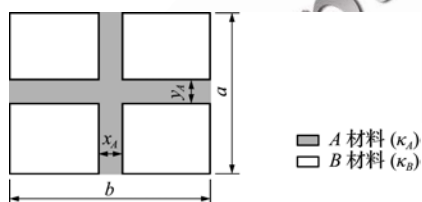


图 3 纤维增强复合材料热隐身斗篷单胞示意图
Fig. 3 Microstructure of thermal invisible cloak made of fiber reinforced composite

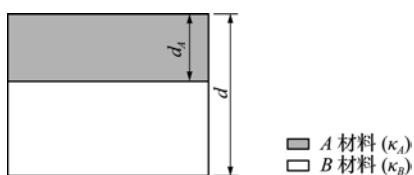


图 4 单向纤维增强复合材料热隐身斗篷单胞示意图
Fig. 4 Microstructure of thermal invisible cloak made of unidirectional fiber reinforced composite

身斗篷的材料性质 $\kappa'_{r'}$ 和 $\kappa'_{\theta'}$ 只与 r' 有关。且 $\kappa'_{r'}$ 和 $\kappa'_{\theta'}$ 随 r' 逐点变化, 实际材料加工时是不可能实现的。因此, 将圆环区域(结构尺寸与 2.2 节相同)沿径向均匀划分为 5 层同心圆环(即 $n=5$), 将每层看成为纤维均匀分布的材料。取每层中间圆环线的坐标 r' 用于近似计算该层的热传导系数, 结果列入表 1。

表 1 离散的各单元热传导系数表
Tab. 1 Thermal conductivity of discrete annular elements

第 n 层 (内到外)	1	2	3	4	5
r'/m	0.21	0.23	0.25	0.27	0.29
$\bar{\kappa}'_{r'} = \frac{r' - R_1}{r'}$	0.0476	0.1304	0.2000	0.2693	0.3103
$\bar{\kappa}'_{\theta'} = \frac{r'}{r' - R_1}$	21.0000	7.6667	5.0000	3.8571	3.2222

下面给出基于纤维增强复合材料的热隐身斗篷的具体设计。设定空间介质为不锈钢($\kappa_{bg} = 16 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$), 选定材料 A 为银($\kappa_A = 412 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$), 材料 B 为空气($\kappa_B = 0.026 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)。取 $m=6$, 由式(4)及 $f_r = x_A/b$ 和 $f_\theta = y_A/a$ 计算得到各单胞的 x_A 和 y_A 列入表 2。

表 2 各单胞 x_A 和 y_A 的计算结果
Tab. 2 x_A and y_A of each microstructure

第 n 层 (内到外)	1	2	3	4	5
$x_A/(10^{-3} \text{ m})$	0.332	1.199	2.013	2.826	3.638
$y_A/(10^{-3} \text{ m})$	16.310	5.954	3.882	2.995	2.502

将表 1 数据作为材料性质输入, 进行有限元建模分析, 结果如图 5 所示。从等温线的分布可以看出, 该纤维增强复合材料的材料性质和选择的离散层数可以很好地实现热隐身, 可以以此为基础进行制造加工。

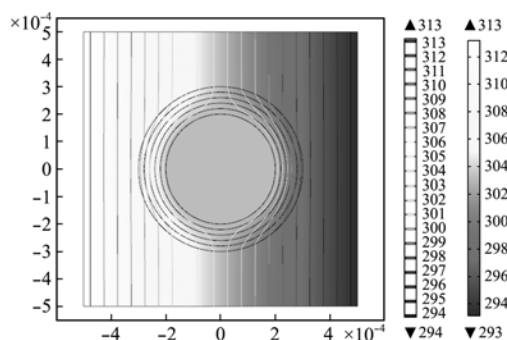


图 5 热隐身斗篷复合材料设计温度结果示意图
Fig. 5 Temperature field of designed thermal invisible cloak made of fiber reinforced composite

5 结 论

本文基于纤维增强复合材料,通过设计不同位置的纤维铺设方式(含量和铺设方向)以改变复合材料的宏观传热性能,从而实现热隐身对传热性能的要求。以金属银作为纤维,空气作为基体为例,设计了纤维铺设方式沿径向的变化规律,获得了纤维增强复合材料圆环形热隐身斗篷设计。数值仿真验证了该设计的隐身性能。该结构的纤维和基体均是常规材料,且纤维铺设方式简单,具有容易实现的特点。设计结果表明,(1)基于纤维增强复合材料的纤维铺设方式设计,是实现热隐身性能设计的有效方式;(2)基于常规材料的合理设计,可以实现热隐身性能。

参考文献(References):

- [1] Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Controlling electromagnetic fields [J]. *Science*, 2006, **312**: 1780-1782.
- [2] Leonhardt U. Optical conformal mapping [J]. *Science*, 2006, **312**: 1777-1780.
- [3] Fan C Z, Gao Y, Huang J P. Shaped graded materials with an apparent negative thermal conductivity [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(25): 251907.
- [4] 黄吉平. 从光学隐身衣到热学隐身衣[J]. 物理教学, 2015, **37**(5): 2-4. (HUANG Ji-ping. From optical invisibility cloaking to thermal invisibility cloaking[J]. *Physics Teaching*, 2015, **37**(5): 2-4. (in Chinese))
- [5] Li J Y, Gao Y, Huang J P. A bifunctional cloak using transformation media [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, **108**(7): 074504.
- [6] Chen T, Weng C N, Chen J S. Cloak for curvilinearly anisotropic media in conduction[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **93**(11): 114103.
- [7] Guenneau S, Amra C, Veynante D. Transformation thermodynamics: cloaking and concentrating heat flux [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(7): 8207-8218.
- [8] Guenneau S, Amra C. Anisotropic conductivity rotates heat fluxes in transient regimes[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(5): 6578-6583.
- [9] Narayana S, Sato Y. Heat flux manipulation with engineered thermal materials [J]. *Physical Review Letters*, 2012, **108**(21): 214303.
- [10] Han T C, Bai X, Thong J T L, et al. Full control and manipulation of heat signatures: cloaking, camouflage and thermal metamaterials [J]. *Advanced Materials*, 2014, **26**(11): 1731-1734.
- [11] Gao Y, Huang J P. Unconventional thermal cloak hiding an object outside the cloak [J]. *Europhysics Letters*, 2013, **104**(4): 44001.
- [12] Farhat M, Chen P Y, Bagci H, et al. Thermal invisibility based on scattering cancellation and mantle cloaking [J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 9876.
- [13] Wu L. Cylindrical thermal cloak based on the path design of heat flux [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2015, **137**(2): 021301.
- [14] 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.
- [15] Ma Y, Lan L, Jiang W, et al. A transient thermal cloak experimentally realized through a rescaled diffusion equation with anisotropic thermal diffusivity [J]. *NPG Asia Materials*, 2013, **5**(11): e73.
- [16] Zhang Y, Xu H, Zhang B. Design, implementation, and extension of thermal invisibility cloaks [J]. *AIP Advances*, 2015, **5**(5): 053402.
- [17] Han T C, Yuan T, Li B, et al. Homogeneous thermal cloak with constant conductivity and tunable heat localization [J]. *Scientific Reports*, 2013, **3**: 1593.
- [18] Han T C, Bai X, Thong J T L, et al. Bilayer isotropic thermal cloak [J]. *Physics*, 2013, **1307**: 2507.
- [19] Han T C, Bai X, Gao D, et al. Experimental demonstration of a bilayer thermal cloak [J]. *Physical Review Letters*, 2014, **112**(5): 054302.
- [20] Li Q, Steven G P, Xie Y M, et al. Evolutionary topology optimization for temperature reduction of heat conducting fields [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2004, **47**(23): 5071-5083.
- [21] Zhang Y C, Liu S T. Design of conducting paths based on topology optimization [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2008, **44**(10): 1217-1227.
- [22] Zhang Y C, Liu S T, Qiao H T. *Design of Heat Conduction Structure Based on the Topology Optimization* [M]. Shanghai, InTech, 2011.
- [23] Cheng C H, Chen Y F. Topology optimization of heat conduction paths by a non-constrained volume-of-solid function method [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2014, **78**: 16-25.

Thermal invisibility cloak design based on fiber reinforced composite

LIU Li-yue, LIU Shu-tian*

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,
Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: Although the spatial variation of the material property required for achieving thermal invisibility in the structure, i. e. an invisible cloak for heat flux, can be obtained through transformation thermodynamics, the design of the cloak is practically very difficult to be implemented due to the complexity in distribution and local extreme (infinite) in value of the required thermal conductivity of the material. Hence, it is of great engineering significance to explore effective ways to design invisibility cloak for heat by using conventional materials. In this paper, we proposed a way to design annular thermal invisibility cloak by using fiber reinforced composite. The required material property distribution (i. e. thermal conductivity) was obtained based on transformation thermodynamics first. Then, through composite microstructure design, the fiber layout (volume fraction and orientation) was determined to match with the required thermal conductivity distribution. Using silver as the reinforcement and air as the matrix, the fiber layout of the annular cloak was obtained, which was easy to be fabricated by ordinary materials. The simulation results showed almost perfect invisible cloak properties, thus validating the proposed design method.

Key words: thermal invisibility; invisible cloak; composite materials; transformation thermodynamics; design optimization

引用本文/Cite this paper:

刘立悦, 刘书田. 纤维增强复合材料热隐身斗篷设计[J]. 计算力学学报, 2017, 34(4): 453-458.

LIU Li-yue, LIU Shu-tian. Thermal invisibility cloak design based on fiber reinforced composite[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2017, 34(4): 453-458.