

基于超材料的定向传热结构研究与设计

孙良奎 于哲峰 黄洁

Research and design of directional heat transmission structure based on metamaterial

Sun Liang-Kui Yu Zhe-Feng Huang Jie

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 084401 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.084401

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084401>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于(火积)理论的轧钢加热炉壁变截面绝热层构形优化

Constructal optimization of variable cross-section insulation layer of steel rolling reheating furnace wall based on entransy theory

物理学报.2015, 64(5): 054402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054402>

亚表面异质缺陷对功能梯度材料表面温度场的影响

Influence of inclusion in functionally graded materials on the surface temperature distributions

物理学报.2014, 63(19): 194401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194401>

基于拉普拉斯方程的任意形状热斗篷研究与设计

Research and design of thermal cloak with arbitrary shape based on Laplace's equation

物理学报.2014, 63(19): 194402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194402>

硅功能化石墨烯热导率的分子动力学模拟

Molecular dynamics simulation of the thermal conductivity of silicon functionalized graphene

物理学报.2014, 63(7): 074401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.074401>

基于变换热力学的任意形状热集中器研究与设计

Research and design of thermal concentrator with arbitrary shape based on transformation thermodynamics

物理学报.2014, 63(5): 054401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.054401>

基于超材料的定向传热结构研究与设计

孙良奎[†] 于哲峰 黄洁

(中国空气动力研究与发展中心, 绵阳 621000)

(2014年9月21日收到; 2014年10月27日收到修改稿)

在热斗篷研究的基础上, 提出定向传热结构的研究. 基于变换热力学, 采用坐标斜变换推导了定向传热结构热导率分布的表达式. 数值计算结果表明, 外部热流流经定向传热区域时, 热流向设计的高温面流动, 而设计的低温面温度较低. 此外, 在导出的热导率分布表达式的基础上, 进一步进行坐标旋转变换, 得到的热导率表达式只有相互垂直的两个分量. 计算结果表明, 沿高温面法向的热导率增大时, 传热效率提高, 而且经过坐标旋转变换后, 高温面与低温面的温差增大. 定向传热在红外隐身、热防护领域具有潜在的应用价值.

关键词: 定向传热, 超材料, 红外隐身

PACS: 44.10.+i, 05.70.-a, 81.05.Xj, 07.05.Tp

DOI: 10.7498/aps.64.084401

1 引言

Cloak的设计研究在超材料研究中占有重要地位^[1-3], 目前电磁及可见光Cloak已经通过实验验证^[4,5]. 电磁Cloak设计的核心在于变换光学理论, 采用该理论能够建立材料本构参数与坐标变换之间的关系^[6,7]. 变换光学理论后来应用于超散射^[8]、超吸收等^[9]具有特殊功能器件的设计. 变换光学理论是建立在Maxwell方程的形式不变性基础上的. 2008年, Fan等^[10]发现在一定条件下, 热扩散方程也具有形式不变性, 并利用该特性设计了球形和椭球形热Cloak. 在这之后, 研究人员相继设计了电流和热流双功能Cloak^[11], 内外边界共形^[12]、非共形^[13]任意形状Cloak, 热聚焦器等^[14,15], 并且研究了热Cloak的制备方法^[16,17].

电磁Cloak的隐身原理是光线绕过目标, 再回到原来的传输路径上, 好像光线没有遇见目标一样; 热Cloak的作用是使热量传输绕过目标, 起到的作用是热保护, 其在隐身领域的应用较少提及. 定向传热结构的研究与设计是在热Cloak的基础上提出来的, 与热Cloak相比, 热流不需要回到原来

的传输路径, 而是定向传输到某些面, 从而使得另外的面保持低温, 这样可以抑制其红外辐射, 达到红外隐身的目的. 此外, 其在高超声速飞行器热防护、热能的有效利用等领域也具有潜在的应用价值. 目前, 几乎还没有关于定向传热结构研究与设计的报道. 本文利用坐标斜变换和旋转变换, 设计了二维定向传热结构的热导率分布表达式, 采用有限元方法计算了其传热效果.

2 坐标斜变换设计二维定向传热结构

热扩散方程描述热量从高温区域流向低温区域的扩散过程. 一般地, 无源热扩散方程可写为如下形式:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\kappa \nabla T) = 0, \quad (1)$$

其中, ∇ 表示梯度算符, κ 是媒质的热导率, T 是温度. 方程(1)具有形式不变性, 在变换空间可以表示为^[18]

$$\rho' c' \frac{\partial T'}{\partial t} - \nabla' \cdot (\kappa' \nabla' T') = 0, \quad (2)$$

其中, ∇' 表示在变换空间求梯度; κ' 和 T' 分别为变换空间媒质的热导率和温度; ρ' 和 c' 分别为变换空

[†] 通信作者. E-mail: slk_0_1999@163.com

间的密度和热容. 变换空间媒质参数计算如下:

$$\rho'c' = \frac{\rho c}{\det(\mathbf{J})}, \quad (3)$$

$$\kappa' = \frac{\mathbf{J}\kappa\mathbf{J}^T}{\det(\mathbf{J})}, \quad (4)$$

式中, \mathbf{J} 为雅可比变换矩阵, \mathbf{J}^T 是 \mathbf{J} 的转置, $\det(\mathbf{J})$ 是矩阵的行列式. 在二维情况下:

$$\mathbf{J} = \frac{\partial(x', y')}{\partial(x, y)} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x'}{\partial x} & \frac{\partial x'}{\partial y} \\ \frac{\partial y'}{\partial x} & \frac{\partial y'}{\partial y} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

所设计的二维定向传热结构坐标变换如图 1 所示. 在原空间中, 热量沿 $-y$ 方向传输, 为实现定向传热, 需要将原空间压缩, 将空间 Ω 压缩至 Ω' , 热量即沿图示方向传输, 从而使得 oA 边处于低温状态. 实现该变换有三种方式: 沿 x 方向压缩、沿 y 方向压缩以及 x, y 方向同时压缩. 本文采用沿 y 轴压缩, x 轴不变的方式, 坐标变换方程为

$$x' = x, \quad (6a)$$

$$y' = \frac{x}{a}y - \frac{b}{a}(x - a). \quad (6b)$$

将 (6) 式代入 (5) 式计算雅可比矩阵, 结果代入 (4) 式, 得到变换后媒质的热导率:

$$\kappa'_{xx} = \frac{a}{x}\kappa, \quad (7a)$$

$$\kappa'_{xy} = \frac{y-b}{x}\kappa, \quad (7b)$$

$$\kappa'_{yx} = \kappa'_{xy}, \quad (7c)$$

$$\kappa'_{yy} = \frac{(y-b)^2 + x^2}{xa}\kappa. \quad (7d)$$

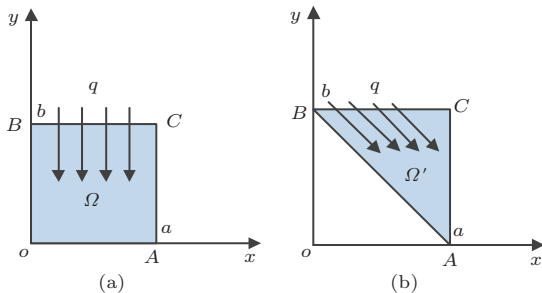


图 1 二维定向传热结构坐标斜变换示意图 (a) 原空间; (b) 变换空间

Fig. 1. Sketch maps of the oblique coordinate transformation of the two-dimensional directional heat transmission structure: (a) origin space; (b) transformation space.

采用 Comsol multiphysics 软件进行瞬态仿真, 图 1 中结构参数 $a = b = 20$ cm. 仿真条件如

下: Ω' 以外的区域材料为铜, 常温下铜的密度 $\rho = 8700$ kg/m³, 热导率 $\kappa = 400$ W/(m·K), 热容 $c = 385$ J/(kg·K), Ω' 区域材料参数由 (7) 式给出. 边界条件设置如下: 上边为温度边界, 温度为 600 K, 其余区域初始温度为 293.15 K, oB 为对称边界条件, oA 和 AC 为对流传热边界条件, 传热系数 $h = 5$ W/(m²·K). 计算了不同时间的温度分布, 图 2 所示计算结果为 120 s 时坐标变换前后的温度分布. 温度云图显示, 坐标斜变换后, oA 边温度明显降低. 同时统计了 80, 120, 160, 200 s 时坐标变换前后 oA 边和 AC 边的平均温度, 结果如表 1 所列.

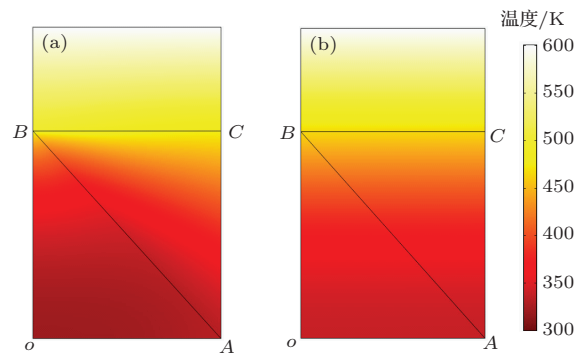


图 2 (网刊彩色) 120 s 时温度分布云图 (a) 坐标变换后; (b) 坐标变换前

Fig. 2. (color online) Temperature contours at the moment of 120 s: (a) after coordinate transformation; (b) before coordinate transformation.

表 1 坐标斜变换前后各边温度变化

Table 1. Temperature variation of the sides before and after the oblique coordinate transformation.

		时间/s			
		80	120	160	200
变换前温度/K	oA 边	310.3	338.4	368.3	396.3
	AC 边	350.5	381.1	407.9	431.5
变换后温度/K	oA 边	303.2	323.4	347.5	371.4
	AC 边	357.4	387.1	410.5	429.9

计算结果表明, 经过坐标变换后, oA 边的温度明显降低, 但是降低幅度小, 而且与 AC 边温度差异不大, 定向传热的效率低. 这主要是因为 Ω' 区域的热导率有 4 个分量, 每个分量的值差异较小, 而且每个分量相互联系, 不易控制单个分量, 这也给实验制备定向传热结构带来困难.

3 坐标旋转变换设计二维定向传热结构

为提高传热效率, 减少 Ω' 区域的热导率分量, 对传热区域进行旋转变换, 变换示意图如图 3 所示.

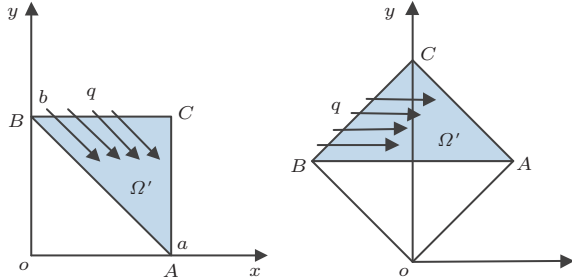


图 3 坐标旋转变换示意图

Fig. 3. Sketch maps of the rotational coordinate transformation.

设旋转角度为 θ , 则旋转后与旋转前的坐标关系为

$$\begin{pmatrix} x'' \\ y'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix}. \quad (8)$$

设 $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$, 则 $\det(\mathbf{A}) = 1$. 旋转变换后热导率为

$$\kappa'' = \frac{\mathbf{A} \mathbf{J} \kappa \mathbf{J}^T \mathbf{A}^T}{\det(\mathbf{J}) \det(\mathbf{A})} = \frac{\mathbf{A} \mathbf{J} \mathbf{J}^T \mathbf{A}^T}{\det(\mathbf{J})} \kappa. \quad (9)$$

由于

$$\mathbf{J} \mathbf{J}^T = \begin{pmatrix} 1 & \frac{y-b}{a} \\ \frac{y-b}{a} & \left(\frac{y-b}{a}\right)^2 + \left(\frac{x}{a}\right)^2 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

当 \mathbf{A} 是可以使 $\mathbf{J} \mathbf{J}^T$ 对角化的矩阵时, 变换后热导率只有两个分量, 对角化矩阵为

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \lambda_{11} & 0 \\ 0 & \lambda_{22} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

其中,

$$\begin{aligned} \lambda_{11} &= \frac{F+1}{2} + \sqrt{\left(\frac{F+1}{2}\right)^2 - \left(\frac{x}{a}\right)^2}, \\ \lambda_{22} &= \frac{F+1}{2} - \sqrt{\left(\frac{F+1}{2}\right)^2 - \left(\frac{x}{a}\right)^2}, \\ F &= \left(\frac{y-b}{a}\right)^2 + \left(\frac{x}{a}\right)^2. \end{aligned}$$

将 (11) 式代入 (9) 式, 得到旋转变换后热导率为

$$\kappa''_{xx} = \frac{a}{x} \left(\frac{F+1}{2} + \sqrt{\left(\frac{F+1}{2}\right)^2 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} \right) \kappa, \quad (12a)$$

$$\kappa''_{yy} = \frac{a}{x} \left(\frac{F+1}{2} - \sqrt{\left(\frac{F+1}{2}\right)^2 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} \right) \kappa. \quad (12b)$$

发现

$$\kappa''_{xx} \cdot \kappa''_{yy} = \kappa^2.$$

两个垂直方向的热导率成反比. 分别计算了 κ''_{xx} 为 $\kappa, 10\kappa, 20\kappa$ 时的温度分布, 计算条件设置与上一节相同, 图 4 给出了时间为 120 s 时的温度分布图, 图 5 为相应的热扩散图.

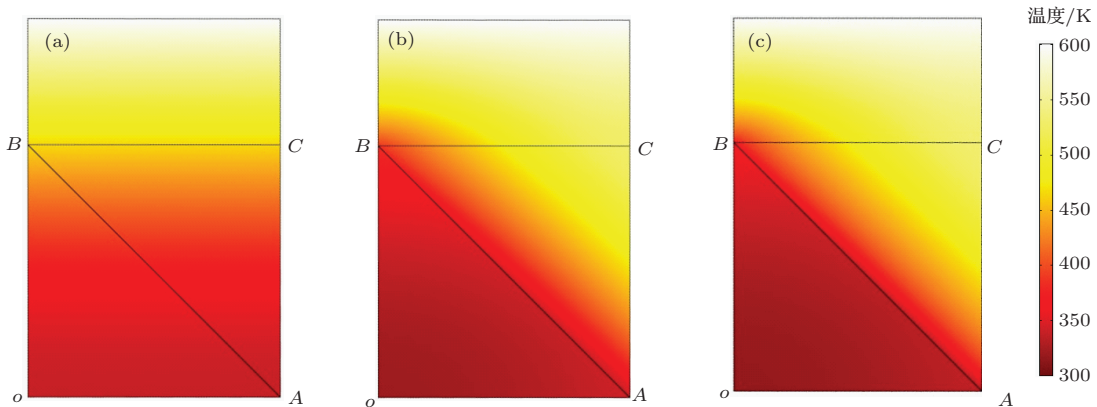


图 4 (网刊彩色) 不同 κ''_{xx} 的温度分布云图 (a) $\kappa''_{xx} = \kappa$; (b) $\kappa''_{xx} = 10\kappa$; (c) $\kappa''_{xx} = 20\kappa$

Fig. 4. (color online) Temperature contours with different κ''_{xx} : (a) $\kappa''_{xx} = \kappa$; (b) $\kappa''_{xx} = 10\kappa$; (c) $\kappa''_{xx} = 20\kappa$.

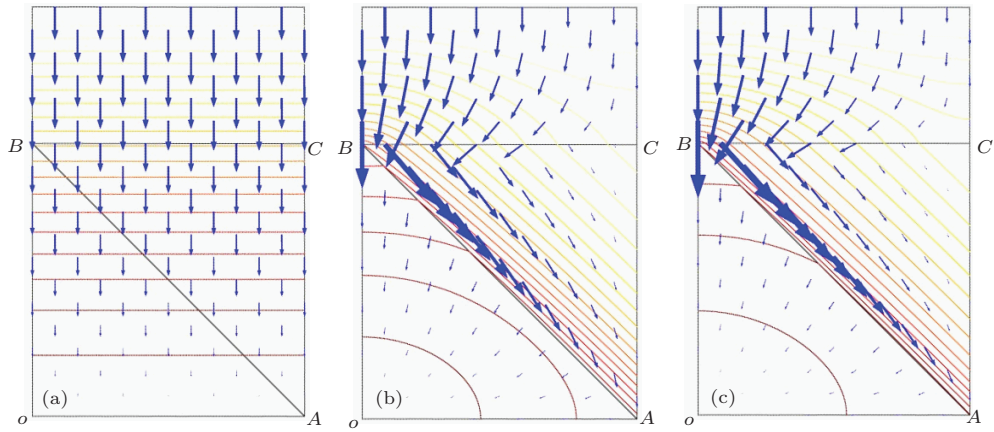


图5 (网刊彩色) 不同 κ''_{xx} 的热扩散图 (a) $\kappa''_{xx} = \kappa$; (b) $\kappa''_{xx} = 5\kappa$; (c) $\kappa''_{xx} = 10\kappa$

Fig. 5. (color online) Heat flow diagram with different κ''_{xx} : (a) $\kappa''_{xx} = \kappa$; (b) $\kappa''_{xx} = 10\kappa$; (c) $\kappa''_{xx} = 20\kappa$.

温度云图和热扩散图显示, 坐标旋转变换后, 随着 κ''_{xx} 的增大, 热流大量流向 AC 边, oA 边温度远小于 AC 边, 传热效率大幅提高. 同时计算了 80, 120, 160, 200 s 时 oA 边和 AC 边的平均温度, 如表 2 所列. 图 6 所示结果为坐标变换前、斜变换及旋转变换后两边在不同时刻的温差.

表 2 坐标斜变换和旋转变换后各边的温度

Table 2. Temperature of the sides after oblique and rotational coordinate transformation.

		时间/s			
		80	120	160	200
斜变换温度/K	oA 边	303.2	323.4	347.5	371.4
	AC 边	357.4	387.1	410.5	429.9
旋转变换温度/K	oA 边	306.8	323.6	342.8	362.6
	AC 边	425.9	466.2	492.1	509.6

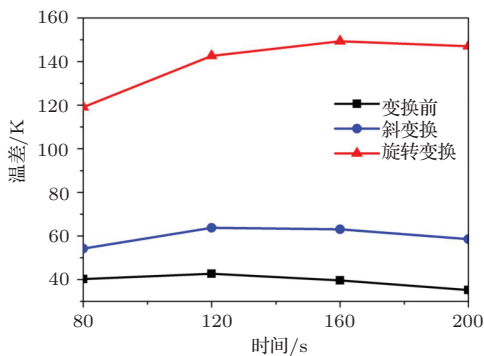


图 6 坐标变换前、斜变换及旋转变换后 AC 和 oA 两边在不同时刻的温差

Fig. 6. Temperature differences of the AC side and oA side at different moments with the coordinate transformations.

计算结果表明, 经过旋转变换后, AC 边温度很高时, oA 边依然保持低温, 而且在两边温差变大

的同时, 同一时刻下, 经过旋转变换后, oA 边温度有所下降, 其传热效率大幅提高. 同时注意到, 铜本身的热导率较高, 所以虽然传热效率提高, 但是 oA 边的温度还是随着时间的推移有所升高.

4 结 论

基于变换热力学, 本文采用坐标斜变换和旋转变换方法推导了二维定向传热结构的热导率分布表达式, 并通过有限元仿真进行了验证. 结果表明: 经过斜变换, 能够初步实现定向传热功能, 热流明显向高温面流动, 但是传热效率较低; 经过坐标旋转变换后, 热导率分量只有相互垂直的两个分量, 且两分量成反比, 容易控制. 计算发现, 沿高温面法向的热导率越大, 定向传热效果越好, 而且旋转变换后, 高温面和低温面的温差增大, 传热效率越高. 下一步将研究超材料结构与热导率分布的关系, 开展定向传热结构的实验研究.

参考文献

- [1] Zhang J J, Huang J T, Luo Y, Chen H S, Kong J A, Wu B I 2008 *Phys. Rev. B* **77** 035116
- [2] Pendry J B, Schurig D, Smith D R 2006 *Science* **312** 1780
- [3] Cummer S A, Popa B, Schurig D, Smith D R, Pendry J 2006 *Phys. Rev. E* **74** 036621
- [4] Schurig D, Mock J J, Justice B J, Cummer S A, Pendry J B, Starr A F, Smith D R 2006 *Science* **314** 97
- [5] Valentine J, Li J, Zentgraf T, Bartal G, Zhang X 2009 *Nat. Mater.* **10** 1038
- [6] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [7] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77

- [8] Yang C F, Yang J J, Huang M, Peng J H, Cai G H 2010 *Comput. Mater. Sci.* **49** 820
- [9] Yang J J, Huang M, Yang C F, Peng J H, Zong R 2010 *Energies* **3** 1335
- [10] Fan C Z, Gao Y, Huang J P 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 251907
- [11] Li J Y, Gao Y, Huang J P 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 074504
- [12] Yang T Z, Huang L J, Chen F, Xu W K 2013 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46** 305102
- [13] Mao F C, Li T H, Huang M, Yang J J, Chen J C 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 014401 (in Chinese) [毛福春, 李廷华, 黄铭, 杨晶晶, 陈俊昌 2014 物理学报 **63** 014401]
- [14] Guenneau S, Amra C 2013 *Opt. Express* **21** 6578
- [15] Li T H, Mao F C, Huang M, Yang J J, Chen J C 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 054401 (in Chinese) [李廷华, 毛福春, 黄铭, 杨晶晶, 陈俊昌 2014 物理学报 **63** 054401]
- [16] Schinnty R, Kadic M, Guenneau S, Wegener M 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 195901
- [17] Han T C, Yuan T, Li B W, Qiu C W 2013 *Sci. Rep.* **3** 1593
- [18] Xiao H, Lin Z W 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 211912

Research and design of directional heat transmission structure based on metamaterial

Sun Liang-Kui[†] Yu Zhe-Feng Huang Jie

(China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

(Received 21 September 2014; revised manuscript received 27 October 2014)

Abstract

Based on the research of thermal cloak, directional heat transmission structure is proposed in this paper. On the basis of transformation thermodynamics, the thermal conductivity expression for directional heat transmission structure is derived by the oblique coordinate transformation. The results from the numeric calculation indicate that the heat flux flows to the designed high temperature side while the low temperature side remains at low temperature. Furthermore, rotational transformation is performed on the basis of oblique coordinate transformation. The derived thermal conductivity expression has two vertical segments. The calculation results display that with the increase of the thermal conductivity along the normal of the high temperature side, the heat transmission efficiency is improved greatly. Moreover, the temperature difference between the high and low temperature side increases after the rotational transformation. Directional heat transmission has potential applications in infrared stealth and heat protection.

Keywords: directional heat transmission, metamaterials, infrared stealth

PACS: 44.10.+i, 05.70.-a, 81.05.Xj, 07.05.Tp

DOI: 10.7498/aps.64.084401

[†] Corresponding author. E-mail: slk_0_1999@163.com