

·光电系统与amp;设计·

天然橡胶布和钢板热特性差异的理论分析

曹益晨¹, 何超²

(1. 61741 部队, 北京 100098; 2. 解放军理工大学, 江苏 南京 210007)

摘要:根据传热学原理,建立了天然橡胶布和钢板的简单传热模型,计算了一日内天然橡胶布和钢板温度随时间的变化.结果表明:天然橡胶布表面温度可以通过热平衡方程求解;钢板温度日变化受厚度的影响最大,厚度越大,温度变化越平缓,厚度越小,越接近天然橡胶布.表面发射率对钢板或天然橡胶布温度变化有相同的影响,发射率越低,一日内表面温度就越高.太阳能吸收系数仅在白天具有太阳辐射时对温度有影响,它与发射率对温度的影响刚好相反.

关键词:天然橡胶布;热模型;发射率;太阳辐射

中图分类号:TN104.2

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2010)03-0018-04

Theoretical Analysis to Thermal Signature Difference of Rubber Cloth and Steel Plate

CAO Yi-chen¹, HE Chao²

(1. Unit 61741 of PLA, Beijing 100098, China;

2. Engineering Institute of Engineering corps, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 210007, China)

Abstract:Based on the thermodynamics principle, a simple thermal model of steel plate and rubber cloth was established, thus their temperature changes in a day are calculated. The results show that the surface temperature of the rubber cloth can be acquired by solving the thermal equilibrium equation; the steel plate thickness can strongly affect the plate temperature changes within a day. (The thicker the plate, the smoother the temperature change is, and the more thin, the more it approaches to nature rubber.) The surface emissivity affects the temperature of the steel plate or the rubber cloth in the same way but the absorbing factor plays the opposite effect on the steel plate or the rubber cloth compared with the emissivity and it affects merely in daylight.

Key words:rubber cloth; thermal model; emissivity; sun radiation

1 热惯量

热惯量的定义是 3 个热特性参数的积的平方根,它体现了由这 3 个热特性参数共同影响的物质的某种特有属性.

$$P = \sqrt{\lambda c \rho}$$

式中, P 是热惯量; λ 是导热系数或热导率($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$); c 是定压比热容($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$); ρ 是物质密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

宏观来看,热惯量是物体阻止其温度变化幅度的物理量.当物体吸热或放热时,温度变化的幅度与物体的热惯量成反比,也就是热惯量大的物体,其温度变化的幅度小;热惯量小的物体,其温度变化的幅度大.对相同条件的瞬态导热而言,热惯量大的物体的温度变化就滞后于热惯量小的物体.对日温度变化而言,热惯量是反映变化幅度的内因.

微观来看,热惯量是阻止物体内部分子热运动变化的阻力,相同特性的物体,其热惯量相同.根据热惯量的这个特点,可以用热惯量来识别物体,比如

收稿日期:2010-05-10

作者简介:曹益晨(1983-),男,山东人,硕士研究生,主要研究方向为结构工程.

识别具有很大热惯量差异的钢板和天然橡胶布.地质学上就利用热惯量的差异做了许多监测地表土壤水分、识别植被类型的工作.结合遥感技术,相信利用热惯量识别和区分钢板与背景,在侦查和伪装上也会有很广的应用前景.

从热惯量的定义上看,它是物质传导和储存热量的能力. λ 越大,导热能力越强; $c\rho$ 越大,储热能力越强.热惯量大的物体,瞬态导热时温度变化速度慢,一日之内温度变化的幅度就小.

2 钢板和天然橡胶布传热模型的建立和求解

由于钢板和天然橡胶布的热惯量差异,导致其温度变化差别很大,建立其传热模型来分析其温度变化特性以及热特性参数的影响具有重要意义.为了简化分析,取最简单的平板为考察对象,假设钢板与天然橡胶布仅存在热特性的差别,尺度特性一致.由于平板厚度较平面展开度小得多,且平行于平板平面的热流较垂直热流小得多,故简化为一维模型.图 1 是简化的钢板和天然橡胶布传热模型,假设内边界绝热,外边界换热分为 3 部分.如果以 X 轴正方向热流为正,这 3 部分分别为:正的辐射出射度、

负的短波和长波辐照度以及与空气的对流换热,对流换热的符号取决于外边界温度和空气温度的差.

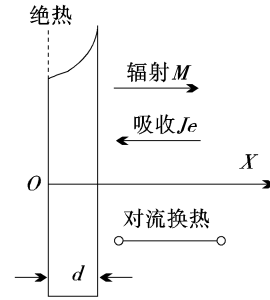


图 1 天然橡胶布或钢板简化传热模型

一维瞬态的导热微分方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \dot{\Phi}$$

其中, T 为温度(K); t 为时间(s); $\dot{\Phi}$ 为内热源($\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$); x 为垂直于平板表面的坐标轴(m). 或者写成

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} - \kappa \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} = Q$$

其中, Q 为内热源(K/s); κ 为热扩散系数($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$).

初始时假设平板温度均匀恒定为 T_0 ; 内边界绝热, 热流密度为零; 外边界热流密度是吸收辐照度、辐射出射度以及对流换热的代数和. 依据上述模型及其初始条件和边界条件, 得出了钢板或天然橡胶布在无内热源时的完整差分方程

$$\begin{cases} \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} - \kappa \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} = 0, & 0 < x < d, t > 0, \\ T(x, 0) = T_0, & 0 \leq x \leq d, t = 0, \\ (\frac{\partial T}{\partial x})_{x=0} = 0, & x = 0, t > 0, \\ -\lambda (\frac{\partial T}{\partial x})_{x=d} = \epsilon \sigma T^4 + h_c T - \alpha J_e - h_c T_a, & x = d, t > 0. \end{cases} \quad (1)$$

其中, T_0 为初始温度(K); d 为平板厚度(m); h_c 为对流热传导系数($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$); J_e 为外来辐射功率密度($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$); T_a 为空气温度(K); σ 为波尔兹曼常数; α 为外来辐射的吸收系数.

采用差分方程对微分方程离散化求解, 符号如下:

$$\begin{cases} T_1^{i+1} = (1-2r) T_1^i + 2r T_2^i \\ T_1^{i+1} = \frac{1}{(1+2r)} [r(1+r) T_{n-1}^i + (1-r^2) T_n^i + r(1-r) T_{(n+1)}^i + r^2 T_{n+2}^i] \\ T_{n+1}^{i+1} = \frac{1}{(1+2r)} [r^2 T_{n-1}^i + r(1-r) T_n^i + (1-r^2) T_{n+1}^i + r(1+r) T_{n+2}^i] \\ T_N^{i+1} = \frac{2\tau\epsilon\sigma}{\rho ch} (T_N^i)^4 + (1-2r-2r\frac{hh_c}{\lambda}) T_n^i + 2r T_{N-1}^i + 2r\frac{h}{\lambda} (\alpha J_e + h_c T_a) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $r = \kappa\tau/h^2$, 式(2)易于并行计算, 求解精度较高.

离散化区域 $\Omega = \{(x, t) \mid 0 \leq x \leq d, t \geq 0\}$; x 方向步长 $h = d/(N-1)$ (N 是某正整数); t 方向步长 $\tau = t/(R-1)$ (R 是某正整数); 采用符号 $T_n^i = T(x_n, t_i)$ 表示 (x_n, t_i) 处近似温度值, 也就是数值求解值. 最后完整的差分格式方程为

3 结果分析

根据模型对钢板和天然橡胶布一日内温度进行了计算,计算时所取参数为^[1]:钢板密度 $7\ 854\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$;导热系数 $60.5\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;比热 $434\ \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,厚度 $5\sim 100\ \text{mm}$;天然橡胶布密度取 $1\ 000\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$;导热系数取 $0.2\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;比热取 $1\ \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;厚度 $2\ \text{mm}$.

3.1 瞬态导热分析

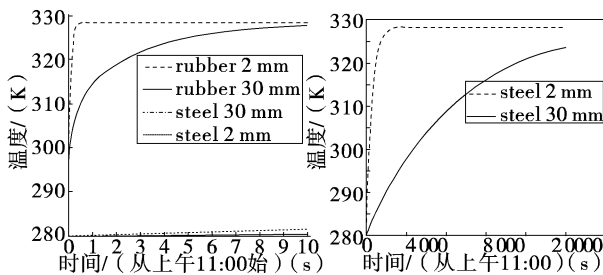


图2 由于热惯量差异引起的瞬态导热时的温度变化

计算瞬态导热时,钢板和天然橡胶布太阳能吸收系数均取 0.8 ,发射率均取 0.9 ,仅有厚度和热惯量的差别,计算从上午 $11:00$ 起,初始温度取 $280\ \text{K}$,假定外部环境保持不变.为便于分析,钢板和橡胶布都看作水平放置,日太阳辐照度、气温都看作是时间的正弦函数^[1]: $T_a = 10 + 20\sin(6.24/86\ 400t) + 273.15$; $E_s = 500(\sin(\pi t/12/3\ 600) + |\sin\pi t/12/3\ 600|)$; $E_{\text{sky}} = \epsilon\sigma T_a^4 = (a + b'\sqrt{e})\sigma T_a^4$. 式中, E_s 是太阳辐照度; E_{sky} 为天空辐照度; a 和 b' 为实验测得的参数^[2], $0.51 < a < 0.60$, $0.059 < b' < 0.065$,平均值 $a = 0.58$, $b' = 0.061$; e 为水蒸汽压(Pa).从图2中可以看出,天然橡胶布和钢板由于很大的热惯量差异使得其瞬态温度变化趋势差别明显: $2\ \text{mm}$ 的天然橡胶布仅用 $0.5\ \text{s}$ 就达到热平衡,作为对比计算的 $30\ \text{mm}$ 的天然橡胶 $10\ \text{s}$ 后也基本热平衡;但 $2\ \text{mm}$ 的钢板 $10\ \text{s}$ 后温度仅仅升高 $2\ \text{K}$, $30\ \text{mm}$ 的钢板 $10\ \text{s}$ 后温度几乎不变;仅对钢板而言, $2\ \text{mm}$ 的钢板 $30\ \text{min}$ 后达到热平衡, $30\ \text{mm}$ 的钢板要达到热平衡需要 $5\ \text{h}$;对于一面绝热的模型,天然橡胶布和钢板的热平衡温度是一样的,与厚度,热惯量都无关.

热惯量是导致瞬态导热温度差别的内在原因,相同厚度下,热惯量大的物体阻止其自身温度变化的能力强,温度变化相对缓慢;厚度对温度变化的影

响很大,同样热惯量条件下,厚度越大,温度变化越缓慢,这是由于厚度大的物体热容量大的缘故;而且,由于天然橡胶布热惯量较小,天然橡胶布厚度对温度变化的影响相对较小.

3.2 天然橡胶布和钢板日温度变化差异分析

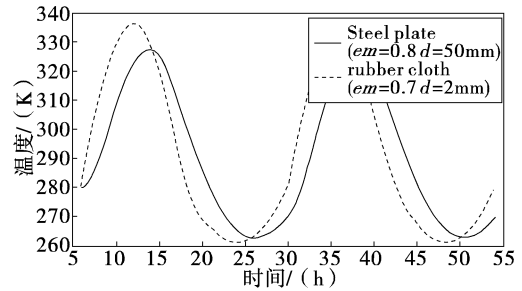


图3 日温度变化理论计算对比

图3~图5是理论计算的天然橡胶布和钢板表面日温度变化结果,计算时太阳能吸收系数均取 0.8 .根据图3,由于巨大的热惯量差异,白天天然橡胶布温度上升较快,最高温度较高,且最高温度出现在刚过正午时刻;下午以后天然橡胶布温度下降也较快,最低温度较低,且出现在刚过气温最低的时刻.而对于钢板而言,其温度变化率较小,最高温度和最低温度也较小,且达到最高温度和最低温度的时刻相对与环境辐照度极值也有所滞后.这是由于天然橡胶布热惯量很小,达到热平衡的速度很快,而钢板性质刚好相反的内在原因造成的.

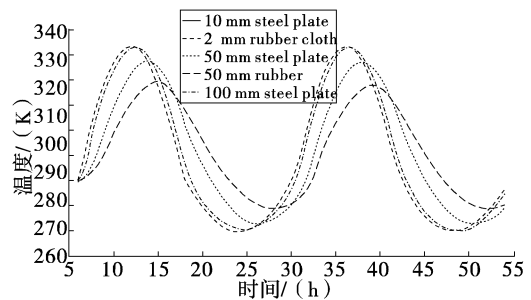


图4 厚度对日温度变化的影响

图4说明了厚度对钢板表面日温度变化的巨大影响:厚度越大,钢板热容量就越大,日温度变化趋缓,变化幅度也较小,极值温度时刻相对于环境辐照度极值时刻的延迟也越久,与天然橡胶布日温度变化的差异也越明显;相比而言,厚度对天然橡胶布的影响就几乎可以忽略不计了($2\ \text{mm}$ 和 $50\ \text{mm}$ 厚橡胶的温度变化曲线几乎完全重合).值得注意的是,如果钢板的厚度也很小,尽管热惯量差别很大,它的日温度变化和天然橡胶布差别也会很小,经计算,在

以上的计算条件下,5 mm 厚的钢板和天然橡胶布最大日温差也已经小于 5 °C,所以薄金属蒙皮天然橡胶布和钢板的日温度变化差别也十分明显.

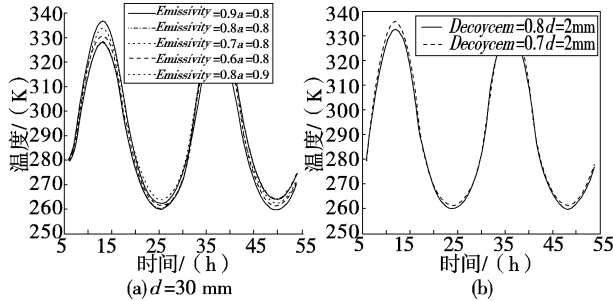


图5 发射率对日温度变化的影响

钢板或天然橡胶布表面发射率对温度变化影响是一致的:发射率越低,白天温度变化就越快,夜晚温度变化就越慢,日温度也就越高,如果仅有发射率的差别,一日内最大温差的时刻也是温度极值和环境照度极值时刻.

另外,太阳能吸收系数仅在白天有太阳辐照度时有影响,吸收系数增大,温度变化很快,白天温度也很高(图 5a).天然橡胶布和钢板受太阳能吸收系数的影响也是一致的.

3.3 瞬态导热模型和稳态导热模型比较

假设钢板或天然橡胶布热平衡,在绝热边界条件下,根据能量守恒原理,有

$$\epsilon\sigma T^4 + h_c T = \alpha J_e + h_c T_a \quad (3)$$

一日内热平衡温度变化可以根据式(3)解出,绘于图 6.可以发现,天然橡胶布模型温度和热平衡温度几乎没有差别.原因可以这样理解,天然橡胶布达到热平衡温度所需时间很短,其瞬态温度随时间的变化率与外部太阳辐射、背景辐射随时间的变化率相比趋于无穷,因此,天然橡胶布一日内温度变化近似可以看作是由在每个不同时刻持续较短时间的稳态导热过程的叠加引起的.所以对于一面绝热的天然橡胶布模型而言,天然橡胶布温度日变化利用式(3)计算即可,误差可以忽略.不仅如此,计算表明,当钢板厚度小于 2 mm 时,天然橡胶布和钢板温度变化基本已无差别,也就是当钢板厚度趋于零时,钢板日温度变化也趋向于热平衡情况下的日温度变化,这是合理的.

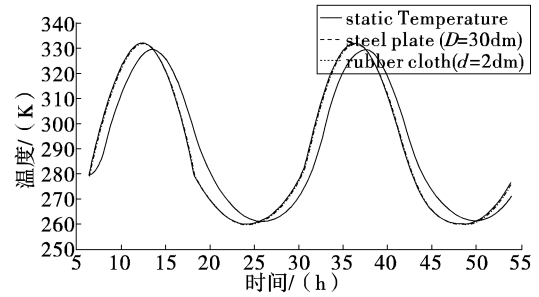


图6 瞬态导热温度变化和稳态导热温度变化的比较

4 结 论

根据天然橡胶布和钢板的简化传热模型,得到了一般情况下钢板和天然橡胶布日温度变化结果,结果表明:

(1)天然橡胶布日温度变化可以看作稳态导热的结果,其表面温度可以通过热平衡方程求出,且误差可以忽略不计.

(2)钢板表面温度日变化与天然橡胶布温度变化以及热平衡时的温度变化差别较大,受厚度(三维钢板时为体积)影响最大,随厚度增加,温度变化明显趋缓;天然橡胶布温度日变化受厚度影响很小.

(3)表面发射率对钢板或天然橡胶布温度变化有相同的影响,发射率越低,白天温度就越易升高,夜晚温度就越不易降低,一日内表面温度也就越高.太阳能吸收系数仅在白天具有太阳辐射时对温度有影响,它与发射率对温度的影响刚好相反.

参考文献

- [1] 叶宏,张栓勤,庄双勇,等.相变材料模拟金属板热特性的理论设计与实验验证[J].兵工学报,2006,27(3).
- [2] Pieter A Jacobs.地面目标和背景的热红外特性[M].北京:国防工业出版社,2002.
- [3] 叶宏,江利锋,王西耀,等.相变材料模拟金属构件热特性的数值研究[J].计算物理,2006,23(4).
- [4] 宣益民,吴轩,韩玉阁.坦克红外热像理论建模和计算机模拟[J].弹道学报,1997,9(1).
- [5] 韩玉阁,李强,宣益民.装甲车辆热特征试验研究[J].弹道学报,2002,14(1).
- [6] 何超,吕绪良,沙建军,等.洞库门一维温度模型的建立和解法[J].红外技术,2008,30(10).
- [7] 陆金甫,关治编.偏微分方程数值解法[M].2版.北京:清华大学出版社,2003.
- [8] 杨尧,吴振森,姚连兴.从红外辐照热平衡方程求解海面温度[J].红外与毫米波学报,2003,22(5).