

辐射条件下航天器热控制系统的凝固传热^①

巨永林 张玉文 陈钟硕

(西安交通大学)

内容摘要: 本文研究了具有辐射肋的半无限大区域内凝固传热问题,得出了固相区和肋片区中的温度分布,并求出了固液界面位置,表面温度及散热量随时间的变化规律。结果表明,具有辐射肋的辐射器散热量比无肋时大 20%—80%,这对强化航天器热控制系统的散热有重要的参考价值。

一、引言

随着航天技术的进步,航天器热控制系统的设计得到迅速发展。在周期性工作的电子设备中,可以利用固液相变来实现有效的冷却。当电子设备工作时,相变材料吸收电子元件发出的热量而熔化,当电子设备停止工作时,由于辐射器向外散热,相变材料就会凝固。这样,由于相变材料具有固定的熔点,可以使发热量波动的仪器温度稳定在熔点附近。在航天器上,由于空气极其稀薄,辐射换热就成为航天器向外界散热的唯一途径。在电子设备工作间歇,只有通过辐射向外散热,于是就形成了一个辐射冷却条件下的凝固问题。陈等求解了辐射冷却条件下半无限大区域内的凝固问题^[1],张曾求解了周期性热流作用下的熔化问题^[2]。为了进一步强化传热,我们考虑在辐射器上安装肋片。众所周知,利用肋片增强散热是工程中一行之有效的方法。本文求解的就是在电子设备工作的间歇中具有辐射肋的航天器热控制系统相变材料的凝固传热,并对肋片尺寸的合理性进行了探讨。本文结果对航天器热控制系统的设计有一定的参考价值。

二、物理模型及数学描写

假定电子设备工作时,已使相变材料完全融化,并且液态的相变介质温度正处于熔点温度 T_m ,也就是液体中不存在过热温差。辐射器面对的是绝对零度的黑体空间,要求解的就是固相区和肋区中温度分布。图 1 给出了具有辐射肋的相变材料热控制系统图。图 2 给出了相应的坐标及温度剖面示意图。

为了便于对问题进行分析,作如下假定:

- (1) 肋根温度为均匀的,即肋片中温度仅随肋高变化。
- (2) 肋片是漫灰体,其导热系数和辐射率不随温度变化。
- (3) 肋片为等截面的矩形肋,布置情况如图 1 所示。

我们取其中一对肋片加以研究,问题的数学描写及边界条件如下:

固相区:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = a_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} \quad 0 < y < s(t), t > 0 \quad (1)$$

① 本课题受国家自然科学基金资助

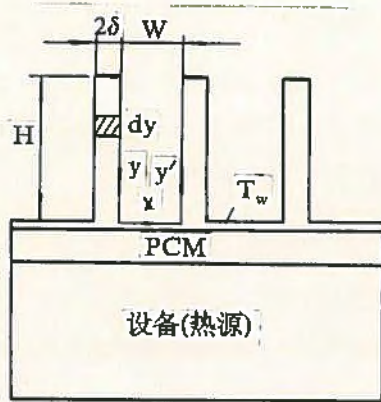


图1 控制系统图

$$K_s \frac{\partial T_s}{\partial y} = Q_r(t)$$

$$T_s = T_m$$

$$K_s \frac{\partial T_s}{\partial y} = \rho_s L_s \frac{ds(t)}{dt}$$

$$T_s(y, t) = T_m$$

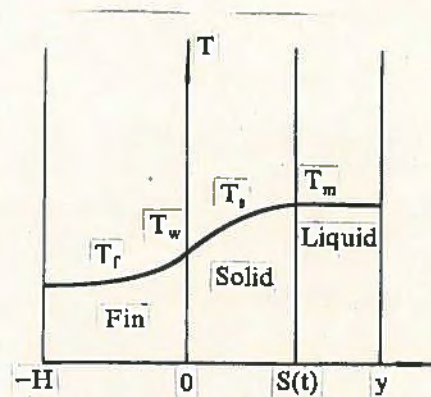


图2 温度剖面示意图

$$y > 0, \quad t > 0 \quad (2)$$

$$y = s(t), \quad t > 0 \quad (3)$$

$$y = s(t), \quad t > 0 \quad (4)$$

$$y > 0, \quad t = 0 \quad (5)$$

肋片区:

$$\frac{\partial T_f}{\partial x} = a_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2} + \frac{\epsilon}{1-\epsilon} [\sigma T_f^4 - J_1(y, t)] \frac{1}{\rho_f C_p \delta} \quad -H < y < 0, t > 0 \quad (6)$$

$$T_f = T_w \quad y = 0, t > 0 \quad (7)$$

$$-K_f \frac{\partial T_f}{\partial y} = \epsilon \sigma T_f^4 \quad y = -H, t > 0 \quad (8)$$

$$T_f = T_m \quad -H < y < 0, t = 0 \quad (9)$$

$$J_1(y, t) = \epsilon \sigma T_f^4 + (1-\epsilon) \left[\int_0^H J_1(y, t) dF_{y-y_1} + \int_0^\infty J_2(x, t) dF_{y-x} \right] \quad (10)$$

$$J_2(x, t) = \epsilon \sigma T_w^4 + (1-\epsilon) \left[2 \int_0^H J_1(y, t) dF_{x-y} \right] \quad (11)$$

$$Q_r(t) = \left[2 \int_0^H J_1(y, t) dF_{y-y_0} + \int_0^\infty J_2(x, t) dF_{x-y_0} \right] / (w + 2\delta i) \quad (12)$$

由于方程(2)(7)(12)使这两组方程相互耦合,必须联立求解。其中相变问题用积分近似法求解,肋片区温度分布用数值方法求解。

三、积分近似解和数值解

由于 $Q_r(t)$ 随时间变化,因此,固相区方程组实质上就是在第二类边界条件下,表面热流随时间任意变化的非线性方程组。T. R. GOODMAN 曾提出一种近似积分法“热平衡积分法”^[5]来求解固相区温度分布和固液界面位置,具体结果如下:

表面温度分布:

$$T_w(t) = T_s(0, t) = \left[-\frac{1}{4} + \frac{1}{4}(1 + 4\sigma)^{\frac{1}{2}} + \frac{\sigma}{2} \right] L_s / C, \quad (13)$$

固液界面位置:

$$s(t) = \sigma K_p L_p / (Q_r(t) C_p) \quad (14)$$

$$\text{其中: } \sigma = \tau - \frac{\tau^2}{2!} + \frac{5\tau^3}{3!} - \frac{51\tau^4}{4!} + \frac{827\tau^5}{5!} \quad (15)$$

$$\tau = \frac{Q_r(t) C_p}{K_p L_p^2 \rho} \int_0^t Q_r(t) dt \quad (16)$$

本文即用上述公式计算固液界面位置及表面温度,可用数值方法求解。

对肋片区中的数学描写用控制体积分法得到全隐格式的差分方程组。由于固相区和肋片区两组方程相互耦合,每一时刻的表面温度 $T_w(t)$,有效辐射 $J_1(y,t)$ 是假定的,需迭代求解,具体步骤略。

四、计算结果及分析

在实际应用中,首先根据相变材料的潜热和熔点选择合适的相变材料,根据文献^[4]介绍,十八烷($C_{18}H_{38}$)已被用于美国“阿波罗 15 号”登月系统的月球车上,所以本文将以十八烷为例加以计算,关于十八烷的物性见参考文献^[6],辐射肋的材料选为锻铝,其物性见文献^[6]。程序具有通用性,对任何材料都适用。在本文的求解中没有引入任何关于相变材料的假定。所以,本文的结果对任何相变材料都是适用的。

图 3、图 4、图 5,绘出了黑度 $\epsilon=0.8$ 时不同肋片尺寸 w/H 时固液界面位置,辐射器温度,辐射热流密度随时间的变化规律,由图可见,随 w/H 下降,即肋片间距同肋高之比越小,凝固速度越快,表面温度下降越快,热流密度也越大,所以,为加大相变材料热控制系统的排热能力,应减小 w/H ,但由图中可见,随 w/H 减小,强化的效果逐渐减缓。 $w/H=0.2, w/H=0.4$ 时变化规律几乎一致,所以是否加肋,如何选择肋片尺寸要视材料黑度的不同综合考虑而定。图中也示出了无肋时的计算结果,强化的效果是十分明显的,对 $\epsilon=0.8$ 的材料而言,加肋比无肋时散热量增大了 20—60% (单位肋基面积而言)。

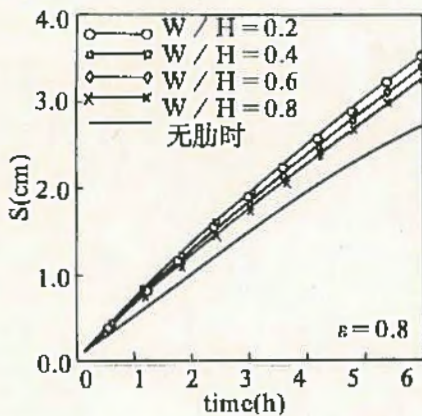


图 3 固液界面位置

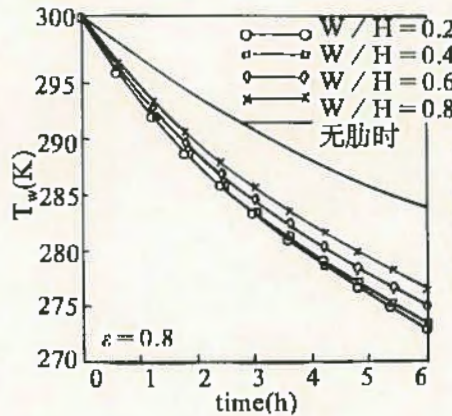


图 4 辐射器温度

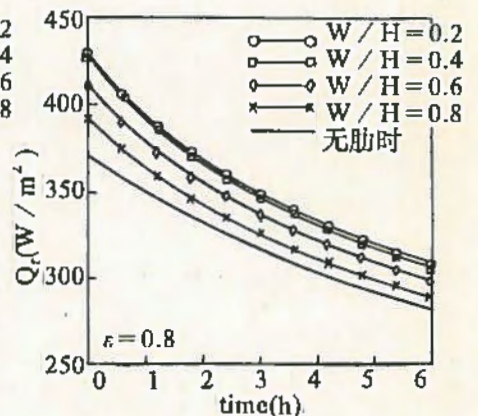


图 5 辐射热流密度

为了说明材料的黑度和肋片尺寸对强化散热的影响,图 6、图 7 绘出了 $w/H=0.8$ 时不同黑度 ϵ 下固液界面位置,辐射器温度随时间的变化规律,随着 ϵ 的增大,辐射器温度下降加快,凝固速度也加快,但对于大黑度时效果不明显,说明加肋对黑度较小的材料强化效果明显,对黑度较大的材料不明显。为说明这点,绘出 $w/H=0.2$ 时固液界面位置,辐射器温度随时间的变化情况,如图 8、图 9,很明显在 $\epsilon=0.6$ 时 $w/H=0.2$ 比 $w/H=0.8$ 时强化作用最明显,而在 $\epsilon=0.9$ 时,两者相差不大,说明加肋可明显提高小黑度 ($\epsilon=0.6$) 材料的辐射热流密度,也就是

说,相当于增大了等效黑度。对于黑度较大的材料($\varepsilon=0.9$),无需加很多的肋,因加肋对其散热几乎没什么影响。

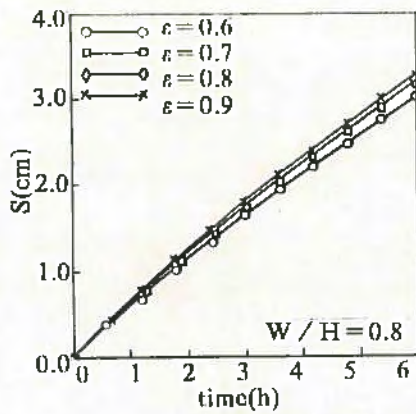


图6 固液界面位置

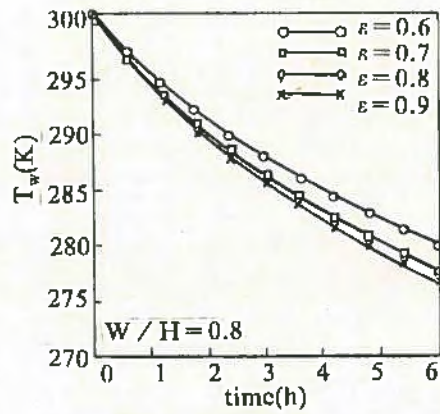


图7 辐射器温度

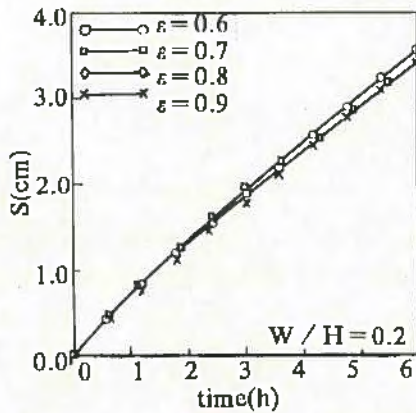


图8 固液界面位置

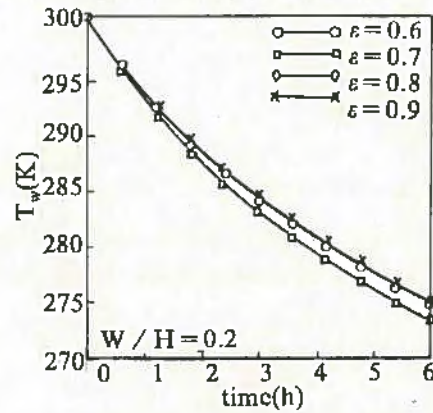


图9 辐射器温度

参考文献

- [1] 陈钟颀,张玉文,辐射条件下半无限大区域内凝固问题的分析解,全国高等学校工程热物理第四届学术会议论文集,杭州,1992
- [2] 张玉文,陈钟颀,第二类边界条件下平板内熔化问题的半精确解,中国工程热物理学会第七届年会论文集,南京,1990
- [3] GOODMAN, T. R., The Heat-Balance Integral and Its Application to Problems Involving a Change of Phase, Trans, ASME, Vol. 80, pp. 332-342, 1958
- [4] 闵桂荣,郭舜,《航天器热控制》,科学出版社,1985
- [5] 张玉文,有分散热源时矩形腔内熔化传热的研究,西安交通大学博士论文,1991
- [6] 马庆芳等编,《实用热物理性质手册》,中国农业机械出版社,1986