

热防护发汗冷却控制

杨学实

(航天工业部)

摘要

发汗冷却是热防护的重要手段。本文提出发汗冷却控制模型。利用有限元的受热平衡,推导出可变域中发汗控制微分方程式。在非烧蚀情况下,采用氢作为发汗剂对方程式进行了验证。计算结果表明,该数学模型符合实际物理过程,并为该类型的分布参数系统的理论研究提供了数值依据。

一、前言

发汗冷却与烧蚀冷却可以提供再入飞行器的热防护,这是克服热障的重要方法。许多研究者对此进行了大量工作^[6-11]。发汗冷却的主要手段是阻止一部分热流进入结构内部。

对热流的控制问题,文献[1]提出利用控制再入速度 $v(t)$ 达到对隔热层外表面烧蚀的控制。文献[4]对一个碳化烧蚀隔热系统作数值分析的同时,给出了舱体内壁温度受控的边界条件。上述两种控制方法的控制参数均出现在边界条件中。

本文应用 Curry^[5] 研究碳化烧蚀体内产生汽态引射物的模型和方法,提出表面具有收缩(烧蚀)或伸长(膨胀)的热层发汗控制物理模型。据此模型,在隔热层内取出一有限元素,分析它的热平衡,推导出可变域发汗控制微分方程式。并对边界条件进行了讨论,得到控制参数既出现在边界条件中,也出现在方程右端的分布参数系统的结果。

二、物理及数学模型分析

1. 物理模型

热层表面是否烧蚀,取决于材料性能和气动加热条件。本文从一般情况出发,只讨论具有烧蚀或膨胀的多孔材料热层。热层的外边界受到气动加热 $Q(t)$,表面后退距离为 $S(t)$,热层初始厚度为 l 。冷却剂从内壁处经过多孔材料内部流向外表面,同时注入边界层气流中。

热层材料为透气性固体。冷却剂流经热层结构内部,没有质量的增加和减少,也不发生任何化学反应。就小发汗量而言,冷却剂与结构材料之间能够进行充分的热交换,保持局部热平衡。

2. 数学模型

1) 建立方程 坐标选取如图 1. 将厚度为 l 的热层等分成 NP 个节点. 在任意两个相邻的节点 i 和 $i + 1$ 处选取垂直于 y 轴方向两个单位截面, 它们之间的距离为 Δy . 两个截面在 Δt 时间过程中分别从图 2 的虚线位置移动到实线位置. 整个热层内各点的移动规律 \dot{S}_i 为线性规律分布 (图 3). 热的传递只在 y 方向进行, 即一维传热. 所有的受热项如图 2 所示, 根据前述物理模型及假设, 体元内热能随时间的改变只与左右界面能量传递有关, 于是

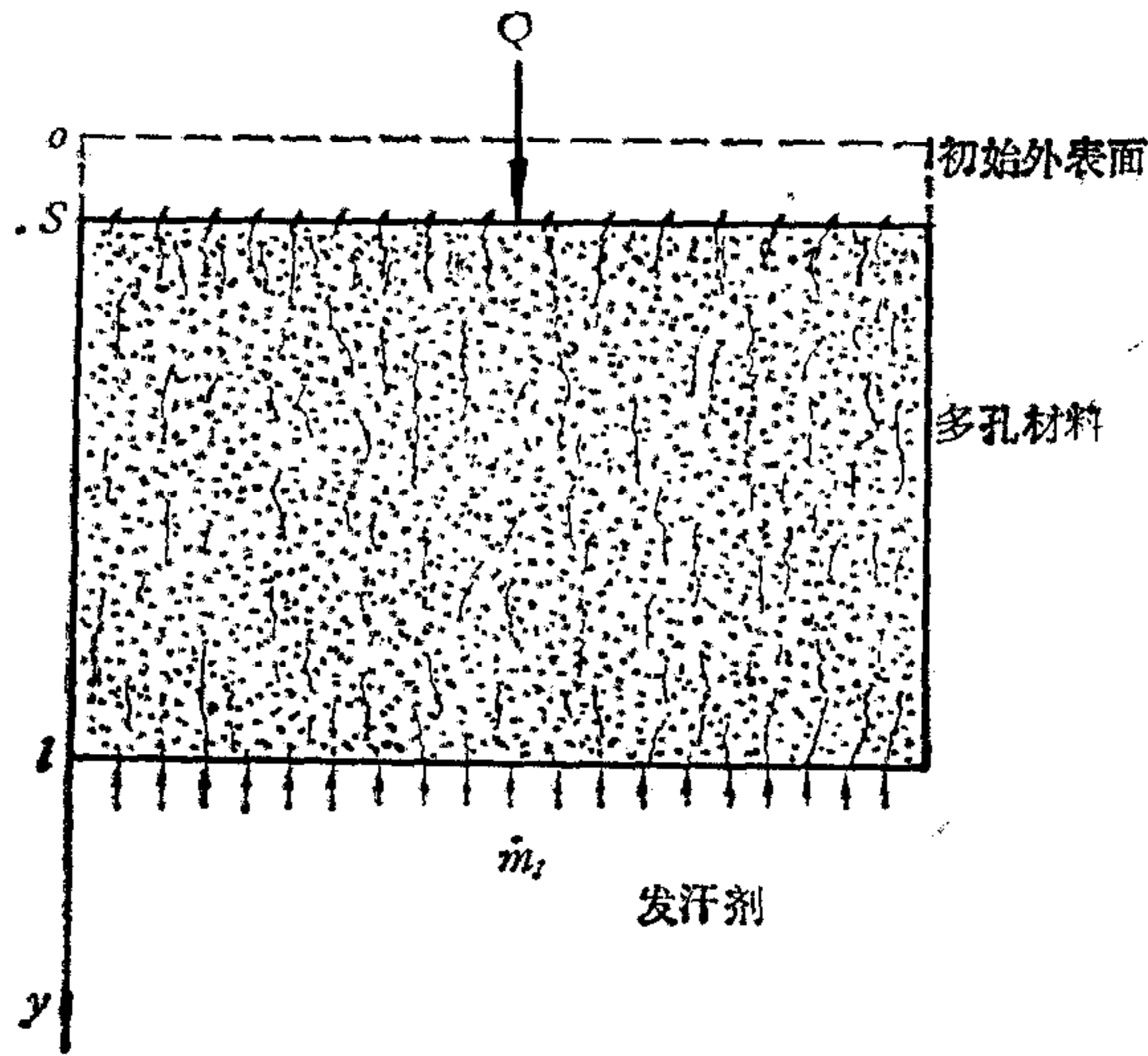


图 1 烧蚀材料内部发汗模型

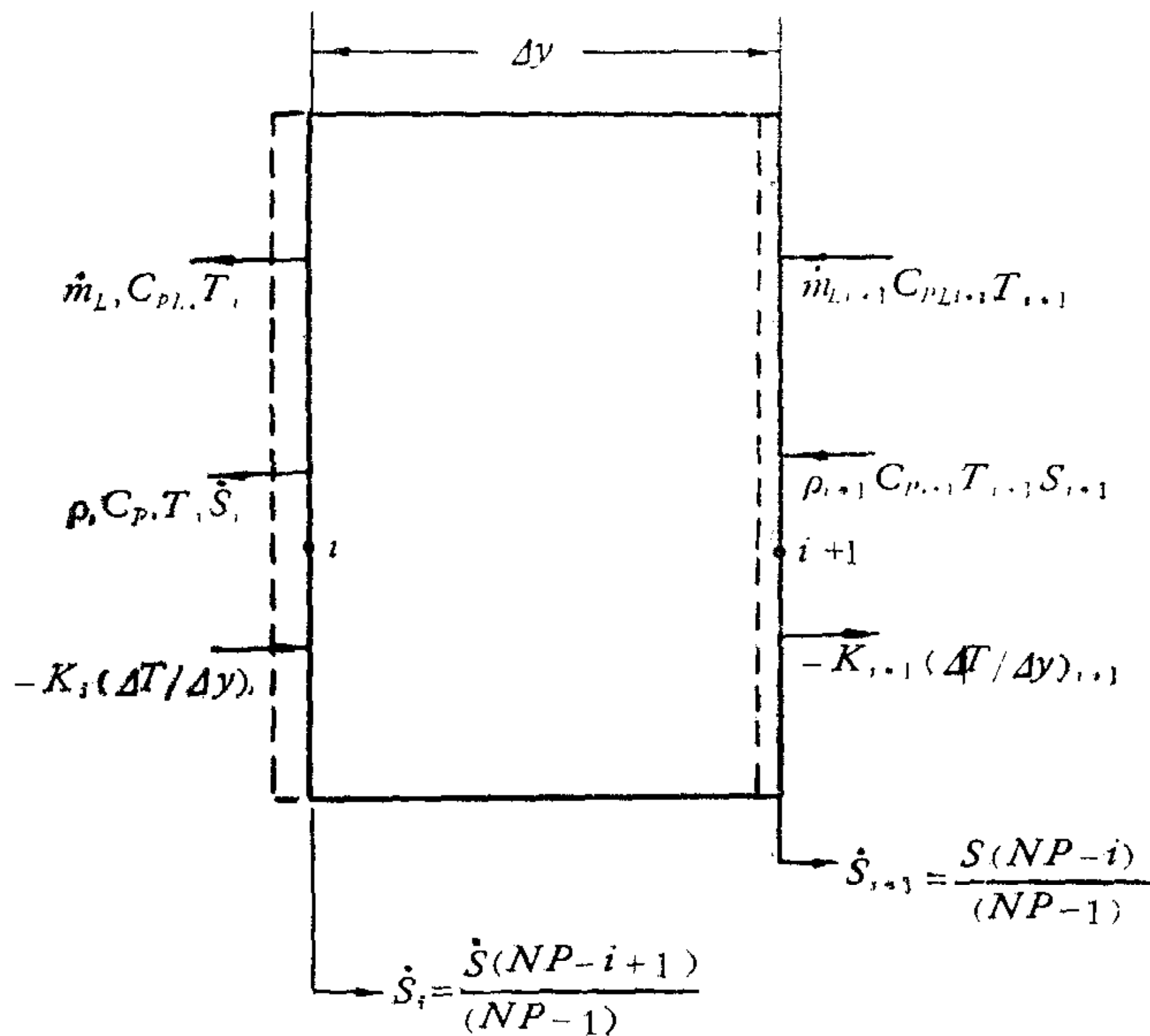


图 2 有限元热平衡示意图

$$\frac{\partial}{\partial t} (\Delta y \rho_i C_{Pi} T_i) = K_{i+1} \left(\frac{\Delta T}{\Delta y} \right)_{i+1} - K_i \left(\frac{\Delta T}{\Delta y} \right)_i + \dot{m}_{Li+1} C_{PLi+1} T_{i+1} - \dot{m}_{Li} C_{PLi} T_i + \rho_{i+1} C_{Pi+1} T_{i+1} \dot{S}_{i+1} - \rho_i C_{Pi} T_i \dot{S}_i. \quad (1)$$

其中 \dot{m}_L 为控制器所控制的冷却剂通过热层时, 单位时间单位面积上冷却剂的质量; C_{PL} 为冷却剂比热; 其余各物理量为热层的相应物理量.

当表面后退距离为 $S(t)$ 时, 有

$$\frac{d}{dt} (\Delta y) = \frac{d}{dt} \left(\frac{l - S(t)}{NP - 1} \right) = \frac{-\dot{S}(t)}{NP - 1},$$

其中 l 为热层初始厚度; $S(t)$ 为烧蚀厚度; $\dot{S}(t)$ 为烧蚀率; 而

$$S(t) = \int_0^t \dot{S}(t) dt.$$

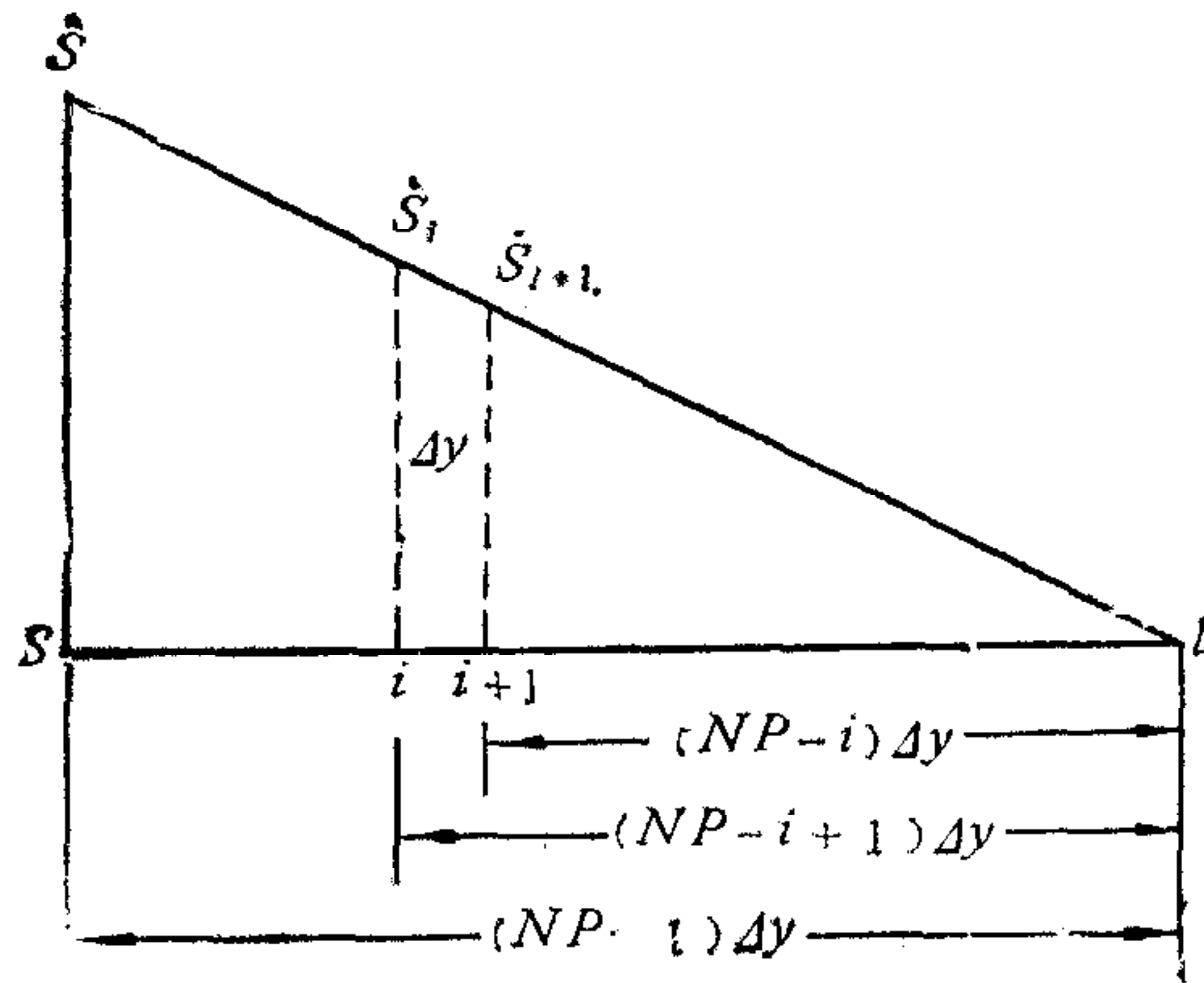


图3 可变域中后退率分布

则(1)式为

$$\begin{aligned} \Delta y \frac{\partial}{\partial t} (\rho_i C_{Pi} T_i) - \rho_i C_{Pi} T_i \frac{\dot{S}(t)}{NP - 1} &= K_{i+1} \left(\frac{\Delta T}{\Delta y} \right)_{i+1} - K_i \left(\frac{\Delta T}{\Delta y} \right)_i \\ &+ \dot{m}_{Li+1} C_{PLi+1} T_{i+1} - \dot{m}_{Li} C_{PLi} T_i \\ &+ \rho_{i+1} C_{Pi+1} T_{i+1} \dot{S}(t) \frac{NP - i}{NP - 1} - \rho_i C_{Pi} T_i \dot{S}(t) \frac{NP - i + 1}{NP - 1}. \end{aligned} \quad (2)$$

对(2)式进行分析整理, 左端第二项与右端第五、六项可以合并,

$$\begin{aligned} \rho_{i+1} C_{Pi+1} T_{i+1} \dot{S}(t) \frac{NP - i}{NP - 1} - \rho_i C_{Pi} T_i \dot{S}(t) \left(\frac{NP - i + 1}{NP - 1} - \frac{1}{NP - 1} \right) \\ = (\rho_{i+1} C_{Pi+1} T_{i+1} - \rho_i C_{Pi} T_i) \dot{S}(t) \frac{l - y}{l - S(t)}. \end{aligned}$$

将上式代入方程式(2)中, 全式除以 Δy , 当 $\Delta y \rightarrow 0$ 取极限, 得到

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \int_{T_0}^T C_P dT \right) &= \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\dot{m}_L \int_{T_0}^T C_{PL} dT \right) \\ &+ \dot{S}(t) \frac{l - y}{l - S(t)} \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \int_{T_0}^T C_P dT \right). \end{aligned} \quad (3)$$

对于固体材料,密度 ρ 和比热 C_P 为常数值. 导热系数 K 是温度的函数,在所讨论的温度场中温度变化不太剧烈时,可视为常数. 冷却剂质量损耗率 \dot{m}_L 在热层内处处为常量(一维). 同时,比热 C_{PL} 是温度和压力的弱函数,当取作与 y 无关的量时,方程(3)化为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \beta \frac{\partial T}{\partial y} + \dot{S}(t) \frac{l-y}{l-S(t)} \frac{\partial T}{\partial y}, \quad y \in [S(t), l], \quad (4)$$

其中 $\alpha = K/\rho C_P$; $\beta = \dot{m}_L C_{PL}/\rho C_P$. 上式右端第二项为发汗剂在热层内流动引起的热项. 第三项为动边界引起的热项.

2) 边界条件 在外边界处,表面受到边界层加热. 冷却剂到达外表面处为气体时,使气动加热受到阻塞,实际净加热为 $Q(\dot{m}_L(t))$. 假定烧蚀物的潜热为 L ,不计辐射加热等,略去靠近壁面的等温剪切层的热防护作用(大引射率情况),根据能量平衡,表面边界条件为^[1]

$$\rho L \dot{S}(t) - \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) \Big|_{y=S(t)} = Q(\dot{m}_L(t)). \quad (5)$$

烧蚀温度 T_m 为已知时,上式即为确定烧蚀率 $\dot{S}(t)$ (或后退距离 $S(t)$) 的关系式^[4].

在许多发汗冷却研究中,选用水作为发汗剂. 当热层内温度和压力条件允许时,水发生汽化. 汽化起始与终了一般应在某一范围内进行. 如果这一范围很小,则认为在界面 $y = y_1$ 处全部汽化,连结条件是

$$-\left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) \Big|_{y_1^-} = -\left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) \Big|_{y_1^+} + \dot{m}_L \cdot \Delta h_L, \quad (6)$$

其中 Δh_L 为汽化热.

在内边界,只计入冷却剂从控制器贮箱到达内边界界面处的吸热. 否则,认为绝热. 则

$$-\left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) \Big|_{y=l} = \dot{m}_L (\Delta h_N - \Delta h_C), \quad (7)$$

其中 Δh_C 为贮箱内冷却剂热容; Δh_N 为内壁界面处冷却剂热容.

3) 初始条件 热层受热后,温度将逐渐升高,在 $t = t_1$ 时刻达到烧蚀温度,此时

$$t = t_1, \quad S(t_1) = 0, \quad T = T(t_1, y). \quad (8)$$

3. 非烧蚀情况 ($\dot{S}(t) = 0$)

多数情况下,发汗冷却表面不烧蚀. 在固定域 $[0, l]$ 内方程(4)为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \beta \frac{\partial T}{\partial y}, \quad y \in [0, l]. \quad (9)$$

定解条件如下:

$$\begin{aligned} t = 0, \quad T &= \varphi(y), \quad y \in [0, l], \\ t > 0, \quad -\left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) \Big|_{y=0} &= Q(\dot{m}_L(t)) \\ &-\left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) \Big|_{y=l} = \dot{m}_L (\Delta h_N - \Delta h_C), \end{aligned}$$

其中 $\varphi(y)$ 为初始温度曲线. 由此看出,热防护发汗控制问题是一种控制参数 \dot{m}_L 不仅出现在边界条件中,同时出现在方程右端的分布参数系统.

4. 温度场的测量

在热层内安放 n 个热电偶, 则温度场是可以测量的, 测量方程

$$\mathbf{y}(t) = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \int_{\Omega} T(t, y) \begin{pmatrix} a_1(y) \\ a_2(y) \\ \vdots \\ a_n(y) \end{pmatrix} dy, \quad (10)$$

其中

$$a_i(y) = \begin{cases} 1, & y \in [y - \varepsilon, y + \varepsilon], \\ 0, & y \notin [y - \varepsilon, y + \varepsilon]. \end{cases}$$

若点测量, 有 $a_i(y) = \delta(y - y_i)$.

测量是有穷维的, 甚至 $n = 1$. 通过对发汗量 \dot{m}_L 的控制, 使 (y_1, y_2, \dots, y_n) 中某一测量值在超过事先规定的特定温度以后, 系统启动, 达到对温度控制的目的. 控制方框图如图 4 所示.

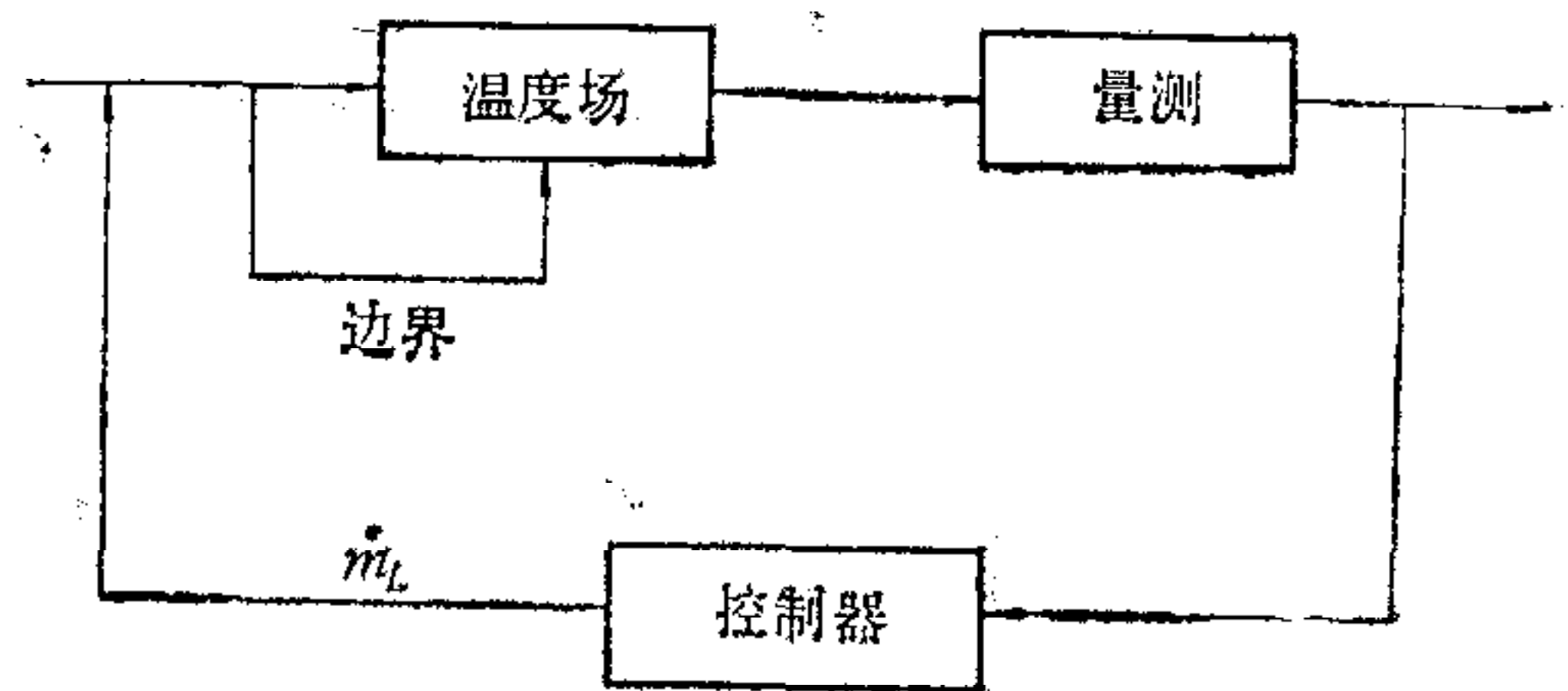


图 4 控制框图

三、数值计算

在发汗冷却问题中, 边界层的加热是由阻塞效应来调节的. 在阻塞模型中, 渗出的发汗剂改变了周围的边界层温度剖面, 而且部分地阻挡热流进入表面. 流向表面总热流被阻塞的部分依赖于不同的发汗剂 (图 5). 作为例子, 本文计算中选氮为发汗剂.

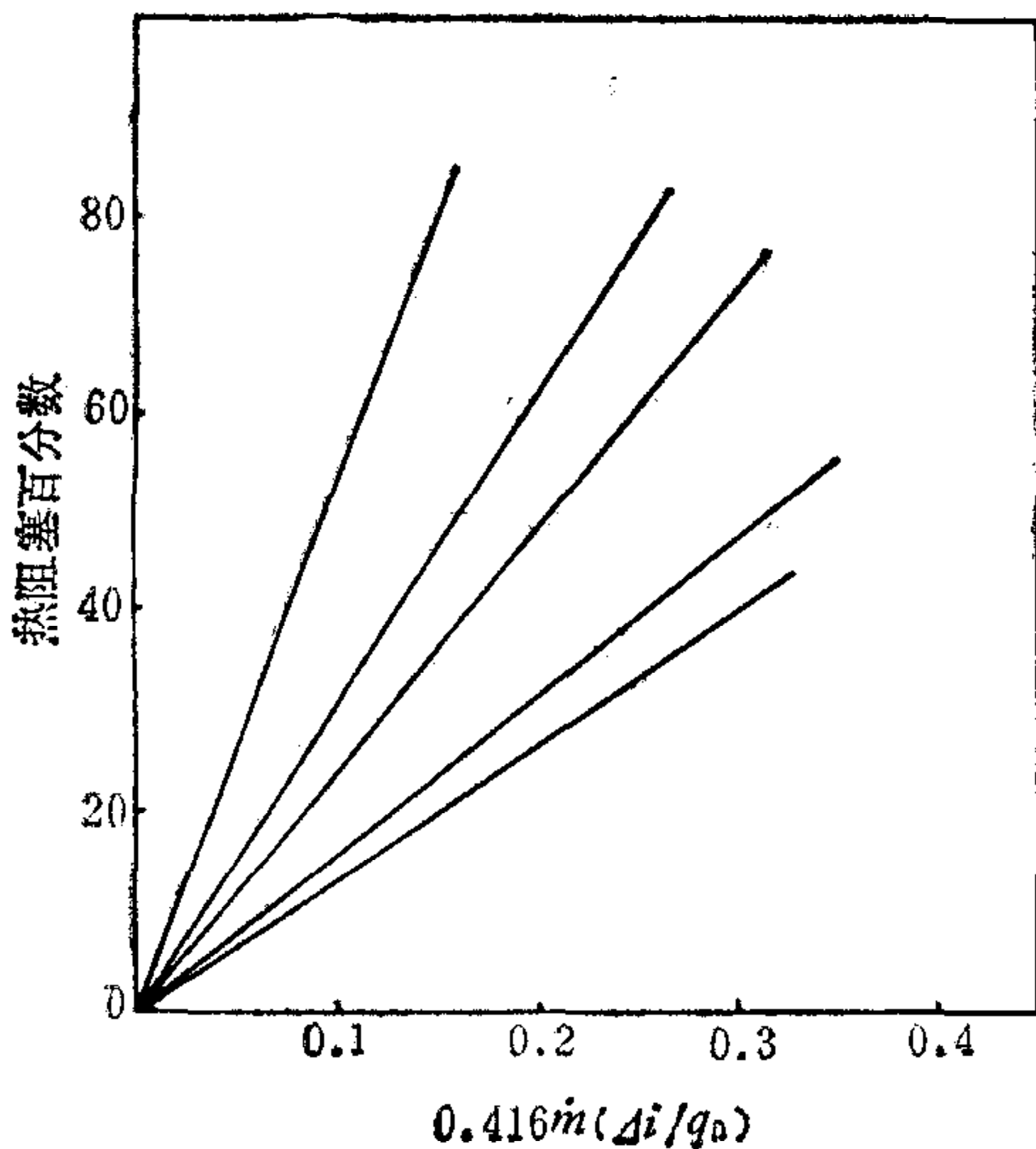


图 5 不同发汗剂阻塞效应比较^[11]

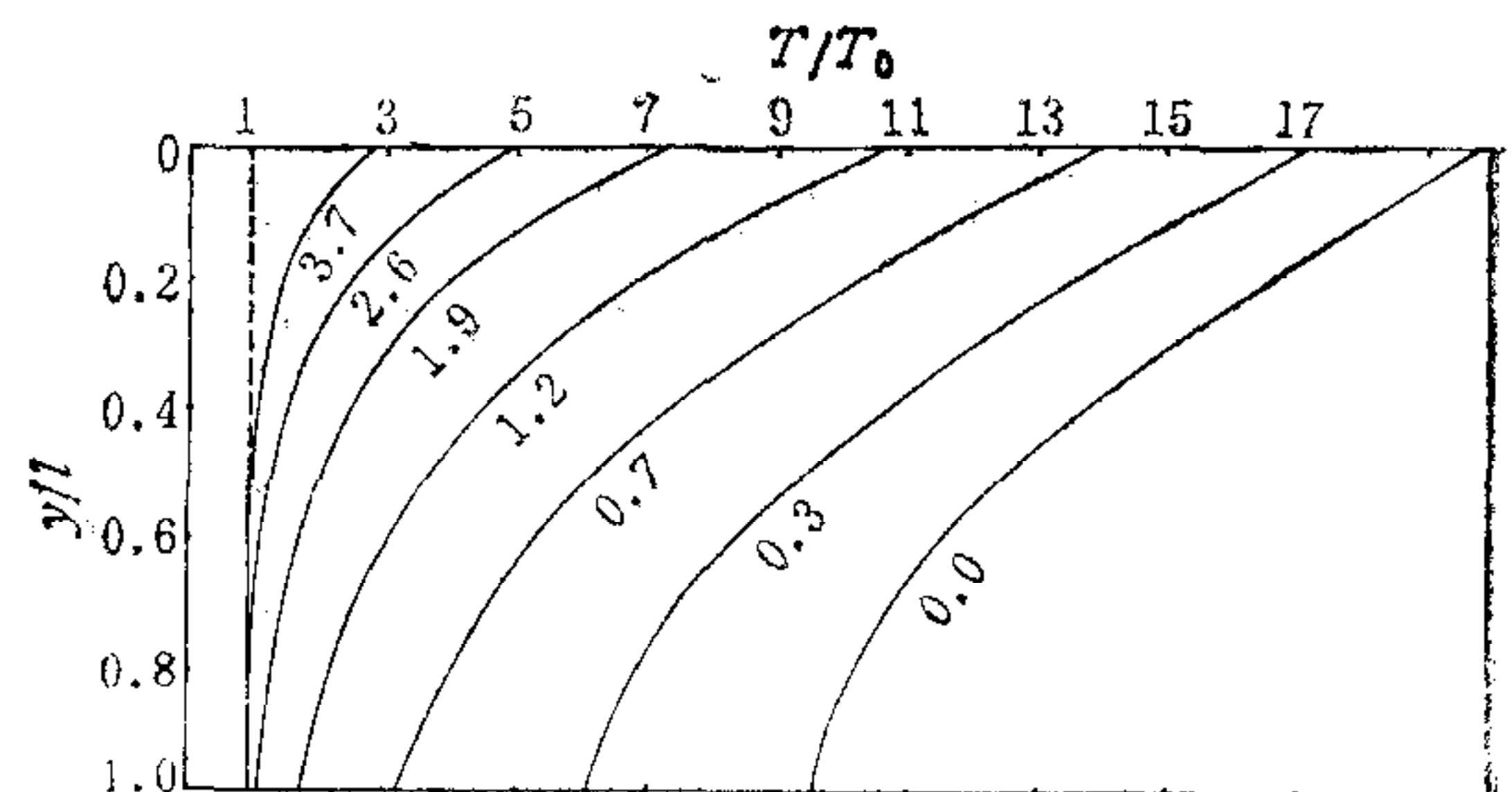


图 6 热层温度随 TPC 变化

对方程(9)采用六点差分格式. 初始条件中 $\varphi(y) = \text{Const.}$. 在计算过程中, 使用无量纲组合参数 $TPC (= \dot{m}_L C_{PL} l / 2K)$ 作为发汗控制参数, 其值可以取得很大 (以边界层不分离为条件). 但另一无量纲组合参数 $BT = TPC \cdot \Delta y / l$ 必须小于 1, 否则计算结果不合理.

外边界加热 $Q(\dot{m}_L)$, 根据阻塞系数 ϕ ^[4,7], 取 $Q(\dot{m}_L) = q\phi$,

其中

$$\phi = 1 - \left[0.724 \frac{h_e}{q_0} \dot{m}_L - 0.13 \left(\frac{h_e}{q_0} \dot{m}_L \right)^2 \right], \quad q = q_0 \left(1 - \frac{h_w}{h_r} \right) \left(\frac{h_e}{h^*} \right)^{0.648}.$$

式中 q 为实际热流; h_e 为边界层外边界焓值; h_w 为表面焓; h_r 为恢复焓; h^* 为 Eckert 焓。对冷壁热流 $q_0 = 4500$ 大卡/米²·秒进行计算。图 6 是选取不同的 TPC, 得到的不锈钢多孔材料厚为 20 毫米第 30 秒的温度分布曲线。从图看出, 当 TPC 增加时, 整个热层温度迅速下降, 且逼近热层的初始常温(贮箱温度也选同一常温)。

根据计算, 当发汗冷却剂为 0.166 克/厘米²·秒时(图 6 TPC = 3.7), 几乎在整个受热过程中表面温度保持在 800°K 以下, 而绝大部分保持常温。热层温度越高, 发汗剂通过热层带走的热量越多, 发汗效率越高。

本文在完成过程中, 于景元同志提供许多宝贵意见, 在此致谢。

参 考 文 献

- [1] Wang, P. K. C., Control of Distributed Parameter Systems. *Advances in Control Systems*, New York, 1(1964), 83—86.
- [2] 钱学森, 宋健, 工程控制论(修订版), 科学出版社, 1980.
- [3] Lions, J. L., Optimal Control of Systems Governed by Partial Differential New York, 1971.
- [4] Swann, R. T., and Pittman, C. M., Numerical Analysis of the Transient Response of Advanced Thermal Protection Systems for Atmospheric Entry, NASA TN D-1370, 1962.
- [5] Curry, D. M., An Analysis of a Charring Ablation Thermal Protection Systems, NASA TN D-3150.
- [6] Heberlein, J. Pfender, E., Eckert, E. R. G., Study of a Transpiration Cooled Constricted Arc, AD 707856.
- [7] Schuster, J. R., Lee, T. G., Application of Air Improved Transpiration Cooling Concept to Space Shuttle Leading Edges. AIAA 72—389.
- [8] Gomez, A. V., Curry, D. M., Johnston, C. G., Radiative, Ablative and Active Cooling Thermal Protection Studies for the Leading Edge of a Fixed-Straight Wing Space Shuttle, AIAA Paper, 71—445.
- [9] Beusman, C. C., Weisman, J., Comparison of Transpiration and Ablation Cooling, *ARS Journal*, 30(1960), No. 6.
- [10] Kelley, J. B., L'Ecuyer, M. R., Transpiration Cooling — Its Theory and Application, N66-30856.
- [11] Zakkay, V., Wang, C. R., Application of Active Cooling to Nose Cones, AD 773178.

TRANSPIRATION COOLING CONTROL OF THERMAL PROTECTION

YANG XUESHI

(Ministry of Astronautics)

ABSTRACT

Transpiration cooling is an important means of thermal protection. A transpiration control model is presented in this paper. By making use of heat balance of finite elements in variable domain, a differential equation of control has been derived. Numerical calculation of the equation is performed with ammonia used as coolant under non-ablation condition. The result shows that this mathematical model exactly agrees with the true physical process and provides a numeral basis for the theoretical research of this type of distributed parameter systems.