

传热传质学文集

中国工程热物理学会1984年传热传质学学术会议论文集

传热传质学文集编辑组

科学出版社

传热传质学文集

——中国工程热物理学会

1984年传热传质学学术会议论文集

传热传质学文集编辑组

(ZK593/29)

1984/10

科学出版社

1984

内 容 简 介

本文集包括传热传质方面的论文 104 篇, 其中导热 13 篇, 自然对流 5 篇, 单相流体对流换热 20 篇, 两相流动与传热 26 篇, 热辐射 6 篇, 保护性冷却 3 篇, 换热器 17 篇, 测试技术 14 篇。

本文集可供从事传热及有关研究的科技人员、高等院校师生 (包括研究生) 参考。

传 热 传 质 学 文 集

——中国工程热物理学会

1984年传热传质学学术会议论文集

传热传质学文集编辑组

责任编辑 陈文芳

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1986年4月第一版 *开本: 787×1092 1/16

1986年4月第一次印刷 印张: 29 3/4

印数: 0001—2,200 字数: 689,000

统一书号: 15031·712

社址: 4980-15-8

定 价: 6.90元

前 言

传热学，包括研究在传热同时兼有物质迁移的更复杂的传热传质过程，是当代技术科学中国际上最活跃的分支学科之一。传热，是人所共知的常见的自然现象。任何温度差异的存在都会伴随有热量的传递，并在固体材料内部产生热应力。而出现温度分布的不均匀又是很自然的事，工程技术人员必须顺应自然规律，结合实际情况，提出适宜的措施，以控制特定的温度分布，达到增强传热、限制应力、或者减少对外热损失。

随着科学技术的发展，不断提出新的传热研究课题，例如：低品位能源的开发利用，要求在小温差下强化热流密度，以提高其经济竞争性；利用地下洞库和自然温差蓄热蓄冷，达到“环境能源”有效开发利用的热环境控制；半导体材料和微生物都对温度敏感，发展超高集成电路需要解决材料高度密集的强化散热问题；开发燃烧和防火新技术，要求适应火焰传播的温度特性，创造并控制合理的温度分布；高温部件、包括未来高能热核反应堆的实用化，则要求开发更有效可靠的保护性冷却措施，等等。而红外、激光等测试新技术与电子计算机作为计算工具的逐步普及与继续改进，也正在丰富传热传质的研究手段，加速传热传质的研究进程，更快积累起科学技术储备，并正在衍生出象环境热科学、生物热物理学、材料热科学等一些新的边缘分支学科。

这几年，由于“四化”建设的需要，促进了我国传热学研究工作的蓬勃发展，不断取得新的研究成果。特别是1981年实施学位制度以来，研究生的培养扩大了传热传质研究的队伍和提高了研究的深度。

这本传热传质文集收编了中国工程热物理学会传热传质学会于1984年11月在武汉市召开的传热传质学术会议上宣读的104篇论文。其中五分之一，已经或者预定在《工程热物理学报》上发表，只在本文集中摘要刊出。为了便于查阅，本文集将全部论文分列成八个部分。这本文集，在一定程度上反映我国传热学界的学术动向和已取得的某些主要成果。正是在这个意义上，本文集的出版将具有它特定的意义。论文作者和学会编辑部与科学出版社对这本文集问世所给予的种种协作，谨代表学会一并致谢。期望这本文集能有助于“七·五”期间繁荣我国传热学界的学术气氛和促进科学技术的发展、起它应起的作用。

王补宣

1985年6月12日

目 录

导 热

利用热探针在现场同时测定松散介质 α 和 λ 的加热-冷却法	王补宣 江亿	(1)
导热问题差分解法的两点讨论	张洪济	(2)
非定常热传导和热应力轴对称问题的有限元分析	王洪纲 林建华 胡建华	(3)
快速冷却低温室(舱)冷负荷工程计算方法和保温结构设计	王浚	(9)
管道保温层表面热流密度的计算模拟	刁乃仁 方肇洪	(15)
玻璃钢蜂窝夹层结构隔热保温的最优设计	周祝林	(19)
岩棉保温材料传热机理的理论分析及其实实验验证	王贞尧 奚同庚	(24)
斯蒂芬问题的温度分布公式及其应用	王朝阳	(26)
用摄动法求解平板 Stefan 反问题	姜瑜 郭宽良 葛新石	(32)
具有混合边值条件的一维 Stefan 问题的变时间步长三次样条数值解法	王璞	(38)
平壁面上凝华结霜的实验研究	潘延龄 李冬青 刘中良	(43)
利用自然冷源的贮果用地下洞库热工性能分析研究	王补宣 江亿	(49)
新型陶瓷材料的热物性及其与相变关系的研究	奚同庚 王永林 段炼 王本民	(55)

自然对流

用微型热电偶测量自然对流附面层的温度分布	蔡国琰 董金锸	(60)
具有添加材料的水平同心套管内自然对流的研究	姜瑜 郭宽良 葛新石	(65)
利用强电场增强自然对流换热	陆志琳 蔡士鸣 郑基立 吴克平	(66)
垂直管排自然对流的相互影响	吴清金 王国祥 王启杰 王育清	(71)
自然对流条件下冷表面状况对凝华结霜影响的实验研究	舒宏纪 刘惠枝 李恒国 张亮 姜富顺	(76)

单相流体对流换热

流动系统中的热阻力和热绕流现象(I)	过增元 布卫红 张冠忠	(78)
水平旋转圆筒换热的实验研究	章熙民 李惟毅 魏连友	(79)
横掠椭圆管的放热研究	杨金宝 黄素逸 赵永湘	(80)
空气横掠铸铁椭圆矩形翅片管的对流放热特性研究	程尚模 陶罗邑 魏秉武	(86)
外掠单排方肋片管的换热强化	曾寿全 陈钟顺	(87)
穿孔翅片的强化传热和流动阻力研究	神家锐 顾维藻 张玉明	(93)
高低翅片管空冷器最佳迎面风速选择	杨泽茂 马义伟	(95)
空气在燃气透平尾部带针肋的楔形通道中弯曲流动时的强化冷却	顾维藻 张玉明 神家锐	(101)
空气在圆管内局部换热系数的实验研究	王丰 关雷洋	(106)

圆弧腔内有横流的冲击射流流动特性试验研究	李立国 常海萍(111)
高强度直流电弧阳极传热的实验研究	陈熙(119)
壁面湍流换热全断面统一温度分布公式	华顺芳(124)
传热系数分离的优化及其误差的逆	许述圣(130)
空气纵掠管束的放热与流动阻力	黄锃剑 程尚模(133)
用积分-微分法数值求解非定常完全 Navier-Stokes 方程及能量方程的外部问题	王德明 孔祥谦(139)
加热流线型细长旋成体层性尾流的温度分布	
..... 杜先之 卢惠民 赖锡棉 华顺芳 陈伯义(146)	
定位格架阻力系数计算	博金海 申森(152)
堆芯热工水力子通道分析的三维两流体模型及 CASTA-1 程序	
..... 傅钢 赵兆颐 曹栋兴(156)	
粗糙三角形通道的换热和流动阻力研究——关于涡轮叶片前缘的强化冷却	
..... 张玉明 顾维藻 神家锐 刘长春(160)	
槽道内壁两相闭式热虹吸管的强化传热	夏吉良 辛明道 石程名(165)

两相流动与传热

过冷液体沿水平板受迫湍流时的膜沸腾传热	王补宣 石德惠(169)
关于池内核态沸腾 Rohsenow 整理式的进一步探讨	王义方 杨光武(170)
带有多孔覆盖层表面的沸腾传热实验研究	陈嘉宾 蔡振业 林纪方(176)
垂直 U 型沸腾管传热恶化特性的研究	
..... 陈昕宽 张文清 顾亚平 罗毓珊 张鸣远 庄正宁(182)	
T 型结构机械加工强化表面的沸腾传热分析与实验	曹一丁 辛明道 谢欢德(183)
薄液膜沸腾临界液位的理论与实验研究	曹一丁 辛明道 陈远国(184)
液滴碰击加热壁面时的传热分析	施明恒(188)
水平面上蒸发滴内的流动微结构及 Bénard 细胞流	张能力 徐友仁(189)
水平圆管内汽液两相流型的模化试验研究	马恩德 鲁钟琪 刘渝 许克(190)
壁面气泡生长的当量模型	曹一丁 辛明道(196)
热表面上的再湿传热	许国华 陈明星 王建伟(200)
机械加工表面多孔管蒸发器与低肋管蒸发器的实机对比试验	
..... 庄礼贤 陆应生 李伟立 吴江滨 谢裕林(205)	
水蒸汽在竖放椭圆管中的凝结换热	吴兆春 徐昂千 许述圣(206)
垂直余弦型沟槽管冷凝传热的研究——物理模型及有限元法求解	
..... 裴觉民 王国栋 崔占峰 林纪方(215)	
饱和氮气在 V 型纵槽管内冷凝传热的研究	
..... 林理和 胡连方 姚堤 孙芝芳 刘楚云 陈和(224)	
两相闭式热虹吸管内的珠状凝结传热	夏吉良 辛明道(231)
双床沸腾燃烧锅炉的埋管传热	张鹤声 黄国权 谢承隆(236)
卡皮查热阻对池内液氮传热的影响	林理和(242)

大型两相封闭热虹吸管加热段换热过程研究	孙曾闰(250)
高炉炉身煤气流动现象的研究——兼评“高炉炉身煤气流运动的研究”一文	魏桂华(255)
竖立管中空气-水反流的实验研究	臧希年 南滨 赵斌(261)
溴化锂水溶液在小雷诺数下降膜吸收的传热和传质	王建平 朱天复 谢仲华(263)
冷却水在垂直管内旋转流动时的蒸汽冷凝换热实验	何厥楨 陶惟棣(272)
粗颗粒流化床内颗粒传热的试验研究	蔡安明 岑可法(277)
气-固流化床中传热的研究	王同章 黄子郁(284)
多孔覆盖层表面强化沸腾传热的修正动力学模型	林理和 李朝明 孙芝芳 胡连方 刘楚芸 陈和(290)

热 辐 射

采用 Monte Carlo 法的空腔辐射系数的计算	王光麟 D. P. DeWitt(296)
一种有效吸收率接近于 1 的人工黑体模型	张卓敏 葛新石 王义方(301)
燃烧多孔热平壁与夹角 15° 灰壁间换热热流分布的计算分析和实验测定	林文贵 刘美(306)
燃烧室中的二氧化碳与水蒸汽的辐射率	余其铮 鲍亦令(312)
用瞬态法在常压下测定金属和涂层的半球向全发射率	葛新石 张敏 孙孝兰(315)
大型锅炉燃烧室三维传热数学模型的研究	姚文达 鲍志勇 马建隆(322)

保护性冷却

微电子元件的液体浸没冷却和射流冲击冷却	马重芳(323)
烟气环境下涡轮叶片的气膜保护	赵惠富(324)
透平叶片换热系数计算方法的改进	邓素卿 陈焕倬 葛绍岩(328)

换 热 器

回转蓄热式换热器的传热特性	任泽霖 王斯永(333)
气-气热管换热器设计中的一些问题	蒋章焰 马同泽(334)
大型变压器内冷却油流速度分布及传热特性分析	俞昌铭 张建 王秀春(335)
1-2及1-3型分流式换热器分析	庄震万(340)
重力热管内的沸腾换热	王恒月 杨鹤峰 邢丙丙 王育琳(345)
一侧流体混合、一侧流体不混合的叉流换热器的平均温差和改进的数学模型	王幼纯 陈焕倬 江淑琴 陈素萍 张伯鹏 陈小权(352)
一侧流体混合、一侧流体不混合叉流换热器的平均温差的实验研究	陈焕倬 江淑琴 王幼纯 陈素萍 张伯鹏 陈小权(354)
确定换热器换热系数的一种新方法——离散流动瞬态法	董志锋 吴键(356)
复杂流道的阻力、传热试验及可视化研究	倪振伟 张能力 焦芝林 罗棣庵 顾传宝(357)
板式换热器内流动不均匀性的分析	罗棣庵 张黎 焦芝林(359)

换热器流道的几何因素对阻力和传热性能影响的评价	倪振伟	焦芝林(364)
气-气换热器换热表面的选择方法	田野	陈钟顺(372)
套管式换热器耦合问题的数值计算(层流充分发展区域)	陶文铨	(377)
蜂窝平板太阳能集热器性能预测	吴子静	张诗针(383)
气-气热管式换热器“离散型”设计方法的分析	吴存真 屠传经	陈鸣明(389)
基于热经济参数的换热器优化计算	杨自奋	杨强生(394)
计算机绘制人字形板式换热器复杂流道及其阻力计算	周柳贞	倪振伟(401)

测试技术

利用全息摄影对翅片周围传热的基础研究	汤学忠 小林博树 黑崎晏夫 柏木孝夫	(405)
红外辐射频谱扫描测温技术	朱德忠	(406)
双膜热流计研究及其应用	曹玉璋 A. H. 爱普斯坦	(407)
热流计对温度场的干扰及其误差分析	王补宣 韩礼钟 方肇洪	(411)
表面安装式热流计测量热流密度的稳定时间	王补宣 韩礼钟 方肇洪	(417)
介绍一种简易的黑度测试方法	任苓华 郑际睿	(419)
激光器谐振腔热稳定性的分析	卞伯绘 王谨玉	(425)
TP-801单板微机用于强迫对流换热实验数据的采集和在线整理	孔祥谦 冯石开 陈成刚 宿成基 谈龙娣	(430)
用瞬态法同时测定粘性液体的导热系数和导温系数的理论和实验研究	宋又王 葛新石	(435)
瞬态热丝法固体导热系数测定装置原理及误差分析的数值模拟	虞吉林 宋又王	(444)
液滴内部流动显示的光学方法	徐友仁 张能力	(445)
一种可以精确测定固体和液体真比热的电加热热损相消法简易卡计	陈则韶 吴晓 陈立人 葛新石	(450)
沸腾换热中壁温测量的研究	林瑞泰 蔡义汉	(456)
用红外技术测量液滴表面温度	李宝星 叶梦眉 陆大有 刘彦	(461)

利用热探针在现场同时测定松散介质 a 和 λ 的加热-冷却法

王补宣 江 亿

(清华大学)

摘 要

本文对利用热探针现场测试导温系数 a 和导热系数 λ 的灵敏度进行了分析, 提出一种可以有效地同时测定 a 和 λ 的新的加热-冷却法, 并通过优化分析得出相应的最佳测试参数。文中也报道了一些测试的结果和互相比较。

THE HEATING-COOLING METHOD FOR MEASURING THERMAL DIFFUSIVITY AND CONDUCTIVITY OF DISPERSED MEDIUM IN THE SCENE WITH A PROBE

Wang Buxuan Jiang Yi

(Tsinghua University)

Abstract

In this paper, a new manner "Heating-cooling method" is developed to measure the thermal diffusivity a and conductivity λ of dispersed medium simultaneously in the scene with a probe. Both the temperature rises when the heater inside the probe is "on" and the temperature drops when the heater is "off" are to be recorded, and " a " and " λ " of the dispersed medium can thus be calculated out. Efforts were made to select the optimum measuring parameters, so as to determine a and λ more precisely. Analysis and experiments show that, the error resulted in thermal diffusivity, a , measured by the "heating-cooling method" will be one half of that measured by the conventional heating method.

导热问题差分解法的两点讨论

张 洪 济

(重庆大学)

摘 要

导热问题的常规有限差分法对曲面边界适应性差, 而且一般认为差分方程系数矩阵不正定, 其性态比有限单元法的刚度矩阵差。本文对这两个问题作了初步研究: 引入“相当导热体”的概念, 采用正交曲线坐标系中的有限差分法, 导出了各类边界条件的变换方程, 解决了差分法对相应曲面边界的适应问题; 从理论和计算实践上, 证明了差分方程系数矩阵的正定性; 通过几个典型工程问题的算例, 得到了一些有意义的结果。

A DISCUSSION ON TWO ASPECTS OF THE FINITE DIFFERENCE METHOD FOR HEAT CONDUCTION PROBLEMS

Zhang Hongji

(Chongqing University)

Abstract

In this paper the appropriateness of the finite difference method for corresponding surface boundaries has been solved by proposing a concept of equivalent heat conduction object and using the finite difference method in orthogonal curvilinear coordinates. The positive definite form of the matrix of coefficients in the finite difference equations in heat conduction problems has been proved. Some useful results were obtained through several numerical examples of typical engineering problems.

非定常热传导和热应力轴对称问题的有限元分析

王洪纲 林建华 胡建华

(昆明工学院)

数学分析的方法难于求解复杂几何形状和多样化的边界条件的热应力问题。特别是在非定常的情况下，温度变化范围比较大，物性系数随温度的变化是显著的。如果考虑这种情况，则问题更难以解决。

本文用有限元法来求解非定常热传导和热应力的轴对称问题，求解过程中考虑了物性系数随温度的变化，并将问题作为拟静态来处理，边界条件不受限制。

一、非定常热传导问题的泛函及有限元基本方程

在轴对称问题中，非定常温度场 $T = T(z, r, t)$ 。将时间过程 t 划分为 n 个时间间隔 Δt_k ($\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$, $k = 1, 2, \dots, n$)。取 Δt_k 足够小，并设初始瞬时 t_{k-1} 的温度场 $T_{k-1} = T(z, r, t_{k-1})$ 已经给定，则在 Δt_k 内导热系数 λ_{k-1} ，换热系数 γ_{k-1} ，比热 c_{k-1} 可以取为

$$\begin{aligned}\lambda_{k-1} &= \lambda_0 + \lambda^*(T_{k-1} - T_0) = \lambda_{k-1}(z, r) \\ \gamma_{k-1} &= \gamma_0 + \gamma^*(T_{k-1} - T_0) = \gamma_{k-1}(z, r) \\ c_{k-1} &= c_0 + c^*(T_{k-1} - T_0) = c_{k-1}(z, r)\end{aligned}\quad (1)$$

式中， λ_0, γ_0, c_0 表示 T_0 时的值， λ^*, γ^*, c^* 表示单位变温时的增量。

这样，每个 Δt_k 内非定常热传导的泛函为

$$\begin{aligned}\Pi_{\Delta t_k} &= \iint_D \left\{ \frac{\lambda_{k-1}}{2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{c_{k-1} \rho}{\Delta t_k} \left(\frac{T^2}{2} - TT_{k-1} \right) \right\} r dr dz \\ &+ \int_{\Gamma} \gamma_{k-1} \left(\frac{T^2}{2} - TT_A \right) r ds\end{aligned}\quad (2)$$

式中， D 表示子午面上的域， Γ 表示边界， ρ 为材料密度， T_A 为周围介质的温度。

在子午面上取三角形单元，单元节点以 i, j, m 表示；边界上节点为 j, m ；设节点总数为 l 个。以 $\lambda_{k-1}^e, \gamma_{k-1}^e, c_{k-1}^e$ 及 T_{k-1}^e 表示单元上的平均值，并以列阵 $\{T\}$ 表示 $[T_1, T_2, \dots, T_l]^T$ 。则由 $\delta \Pi_{\Delta t_k} = 0$ 得到 Δt_k 内的有限元基本方程

$$([H] + [N])\{T\} = \{P\}\quad (3)$$

式中矩阵 $[H], [N], \{P\}$ 分别为

$$[H] = \Sigma [H]^e \quad [N] = \Sigma [N]^e \quad \{P\} = \Sigma \{P\}^e\quad (3a)$$

矩阵 $\{H\}^e$ 中元素 H_{pq}^e , $\{N\}^e$ 中元素 N_{pq}^e 和 $\{P\}^e$ 中元素 P_p^e 分别由以下各式确定:

$$H_{pq}^e = \lambda_{k-1}^e \cdot r_e (b_p b_q + c_p c_q) / 4 \Delta_e + \xi_h \quad (4)$$

式中, r_e 为节点 i, j, m 的 r 坐标的平均值; b_p 和 c_p ($p, q = i, j, m$) 分别为

$$b_i = r_j - r_m \quad c_i = z_m - z_j \quad (i, j, m) \quad (5)$$

对于位于第一、二类导热边界上的单元和内部单元 $\xi_h = 0$ 。位于第三类导热边界上的单元, 如果 p 或 $q = i$, 则仍有 $\xi_h = 0$; 如果 $p = q \neq i$, 则 $\xi_h = \gamma_{k-1}^e \cdot l_{jm} \cdot r_l / 3$; 如果 $p \neq q$ 且 $p, q \neq i$, 则 $\xi_h = \gamma_{k-1}^e \cdot l_{jm} \cdot r_l / 6$ 。以上 l_{jm} 为单元 jm 边长, r_l 为 j 和 m 的 r 坐标平均值, Δ_e 为三角元的面积。

$$N_{pq}^e = c_{k-1}^e \rho \cdot r_e \Delta_e \cdot \xi_n / \Delta t_k \quad (p, q = i, j, m) \quad (6)$$

式中, 如果 $p = q$ 则取 ξ_n 为 $1/6$, 否则取 $1/12$ 。

$$P_p^e = c_{k-1}^e \rho \cdot r_e \Delta_e (T_{k-1}^e - T_{pk-1} / 3) / 6 \Delta t_k + \xi_p \quad (7)$$

对于第一、二类导热边界单元和内部单元 $\xi_p = 0$; 对于第三类边界, 如果 $p = i$, 则 $\xi_p = 0$, 否则为 $r_{k-1}^e l_{jm} r_l T_A / 2$ 。

由基本方程 (3) 解出瞬时 t_k 全部节点温度 $\{T\}$ 。以它们为初始条件又可求出下一瞬时全部节点温度。从而得到以节点温度表达的非定常温度场。

二、非定常热应力问题的泛函及有限元基本方程

以 E 表示弹性模量, λ_L 和 μ 为拉梅常数, α 为热胀系数, 则在 Δt_k 内有

$$\begin{aligned} E_{k-1} &= E_0 + E^*(T_{k-1} - T_0) = E_{k-1}(z, r) \\ \lambda_{Lk-1} &= \lambda_{L0} + \lambda_L^*(T_{k-1} - T_0) = \lambda_{Lk-1}(z, r) \\ \mu_{k-1} &= \mu_0 + \mu^*(T_{k-1} - T_0) = \mu_{k-1}(z, r) \\ \alpha_{k-1} &= \alpha_0 + \alpha^*(T_{k-1} - T_0) = \alpha_{k-1}(z, r) \end{aligned} \quad (8)$$

波桑比 ν 可认为与温度无关。在非定常情况下, 需要分段地 (即在 Δt_k 内) 写出自由能 Φ_k :

$$\begin{aligned} \Phi_k &= \lambda_{Lk-1} (\epsilon_z + \epsilon_r + \epsilon_\theta)^2 / 2 + \mu_{k-1} (\epsilon_z^2 + \epsilon_r^2 + \epsilon_\theta^2 + \gamma_{zr}^2 / 2) \\ &\quad - \alpha_{k-1} (3\lambda_{Lk-1} + 2\mu_{k-1}) (\epsilon_z + \epsilon_r + \epsilon_\theta) \Delta T_k - c_{k-1} \rho \cdot \Delta T_k^2 / 2 T_{k-1} \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $\epsilon_z, \epsilon_r, \epsilon_\theta$ 及 γ_{zr} 分别为轴向、径向、环向的应变增量及子午面剪切应变增量。略去体积力, 以 \bar{p}_z 和 \bar{p}_r 表示边界 Γ_p 上给定的表面力分量, 则 Δt_k 内泛函为

$$\Pi_{\Delta t_k} = \iint_D \Phi_k r dr dz - \int_{\Gamma_p} (\bar{p}_z u + \bar{p}_r v) r ds \quad (10)$$

式中, u 和 v 为 z 和 r 向位移增量。以 $\{\delta\}$ 表示 $[u_1, v_1, u_2, v_2, \dots, u_i, v_i]^T$, 则由 $\delta \Pi_{\Delta t_k} = 0$ 得到非定常热应力轴对称问题的有限元基本方程:

$$\{K\} \{\delta\} = \{Q_T\} + \{Q_w\} \quad (11)$$

式中, $\{K\}$, $\{Q_T\}$ 和 $\{Q_w\}$ 分别为

$$\{K\} = \sum \{K\}^e \quad \{Q_T\} = \sum \{Q_T\}^e \quad \{Q_w\} = \sum \{Q_w\}^e \quad (12)$$

其中, 单元刚度矩阵 $\{K\}^e$ 中元素 K_{pq}^e , 单元热负荷矩阵 $\{Q_T\}^e$ 中元素 Q_p^e 和表面力荷载矩阵 $\{Q_w\}^e$ 中元素 Q_w^e 分别为

$$K_{pq}^e = \frac{r_e}{4\Delta_e} \cdot \frac{E_{k-1}^e}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[\begin{array}{l} (1-\nu)b_p b_q + \frac{1-2\nu}{2} c_p c_q \\ \nu c_p b_q + \frac{1-2\nu}{2} b_p c_q + \nu b_q \cdot \frac{2\Delta_e}{3r_e} \\ \nu b_p c_q + \frac{1-2\nu}{2} c_p b_q + \nu b_p \cdot \frac{2\Delta_e}{3r_e} \\ (1-\nu)c_p c_q + \frac{1-2\nu}{2} b_p b_q + \nu(c_p + c_q) \frac{2\Delta_e}{3r_e} + A^e \end{array} \right] \quad (13)$$

常数 A^e 在 $p \neq q$ 时取 $(1-\nu)\Delta_e^2/3r_e^2$; 在 $p = q$ 时取 $2(1-\nu)\Delta_e^2/3r_e^2$

$$Q_{Tp}^e = \alpha_{k-1}^e \cdot \frac{E_{k-1}^e}{1-2\nu} \left\{ \begin{array}{l} b_p \cdot \frac{r_e}{2} \cdot \Delta T_k^e \\ c_p \cdot \frac{r_e}{2} \cdot \Delta T_k^e + \frac{\Delta_e}{4} \cdot \Delta T_k^e + \frac{\Delta_e}{12} \cdot \Delta T_p \end{array} \right\} \quad (14)$$

$$Q_{\omega j}^e = \frac{l_{jm}}{2} \left(\frac{2}{3} r_j + \frac{1}{3} r_m \right) \left\{ \begin{array}{l} \bar{p}_z \\ \bar{p}_r \end{array} \right\}, \quad Q_{\omega m}^e = \frac{l_{jm}}{2} \left(\frac{2}{3} r_m + \frac{1}{3} r_j \right) \left\{ \begin{array}{l} \bar{p}_z \\ \bar{p}_r \end{array} \right\} \quad (15)$$

且 $Q_{\omega i}^e = 0$ 。以上各式中 $p, q = i, j, m$ 。

由基本方程解出瞬时 t_k 全部节点的 $\{\delta\}$ 后, 即可求出各单元的应变增量 $\{\varepsilon\}_k^e$ 和应力增量 $\{\sigma\}_k^e$:

$$\{\varepsilon\}_k^e = \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_z \\ \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{zr} \end{array} \right\}_k = \frac{1}{2\Delta_e} \left\{ \begin{array}{ll} b_i & 0 & b_j & 0 & b_m & 0 \\ 0 & c_i & 0 & c_j & 0 & c_m \\ 0 & \frac{a_i + b_i z + c_i r}{r} & 0 & \frac{a_j + b_j z + c_j r}{r} & 0 & \frac{a_m + b_m z + c_m r}{r} \\ c_i & b_i & c_j & b_j & c_m & b_m \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_m \\ v_m \end{array} \right\} \quad (16)$$

$$\{\sigma\}_k^e = \left\{ \begin{array}{l} \sigma_z \\ \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \tau_{zr} \end{array} \right\}_k = \left\{ \begin{array}{ll} 2\mu_{k-1} + \lambda_{Lk-1} & \lambda_{Lk-1} & \lambda_{Lk-1} & 0 \\ \lambda_{Lk-1} & 2\mu_{k-1} + \lambda_{Lk-1} & \lambda_{Lk-1} & 0 \\ \lambda_{Lk-1} & \lambda_{Lk-1} & 2\mu_{k-1} + \lambda_{Lk-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu_{k-1} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_z \\ \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{zr} \end{array} \right\}_k - \alpha_{k-1} (3\lambda_{Lk-1} + 2\mu_{k-1}) \left\{ \begin{array}{l} \Delta T_k^e \\ \Delta T_k^e \\ \Delta T_k^e \\ 0 \end{array} \right\} \quad (17)$$

式 (16) 中, $a_i = z_j r_m - z_m r_j$ (i, j, m)。

三、算 例

现计算金属圆柱的非定常温度场及热应力。子午面上单元划分如图 1 所示。考虑两种情况下 (即物性系数为常数和随温度变化) 的结果。

1. 物性系数为常数时的非定常温度场及热应力计算。

取 $T_0 = 0^\circ\text{C}$, $\lambda_0 = 0.147[\text{cal}/\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}]$, $c_0 = 0.11[\text{cal}/\text{g}\cdot^\circ\text{C}]$, $\rho = 7.8[\text{g}/\text{cm}^3]$, $\alpha_0 = 11 \times 10^{-6} [^\circ\text{C}]^{-1}$, $E_0 = 2.1 \times 10^8 [\text{kg}/\text{cm}^2]$, $\nu = 0.33$, $\gamma_0 = 0.0147[\text{cal}/\text{cm}^2\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}]$, $T_A = 100^\circ\text{C}$ 。以 t' 表示无因次时间 $t' = \lambda t / c \rho R^2$ 。计算结果如图 2, 3, 4 所示。

由图 2 可以看出, 温度的变化在靠近表面层处较为急促, 内部则比较平缓。图 3 为径向热应力的变化曲线, 由图可见内部热应力变化比较剧烈。图 4 为环向热应力的变化曲线, 内层为拉应力, 外层为压应力。

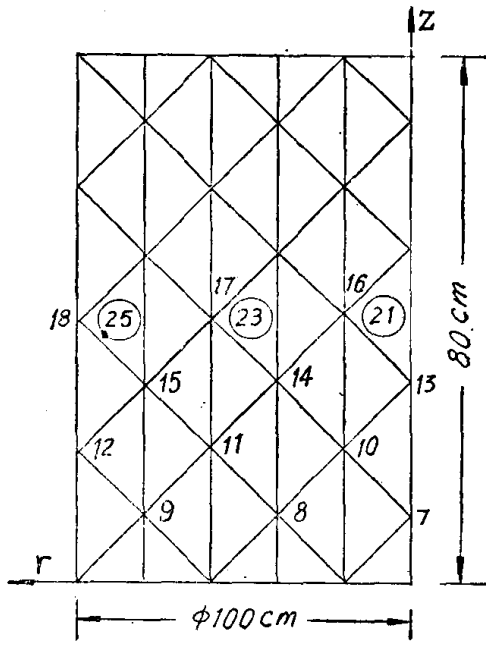


图 1

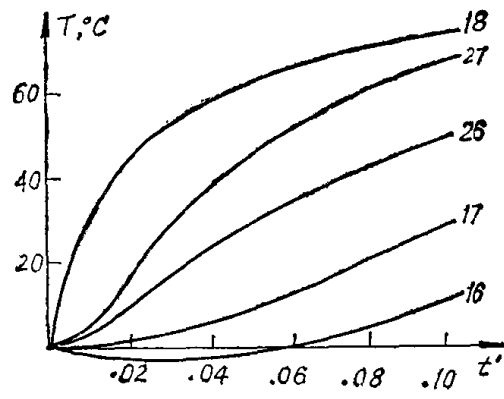


图 2

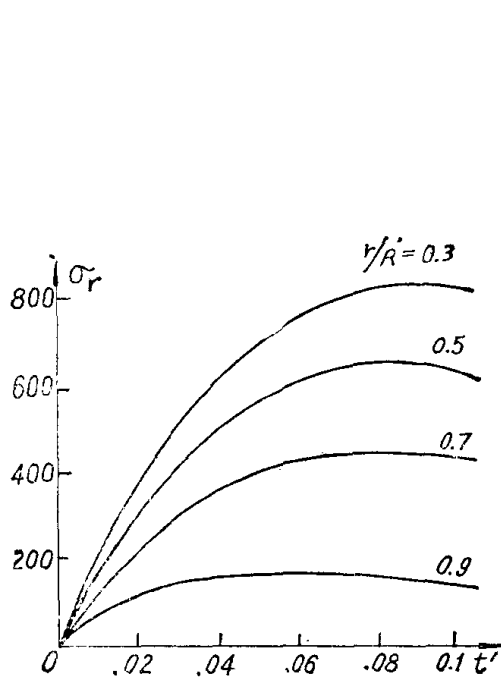


图 3

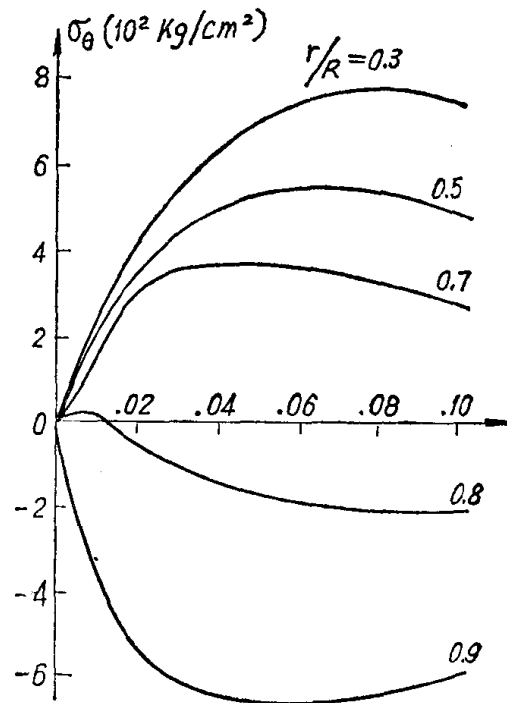


图 4

2. 物性系数随温度变化时的非定常温度场和热应力。

取 $\lambda^* = -9.4 \times 10^{-5} [\text{cal}/\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}^2]$, $c^* = 0.0004 [\text{cal}/\text{g} \cdot ^\circ\text{C}^2]$, $\gamma^* = 0$ 。并取 $T_A = 500^\circ\text{C}$ ，其他数据不变。计算的非定常温度场如图 5 中实线所示。图中虚线是令物性系数为常数时的计算结果。对于内部节点，系数的变化对温度有明显的影响。

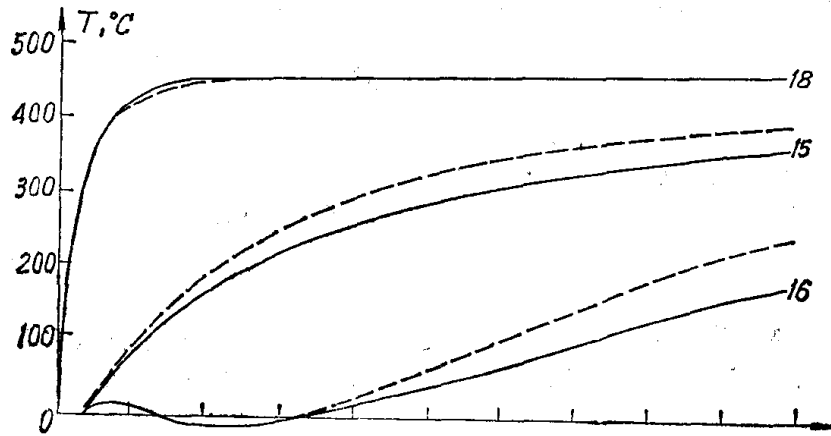


图 5

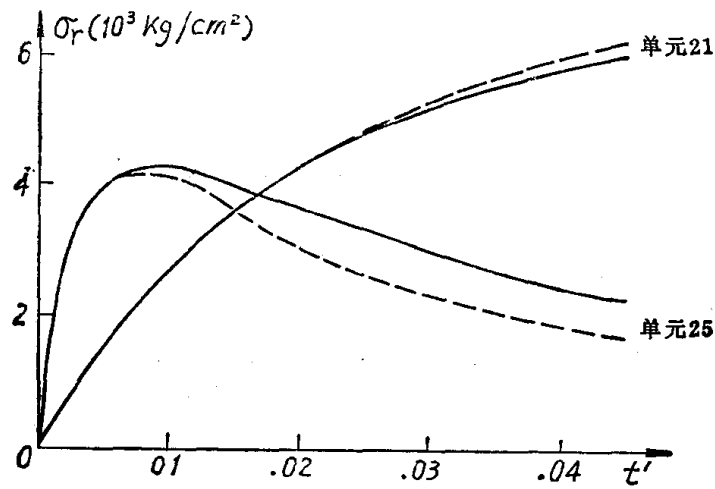


图 6

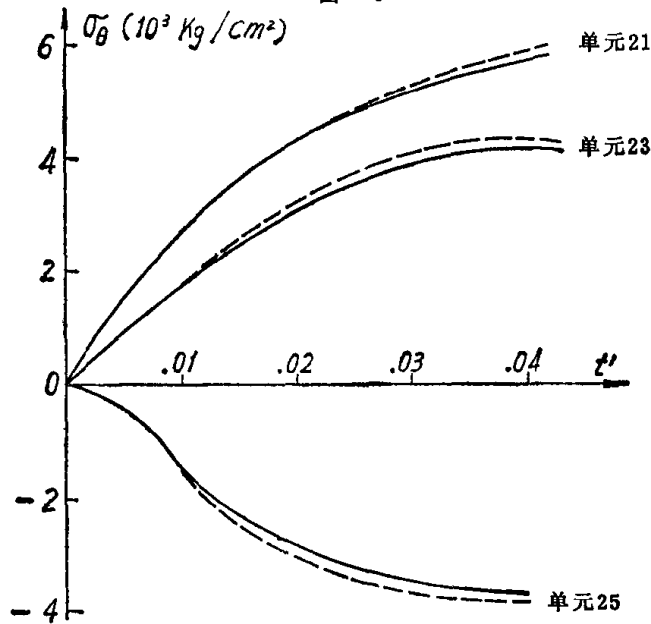


图 7

取 $\alpha^* = 0.0064 \times 10^{-8} [^{\circ}\text{C}]^{-2}$, $E^* = -800 [\text{kg}/\text{cm}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}]$ 后, 计算得到的非定常热应力 σ_r 和 σ_{θ} 分别由图6和图7中实线所示。图中虚线则为物性系数取常数时的计算结果。

由图可见, 物性系数的变化对径向热应力的影响主要反映在内部单元上, 且影响显著。对于环向热应力而言, 虽然影响不大, 但内部单元上仍较外部显著。

因此, 在温度急剧变化的非定常问题中, 考虑物性系数的变化是必要的。

参 考 文 献

- [1] 竹内洋一郎, 热应力, 科学出版社, 1977。
- [2] 钱伟长, 变分法及有限元(上册), 科学出版社, 1980。
- [3] 王洪纲, 关于热冲击弹性问题的自由能及变分原理, 应用数学和力学, 3, 5 (1982)。

A FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE AXISYMMETRIC PROBLEM FOR NON-STEADY HEAT CONDUCTION AND THERMAL STRESS

Wang Honggang Lin Jianhua Hu Jianhua
(Kunming Institute of Technology)

Abstract

An axisymmetric problem for non-steady heat conduction and thermal stress is studied by a finite element method in this paper. The material properties vary appreciably with temperature fluctuations in non-steady state. Corresponding functionals and fundamental equations of the finite element method are given for these cases, and sample calculations have been then performed. It is shown that the influence of variable material properties on the result of heat conduction and thermal stress is evident.

快速冷却低温室(舱)冷负荷工程计算方法 和保温结构设计

王 浚

(北京航空学院)

有降温时间要求的低温室(舱)称快速冷却低温室(舱),正日益广泛地应用于各个领域。其冷负荷的计算和保温结构的设计,目前还研究得较少。本文应用传热学理论,结合若干快速冷却低温室的设计实践和专门进行的试验研究,提出了保温结构的设计方法,介绍所总结的四种冷负荷工程计算方法。

一、保温结构传热分析

快速冷却低温室保温结构的传热是不稳定传热,当室温在要求的时间内由初始稳定温度降低到规定温度,并到达稳定状态时,根据结构内温度变化过程的特征和范围,可分为三个传热阶段:(1)降温阶段。即由初温降至规定温度的过程。这阶段结构向室内放热,自身温度降低,由内表面向外形成温度梯度。通常开始降温的结构厚度小于保温层厚度,向室内的放热量是由于结构蓄热量减少产生的,和外界无热交换。(2)过渡阶段。从室温降到规定值开始、到结构内温度达稳定值止的整个过程。这阶段室温维持不变,结构内温度并未稳定而是变化梯度减小。温度开始降低的厚度增大,直到结构外表面。过渡阶段结束时,温度分布为直线或折线,结构蓄热量不再变化。向室内的传热,前期为结构蓄热量减少所引起,后期包括蓄热量减少和由外界传入两部分。(3)稳定阶段。从结构内温度分布达到稳定时开始,向室内的传热量全部为室外传入的热量。根据传热学理论分析和实测表明,保温结构厚度选择合适时,降温阶段的传热量最大,因此应作为确定制冷设备容量的冷负荷计算状态。

二、冷负荷工程计算方法

快速冷却低温室的冷负荷不仅和保温结构及室内试件有关,而且和制冷设备的制冷量变化规律有关。冷负荷、降温时间和制冷量变化规律三者之间存在着一定的函数关系,这种关系是很复杂的。

1. 系数法

计算公式为

$$Q_c = (1.2 \sim 1.3) Q_{dr} \quad (1)$$