

加热炉控制算法

〔苏联〕 B. A. 马科夫斯基 著
И. И. 拉夫连契克

高家锐 译
高仲龙 校
潘德惠

内 容 简 介

本书系根据苏联冶金出版社1977年出版的В.А.马科夫斯基与И.И.拉夫连契克所著《加热炉控制算法》(АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАГРЕВАТЕЛЬНЫМИ ПЕЧАМИ)一书译出。

书中叙述了冶金生产自动控制系统领域实现加热过程的参数检测和加热炉控制的有关算法。书中说明了可将加热设备热过程的数学描述大加简化,这就可在自动控制系统中对金属温度的计算检测及其加热过程的控制应用简单而有效的算法。介绍了试验确定开始条件和有关常数的方法,这些是在模拟及数字计算装置上实现检测和控制算法时所必需的。书中列举了在实验及生产条件下所用算法的计算结果。也讨论了在电子计算机上进行加热炉的模拟与计算自动化的某些问题。

本书可供从事金属加热控制方面工作的科研人员、大学生、研究生及工程技术人员使用。

加 热 炉 控 制 算 法

〔苏联〕В.А.马科夫斯基 著
И.И.拉夫连契克

高家锐 译

高仲龙 校
潘德惠

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张 5 7/8 字数 155 千字

1985年11月第一版 1985年11月第一次印刷

印数00,001~3,800册

统一书号, 15062·4280 定价1.60元

序 言

苏共二十五大通过的《1976—1980年苏联国民经济发展的基本方针》规定，要扩大理论和应用数学方面的研究。开展科学研究，使电子计算技术进一步完善并在国民经济中得到有效的应用，计算技术工具计划增加80%。计算技术的很大一部分是用于装备钢铁生产过程的自动控制系统。

在冶金生产中，近年来金属加热控制理论和技术的发展相当迅速，这主要在于加热过程的自动控制系统中和加热设备的管理上应用了电子计算机的结果。虽然计算技术工具的价格较贵，并且维护费用相当高，但在大型现代化轧钢车间的生产自动控制系统中，电子计算机的应用却带来了相当好的经济效果。现代高速轧机的轧制工艺对金属加热质量的要求提高了，只有在生产过程的自动控制系统能满足这一要求的前提下，电子计算机才能获得有效的应用。

对于电子计算机在金属加热的控制与检测系统中应用的理论基础已进行了一系列不同程度的研究工作^[1—5]。往往由于工作人员没有掌握金属温度检测和加热控制的详细算法，阻碍了计算技术在加热设备上的实际应用。

目前，研究加热金属的数学动态模型，并在此基础上确定电子计算机控制加热过程的算法，以及用不同的算法语言或机器语言编制检测和控制过程的计算程序等方面，都要耗费大量的时间和资金。一些先进的冶金工厂轧钢车间对自动控制系统的研究和电子计算机运用的经验（具备推广条件者），对用电子计算机建立或完善金属温度检测和加热控制系统的研究人员、自控系统管理人员，以及程序编制人员，均有很大的帮助。

在编写本书时，作者力求使其中所有的立论和结果满足处理和解决工程技术问题的要求，可直接地或稍加改变后就能用于生

产实际。计算技术和数学都不是冶金和热工技术人员的专业研究内容。为了叙述通俗，在正文和附录中所列入的控制和检测过程的算法采用了最简单最通俗的一种算法语言——АЛ语言（自动程序编制语言）〔6〕。

生产过程自动控制系统的一些算法中就包括被检测和控制对象的数学模型问题。模型能使各种不易直接为仪器检测的工艺参数在现行时间范围内实现自动计算和检测，预报调节对象由于某些扰动和控制作用的反应而能对将要出现的状态设计出最佳的工艺制度，以及对加热设备在结构和生产制度方面改善的技术经济效益给以评价。

随着电子计算机在实验和生产中应用的不断扩大，愈发重视对生产过程进行动态数学模型化的研究，出版书籍〔5、7〕和在定期刊物上发表大量论文，但对加热设备动态模型的研究还远未达到尽善的程度。

本书介绍的金属加热及冷却过程的数学模型，在实验条件下的计算机上和生产条件下的自控系统中进行了校核和考验，因此可以推荐应用到生产过程的自控系统中去，至少是极近似于加热设备及冶金工厂生产的实际情况。动态数学模型亦能颇有成效地用来对生产过程自控系统的管理人员、生产人员以及大学的学生进行近似生产情况的培训。

在一般情况下，动态模型是用来对所研究的过程进行考查、计算和检测，以及对生产对象的不稳定制度进行控制管理。冶金过程的不稳定制度中，有集中参数的以常微分方程来描述，其中以时间 τ 为自变量；有分布参数的不稳定制度则以偏微分方程（自变量是时间及空间坐标 x, y, z ）来描述。微分方程乃是描述自然现象的一些基本运动规律的数学形式，这些规律就是对微小时间间隔 $d\tau$ （如参数是分布的）和微小空间体 $dx dy dz$ 上的能量和物质的守恒定律。

用解析法或数值法得出的微分方程或微分方程组的解，不仅可描述非稳定的动态，还能给出所研究对象的静态特性，因为稳

定制度乃是过渡过程在 $\tau \rightarrow \infty$ 时的一种极限状态。因此常常可以动态模拟的方法，在由不稳定制度向稳定制度过渡的极限中求解静态问题，并能得到满意的结果。

在建立有关冶金过程的微分方程时，通常采取下列简化条件：

1. 与固体和液体相比，气体蓄积的能量可忽略不计。
2. 沿流股的运动方向，固体和液体的扩散和导热系数很小，以致可忽略不计。

随着电子计算机的出现，求解高阶微分方程组和代数方程组就有了实际的可能性。目前至少在原则上已能对任何冶金过程、对象或生产阶段的数学动态模型进行处理和研究。为在电子计算机上对微分方程进行数值积分，则需将微分换成有限增量($\Delta\tau$, Δx , Δy , Δz)然后可用某种适当的数值法来求解^[8,9]。

本书以П.欧拉法及П.А.巴施基洛夫法^[10,11]为解微分方程的主要数值方法。纵然在应用电子计算机时可以把时间和空间坐标的单元间隔取得很小，但采用很复杂的解法（隆盖—库塔法、阿达姆斯法、密伦法等。）并不能明显地减小积分误差，反而扩大了计算的程序和机器的存贮量。

在电子计算机上对有分布参数的冶金过程进行动态模拟是非常简便自然的，这是因为所研究对象的诸参数的分布值可相应地在电子计算机中按各独立的单元分布存贮。输出值（即所模拟过程的参数）分布在空间坐标系若干离散点上，对固定的模拟对象则将其贮存在电子计算机存贮单元的记存系统中，或者按需要将其从一组存贮单元转送到另一组中去，这实际就是对所研究对象运动过程的模拟。这种运动的物理模型，能简便地实现对运动体系中各种过程的模拟，并与实际情况合拍（实际的时间比例）。数学模型的这个特点，用在金属在连续加热炉内加热过程的动态模拟上很有效。

在研究有不连续分布特性的冶金过程时，如有大量炉坑的均热炉车间，钢锭和钢坯运输线等，数学模拟就更接近于实际情况。此时不连续分布的原值信息（如装炉金属、钢锭等）的空间

变动完全自然地与这些参数在电子计算机记存单元中传送转移的情况相应。

用电子计算机解微分方程时，计算过程可能为稳定的，不稳定的或处于稳定的临界状态。在一般情况下，用改变积分步长 ($\Delta\tau$, Δx) 的方法，使一种运算状态转变为另外一种，

积分步长愈小，则运算过程不稳定的可能性就愈小。

有关冶金及热工过程的介质、原料及材料的物理性能方面的技术资料在文献中多是以图解、表格的形式表示，很少用解析式表明。因电子计算机不能接受图解式的信息（除个别的试验情况），则要求将物理性能的有关数据以表格或分析式的形式送入机器的存贮系统，尤以分析公式为最佳，因为表格式会加重机器存贮系统的负荷，而且终究还是要发生自变量离散值之间的插值解析式问题。

因此，由于数学模拟的需要，对过去常以表格、图解和曲线说明的一些数据（如钢的物理性能），则需以解析式来表述。同时由于快速电子计算机能对基本初等函数组成的任何复合函数进行迅速的计算，于是近似经验公式也就没有多大的意义了。但毕竟还是希望将这些数据编写得紧凑一些，特别是减少公式中常数的数量，以简化程序编制和减小所需电子计算机的存贮容量。在这方面，高阶多项式的经验公式，一般说来不及特殊选定的公式，后者包括了对各种具体情况最合适的函数。函数的类型一般是根据研究人员在工程技术和科学工作方面的经验来选定的。动态问题自动计算的系统方法是冶金过程动态数学模拟方法合乎逻辑的发展。

工业自动装置上的自动调节器（线性或非线性的），在工艺过程和对象结构的信息不够完备的条件下也能有效地使调节对象保持在给定状态。

对调节器的这种功能可用有代表性的实例来说明。制定钢坯在逆流式加热炉内加热所需燃耗的算法是相当困难的。各个参数的分布特性、钢的物理性能及热交换参数与温度的非线性关系

等，使得问题极为复杂。如果在工业炉上装设自动调节器，则可实现具有逆向反馈调节作用的简单算法，在其投入使用后，很快就能使燃耗达到所需数值，即自动地解决了求解的问题。

因此，应当在所谓自动算法的基础上，对复杂过程实现动态模拟^[12]。

自动算法的基本程序如下：1) 为建立动态系统的模型，先作出描述该系统输入（自变量）和输出（因变量）诸参数的结构图；输出与输入参数之间的静态关系需为单值对应的；2) 在模拟算法结构图中列入自动调节器部分，向调节器入口送入给定值与实际输出值之间的偏差信号，而调节器出口信号则使系统的输入信号朝有利的方面变化，以减小偏差；3) 在电子计算机上对具有调节过程的模型进行运算，并对调节器部分进行必要的整定，以达到所要求的模拟质量。

在具有各种工业自动调节器的实际系统中，对过程所进行的动态模拟是自动算法的一种变形。应着重指出的是，自动算法不是对自动调节系统进行模拟，而是对应用自动调节原理的生产对象进行研究。

对电子计算机超越人工计算的情况，可作这样的判定，即在电子计算机上完全可能并十分理想地应用复杂的算法对过程进行模拟，而这是手算根本无法做到的。

特别是当制定和实现金属加热过程的动态模型时，常会遇到的求以辐射和对流方式加热的“厚材”表面温度的问题。不难知道，所求温度必是下列四阶代数平衡方程的解：

$$y^4 + ay - b = 0$$

此方程的解为：

$$y = (1/2) \left\{ -\sqrt{k_1 - k_2} + \sqrt{2\sqrt{(k_1 - k_2)^2 + 3(k_1 + k_2)^2}} \right. \\ \left. \times \cos \left[\frac{1}{2} \arccos \frac{k_2 - k_1}{\sqrt{(k_1 - k_2)^2 + 3(k_1 + k_2)^2}} \right] \right\}; \\ k_{1,2} = \sqrt[3]{\pm a^2/2 + \sqrt{64b^3/27 + a^4/4}}$$

在动态模拟过程中多次对四阶方程求解，对于手算这无疑是非常难以进行的，而在电子计算机上则能很自然而轻快地得出解来。

应该指出，在电子计算机上对微分方程进行数值积分是一种动态模拟的通用方法，有时也采用其他解微方程的方法，如运算微积方法（对线性动态模型）。

因此，在研究金属温度及其加热过程的控制系统时，计算算法时所涉及的问题极为广泛，其中有技术方面的，也有数学方面的，而实际上它是处于下述一系列学科的边缘范畴：数学、控制理论、计算技术、冶金学、热工学等。在这些科学和技术领域中，经常不断地有新的理论和方法出现，因此作者决不认为所述及的问题已完美无缺了，而是感谢读者对本书的意见和建议。

本书所引述的应用计算技术进行金属温度计算检测及其加热过程控制方面的实验，主要来源于日丹诺夫冶金学院及黑色冶金自动化科学研究和实验设计研究所。由于本书内容的系统性，可以作为初在加热炉管理部门工作的专业人员教科书来用。

技术科学博士、Г.М.格林科夫教授为本书手稿提出了极其宝贵的意见，使它在内容的选取和安排上都得到了很大的改进，为此作者表示诚挚的感谢。

目 录

序言	I
第一章 金属加热及冷却模型的计算基础	1
一、钢的物理化学性能	1
二、燃料及气体的物理化学性能	11
三、氧化铁皮和耐火材料的物理化学性能	17
第二章 金属加热及冷却的数字动态模拟	18
一、数字模拟基础	18
二、第一类边界条件下的模拟算法	24
三、第一类边界条件下简化的模拟算法	34
四、第三类边界条件下的模拟算法	36
五、第三类边界条件下简化的模拟算法	42
第三章 金属加热的最佳控制算法	44
一、薄材加热的最佳控制	45
二、厚材加热过程的最佳化	59
三、存在随机扰动时控制的最佳化	71
第四章 金属加热的自动计算检测	79
一、均热炉内钢锭温度的计算检测	80
二、连续加热炉内金属温度的计算检测	102
三、加热炉数学模型的热工计算自动化	117
第五章 加热炉的控制系统	126
一、均热炉热制度的最佳化	126
二、连续加热炉热制度的最佳化	134
附录	136
参考文献	177

第一章 金属加热及冷却模型的计算基础

建立加热设备中热工及化学过程的数学模型时，要涉及钢、燃料、炉气、氧化铁皮及耐火材料的物理化学性能方面的有关参数。为保证将这些参数用于电子计算机的计算过程，需将表格式及图解式的数据处理成解析式的形式。

一、钢的物理化学性能

在钢加热和冷却过程的一些计算结果中有金属热函这个参数。为将钢的热函 i 转换成钢的温度 t ，向电子计算机存入的程序应以非线性的经验关系式为基础：

$$t = f(i)。(1)$$

图 1 为按文献[13]的数据绘制的 (1) 式的图形，其中曲线

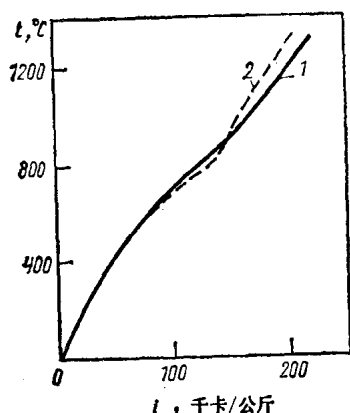


图 1 碳钢的热函与温度关系图

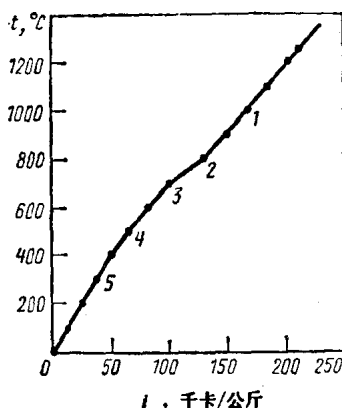


图 2 碳钢分段线性近似 $i-t$ 图

(1) 为含碳量 0.09% 的钢，曲线 (2) 为 1.75% 的钢。图 1 说明函数式 (1) 是非线性的，其特点决定于钢的含碳量。

故

$$t = \varphi(i, C), (2)$$

接着的问题就是确定函数 φ 的具体形式。

为在电子计算机上计算，将函数式（2）表示成分段线性的形式，如图2所示。图中所示为根据文献[13]的实验数据标成点，在以下各点之间截成折线： $0(t=0, i=0)$ ， $5(t=300, i=35.8)$ ， $4(t=500, i=63.7)$ ， $3(t=700, i=100.2)$ ， $2(t=800, i=129.6)$ ， $1(t=1000^{\circ}\text{C}, i=167.6\text{千卡/公斤})$ 等等。图示关系为含碳量0.234%钢的特性。近似实验函数式（2）在 $0\sim 1300^{\circ}\text{C}$ 范

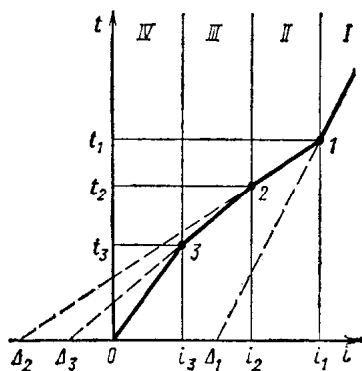


图3 钢的分段线性近似 $i-t$ 图的参数

围内截有六条直线，保证了用电子计算机计算有足够的精度（平均误差 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ）。这种分段线性函数 $t = \varphi(i, C)$ 也适用于其他碳钢。

图3为钢的分段线性近似 $i-t$ 图的示例。

$$\text{区域 I: } t = t_1 (i - \Delta_1) / (i_1 - \Delta_1); \quad (3)$$

$$\text{区域 II: } t = t_2 (i - \Delta_2) / (i_2 - \Delta_2); \quad (4)$$

$$\text{区域 III: } t = t_3 (i - \Delta_3) / (i_3 - \Delta_3); \quad (5)$$

$$\text{区域 IV: } t = t_4 i / i_4. \quad (6)$$

在已知金属热函 i 的条件下，就可按（3）~（6）式计算金属的温度。

引入符号

$$b_j = t_j / (i_j - \Delta_j)$$

并确定各种碳钢的 Δ_j 及 b_j 值（对 $i-t$ 图的六个区）。由文献[13]的

数据分析得出 (图 4):

$$\left. \begin{aligned} i_{1000} &= i_1 = 169.2 - 8.4C; \\ i_{800} &= i_2 = 129.3 + 1.4C; \\ i_{700} &= i_3 = 100.0 + 1.7C; \\ i_{500} &= i_4 = 63.3 + 1.8C; \\ i_{300} &= i_5 = 35.6 + 1.2C. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

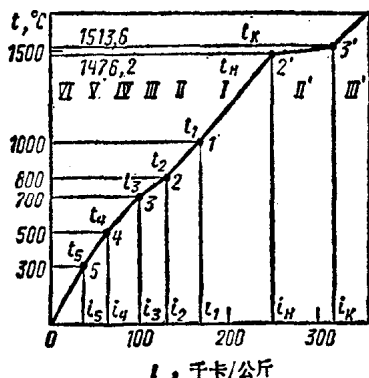


图 4 钢(0.234%C)的热函与温度关系图

式中 i ——热函, 千卡/公斤;

C ——钢的含碳量, %。

由此可得:

$$\left. \begin{aligned} b_6 &= t_5/i_5 = 300/(35.6 + 1.2C); \\ b_5 &= (t_4 - t_5)/(i_4 - i_5) = 200/(27.7 + 0.6C); \\ b_4 &= (t_3 - t_4)/(i_3 - i_4) = 200/(36.7 - 0.1C); \\ b_3 &= (t_2 - t_3)/(i_2 - i_3) = 100/(29.3 - 0.3C); \\ b_2 &= (t_1 - t_2)/(i_1 - i_2) = 200/(39.9 - 9.3C); \\ b_1 &= 1/c \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式 (b_1) 中 $c \approx 0.174 \sim 0.008C$ ——当 $t > 1000^\circ\text{C}$ 时钢的比热, 千卡/(公斤 $\cdot$ $^\circ\text{C}$)。

此外:

$$\Delta_i = i_j - t_j (i_{j-1} - i_j) / (t_{j-1} - t_j)$$

此后将采用具有变换符号的 Δ_i ：

$$\left. \begin{aligned} \Delta'_5 &= -\Delta_5 = 1.5(i_4 - i_5) - i_5; \\ \Delta'_4 &= -\Delta_4 = 2.5(i_3 - i_4) - i_4; \\ \Delta'_3 &= -\Delta_3 = 7.0(i_2 - i_3) - i_3; \\ \Delta'_2 &= -\Delta_2 = 4.0(i_1 - i_2) - i_2; \\ \Delta'_1 &= -\Delta_1 = 174 - 8C - i_1. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

根据(7)~(9)式，可将固体钢的 $i-t$ 图表示为下列形式：

$$\left. \begin{aligned} \text{当 } t > 1000^\circ\text{C } i > i_1 \\ \quad t &= (i + \Delta'_1)b_1; \\ \text{当 } 1000^\circ\text{C} \geq t \geq 800^\circ\text{C}, i_1 \geq i \geq i_2 \\ \quad t &= (i + \Delta'_2)b_2; \\ \text{当 } 800^\circ\text{C} \geq t \geq 700^\circ\text{C}, i_2 \geq i \geq i_3 \\ \quad t &= (i + \Delta'_3)b_3; \\ \text{当 } 700^\circ\text{C} \geq t \geq 500^\circ\text{C}, i_3 \geq i \geq i_4 \\ \quad t &= (i + \Delta'_4)b_4; \\ \text{当 } 500^\circ\text{C} \geq t \geq 300^\circ\text{C}, i_4 \geq i \geq i_5 \\ \quad t &= (i + \Delta'_5)b_5; \\ \text{当 } t \leq 300^\circ\text{C}, i \leq i_5 \\ \quad t &= i b_6 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

由热函到温度的这种转换，不仅用于固体钢的加热计算，而且也用于钢锭结晶的模拟过程。在研究热装均热炉的工作时，需用此种计算。为进行钢的结晶计算，将式(2)推广用于钢的熔化过程和液体状态。

以 t_* 代表钢的熔化终了温度，则按铁—碳平衡图^[14]有

$$t_* \approx 1530 - 70C, \quad (11)$$

式中 t_* ——钢的熔化终了温度， $^\circ\text{C}$ ；

C ——含碳量， $\%$ 。

同样，钢的熔化开始温度也是按其成分确定的：

$$t_* \approx 1530 - 230C. \quad (12)$$

式 (11) 适用于含碳 0~2.0%, 式 (12) 适用于含碳 0~1.7%。

文献[15、16]推荐的熔化热 r , 生铁 (4.3 % C) 为 52, 纯铁 (0.0 % C) 为 65 千卡/公斤。

$$\text{故: } r \approx 65 - 3C. \quad (13)$$

从文献[15]知液体钢的比热 $c \approx 0.2$ 千卡/公斤·°C。

在钢的熔化过程中, 伴随有热函的变化, 如图 4 所示 (对 0.234 % C)。在图 4 中除已述及的 I—VI 的几个区域外, 另分出了 II' 区 (熔化区) 和 III' 区 (液体状态):

$$\begin{aligned} i_x &= i_1 + (0.174 - 0.008C)(t_x - 1000) \\ &= 169.2 - 8.4C + (0.174 - 0.008C)(530 - 230C); \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} i_x &= i_x + (0.174 - 0.008C)(t_x - t_x) + r \\ &= 169.2 - 8.4C + (0.174 - 0.008C)(530 - 70C) + 65 - 3C \end{aligned} \quad (15)$$

因此:

$$\left. \begin{aligned} &\text{当 } t_x \geq t \geq 1000^\circ\text{C}, \quad i_x \geq i \geq i_1 \\ &\quad t = (i + \Delta'_1)b_1; \\ &\text{当 } t_x \geq t \geq t_x, \quad i_x \geq i \geq i_x \\ &\quad t = (i + \delta'_2)a_2; \\ &\text{当 } t \geq t_x, \quad i \geq i_x \\ &\quad t = (i - \delta'_1)a_1, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$\text{式中 } \left. \begin{aligned} a_2 &= (t_x - t_x)/(i_x - i_x); \\ \delta'_2 &= [(i_x - i_x)/(t_x - t_x)]t_x - i_x; \\ a_1 &= 1/0.2 = 5.0; \\ \delta'_1 &= i_x - 306 + 14C = i_x - 0.2t_x; \\ i_x - i_x &= [(0.174 - 0.008C) \times 160 - 3]C + 65 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

对于粗略的计算, 可将钢分成亚共析钢 (<0.8 % C) 及过共析钢 (>0.8 % C) 两类。这些钢的简化 $i-t$ 图解如图 5 所示。此处假定钢在固定温度下熔化。

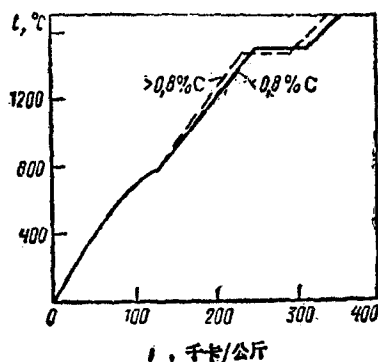


图 5 亚共析及过共析钢简化*i-t*图

下面给出*i-t*图的直线段区划:

亚共析钢:

$t, ^\circ\text{C}$	0	300	500	700	800	1500	1500	1600
						(固)	(液)	

$i, \text{千卡/公斤}$	0	36	64	101	130	251	313	333
-------------------	---	----	----	-----	-----	-----	-----	-----

过共析钢:

$t, ^\circ\text{C}$	0	400	700	800	1000	1465	1465	1565
						(固)	(液)	

$i, \text{千卡/公斤}$	0	50	102	131	159	233	292	312
-------------------	---	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

计算时可用 $c_m t$ 代替 i , c_m 为 $0 \sim t$ 温度范围内的平均比热, 因为求得近似公式是相当复杂的, 因而从 $C_m t$ 求 t 很难 (按已知温度 t 求 $C_m t$ 没有困难)。经验公式如下^[17]:

$$c_m(t) = c_{m0} + a_1 \left(\frac{t}{100} \right)^n + \frac{a_2}{\text{cha}_3 [(t-t_0)/100]} \quad (18)$$

包含的常数 C_{m0} , a_1 , a_2 , a_3 , n 及 t_0 , 对各种钢其数值如下:

钢 种	C_{m0}	a_1	a_2	a_3	n	$t_0, ^\circ\text{C}$
碳 钢 ⁽¹⁸⁾ (0.05~1.3%C)	0.116	0.0023254	0.02200	0.85	1.190	855
亚共析钢 ^(13,14) (0.09~0.83%C)	0.113	0.0013681	0.02245	0.84	1.455	870
过共析钢 ^(13,14)	0.117	0.0013847	0.02200	0.86	1.360	840

(0.83~1.4%C)

低合金钢 ^{①(18)}	0.117	0.0014300	0.02380	0.89	1.355	820
铬镍钢(15— 22%Cr; 8— 15%Ni) ⁽¹⁸⁾	0.118	0.0028600	0.00000	—	0.850	—

公式 (18) 的这个 $c_m = c_m(t)$ 近似关系式的平均误差, 在 0~1250°C 范围内, 对于各种钢号为 $\pm (0.5 \sim 0.8)\%$ 。图 6 为按 (18) 式绘制的过共析钢的温度曲线 $C_m(t)$ 。图中的点是 C_m 的实际数值。其他钢号的碳钢或低合金钢的 $C_m(t)$ 曲线与之相似。

在钢的加热和冷却计算中, 钢的真比热 $c(t)$ 与温度的关系具有特别重要的意义。钢的真比热的近似公式为一分段平滑折线函数式:

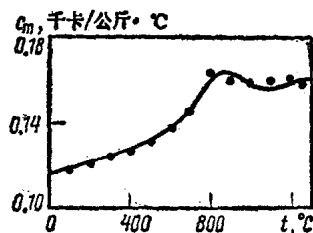


图 6 过共析钢的平均比热

$$c(t) = c_0 + a_1(t/1000)^n + a_2 \exp(-a_3|t - t_0|) \quad (19)$$

各种钢的 c_0, a_1, a_2, a_3, n 和 t_0 等常数值列在下面:

钢 种	c_0	a_1	a_2	$a_3^{\bullet}$	n	$t_0, ^\circ\text{C}$
碳钢(0.09~ 1.235%C) ⁽¹⁸⁾	0.115	0.0477	0.194	$\frac{0.0099}{0.0261}$	1.0	768
低合金钢 ^{②(18)}	0.113	0.0235	0.160	$\frac{0.0047}{0.0135}$	5.0	740

① (0.45~1.6%Cr, 1.0~1.8%Mn, 1.1~1.4%Si, 0.15~0.55%Mo, 0.1~0.2%V, 1.0~3.15%Ni)。

各常数的单位: c_0 及 a_2 —千卡/(公斤·°C); a_1 —千卡/(公斤·°Cⁿ⁺¹); a_3 —°C⁻¹。

② 分子指 $t \leq t_0$, 分母指 $t > t_0$ 。

③ 0.45~1.6%Cr, 1.0~1.8%Mn, 1.1~1.4%Si, 0.15~0.55%Mo, 0.1~0.2%V, 1.0~3.15%Ni。

各常数单位: c_0 及 a_2 —千卡/(公斤·°C); a_1 —千卡/(公斤·°Cⁿ⁺¹); a_3 —°C⁻¹。

铬镍钢(15~ 0.116 0.0380 0.000 — 0.7 —
22%Cr, 8~
15%Ni)⁽¹⁸⁾

对各种钢, 在从 0 到 1200~1300℃ 的温度范围内, 近似式的平均误差为 ±(2.2~4.9)%。图 7 是按 (19) 式对碳钢绘制的

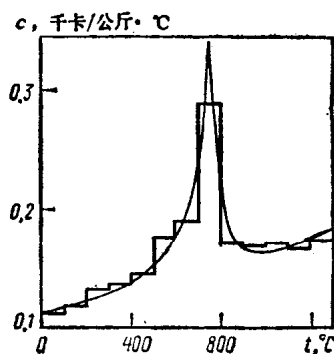


图 7 碳钢的真比热

$c=c(t)$ 曲线图, 与之相比的阶梯折线是由实验得来的按百度分段的平均比热变化情况⁽¹³⁾。

大断面钢件的不定态导热计算公式中包括有钢的导热系数:

$$\lambda(t) = \lambda_0 + a_1 \left(\frac{t}{100} \right) - \frac{a_2}{\text{ch} a_3 [(t-t_0)/100]} \quad (20)$$

常数 λ_0, a_1, a_2, a_3 及 t_0 对不同钢种的数值是⁽¹⁸⁾:

钢 种	λ_0	a_1	a_2	a_3	t_0
低碳钢(0.05~0.2%C)	54.3	0.0	31.7	0.245	975
中碳钢(0.2~0.6%C)	48.1	0.0	26.9	0.285	935
高碳钢(0.6~1.3%C)	48.3	0.0	27.2	0.235	900
低合金钢①	42.0	0.0	18.5	0.240	950

① 0.45~1.6%Cr, 1.0~1.8%Mn, 1.1~1.4%Si, 0.15~0.55%Mo, 0.1~0.2%V, 1.0~3.15%Ni。

各常数单位: λ_0 —千卡/(米·时·℃), a_1 —千卡/(米·时·℃), a_2 —千卡/(米·时·℃), a_3 —℃⁻¹, t_0 —℃。