

东北重型机械学院科技情报科

类	分	
号	号	

# 大型铸锻件文集

第 16 集

第二重型机器厂技术情报科编译

第一机械工业部情报所

一九七六年六月

11

# 大型鑄鍛件文集

第 16 集

第二重型机器厂技术情报科编译

第一机械工业部情报所

一九七六年六月

## 出 版 说 明

在批邓和反击右倾翻案风的斗争取得伟大胜利的大好形势下，为了适应抓革命、促生产的需要，根据毛主席“洋为中用”的教导，大型铸锻件文集第16集出版了。

本集收入了第七届国际锻造会议论文五篇，另外，根据我国大型锻件制造情况从国外文献中选用了五篇，内容涉及大型锻件的化学成分，组织与性能，锻造和热处理，着重介绍了用重熔拼焊法生产大型发电机转子，大型锻件冷却过程计算和钢的氢脆现象的研究，供从事大型锻件制造的工人、干部和技术人员参考。

收入本集的第七届国际锻造会议论文，其中的照片图由于原稿不清，无法复制，故略去，希鉴谅。

本集中“3.5%NiCrMoV转子钢的回火脆性”一篇系北京钢铁研究院译的，二重情报科作了校对。

由于我们外文水平低，专业知识不足，难免有误，尚望读者批评指正，以利改进我们的工作。

编 者

一九七六年六月

# 毛主席语录

自力更生为主，争取外援为辅，破除迷信，独立自主地干工业、干农业，干技术革命和文化革命，打倒奴隶思想，埋葬教条主义，认真学习外国的好经验，也一定研究外国的坏经验——引以为戒，这就是我们的路线。

抓革命、促生产、促工作、促战备。

# 目 录

大锻件冷却过程的计算.....	( 1 )
转子的成分、热处理、组织和性能.....	( 17 )
转子的锻造.....	( 28 )
√钢的氢脆现象(历史的考察及现状的研究).....	( 32 )
论大型钢锻件的制造,冶金条件对性能的限制和新的试验规范.....	( 67 )
用重熔拼焊(ABR)法生产原子能电站的大型发电机转子.....	( 79 )
低合金钢大型锻件的凝固特点.....	( 85 )
压缩应力对于21CrMoV5.11钢重型锻件 淬火时相变特性的影响.....	( 88 )
砧子形状在锻造的拔长工序中对锻件内部疏松锻合的影响.....	( 91 )
3.5%NiCrMoV转子钢的回火脆性.....	(102 )

# 大鍛件冷却过程的計算

大型工件淬火时冷却过程的知识根据不同的理由都是重要的。借助连续冷却相变图可以估计工件截面中组织成分和机械性能的详细情况，通过这可以使选择一定用途的钢材容易些。

生产上的冷却过程和回火过程可以通过拉力试样和冲击试样模拟热处理来模仿，这样就可以做出关于一个工件在调质情况下达到的机械性能的结论。可是，这种模拟试验只能表示冷却对这种材料性能的影响。因为工件的锻造比和偏析情况几乎没有考虑。

在测定淬火钢内应力时冷却曲线的知识也是必不可少的。热应力可以根据工件中的温差（随时间的）变化近似地算出。如果从连续冷却相变图导出不同截面中的组织变化，就可算出相变应力，最低限度可以得到它的种类和数量级。

在参考文献中有大量的几何形状简单的物体的冷却曲线，可惜不同作者所测得的结果彼此间局部有严重的差异。这也许不仅是由于试验条件（工件的几何形状，材质，冷却介质和试验技术）不同，而且还有测量的误差之故。另一方面，在大型工件上要获得冷却曲线花费很高，又考虑到在以后还难于遇到类似情况，所以兴趣被迫转移到用数学计算去解决问题。

在几何形状简单的工件中的不稳定温场的计算方法早已知道，这种方法尽管有一些为了避免非常复杂的计算程序的假设条件有局限性，但还是能算出比较可靠的大型锻件心部的冷却曲线。不过计算的边缘区冷却曲线常有很大出入。

在本文中介绍圆柱形和板状物体在油淬和空冷情况下，借助电子计算机去求出随时间的温度变化。试验材料选用合金调质钢的典型代表34CrNiMo6钢。

## 计算依据

碳钢或者合金钢工件的冷却状态除了其尺寸和表面状态以外，还决定于其导热性，比热和相变热以及首先是对冷却介质的热传导（热交换）。我们不得不先谈一下这些热参数及其与温度的关系的求法。

一种金属材料的导热系数 $\lambda$ 及其与温度的关系可以根据其化学成分来计算。按H. 乌利茨公式有以下关系：在 $\alpha/\gamma$ 相变以下的温度范围内的：

$$\lambda_1 = \frac{360}{5.5 + 0.16^2 + 0.358 + 2.2\%C(1 - 0.11258) + 4.5\%Si(1 - 0.1258) + 1.9\%Mn(1 - 0.11258) + 0.64\%Cr(1 - 0.18) + 0.9\%Ni(1 - 0.1258)} \quad (1)$$

$$\delta = \frac{\text{温度}^\circ\text{C}}{100}$$

在 $\alpha/\gamma$ -相变以上的温度范围内的;

$$\lambda_s = \lambda_u + \frac{25 - \lambda_u}{1200 - \delta u} (\delta - \delta u) \quad (2)$$

$\delta u = \alpha/\gamma$ 相变温度

$\lambda_u =$ 将 $\delta u$ 代入(1)所得导热系数

$\delta =$ 在 $\gamma$ 或 $\lambda$ 区的温度

34CrNiMo6钢的化学成分见表1; 假设其平均相变温度 $\delta u = 450^\circ\text{C}$ (对比图2), 所算出的导热系数值见表2。

表1 试样材料34CrNiMo6钢的化学成分

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni
0.35	0.34	0.53	0.020	0.022	1.35	0.26	16.9

表2 84CrNiMo6钢的导热系数与温度的关系( $\lambda$ : 千卡/米·时 $^\circ\text{C}$ )

100 $^\circ\text{C}$	200 $^\circ\text{C}$	300 $^\circ\text{C}$	400 $^\circ\text{C}$	500 $^\circ\text{C}$	600 $^\circ\text{C}$	700 $^\circ\text{C}$	800 $^\circ\text{C}$
32.8	32.8	32.1	31.1	30.0	29.3	28.6	27.9

根据W. 海立根斯塔特试验, 比热 $C_p$ 与化学成分的关系很小, 为了计算, 我们于图1立出了不同作者的数据, 并将其平均值列于表3。在700 $^\circ\text{C}$ 和800 $^\circ\text{C}$ 之间的比热由于 $A_1$ 、和 $A_2$ 点相变而突变, 下面我们将看到这明显地表现为计算的冷却曲线的不连续性。

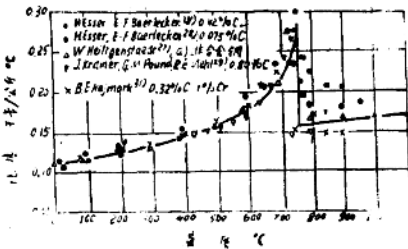


图1 不同参考文献中碳钢和一种合金钢的比热与温度的关系

表3 碳钢的比热与温度的关系(千卡/公斤 $^\circ\text{C}$ )

100 $^\circ\text{C}$	200 $^\circ\text{C}$	300 $^\circ\text{C}$	400 $^\circ\text{C}$	500 $^\circ\text{C}$	550 $^\circ\text{C}$	600 $^\circ\text{C}$
0.118	0.128	0.138	0.148	0.159	0.167	0.179
650 $^\circ\text{C}$	700 $^\circ\text{C}$	740 $^\circ\text{C}$	760 $^\circ\text{C}$	770 $^\circ\text{C}$	800 $^\circ\text{C}$	850 $^\circ\text{C}$
0.196	0.226	0.245	0.280	0.155	0.158	0.160

计算试件内部的热传导需要导温系数 $a$ 确定导温系数 $a = \lambda / c \cdot \gamma$ 就要知道比重与温度的关系, 按H·乌立茨公式计算比重与温度的关系,

$$\gamma = \frac{\gamma_0}{1 + 3\beta \cdot \delta}$$

$\gamma_0$  = 室温比重, 34CrNiMo6钢的 $\gamma_0 = 7679 \text{Kg/m}^3$

$\beta$  = 线胀系数 (按表4),  $\text{m/m}^\circ\text{C} \cdot 10^{-6}$

$\delta$  = 温度,  $^\circ\text{C}$

表4 报告了比重和线胀系数与温度的关系。

表4 34CrNiMo6钢的比重 $\gamma$ 和线胀系数 $\beta$ 与温度的关系

参 数	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C
$\beta \text{m/m}^\circ\text{C} \cdot 10^{-6}$	11.0	12.2	12.8	13.2	13.6	13.9	14.1	10.4
$\gamma \text{kg/m}^3$	7654	7623	7592	7560	7525	7491	7459	7455

利用 (化学成分相当于表1的钢的) 连续冷却相变图 (图2) 来考虑 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变的相变热。在这个图中有 (在各种冷却速度下所形成的) 各种组织的百分数, 根据这些百分数和参考文献中的百分之百相变的数据, 可以估算出在一定冷却过程情况下出现的相变热效应:

$$Q = Q_{100} \cdot f(t)$$

$t$  = 从奥氏体化温度到相变开始的冷却时间。

$Q_{100}$  = 在一个相变区完全相变的热效应。由图2推导的函数 $f(t)$ 值归纳在表5中。

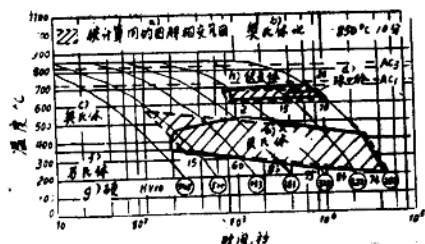


图2 34CrNiMo6钢的连续冷却相变图

- a. 用于计算的图解相变范围,      b. 奥氏体化: 850°C 10分钟。  
 c. 奥氏体, d. 珠光体, e. 贝氏体, f. 马氏体, g. 硬度Hv, h. 铁素体

按参考文献数据, 在纯珠光体区域情况下相变热取  $Q_{100} = 18.4$  卡/克 或  $1.415 \cdot 10^5$  千卡/米<sup>3</sup>, 在纯马氏体区域情况下相变热取  $Q_{100} = 20$  卡/克 或  $1.52 \cdot 10^5$  千卡/米<sup>3</sup>, 因为参在考文献中没有找到在纯贝氏体区域情况下的相变热的数据。在计算中便使用在马氏体区域



情况下的相变热数值。

按公式(4)计算出的一定冷却过程的相变热应该正好对应相变特性(数量/单位时间)分配在各个相变范围内。但是为简化计算程序,便将珠光体区域和贝氏体区域的最大相变热忽略,而在这些相变范围的相变热象在马氏体相变范围一样,取一个不变数值。对于这个问题的详情,在讨论计算过程时再谈。

表5 34CrNiMo<sub>6</sub>钢的函数f(t)值 1)

珠光体转变的温度区域		贝氏体转变区		马氏体转变区	
时间/秒	f(t)	时间/秒	f(t)	时间/秒	f(t)
<900	0	<100	0	<280	1.00
900	0.02	100	0.10	280	0.90
1500	0.08	120	0.15	330	0.85
3000	0.15	200	0.30	500	0.70
5000	0.23	400	0.60	900	0.40
8000	0.30	1100	0.85	2000	0.15
13000	0.35	3000	0.95	5000	0.20
		9000	0.85	>5000	0
		25000	0.70		
		40000	0.65		

1) 见方程式(4)

连续冷却相变图(图2)以图解的形式说明了相变开始温度 $T_B$ 和相变结束温度 $T_E$ 。珠光体区域和部分马氏体区域可以认为 $T_B$ 和 $T_E$ 是不变的。与此相反,在带有预先相变的冷却速度情况下,在贝氏体和马氏体区域的相变开始和结束温度与时间的关系就要考虑。表6为各个相变区域内 $T_B$ 和 $T_E$ 的数值。

表6 34CrNiMo<sub>6</sub>钢在珠光体、贝氏体、马氏体区域相变时 $T_B$ 和 $T_E$ 的温度

温度参数	珠光体转变区	贝氏体转变区	马氏体转变区	
			$t^1) < 100s$	$t^1) > 100s$
始温 °C	680	$700 - 65 \lg t^1)$	350	$500 - 65 \lg t^1)$
终温 °C	620	$500 - 65 \lg t^1)$	150	$300 - 65 \lg t^1)$

1) 从奥氏体化温度到相变开始的冷却时间。

油冷的给热系数 $\alpha$ 通过淬火试验测定,试验时使用圆柱形试样尺寸为 $\phi 20 \times 50mm$ ,淬火油是两种常用淬火油(用I和II表示),其物理性能见表7。图3的上部是用Cr-Al热电偶测

得的34CrNiMo6钢的冷却曲线,测试点在试样中间距表面0.5mm处,奥氏体化温度为常用的

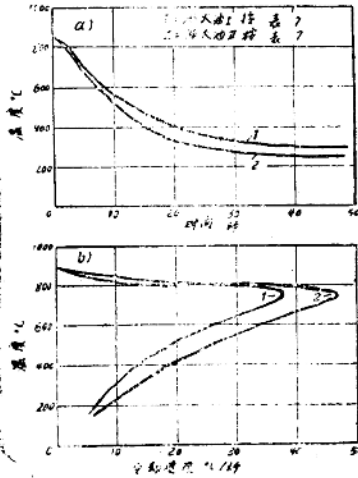


图3  $\phi 20\text{mm} \times 50\text{mm}$ 试样在两种淬火油中淬火时,边缘区的温度变化(上图)和冷却速度(下图)。

850°C。淬火油Ⅱ显示出的冷却作用比淬火油1急剧。图3的下图是由上图求出对时间的冷却速度 $\Delta T/\Delta t$ 。借助于这些数值以及公式(5)(试件中热含量的改变)和公式(6)(淬火介质的吸热)计算给热系数如下:

$$\Delta Q_1 = G \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (5)$$

$$\Delta Q_2 = d \cdot (T - T_0) \cdot \Delta t \cdot F \quad (6)$$

公式(5)和(6)对照得:

$$\alpha (= \text{千卡}/\text{米}^2 \cdot \text{时} \cdot \text{度}) = \frac{G \cdot c_p}{F \cdot (T - T_0)} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \cdot 3600 \quad (7)$$

式中G:  $\phi 20 \times 50\text{mm}$ 试样的重量(公斤)

$c_p$ : 比热(千卡/公斤·度)

T: 时间t的试样温度(°C)

$T_0$ : 冷却介质温度: 40°C

$\Delta T/\Delta t$ : 试样的冷却速度, 图3下图°C/秒)

F: 试样的表面积, 米<sup>2</sup>

这样求得的给热系数(见表8), 严格地讲只适用于所用试样( $\phi 20 \times 50\text{mm}$ )的尺寸。在计算冷却曲线时, 可以忽略淬火油的给热系数与尺寸的关系。

按H·鲁福斯的数据计算的在静止空气中冷却的给热系数见表9

本文所涉及的是园柱形和板状另件的冷却曲线。为了能够相互比较计算的各冷却曲线，在各种情况下，固定园柱长L和直径D之比 $L/D=5$ ，半个板宽B和半个板厚H之比 $B/H=10$ ，按H·乌立茨的意见，这种尺寸关系的园柱形和板状件可视为无限长和无限宽。计算开始温度一律用 $850^{\circ}\text{C}$ 。

**表7 计算选用的淬火油的物理性能**

油的参数	粘 度 cSt		闪 点 $^{\circ}\text{C}$	比 热 在 $60^{\circ}\text{C}$ 时 千卡/公斤 $^{\circ}\text{C}$	密 度 在 $50^{\circ}\text{C}$ 时 克/厘米 $^3$
	在 $20^{\circ}\text{C}$ 时	在 $50^{\circ}\text{C}$ 时			
I <sup>1)</sup> ) .....	32.6	11.3	185	0.51	0.87
II <sup>2)</sup> ) .....	53	13	175	0.48	0.92

1) 商标“Super Quench”，制造者：Gulf

2) 商标“Carnea”制造者：Shell

**表8 34CrNiMo6钢制 $\phi 20 \times 50\text{mm}$ 试样在计算选用淬火油中冷却时给热系数 $\alpha$  (千卡/米 $^2 \cdot$ 时 $^{\circ}\text{C}$ )与温度的关系**

油的参数	200 $^{\circ}\text{C}$	300 $^{\circ}\text{C}$	400 $^{\circ}\text{C}$	500 $^{\circ}\text{C}$	600 $^{\circ}\text{C}$	650 $^{\circ}\text{C}$	700 $^{\circ}\text{C}$	750 $^{\circ}\text{C}$	800 $^{\circ}\text{C}$
I <sup>1)</sup> ) .....	380	475	545	755	920	1050	1310	1040	700
II <sup>2)</sup> ) .....	710	740	870	990	1205	1360	1560	1400	750

1) 商标“Super Quench”，制造者：Gulf

2) 商标“Carnea”，制造者：Shell

**表9 在静止空气中冷冷时给热系数 $\alpha$  (千卡/米 $^2 \cdot$ 时 $^{\circ}\text{C}$ )与温度的关系**

100 $^{\circ}\text{C}$	200 $^{\circ}\text{C}$	300 $^{\circ}\text{C}$	400 $^{\circ}\text{C}$	500 $^{\circ}\text{C}$	600 $^{\circ}\text{C}$	700 $^{\circ}\text{C}$	800 $^{\circ}\text{C}$
35	35	33	31	29	28	27	25

## 计 算 方 法

用数字计算机“Control Data3300”和一个在我们厂设计的，处理稳定温场和不稳定温场的程序来完成计算任务。以下简单叙述这个程序的基本组成。

数字计算机只能处理离散数值，所以要把提出的计算任务离散化。在上述情况下，就要把园柱和板细分成七个园柱园环形或园盘形单元（局部离散化）。除了这些“内部”单元之外，为了考虑冷却条件，即冷却介质的种类，还采用了“外部”单元。在每个单元内比重和

比热流的可变的温度场，导热性和比热，均用平均值对应圆柱轴向配置，在单元之间称为“合缝”的分离面上的平均给热系数，在“内部”“合缝”中平均给热系数为无限大，用这种方法便可以近似计算通过合缝的热流量和确立每个单元的热平衡，综合这些平衡，就可以建立计算各单元温度与冷却时间的关系的微分方程系统。为了解决这一方程系统，就要把时间作离散化，在这时候，按照稳定准则把时间增量  $\Delta t$ （也称累接）向上限制。

用上述的程序可以比较简单地解决不同的材料参数和冷却介质参数与温度所产生的计算任务。考虑相变热有些困难。正如已经提到的那样，按公式（4）求得的一个指定冷却过程的相变热应该均匀地分配在相应的时间——温度场上，因为计算机是不“知道”相变开始和相变结束的时间点的（见表6），故必须选用在图4中所拟出的近似方法。如果瞬时温度  $T_1, T_2, \dots, T_n$  在热流的  $T_B$  ——  $T_E$  温度范围内，那么就根据最后确定的数值  $T, T_1, \dots, T_{n-1}$  和  $t, t_1, \dots, t_{n-1}$  假设为线性曲线，计算预定的时间终点  $t_{E1}, t_{E2}, \dots, t_{En}$ 。在每个时间增量  $\Delta t$  下发出一定的热量。随着时间的推移一旦增量超过  $T_E$ ，便可得知留下的总热量。

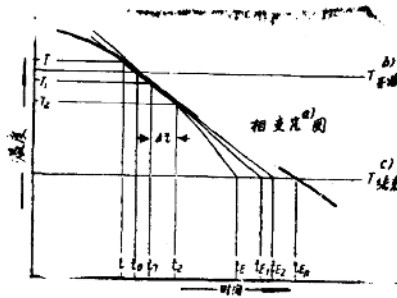


图4 相变热逐步输送的图解说明

$\Delta t = 1$  个时间增量

$t_0$  到  $t_E$  = 没考虑热流的冷却过程

$t_0$  到  $t_{En}$  = 考虑热流的冷却过程

可以用坐标描绘器，按照冷却曲线簇的形状，以图解方式来表示计算的结果。

## 计 算

图5到图8为  $\phi 100 \sim \phi 2000$  mm 的无限长圆柱体在两种采用的淬火油（见表7）及静止空气中冷却的曲线簇。用轴距  $r$  与圆柱半径  $R$  之比来表示冷却曲线在圆柱截面中的位置。无限宽的板在淬火油中冷却的冷却曲线见图9，在这种情况下，冷却曲线的位置用距板中间平面的距离  $h$  和半个板厚  $H$  之比来表示。

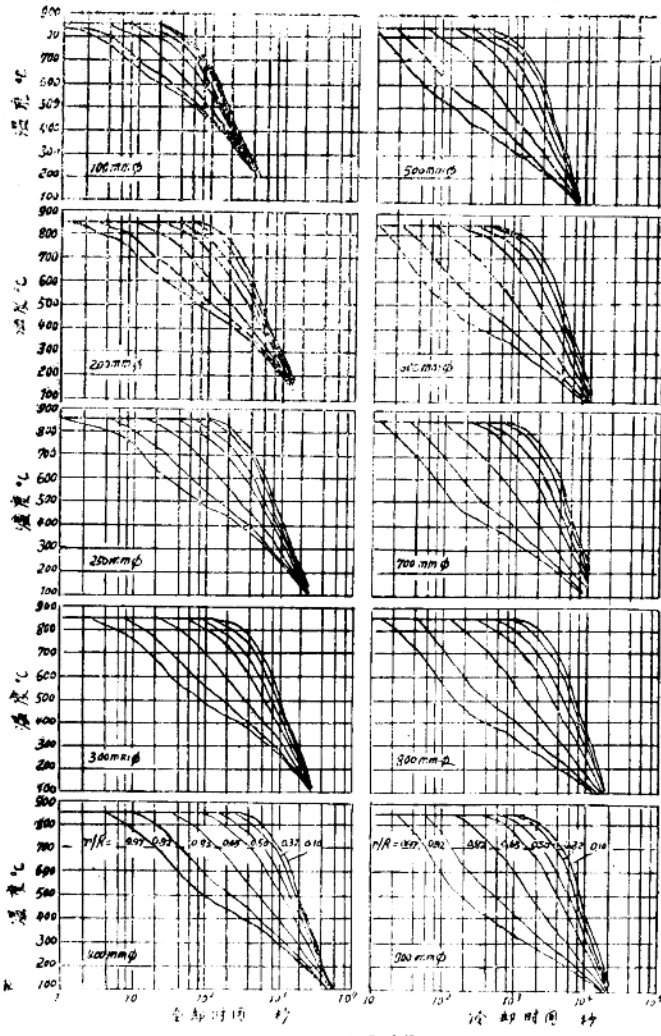


图5  $\phi 100 \sim 900\text{mm}$  的无限长园柱体整个截面上的计算出的冷却曲线，在 I\* 油中冷却。

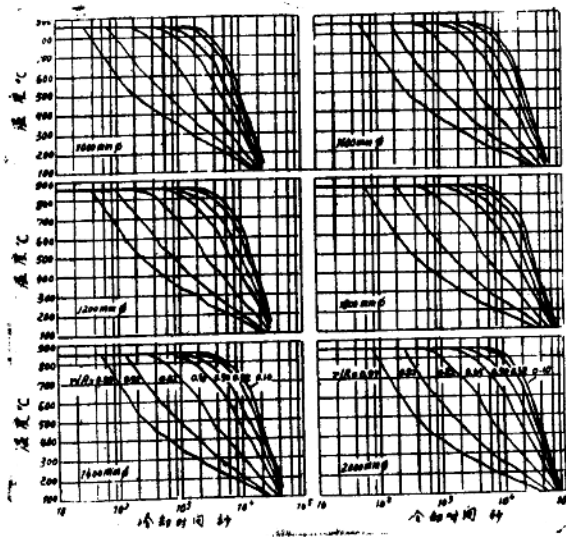


图6  $\phi 1000 \sim 2000 \text{mm}$  的无限长园柱体整个截面上的计算出的冷却曲线，I\*油中冷却。

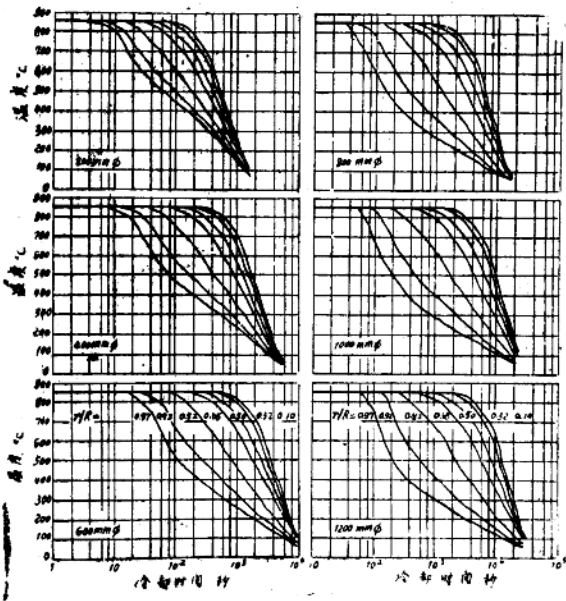


图7  $\phi 200 \sim 1200 \text{mm}$  的无限长园柱体在II\*油中冷却时计算的冷却曲线

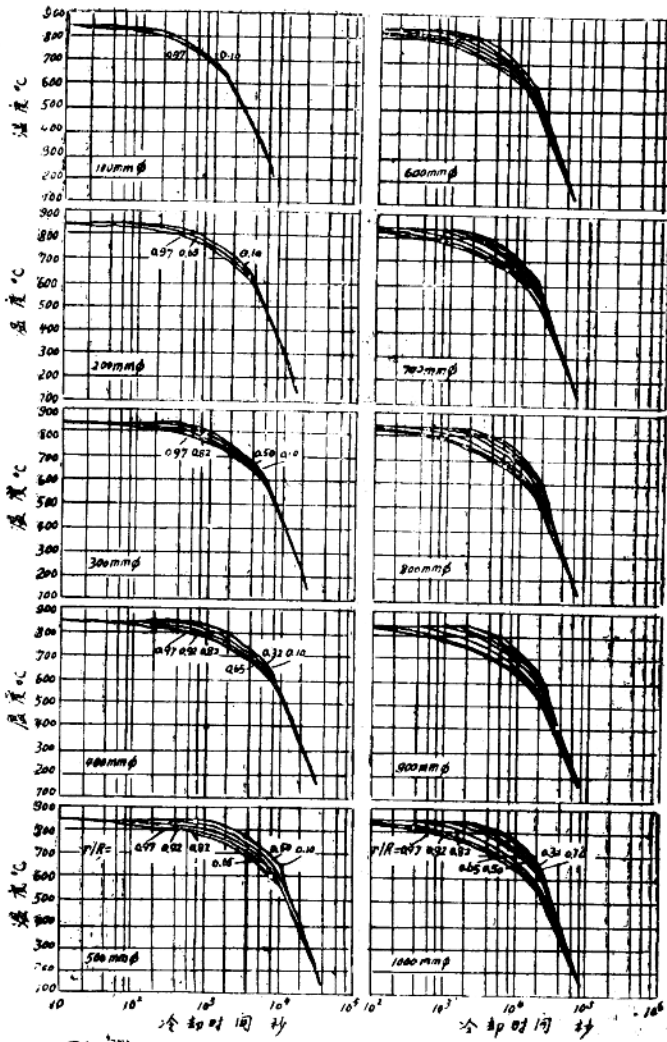


图8  $\phi 100 \sim 1000 \text{mm}$  的无限长园柱体在静止空气中冷却时计算的冷却曲线

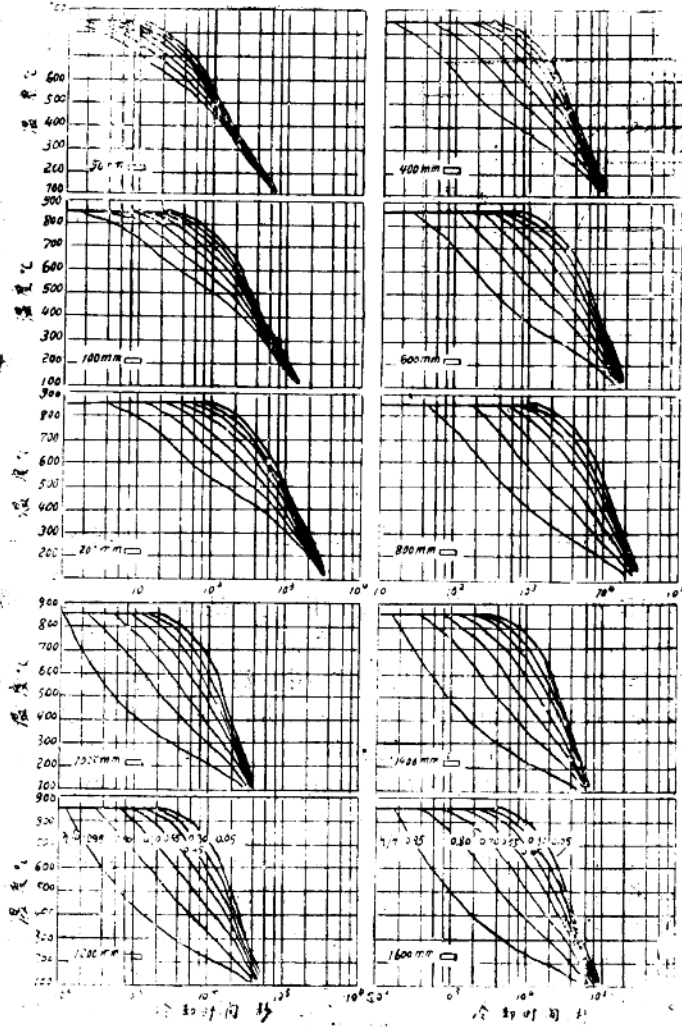


图9 50~1600mm厚的无限宽的板在I°油中冷却时计算的冷却曲线



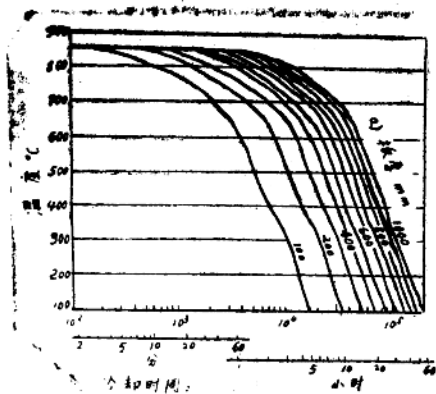


图10 100~1000mm厚的无限宽的板在静止空气中冷却时心部的计算冷却曲线

在空冷情况下，与圆柱体相似，板截面上的温差小，所以在图10中只给出了心部的冷却曲线。

冷却曲线在800和700℃之间有时可观察到的不稳定性是由于上述的在这个温度范围内比热的突然改变之故。相变热的影响在低温情况下才是可以察觉的。

图11是油冷圆柱体的计算冷却曲线和参考文献中的测量结果的对比。与文献数据局部有较大分散，其原因除了冷却介质和试件材质的影响之外，还有试件的长度 $L$ 和直径 $D$ 有不同比值所引起。在 $L/D < 3$ 的情况下，冷却是在端面方向和圆柱面方向进行。在 $L/D > 3$ 的情况下，作为测量面的圆柱中心热量几乎完全从圆柱面离开。在每个图中，只要知道，都给出了工件的尺寸。

截面上所有布置的计算的冷却曲线的时—温特性与工件实际冷却状态完美相符。从测量结果的分散情况来看，计算的冷却曲线应该视为可靠的。

图12为空冷时计算的冷却曲线与测量结果的相应比较。参考数据的分散性在这里自然很少是大的，与此相反而相变热的影响，尤其是在碳钢情况下，冷却过程中以清晰的转折点形式却明显表现出来。直径在 $\phi 300\text{mm}$ 以下的计算冷却曲线与测量结果偏离比较严重，但在直径较大情况下，吻合就比较满意。

板状件的计算的冷却曲线没有测量结果来校核。由图13看出，板心从800℃冷到200℃的时间，大约是与厚度相同的圆柱体的两倍。因为在厚度相同的情况下，无限宽的板和无限长的圆柱的所谓标准模数（表面/体积）有1：2关系，应该相信图9和图10中的冷却曲线。

为了模拟碳钢和合金钢制大锻件淬火时心部的冷却过程，图13中包含有大量尺寸为 $12 \times 12 \times 60\text{mm}^3$ 的试样模拟处理的数据。这种在以前的文献中已经刊登过的相似图表可很好地用于估量从淬火温度以不同速度冷却时达到的机械性能。