

鋼的感应加热 热处理工艺特点

И. Н. 基金編著

李 文 卿 譯

中国工业出版社

在这本小册子中，闡明了鋼的感应加热热处理工艺的特点和优点，列举了高频淬火时优越的加热规范图，并把在应用高频淬火的情况下决定着热处理工艺特点的一些原理进行了总结。

本书的讀者对象是从事热处理工作的工程技术人员；也可供高等工业学校金属学及热处理专业的师生参考。

苏联 И. Н. Кидин 著 ‘Технологические особенности термической обработки стали с применением индукционного нагрева’ (Машгиз 1959 年第一版)

* * *

鋼的感应加热热处理工艺特点

李文卿 譯

*

机械工业图书編輯部編輯 (北京阜成門外百万庄)

中国工业出版社出版 (北京佟麟閣路 10 号)

(北京市书刊出版事业许可出字第 110 号)

中国工业出版社第四印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 2 · 字数 41,000

1962 年 6 月北京第一版 · 1962 年 6 月北京第一次印刷

印数 0001—3166 · 定价 (10-7) 0.32 元

*

统一书号: 15165 · 1495 (一机-285)

目 次

序言	2
第一章 感应加热动力学的特点	3
第二章 淬火时感应加热的热参数	10
1 淬火的加热温度	10
2 相变区内的加热速度	11
第三章 表面淬火时淬硬层厚度的确定	16
第四章 淬火时优越的感应加热规范	23
1 现有的淬火时感应加热合理规范图	23
2 关于优越规范和容许规范的分界线的标准	27
3 高频淬火时的优越加热规范图	34
第五章 淬火时不容许的感应加热规范	38
第六章 高频淬火后合金钢中的残余奥氏体	41
1 高频淬火后铬钢中的残余奥氏体	41
2 高频淬火后钨钢中的残余奥氏体	44
3 高频淬火后钼钢中的残余奥氏体	45
第七章 高频淬火后的结构钢的回火	47
結論	56
参考文献	59

序 言

在机器和机械零件的所有热处理作业中，就可能用快速感应加热来代替缓慢的炉中加热这一方面来说，淬火是最为人们所感兴趣的。通常，高频淬火惯用于处理中碳的碳钢或低合金钢零件。很少把它应用于工具和某些特殊零件。

对快速感应加热热处理的特点进行的研究证明，在许多场合下只要正确应用高频淬火都能够比普通淬火获得更高质量的零件。为了实现高频淬火的这些优点，就必须考虑到零件的形状和尺寸，以及制造零件用的钢的化学成分，而采用最合理的加热规范。回火规范也必须仔细选择，以便能够使零件得到较佳的综合机械性能，并尽量减小淬火时所产生的内应力。

近20~25年来，除研究与热处理的感应加热条件有关的电工技术问题〔1~21〕以外，关于掌握具体零件高频淬火的工作〔22~41〕，关于研究钢在高频淬火后的性能的工作〔42~67〕，关于利用感应加热作为处理零件的新方法的工作〔68~78〕，都得到极其重大的发展。因此，高频淬火方法获得了广泛的推广。现在有着丰富的、有价值的、便于这一方法继续推广的实验资料。

但是，在上述的大多数著作中，只对个别的、局部的问题进行了讨论。如果说综合性的研究能够作为对各种各样不同零件规定最正确的具体工艺的基础，那末对综合性研究做的不够就会使更进一步掌握高频淬火方法发生困难。对获得比普通淬火质量更高、综合性能更好的工件的必要性和可能性，目前还考虑得很少，很不够。

本书试图进一步发展一系列决定着在应用高频淬火条件下的热处理工艺特点的总结性原理。

我们人为感应加热动力学，是一个实际上（在大多数情况下）不依相变为转移的独立因素，由于我们提出了这样的新观点，就有了以通俗的形式来叙述一些基本原理的必要性，而这些基本原理应该成为拟制高频淬火的具体工艺时的指南。

第一章 感应加热动力学的特点

拟制高频淬火工艺的基本原理，应该依靠对感应加热动力学主要特点的了解，依靠对感应加热同普通炉中加热以及一些用其它能源的快速加热法的最大区别的了解。

首先要指出的是影响感应加热动力学的一些基本因素。

感应加热最重要的特点之一在于，在被加热的物件中所发出的功率是不均匀分布的（第一个因素）。我们不去深入计算感应器—被加热钢件电磁系统，仅仅指出一个原则性的情况：交流电流在感应器和被加热零件中的不均匀分布，造成大部分感应电流集中于被加热零件表面层的可能性，从而保证了这层的加热最为强烈。

随着电流频率及电流渗入到冷钢和热钢中的相对深度的不同，加热动力学可以在广大范围内变化。

发出功率在加热过程中的重新分布，对感应加热动力学有显著的影响（第二个因素）。这一情况是由作为铁磁材料的钢的感应加热特点所决定的，并且是同它的性能（磁导率、热容量、电阻率）随着温度升高而有极大改变相联系的。

上述物理性质，起初只发生渐渐的变化，而以后却发生急剧地变化。由于铁磁材料的这些特点，表面层中单位受能体积在低温时所收得的功率很大，但它在居里点或接近于居里点的温度时却急剧地减小了。

上述情况使得表面层的加热大为变慢，这就决定了向零件内层传热过程发展上的变化（第三个因素）。

由上述因素所引起的加热动力学中的变化性质，是与总的感

应功率值有密切联系的（第四个因素）。

随着具体加热条件的不同，在珠光体-奥氏体转变、磁性转变和同素异构转变时的吸热效应，在某些情况下可能或多或少地影响加热动力学（第五个因素）。此时，不仅所吸收的热量的多少起作用，而且磁性转变和同素异构转变的临界点对珠光体转变为奥氏体的温度范围的相互位置也起作用（第六个因素）。

组织组成物（珠光体和自由相）的数量之比和碳化物的稳定性，在感应加热动力学中也起着一定的作用，因为原始相转变为奥氏体的总热效应，就是由此所决定的（第七个因素）。

最后三个因素的作用，自然是决定于钢的化学成分。

被加热钢件的原始组织——相的形状、大小和空间分布，也应该列入影响表面感应加热动力学的因素之内（第八个因素）。这里无需再详细叙述上述每一因素所起的作用和影响程度。著作[79]专门讨论这一问题，读者在专门研究这一问题时可以参阅该书。

感应加热可视为导热性不稳定的过程的特殊形式，它具有分布的内部正能源和内部负能源，这是一个必须注意的决定的情况。

正的能源是用感应法在被加热物件中所感应的交流电流。负的能源则是在某些温度范围内在钢中所发生的某些转变的吸热效应。

这一过程的理论研究使人确信，可以把整个过程想像为由下列基本阶段组成的：

1. 正在建立的过程。从通电时起，加热是这样发展的：表面层和中心层之间的温度差，是连续不断地在增大着。
2. 已经建立的、似稳定的过程。通电后经过一段时间，便开

始了那样一个以温度梯度不变为特征的阶段。当这一阶段正在进行的时候，表面温度和中心层温度是以相同速度上升着，而表面层和中心层之间的温度差，在这一阶段进行的整个时期内，却是始终不变的。

3. 新的正在建立的过程。在达到钢失去铁磁性的温度（居里点温度）以后，一定厚度的表面层则转变为顺磁状态。此层的磁导率减小到 1，而它的电阻率却增加若干倍。

由于在任何铁磁体中在居里温度时都会发生的这些改变，在感应器-被加热物件电磁系统中开始了急剧的变化。在顺磁的薄表面层中电流所发生的功率急剧减小，而在与它毗连的（还是铁磁的）层中，功率却增大了。自然，此时表面层的加热变得缓慢了，而尚未失去铁磁性的那层温度，却是以比表面层中更大的速度在增加着。由于上述的变化，就发生了表面层和中心层之间温度梯度的减小，并且由表面层向内部的导热继续增长。如果此时被加入到顺磁表面层中的功率比向内层传出的还要小，那么表面层温度改变的特征，就不仅是增长的速度减小，而且还可能有某些下降。

4. 新建立的（第二次似稳定的）过程。上面所指出的变化，以在表面层和中心层之间建立一定的温度差而结束，以后，过程是这样发展的：即这两层的加热速度保持一致。

这样一来，在第三阶段上完成了温度梯度由大向小的过渡，而第四阶段的特征则类似第二阶段，是温度梯度不变。

我们所作的对于铁磁体感应加热发展特征的简短叙述可用图 1 所示的理论加热曲线来说明。既然钢是铁磁材料，那么这些原理就完全适用于钢件的感应加热。由钴、镍和工业纯铁制成的直径为 12 毫米的实心试样，其表面层的实际加热曲线如图 2 所示，而

35鋼、V8鋼和高鉻鋼(10%Cr; 0.24%C)的实际加热曲线, 則如图3所示。不难証实, 表面层加热的动力学, 完全符合于上面所作的对于过程发展的叙述。

在所有的情况下, 在由鉄磁状态轉为順磁状态的溫度时, 都出現了弯曲。

图4是05、35和V8鋼的实际加热曲线, 这些曲线是在同时记录不同壁厚的管子外表面和內表面上的溫度变化时所获得的。若管壁的厚度愈大, 也就是外表面和

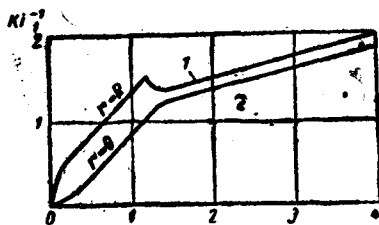


图1 感应加热时, 板状物件表面 ($x=R$, 曲线1)及中心 ($x=0$, 曲线2)的溫度变化(表面效应明显地表现出来), 此时由于鉄磁性的損失单位功率降低。

內表面上的热电偶互相离开的愈远, 就愈能令人滿意地再現出理論曲线图(图1)来。期待完全相同是不可能的, 因为图1上的曲线2是說明中心层的变化, 而图4上的相应曲线, 則是說明离开外表面一定距离处之变化的。

所引用的图表, 也同样能解决关于珠光体轉变为奥氏体在加热曲线变化中所起的作用問題。在工业純鉄中, 实际上沒有珠光体, 但却出現了弯曲。在只由珠光体組成的V8鋼中, 弯曲并不是在接近于平衡的溫度(723°)时出現, 而是在接近于居里点的溫度, 即表面层由鉄磁状态轉为順磁状态时出現的。

在高鉻鋼中, 鉄磁性的临界溫度, 是在珠光体轉变为奥氏体的开始溫度以下。磁性轉变和珠光体-奥氏体轉变, 处于不同的溫度范围。观测这一情况下的感应加热动力学, 是确定加热曲线上弯曲原因的直接試驗。正如图3所示, 弯曲发生在表面层由鉄磁状态轉变为順磁状态的溫度。而在 840°C , 珠光体开始向奥氏

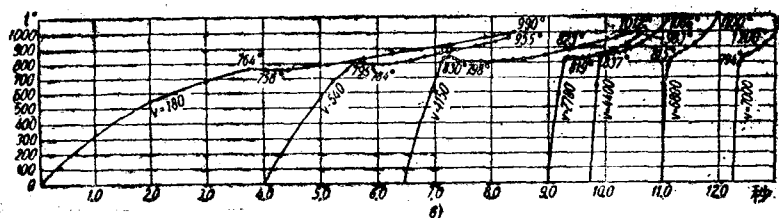
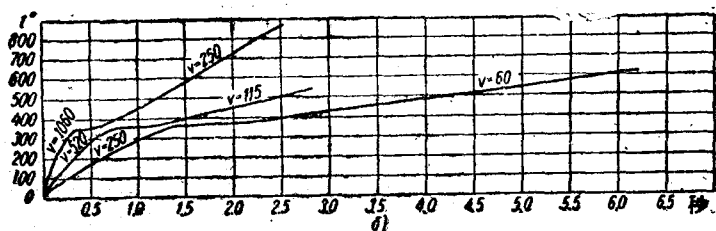
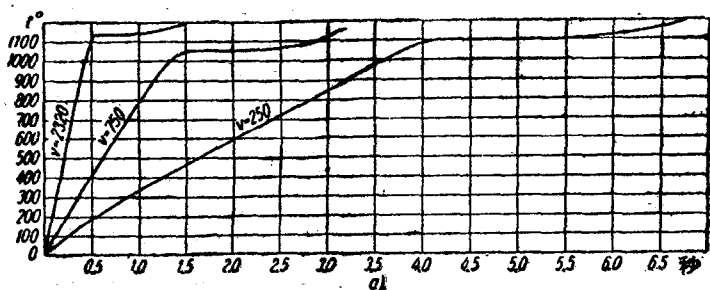


图2 钴(a)、镍(b)和工业纯铁(B)的加热曲线。

体转变的温度时，并不引起加热曲线上的重大变化。虽然在加热的第二阶段上（在居里点以上）表面层吸收的功率小得多（比在第一阶段上），但它却比珠光体-奥氏体转变所需的热功率要大得多。

因而，在加热曲线变化中的决定因素是磁性转变，是由于这一情况在感应器-被加热物件电磁系统中所引起的变化。在一般情

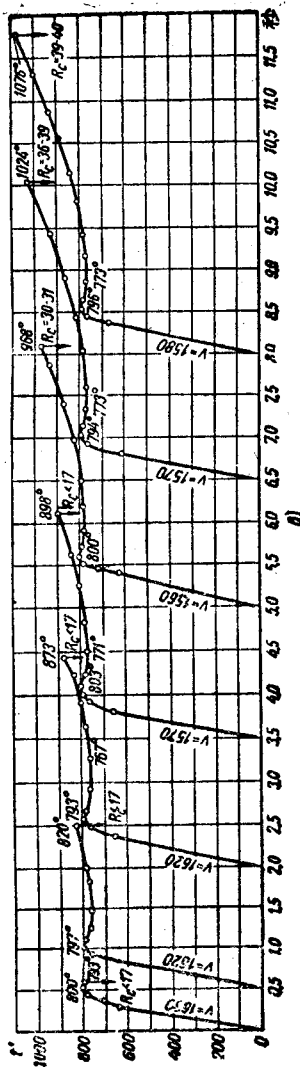
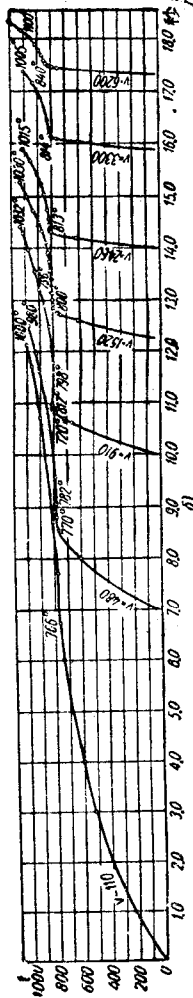
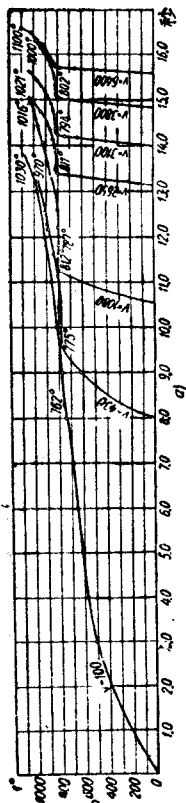


图3 直径为12毫米的实心试样的加热曲线:

a—35Cr; b—Y8钢; c—高铬钢(10%Cr; 0.24%C)。

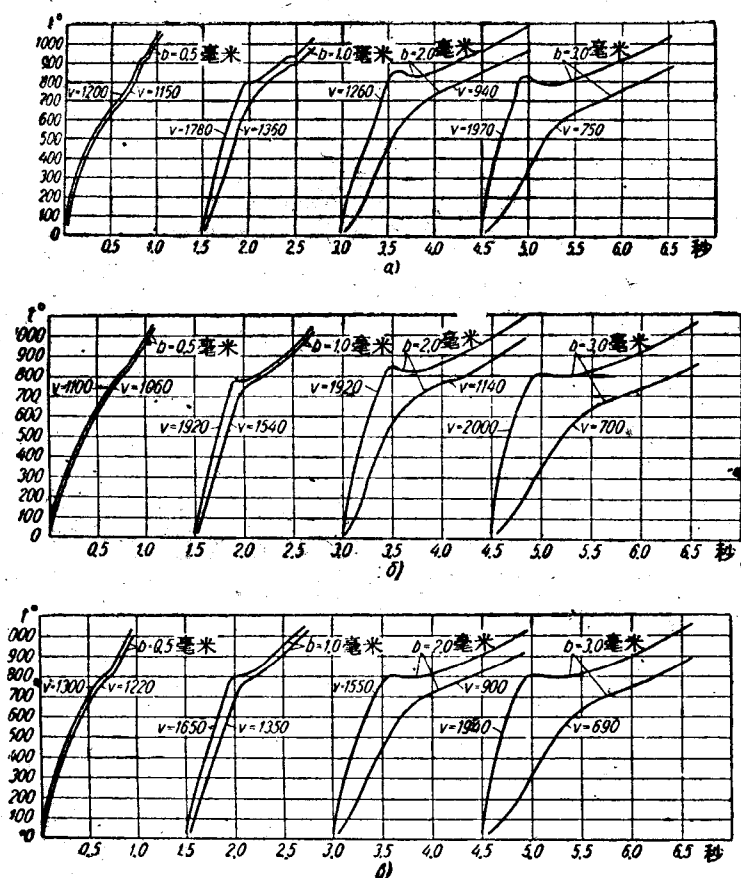


图4 直径为12毫米的管子在不同壁厚时的加热曲线:

a —05钢; b —35钢; c —Y8钢。

况下, 珠光体-奥氏体转变, 实际上在感应加热动力学中并不起作用。

这里所叙述的一些原理, 无论在探讨有关研究感应加热时的

相变机构和动力学的问题时，或者对确定采用这一类型加热条件下的热处理最重要工艺特点来说，都起着决定性的作用。

第二章 淬火时感应加热的热参数

关于过程的最重要的基本参数问题，对评价任何工艺作业都有巨大的意义。尤其重要的是，这些参数对实现过程的所有情况或许多个别具体情况是共用的。否则，一切由于热处理的结果而使某些性能改变的规律，将成为在处理其它尺寸和形状的零件时不再重复的个别情况。大家知道，在应用高频淬火的技术中，编制只有在某车间条件下才有用的个别工艺的例子数以千计。掌握其它生产中的高频淬火过程，不总是因已有个别的例子存在而变得容易。

钢在高频淬火后的性能与电规范〔80〕等参数之间的关系，可作为建立个别规律性的例子。其次要指出，在温度-总加热时间坐标内来作图〔81〕〔83〕，也带有个别关系的性质。

为了得出一些适于在不同生产条件下操作时直接使用的规律，我们提出了体现着感应加热一些特点的热参数。

1 淬火的加热温度

知道感应加热时的淬火温度，无疑是必要的。在我们的一些著作以及其他研究者的著作中都曾指出，在感应加热的情况下，知道淬火温度范围的允许极限，无论在任何大的加热速度时，都是十分必要的。这个问题现在已经很明显，无需再详细地讨论它。

测量感应加热时的温度，是比普通在炉中加热时要复杂一些。由于感应加热的时间很短，就必须采取措施来消除或最大限度地

减小由测温仪器惰性所引起的误差。

2' 相变区内的加热速度

在著作 [79] [82] 中，引用了一些反映出不同成分钢感应加热动力学的曲线。书中也探讨了产生这样或那样类型的加热动力学的原因。要提醒大家注意，在很多感应加热的情况下，由于表面层转变为顺磁状态的结果，加热强度就大大地减小。因此，实际上最好把整个加热过程分为两个阶段：第一阶段——由室温到居里点；第二阶段——由居里点到淬火温度。

正如我们已经见到的，在讨论相变动力学时，有时必须把加热分为三个阶段。但在研究淬火钢的性能与感应加热规范之间的关系时，实际上把加热过程分为上述两个阶段就够了。这种情况造成了某种程度的不精确性。然而正如大家知道的，加热速度在5~10%范围内的变化，并不能对淬火部分的性能有极其重大的影响。此外，应用很大的加热速度，能够大大扩大淬火加热的容许温度范围。由于这个缘故，淬火温度与最适宜的温度相差30~40°C，在大多数情况下并不给处理的质量带来损害。这样，可以认为，在实用上采取把加热过程分为两个阶段是足够的。

由于在第二阶段上加热速度的急剧减小，如上所述，按照总的加热时间来评价加热强度，就会在确定主要相变发生的温度条件方面引起很大误差。这种情况由于下述原因而加深，即在第二阶段上，加热变慢的性质，可依发电机的类型和工作线路、零件尺寸和加热速度而有所不同。

在图5上示意地指出了在相同的总时间内加热到同一淬火温度的加热过程发展的两种可能情况。按曲线1加热时经过由 θ 至 $t_{\text{зак}}$ 范围的时间 τ_a ，可能比按曲线2经过同样范围的时间大几

倍。很明显，基本相变发生的条件和上述两种情况下的奥氏体状态，是截然不同的。而按总的加热时间（在此情况下是相同的）来测量加热速度，也包含着加热条件上的这些差别，并妨碍着查明淬火结果不同的原因。

在普通结构钢进行快速加热时，相变在由 A_1 至 θ 的温度范围内来不及多大的发展（图 6），而这一转变的绝大部分却是在高于 θ 的温度时完成的。可以认为由 θ 至淬火温度的温度范围，是主要的相变区域。因而，在许多情况下，把第二阶段上的加热速度作为相变区内的加热强度，并不会产生很大的误差。

在共析成分的（或接近于它的）、具有很分散珠光体原始组织的碳钢的加热情况下，甚至在加热速度很大时，珠光体-奥氏体转变也是在居里点温度以下结束的，也就是在第一阶段上结束的。在这种情况下，转变的结束，才是使快速加热的第一阶段过渡到缓慢加热的

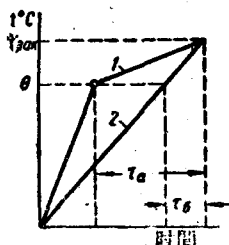


图 5 感应加热温度依从单位功率变化规律而随时间变化的不同特征（示意图）。

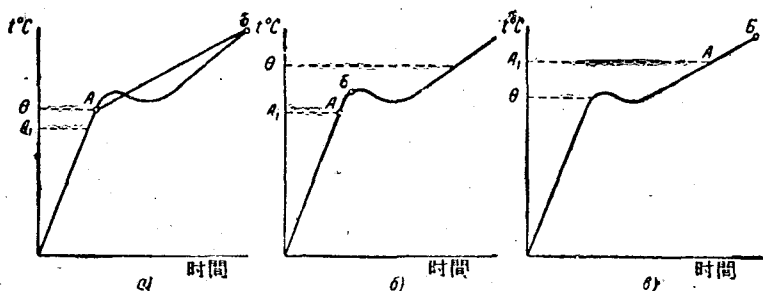


图 6 感应加热曲线和珠光体转变为奥氏体的温度区域：
a—35 钢；b—Y8 钢（索氏体）；c—含有 0.2% C 和 10% Cr 的钢。

第二阶段之溫度界綫下降的原因。这样,在这里由 A_1 至加热第一阶段結束溫度的範圍, 才是相变的溫度区域(图66)。

也可以遇到第三种个别的情况。在处理用 A_1 溫度高於 θ 的鋼(例如高鉻鋼)所制成的零件时, 則在 A_1 和 t_{sak} 之間的溫度範圍, 就是相变区域。很明显, 在这种情况下, 在第二阶段上的加热强度, 便是相变区內的加热速度。

在图6上指出了对上面所列举的三种情况的加热曲綫和珠光体轉变为奥氏体的溫度範圍: 1) 对35鋼來說, 这一区域在 θ 和 t_{sak} 之間; 2) 对Y8鋼(索氏体)是在 A_1 和 t_{sak} 之間(在居里点以下); 3) 而对含有10%Cr和0.2%C的鋼, 則在 A_1 和 t_{sak} 之間(在居里点以上)。

相变区內的加热速度, 是根据 t_{sak} 和 A_1 之溫差(第二种和第三种情况)或 t_{sak} 和 θ 之溫差(第一种情况)对經過相应溫度範圍的时间之比例来确定的。

t_{sak} 值和經過珠光体-奥氏体轉变溫度範圍的时间值, 是直接根据波形图在把它換算后而求得的。上述測定相变区内加热速度的方法, 是属于同时加热时的淬火情况的。

在連續順序加热时, 也可以用示波器来记录加热曲綫。但是, 在这种情况下, 經過居里点时加热变慢的性质, 也可以更简单地用試驗的加热方法来測定。具有一定原始組織的鋼試样, 經過两种加热: 第一种加热只进行到居里点; 相同試样的第二种加热, 却是在同一电规范下并在同一感应器內, 經過比第一种加倍的时间来实现的。同时, 測量在加倍的时间內加热时所达到的溫度, 并把試驗加热的数据繪在图上(图7)。

下面即将指出, 为了便于計算起見, 就最好測定即在上述時間間隔內由 θ 至 t_p 的溫度範圍。

在这种情况下，在由 θ 至 t_{3ak} 范围内的加热速度，也是根据 t_{3ak} 和 θ 之差对经过这一温度范围的时间之比来确定的，并且必须附带考虑到，在计算中应该采用使用相当于感应器高度的那个带（试样上）加热所花费的时间。试样的长度是感应器高度的多少倍，那就应该把整个试样的加热时间减为多少分之一 $\frac{Bt_{3ak}-B_{\theta}}{L/h}$ 。如果考虑到，当发电机作

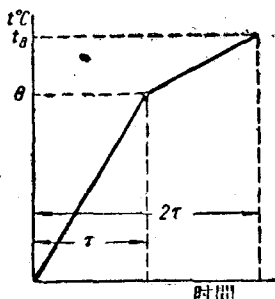


图7 感应加热的温度随时间而变化的性质（示意图）。

用的时候，在感应器内移动的不是试样的整个长度 L ，而是它的等于 $L-h$ 的一部分，那么确定第二阶段上加热速度用的普遍公式，就有如下的形式：

$$v_{\theta \rightarrow t_{3ak}} = \frac{(t_{3ak} - \theta)(L - h)}{(Bt_{3ak} - B_{\theta})h}; \quad (1)$$

式中 t_{3ak} ——淬火温度，

θ ——居里点温度，

Bt_{3ak} ——使整个试样加热到 t_{3ak} 所花费的总时间，

B_{θ} ——把试样加热到居里点所花费的时间，

L ——试样的长度，

h ——感应器的高度。

在这样测定加热速度时所采用的一些假设，以及一些计算例子，在专题学术著作〔83〕中都有记载。

鉴于在实际进行淬火时，很难使用像相变区内加热速度那样的复杂参数，就把下式（1）化成另外一个便于根据所给定的淬火温度及相变区内的加热速度来确定总时间 $\tau_{t_{3ak}}$ 的形式：

$$\tau_{t_{3ak}} = \frac{(t_B - \theta)(L - h)}{v h} (K + 1); \quad (2)$$

式中 K ——所給定的溫度 ($t_{\text{гак}}$) 和居里点之溫差对溫度範圍 ($t_B - \theta$) 的比例,

t_B ——溫度範圍的最終溫度, 經過該溫度範圍的時間, 則必須是与加熱到居里点 θ 所需的時間相同的●。

显然, $(K + 1)$ 值反映出加熱變慢的性质, 这种性质是由著作[82]中所指出的所有因素的总合作用所引起的。

在一些个别的具体条件之間的差別, 可表現在 $(K + 1)$ 值的变化上, 此 $(K + 1)$ 值則是說明在第二阶段上感应加熱變慢程度的任何变化的。

因而, 公式 (2), 如同导出它的公式 (1) 一样, 同样地适用于淬火时感应加熱的各种极不相同的實驗条件和生产条件。

我們來討論一个数字例子, 条件如下: 加熱到溫度 $\theta = 770^\circ\text{C}$ 是在 τ_{770} 時間內达到的, 而在 $2\tau_{770}$ 時間內則保証加熱到溫度 960°C 。

計算一个长度 $L = 130$ 毫米的試样在高度 $h = 10$ 毫米的感应器中以 $300^\circ\text{C}/\text{秒}$ 的速度加熱到溫度 880°C 和 940°C 的总時間。

在加熱到 880°C 时系数

$$K = \frac{880 - 770}{960 - 770} = \frac{11}{19};$$

在加熱至 940°C 时

$$K = \frac{940 - 770}{960 - 770} = \frac{17}{19};$$

$$\tau_{880} = \left(\frac{11}{19} + 1 \right) \frac{(960 - 770)(130 - 10)}{300 \times 10} = 12 \text{秒};$$

$$\tau_{940} = \left(\frac{17}{19} + 1 \right) \frac{(960 - 770)(130 - 10)}{300 \times 10} = 14.4 \text{秒}。$$

所采用的热参数一般地反映着感应加熱的特征, 并反映着一些个别情况的具体差別, 在此热参数的基础上, 能最合理地建立

● 由公式 (1) 导出公式 (2) 的次序, 見专题学术著作[83]。