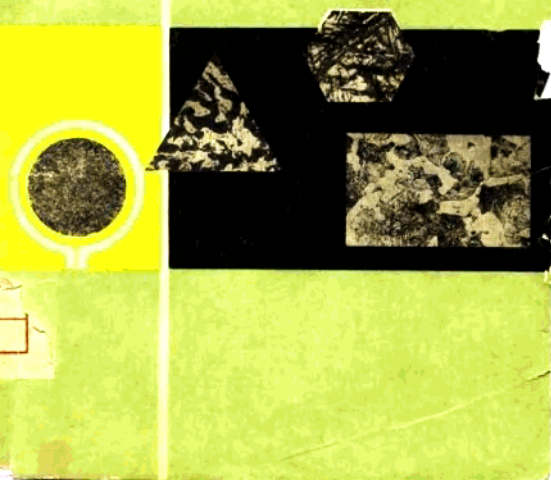


感应热处理



目 录

第一章 感应热处理原理	1
第一节 感应加热在热处理中的应用	1
第二节 钢的感应加热	4
一、电磁感应和表面效应	4
二、感应加热的物理过程	7
三、透入式加热与传导式加热的特点	8
第三节 钢在快速加热时的组织转变	11
一、感应加热速度及其测定方法	11
二、快速加热对相变温度及相变动力学的影响	14
三、快速加热对相变产物组织的影响	18
四、原始组织的影响和预备热处理	23
第四节 钢件在表面淬火时的内应力	24
一、表面淬火件残余内应力的分布	25
二、含碳量与淬火层深度对残余内应力的影响	26
三、改善内应力的方法	27
第五节 感应热处理件的性能	28
一、硬度	28
二、耐磨性	30
三、疲劳强度	32
第二章 表面淬火感应器的设计与制造	35
第一节 感应器的结构组成与分类	35
第二节 感应器设计的理论基础	36

一、电磁转换的基本知识	37
二、感应器的效率	41
三、高频电流的特性	44
四、导磁体的驱流作用及其应用	46
五、感应加热的屏蔽原理及其应用	50
第三节 感应器基本尺寸的选择	52
一、感应器制造用铜料的厚度	52
二、感应器与工件之间的间隙	54
三、感应器截面的形状和尺寸	54
四、感应器的匝数	56
五、感应器冷却水路及淬火喷水孔	57
六、汇流排的结构形式	61
七、感应器与高频变压器的连结方式	62
第四节 外圆表面加热感应器的设计	63
第五节 内圆表面加热感应器的设计	64
第六节 平面加热感应器的设计	69
第七节 特殊形状感应器的设计	71
第八节 感应器的制造及搪瓷	73
第三章 高、中频感应加热表面淬火工艺	77
第一节 表面淬火用钢	77
第二节 表面淬火件的技术条件	80
第三节 设备频率与加热比功率的选择	83
一、设备频率的选择	83
二、加热比功率的选择	86
第四节 加热方法、冷却方法与冷却介质的选择	91

一、加热方法	91
二、冷却方法与冷却介质	92
第五节 感应加热淬火的工艺参数	97
一、电参数	97
二、加热温度与加热时间	101
三、冷却时间	104
第六节 感应加热淬火件的回火	104
一、炉中回火	105
二、自回火	107
三、感应加热回火	108
第七节 质量检查	109
第八节 淬火缺陷及其解决方法	114
第四章 齿轮感应表面淬火	118
第一节 齿轮的工作条件及表面淬火要求	118
第二节 齿轮的全齿感应淬火	121
一、全齿淬火感应器	121
二、齿轮硬化层形式与频率关系	121
三、全齿淬火比功率的选择	126
四、齿轮全齿淬火机床	128
第三节 沿齿面单齿感应表面淬火	129
第四节 沿齿沟单齿感应表面淬火	135
第五节 沿齿廓分布硬化层的其它淬火法	138
一、低淬透性钢的感应透热淬火	138
二、渗碳后进行感应透热淬火	141
三、双频淬火	142
第六节 齿轮表面淬火的变形与开裂	143

一、齿轮表面淬火变形及其防止	143
二、齿轮表面淬火裂纹及其防止	150
第五章 轴类零件感应表面淬火	151
第一节 轴类零件的工作条件及表面淬火要求	151
第二节 轴类零件的淬火机床	157
第三节 花键轴的高、中频表面淬火	159
第四节 汽车半轴的中频表面淬火	163
第五节 镗杆高频表面淬火	166
第六节 机床主轴的多工位表面淬火	168
第七节 曲轴中频表面淬火及喷油淬火	171
第八节 凸轮轴的高、中频表面淬火	176
第九节 钻杆及岩心管高频表面淬火	181
第十节 矫直辊中频表面淬火	183
第六章 其它机械零件及工模具	
感应热处理	185
第一节 套筒型零件内孔高频表面淬火	185
第二节 机床导轨高频表面淬火	189
第三节 大模数蜗杆高频表面淬火	192
第四节 J ₆ 型绞盘机主轴颈及轴套高频 表面淬火	194
第五节 O ₂ 型蒸汽机车滑板及月牙板 高频表面淬火	196
第六节 138载重汽车曲轴前节高频 表面淬火	198
第七节 起重机行走轮中频表面淬火	200

第八节	起重机弹子盘中频表面淬火	203
第九节	滚丝模高频表面淬火	205
第十节	游标卡尺爪量面高频淬火	210
第十一节	剪刀刃高频表面淬火	212
第十二节	锉刀高频表面淬火	215
第十三节	轴承套圈中频穿透淬火	217
第十四节	棒材中频调质处理	222
第七章	工频感应表面淬火	226
第一节	工频感应器的供电	226
第二节	工频表面加热感应器的结构与设计	228
第三节	典型零件的工频表面淬火	232
一、	大型柱塞工频表面淬火	232
二、	冷轧辊工频表面淬火	233
三、	铁道车轮及起重机车轮工频表面淬火	234

第一章 感应热处理原理

第一节 感应加热在热处理中的应用

感应加热是一种先进的热处理加热方式。全国解放后，特别是无产阶级文化大革命以来，感应热处理在我国应用日趋广泛。目前，除大型工厂外，许多中、小工厂也大量采用感应热处理。一些部门设计、制造、改装了多种专用、多用的自动化与半自动化淬火机床，试验并采用了新材料、新工艺，有效地降低了生产成本，提高了产品质量。

感应加热具有许多优点：

- ①能够在一定的范围内控制加热层深度，既可以对零件表面进行加热淬火，也可以进行穿透加热；
- ②易于实现局部加热；
- ③易于实现连续加热；
- ④加热速度快，生产效率高；
- ⑤工件氧化少；
- ⑥工件的热处理变形小；
- ⑦便于实现流水生产和生产过程的自动化。

感应热处理的主要应用范围：

1. 表面淬火

表面淬火，是感应加热在热处理中最有效和最基本的应用方式。它是将工件表面层加热到淬火温度，然后迅速冷却，

仅在表面层获得淬火组织的热处理方法。经过表面淬火，可以显著提高工件的表面硬度、强度、耐磨性和抗疲劳性能，同时仍然保持心部原有的强度和韧性。因此，感应加热表面淬火，广泛用于在磨损和疲劳条件下工作的各种零件，如齿轮、凸轮、曲轴、气缸套和各种直轴、冷轧辊等。

2. 局部淬火

局部淬火，使工件仅在某个区域获得淬火组织，从而达到所需要的性能。如卡尺，仅对卡爪的易磨损部分进行淬火。千分尺的量杆和对柱，以及铁轨的端面等也是进行局部淬火的。

3. 局部回火(或称局部退火)

在某些情况下，对淬火工件某个局部进行感应加热回火，可以改善加工工艺路线。例如对带螺纹、带槽和需钻孔的工件，可以在加工前进行整体淬火，然后利用感应加热对加工区域进行局部回火，降低其硬度，而后再进行车螺纹，铣槽或钻孔等加工。

4. 长件的热处理

对于棒材、管材及长度达3~4米或更长的工件(如地质勘探用的钻杆)，若用普通炉子加热，需专门修造很深的井式炉，造价很高，而采用感应加热，只需专门设置简单的夹持、送料机构即可实现连续加热。根据需要，选择合适的电流频率与电参数，既可以实现表面淬火，也可以实现穿透加热淬火和回火加热(调质处理)。

5. 高频渗碳

利用高频感应加热进行渗碳处理，可以显著加快渗碳过程。例如，对18CrMnTi钢，在二十多分钟内可以获得1.2—

1.3 毫米的渗碳层，而在普通炉中渗碳时，达到同样的深度，则需几小时。

高频渗碳有固体渗碳（将工件封闭在有固体渗碳剂的箱中加热）、气体渗碳（向装有工件的渗碳箱中通入煤油）和涂膏渗碳（将工件表面涂上膏状渗碳剂）等几种方法。

6. 渗碳件的感应加热表面淬火

对渗碳件进行感应加热表面淬火，可以显著减小淬火变形，而且常常可以免除非渗碳表面的防护措施（一般用镀铜法防止渗碳），因为随后的高频加热淬火只在要求高硬度的地方进行。

对一些在普通渗碳淬火时残留奥氏体量很大的高合金渗碳钢（例如 18CrNiW，20Cr2Ni4），采用感应加热淬火，还可以大大减少其残留奥氏体量。见表 1-1。

表 1-1 我国常用的感应加热装置

设备名称	型号	规格	
		功率，千瓦	频率，周
高频设备 (电子管式)	GP ₅₀ -CR11	60	250000
	GP100- ^{C2} _{O3}	100	250000
	GP200	200	60000—70000
中频设备 (机械发电机式)	DGF-C-102	100	2500
	DGC-200/2.5	200	2500
	DGF-C-252	250	2500
	DGF-C-103	100	2500
	DGC-250/1	250	1000
可控硅变频器		100—500	500—8000
工频设备		50—2000	50

第二节 钢的感应加热

一、电磁感应和表面效应

1. 电磁感应

当感应圈中通过交变电流时，在它的内部和周围就建立起与电流变化频率相同的交变磁场，这个磁场又使工件内部产生同样频率的电场，也即产生感应电动势，其大小为

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \text{ (伏)} \dots\dots\dots (1-1)$$

式中 e ——感应电势的瞬时值

ϕ ——工件上感应电流回路所包围面积上的总磁通，其数值随感应圈中的电流强度、工件材料的导磁率的增加而增大，与工件和感应圈之间的间隙也有很大的关系。磁通 ϕ 对时间的变化率 $\frac{d\phi}{dt}$ ，除决定于上述因素外，还决定于电流的频率，当其他条件相同时，电流频率越高， $\frac{d\phi}{dt}$ 越大，感应电势 e 也越大。式中负号表示感应电势的方向与 $\frac{d\phi}{dt}$ 的变化方向相反。

由于金属工件是导体，存在感应电势，就会在工件中产生电流。这种电流的电路在工件内部是闭合的，被称为涡流。涡流的方向，在每一瞬间均与感应圈中的电流方向相反。涡流强度 I_f ，决定于感应电势 e 及工件内涡流回路的电抗 Z (Z 是由电阻 R 和感抗 X_L 两部分组成的， $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$)

$$\text{即} \quad I_f = \frac{e}{Z} \text{ (安培)} \dots\dots\dots (1-2)$$

由于 Z 值很小，涡流可以达到很高的数值，使工件产生

大量的热。热量 Q 由下式确定

$$Q = 0.24 I_r^2 R t (\text{卡}) \dots\dots\dots (1-3)$$

对铁磁材料(如钢、铁)来说,除电磁感应产生涡流的热效应外,还有由于“磁滞现象”所引起的热效应,它同样使工件的温度升高,但工件的加热主要还是依靠涡流的热效应。

2. 表面效应 涡流在被加热工件中的分布,由表面向中心呈指数规律衰减,即

$$I_x = I_0 e^{-\frac{2\pi}{C} \sqrt{\frac{\mu f}{\rho}} x} \dots\dots\dots (1-4)$$

式中 I_x ——离表面为 x (厘米)处的涡流强度(安培),
 I_0 ——表面处的涡流强度(安培), C ——光速 (3×10^{10} 厘米/秒), ρ ——工件材料的电阻系数(欧姆·厘米),
 μ ——工件材料的导磁率, x ——距工件表面的距离(厘米),
 f ——电流频率(赫芝)。

这种现象称为表面效应。

在工程上,规定 I_x 降至 I_0 的 $1/e$ (其中 $e = 2.718$) 处的深度为“电流透入深度”,用 δ 表示,可以求出

$$\delta = 50300 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} (\text{毫米}) \dots\dots\dots (1-5)$$

可见,电流透入深度 δ 的大小决定于交变电流的频率 f , 工件材料的电阻率 ρ 和导磁率 μ 。

可以近似认为,涡流只在工件表面深度为 δ 的薄层中通过,而在薄层以外没有电流。因为涡流所产生的热量与涡流强度的平方成正比,所以由表到里,热量下降的速率比涡流下降还快。计算证明,85%以上的热量发生在厚度为 δ 的薄

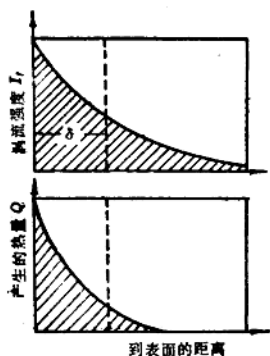


图 1-1 涡流强度与产生的热量沿截面的分布

层以内。这些关系，可以由图 1-1 反映出来。

钢在感应加热时，电阻率 ρ 与磁场强度无关，但它随着温度的升高而增大。在 800—900°C 范围内，各类钢的电阻系数基本相等，大约为 10^{-4} 欧姆·厘米。导磁率 μ ，在失去磁性以前基本不变（其数值与磁场强度有关），但在某一温度（称为磁性转变温度或居里点）

以上，钢材将失去磁性，此时 μ 下降为真空的导磁率 ($\mu = 1$)。

图 1-2 为 μ 、 ρ 与钢材温度的关系。电阻率 ρ 的上升和导磁率 μ 的下降均使电流透入深度增加。将 $\mu = 1$ 和 $\rho = 10^{-4}$ 欧姆·厘米代入公式 (1-5)，可以求得钢在 800—900°C 范围内的电流透入深度 $\delta_{\text{热}}$

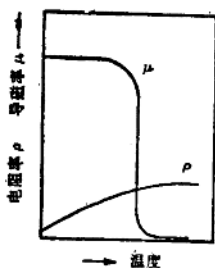


图 1-2 钢材 μ 、 ρ 与温度的关系

$$\delta_{\text{热}} = \frac{500}{\sqrt{f}} \text{ (毫米)} \dots\dots (1-6)$$

$\delta_{\text{热}}$ 称为“热态电流透入深度”，它比室温下的“冷态电流透入深度” $\delta_{\text{冷}}$ 大几十倍。表 1-2 列举了在各种频率下钢的冷态及热态电流透入深度。

钢在“热态”时，涡流由表到里，下降较为平缓；在“冷态”时，下降较为急剧，如图 1-3 所示。

表 1-2 不同频率下铜和钢中电流透入深度 (厘米)

频 率 (赫 芝)	钢 温 度 15°C $\rho = 1.8 \times 10^{-8}$ (欧姆·厘米) $\mu = 1$	45 号 钢	
		温 度 15°C $\rho = 2 \times 10^{-8}$ (欧姆·厘米) $\mu = 40$	温 度 800°C $\rho = 10^{-4}$ (欧姆·厘米) $\mu = 1$
50	1.0	0.5	7.0
500	0.3	0.15	2.2
2500	0.13	0.067	1.0
10000	0.07	0.034	0.5
10^8	0.022	0.011	0.16
10^6	0.007	0.0031	0.05

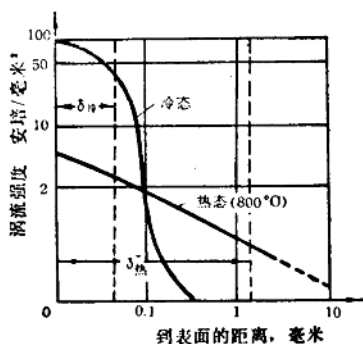


图 1-3 在冷态及热态时涡流的分布特性
(频率 $f = 200$ 千周)

二、感应加热的物理过程

在感应圈中刚接通电流, 工件温度开始升高前的瞬间, 工件内所产生的涡流按冷态特性分布, 当表面温度升高而出现超过失磁温度的一薄层时, 加热层被分成两层, 即外层的失磁层和与之毗连的未失磁层。因失磁层的涡流强度显著下

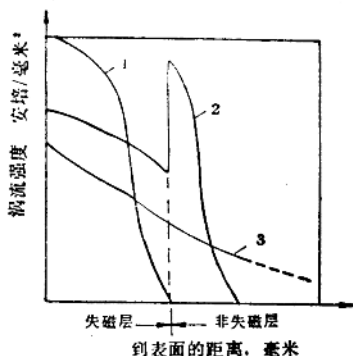


图 1-4 在各种情况下涡流分布的特性

1. 冷态；2. 加热过程中；3. 热态。

透入深度 $\delta_{\text{热}}$ 以后，涡流完全按着热态特性分布。继续加热时，热量总是在厚度为 $\delta_{\text{热}}$ 的薄层中析出，此层的温度将得到升高。同时，由于热传导的作用，加热层的厚度也将随时间延长而不断增加。这和火焰表面加热或在普通炉中加热的情形是一样的，称为传导式加热。

三、透入式加热与传导式加热的特点

在透入式加热过程中，由于加热层是在失磁的高温层加热显著减慢的条件下，依靠最大涡流强度向内移动而不断向内部推移的，因此表面过热小。

此时加热表面层的温度分布曲线，如图 1-5a 所示。

透入式加热所需要的功率，可以这样来估算：将 1 厘米³ 的钢材由 20°C 加热到淬火温度所需要的热量大约为 5000 焦耳，当淬硬层厚度为 δ_s 厘米，在 t 秒钟内将工件加热到淬火

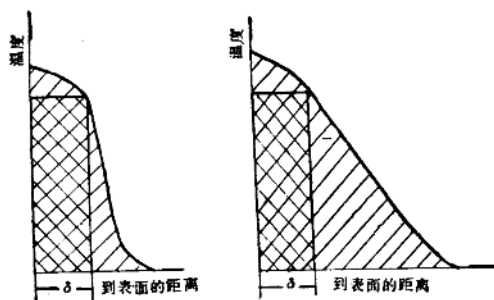


图 1-5 两种加热方式的温度曲线示意图

a_1 透入式 b_1 传导式

温度时，可得每平方厘米表面所需的功率（比功率）为

$$P_o = \frac{5000\delta_s}{t} \text{ 瓦/厘米}^2$$

$$= \frac{5\delta_s}{t} \text{ 千瓦/厘米}^2 \dots\dots\dots (1-7)$$

图 1-5a 中，淬火层厚度 δ_s 与淬火温度 T 所包围的长方形面积（带格部分）为设备所消耗的有效功率，温度曲线所包围面积的其余部分（带斜线部分）为表层过温和内部透热所消耗的功率，为损失功率。在透入式加热中的有效功率约占总功率的 50—65%。

在传导式加热过程中，加热速度由温度梯度和钢的导热系数所决定。钢在 1000°C 时，平均导热系数约为 0.3 瓦/厘米 $^\circ\text{C}$ 。表面过热度为 ΔT 时，获得 δ_s 厘米的淬火层所需要的比功率为

$$P_o = \frac{0.3\Delta T}{\delta_s} \text{ 瓦/厘米}^2 \quad (1-8)$$

可见，过热度 ΔT 与比功率 P_0 成正比。采用的比功率 P_0 越大，过热度 ΔT 越大，加热速度也就越快；但过热度太大，将使工件表面过热。因此，传导式加热温度曲线较透入式平缓，如图 1-5b 所示。其热效率大约为 20—50%，比透入式加热低得多。

采用透入式加热，应根据加热层的厚度要求选择设备频率，使该频率下的热态电流透入深度大于加热层厚度。此时可以选用很大的比功率和加热速度加热，表面亦不会过热。

由于设备条件的限制，经常不得不使用频率高的设备加热淬火厚度较大的零件，即采用传导式加热。为保证加热质量，应根据允许的过热度，选用设备的比功率；允许的过热度越小，比功率应越小，相应的加热时间越长，热效率越低。反之，可以适当增大比功率，减少加热时间和提高热效率。

透入式与传导式加热过程的特性比较，可参见表 1-3：

表 1-3 两种加热方式特性比较

淬 火 深 度 (毫米)	频率 300000 周						频率 2000 周		
	加热时间 秒		比 功 率 千瓦/厘米 ²		电能消耗 瓦特·小时/ 厘米 ²		加热 时间 秒	比 功 率 千瓦/厘米 ²	电能消耗 瓦特·小时/ 厘米 ²
	表 面 过 热 度						表 面 过 热 度		
	00°	50°	100°	50°	100°	50°	20°	20°	20°
2	9	35	0.5	0.25	1.25	2.5	2.5	1.35	0.94
3	15	60	0.4	0.2	1.65	3.3	3.4	1.30	1.13
4	22	90	0.3	0.15	1.85	3.7	4.3	1.05	1.25
5	28	110	0.25	0.12	1.95	3.9	5.1	0.95	1.35
注						为透入式加热			

第三节 钢在快速加热时的组织转变

一、感应加热速度及其测定方法

加热速度快，是感应加热的一个重要特点。用于各种零件表面淬火的高、中频加热时间，多在几秒到十几秒之内，很少有超过几十秒的。在感应加热中，加热速度是个重要参数。掌握加热速度，以及随之改变的组织转变温度，对控制热处理工件的质量有着重要作用。

钢在感应加热时的加热速度，在失磁后显著下降（参见图 1-6），而通常所说的加热速度，是指钢在失磁后的加热速度（图 1-6b 中的 ab 段）。不是指的总平均加热速度。

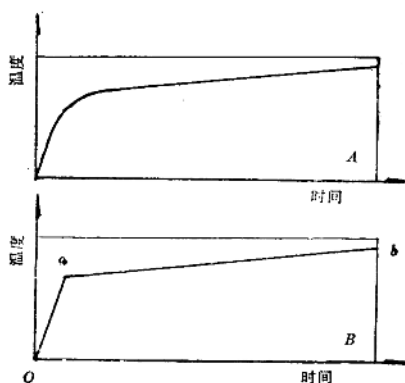


图 1-6 感应加热曲线

A 实测曲线 B 简化后的加热曲线

钢材的失磁温度与加热速度无关，但与钢材含碳量有关（见图 1-7）。对铁碳合金的共析钢和过共析钢，当加热温度