



感应热处理问答

天通 编著

机械工业出版社

感应热处理问答

沈庆通 编著



机械工业出版社

序 言

感应热处理具有节能、高效、便于自动化等一系列的优点。因此，汽车、拖拉机与机床制造工业中，感应热处理件与日俱增。有些机型的感应热处理件已占机加工热处理件的60%以上。

感应热处理技术、工艺水平的提高，很大程度上取决于电源设备与工艺装备的条件，因此工艺人员、技工也必须掌握设备、工装的使用或设计知识。本书从感应加热物理基础、电源设备选择、工艺调整、质量检验、感应器设计、淬火机床性能结构与成套设备布置安装等方面进行了系统的叙述，综合了本专业范围内有关应用知识。

本书由热处理学会感应加热技术委员会组织编写，编写中由一汽、二汽李敏堂、刘子斌同志提供了金相标准资料，天津市第九机床厂等单位提供了淬火机床产品资料。全书由南京汽车制造厂王东升同志审校，在此一并致谢。

由于作者水平所限，并且是在工作之余挤时间编写的，错误在所难免。本书如能对国内感应热处理工作者有一点参考用处并为四化作出贡献则是作者衷心希望的。

作者

洛阳第一拖拉机厂

一九九〇年

目 录

第一章 感应加热物理基础	1
1. 什么是电磁感应现象?	1
2. 什么是集肤效应?	2
3. 什么是邻近效应?	4
4. 什么是环状效应?	4
5. 什么是有磁路存在时的集肤效应?	6
6. 什么是高频、中频、超音频电流?	7
7. 什么是电流透入深度?	7
8. 电流透入深度是否就是淬硬层深度?	10
9. 什么是透入式加热? 什么是传导式加热? 何种加热类型较好?	10
10. 透入式加热对节能、提高经济效益有何意义?	12
第二章 电流频率的选择与高、中频 电源功率的计算	14
1. 电流频率选择的原理是什么?	14
2. 电流频率选择时, 是否都要进行计算?	18
3. 特殊几何形状零件的电流频率如何选取?	20
4. 电流频率选择对淬火零件的强度有何影响?	21
5. 高、中频电源装置的功率怎么选定?	22
6. 典型零件根据技术要求, 如何计算所需功率 与电源设备?	37
7. 国内外高、中频电源设备有哪些型号规格?	39
第三章 感应热处理工艺、用材与加热和 冷却的特点	42

1. 感应热处理常用钢号有哪些?	42
2. 感应淬火对用钢有哪些特殊要求?	46
3. 钢中诸元素对感应淬火, 各有何种作用?	47
4. 钢的不同原始组织对感应淬火有何影响?	48
5. 感应热处理有哪些金属学的特点?	49
6. 感应加热时, 零件截面上的温度是怎样分布的?	52
7. 感应加热淬火温度应怎样选择?	54
8. 感应淬火时, 零件上的应力有哪些? 怎样分布?	54
9. 感应淬火时, 常见加热方法有哪几种? 如何选用?	55
10. 感应淬火常用淬火介质有哪些? 其性能及适用 性如何?	57
11. 有哪几类铸铁可以进行感应淬火? 对铸铁成分 与原始组织有什么要求?	60
12. 感应热处理除用于表面淬火外, 还有哪几方面 的应用?	62
13. 制订与执行感应热处理工艺过程中应遵守哪些 规定?	63
14. 何时需进行感应热处理规范的修订?	65
15. 感应热处理工艺检查包括哪些内容?	66
16. 感应热处理工艺制订中常用的表格有哪些?	66
第四章 感应淬火件的机械性能与结构设计	69
1. 感应淬火件的耐磨性如何? 与渗碳淬火件相比, 何种工艺的耐磨性好?	69
2. 感应淬火件的疲劳性能如何? 和调质、正火、 渗碳件相比, 何种工艺的性能为好?	71
3. 感应淬火试样的抗冲击性能如何? 与正火、调质、 渗碳相比, 何种工艺的性能好?	73
4. 感应淬火件的硬化层深度对零件扭转性能有何影响?	74
5. 感应淬火件的硬度应如何选用?	77

6. 感应淬火件的淬硬层深度, 一般应如何选择?	73
7. 淬火件的淬硬区域应如何正确标注?	79
8. 感应淬火件的几何形状应如何适应淬火工艺?	81
第五章 感应热处理的工艺调整	84
1. 感应热处理工艺调整包括哪些内容?	84
2. 高频电源设备合适的电规范应如何调整?	84
3. 机式中频发电机合适电规范如何调整?	87
4. 静止变频器合适电规范如何调整?	94
5. 感应加热的热处理规范应如何调整?	96
第六章 感应淬火零件的质量检查	105
1. 感应淬火零件一般检查哪几项项目?	105
2. 感应淬火零件的淬硬层深度应如何测量? 国内、 外测量有效硬化层有哪些标准?	106
3. 感应淬火件的金相组织有无级别标准?	108
4. 感应淬火件金相检验是否有了新的标准?	121
5. 感应淬火件常见质量问题有哪些? 如何解决?	128
第七章 感应器的设计与制造	132
1. 对感应器的设计有什么要求?	132
2. 感应器设计中如何应用有关感应加热物理基础 与电流途径等法则?	134
3. 高频感应器设计时, 基本结构、尺寸如何确定?	137
4. 高频感应器设计举例	147
5. 中频感应器设计时, 基本结构、尺寸如何确定?	152
6. 感应器制造用的材料与规格有哪些?	161
第八章 感应淬火机床的性能与结构	165
1. 感应淬火机床有哪几种类型?	165
2. 淬火机床的主要组成部分有哪些?	168
3. 感应淬火机床的基本参数如何确定?	171
4. 如何评价淬火机床的性能?	179

5. 国产专用淬火机床有哪些主要品种?其性能与用途如何?...	180
第九章 感应淬火成套设备的平面布置与安装	189
1. 感应淬火成套装置由哪些设备所组成?	189
2. 感应淬火成套装置应该怎样合理布置?	191
3. 感应淬火设备平面布置面积应如何考虑?	193
4. 高、中频电源设备对设备冷却水的水质有何要求?	196
5. 设备冷却水的水箱(池)的容积应如何考虑?	197
6. 淬火液箱容积应如何考虑?	198
7. 冷却水泵与淬火水泵应如何选择?	198
8. 冷却水管路与淬火液管路应如何设计?	199
第十章 感应热处理的应用与发展	204
1. 感应热处理有哪些优缺点?	204
2. 感应热处理电源设备当前向哪方面发展?	206
3. 感应热处理工艺近年有哪些发展?	208
4. 感应淬火机床近年来有哪些改进?	213
5. 感应器设计上有何新的发展?	217
6. 有哪些感应热处理用的新的检测仪器与工具?	220

第一章 感应加热物理基础

1 什么是电磁感应现象？

金属能够在感应器内加热，主要依靠电磁感应现象。电磁感应能够将电能经由真空、空气或其他介质所形成的空间传送到所需加热的金属上去。

电磁感应的实质是：交变的磁场能够引起交变的电场。反过来说，交变的电场能引起交变的磁场。如图1-1所示。

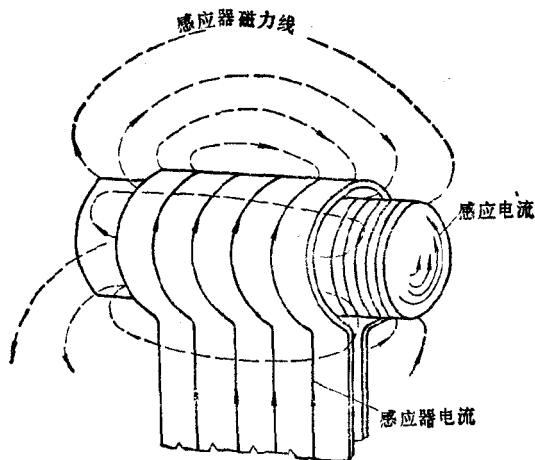


图1-1 螺管状感应器与圆柱形工件

当一匝或数匝线圈内通过交变电流时，线圈周围便产生交变磁场，置于交变磁场中的导体（金属零件）便产生电动势，即

$$E = 4.44fn\phi 10^{-8} \text{V} \quad (1-1)$$

式中 f —— 电流频率 (Hz);

ϕ —— 磁通的振幅;

n —— 回路的匝数;

当加热金属零件时, 回路即是零件本身, 此时, $n=1$ 。

导体在电动势的作用下产生涡流, 其值可用下式表示:

$$I = \frac{E}{Z} \quad (1-2)$$

式中 I —— 涡流 (A);

E —— 电动势 (V);

Z —— 金属导体的阻抗。

这个涡流就使金属本身发热, 使金属自身进行加热。根据焦耳-楞次定律, 涡流产生的热量 Q 可由下式计算:

$$Q = I^2 R t \quad (\text{J}) \quad (1-3)$$

式中 I —— 涡流 (A);

R —— 金属零件电阻 (Ω);

t —— 加热时间 (s)。

当加热的金属零件为铁磁材料时, 交变磁场使铁磁材料反复磁化, 磁畴不断转向, 並产生摩擦, 消耗能量, 称作磁滞损耗。磁滞损耗也使金属零件发热, 但这部分热量比涡流的热量小得多。

2 什么是集肤效应?

集肤效应也称趋肤效应或表面现象, 当直流电通过一导体时, 导体截面上各点的电流密度是均匀的。当交流电通过导体时, 导体表面处的电流密度较大, 导体内部的电流密度较小。当高频率电流通过导体时, 导体截面上的电流密度差

更加增大，电流主要集中在导体表面，这种现象称为集肤效应。集肤效应时导体表面与心部的相对电流密度示如图1-2。

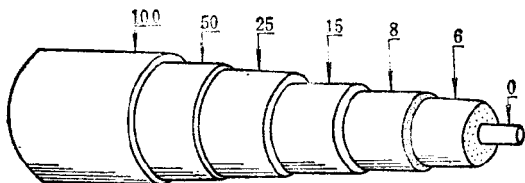


图1-2 集肤效应作用下，从表层到心部的相对电流密度

集肤效应可以用楞次定律来解释：当通过零件的磁通发生变化时，产生在零件内的感生电势，总企图使感生电流产生的磁通反抗原有磁通的变化。

设想零件是由一个由无数同心层组成的钢棒，当它处在感应器内的磁场中，如图(1-3)。因为邻近磁场，涡流将首先在外层产生，而且钢棒外层的涡流最强。按照楞次定律，此外层感应电流的流动，将产生磁通，但其方向将阻止感应器磁通的增加。

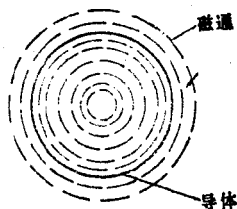


图1-3 集肤效应说明，
钢棒处在磁场中

这个对抗，减小了作用在第二层的感应器的磁通量，因此减少了感应电流，即第二层电流比第一层电流为小。第二层电流产生的磁通对抗感应器产生的磁通，使作用于第三层的磁通量更小。在这种情况下，感应器磁通量与感应电流呈现出向钢棒中心逐步减弱的现象。

3 什么是邻近效应?

导体内交变电流的分布受到邻近导体内交变电流的影响 这种现象叫做邻近效应。

图1-4a表示两个平行导体A和B，A中的导体丝 a_1 所交链导体B的磁通量比导体丝 a_2 所交链的为少。故在 a_1 中的互感电动势就比 a_2 中的为小。当导体A、B带有同方向电流时， a_1 和 a_2 的互感电动势与电流的方向基本相反，使 a_1 的电流密度比 a_2 的为小。当导体A、B带有反方向的电流时，因感应电动势与电流有基本一致的方向， a_2 的电流密度比 a_1 处为大。

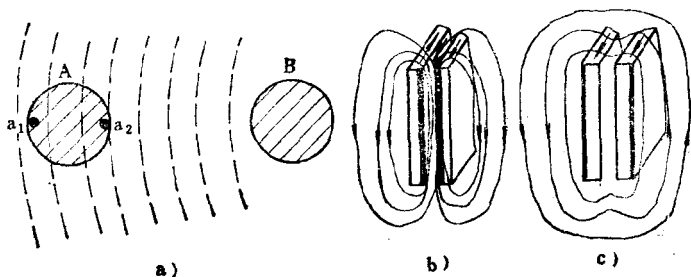


图1-4 邻近效应时导体内电流的分布

a) 导体丝 a_1 比 a_2 交链磁通量为少 b) 平行导体通入方向相反、大小相等电流时 c) 平行导体通入方向相同、大小相等电流时

邻近效应在实际应用中，基本上有两种情况即：

1) 当两个平行导体通入方向相反、大小相等的电流时，电流集中到导体互相靠近的侧面，见图1-4b。

2) 当两个平行导体通入方向相同、大小相等的电流时，电流集中到导体相距最远的外侧。图1-4c。

4 什么是环状效应?

高频电流流过环状导体时，最大电流密度分布在环状导

体内侧，这种现象叫做环状效应，如图1-5所示。环状效应的实质也即是环形感应器的邻近效应。

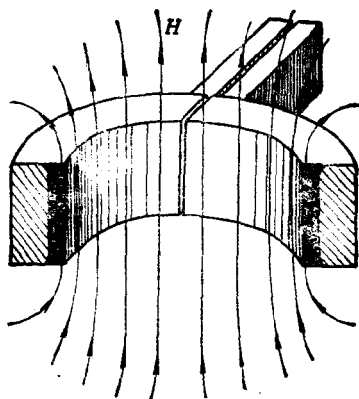


图1-5 环状效应

环状效应使感应器上的电流密集到感应器内侧，对加热零件外表面十分有利，但对加热零件内孔时，此效应使感应器电流远离加热零件表面，是有害的。示如图1-6。

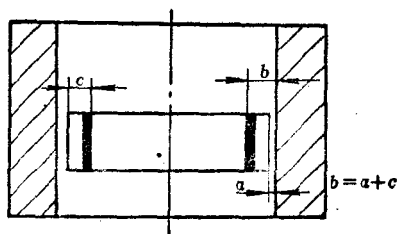


图1-6 内孔加热时，环状效应使电流远离加热表面

5 什么是有磁路存在时的集肤效应?

感应器的有效圈上装了 $\square$ 形导磁体,就能使高频电流从导磁体开口一边的导体表面流过。如图1-7所示。这就是有磁路存在时的集肤效应,也称为导磁体的驱流作用。

导磁体是具有良好磁导率、磁阻很小的磁性材料。导体装上 $\square$ 形导磁体后,当高频电流通过导体时,将有交变磁场产生,磁力线将主要从导磁体中通过,其分布如图1-8所示。假设将导体截面分成 n 层,则在1层处包围的磁力线最少,磁通密度最小,而在 n 层处包围的磁力线最多,磁通密度最大,因而自感电势最大,电流被驱向感抗小的1层,即高频电流从

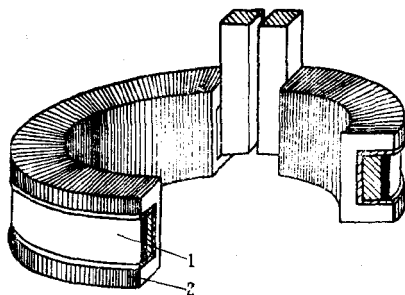


图1-7 感应器有效圈上装上了导磁体
1—有效圈 2—导磁体

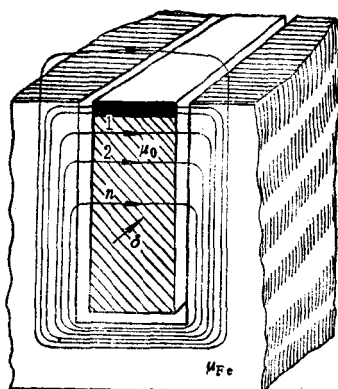


图1-8 有效圈装上了导磁体后,导体上电流的分布

导磁体开口一边的导体表面流过。

图 1-9 表示出高频感应器 ($f=200\text{kHz}$) 有效圈装上导磁体后的电流分布。

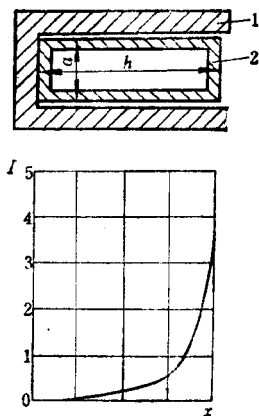


图 1-9 高频感应器有效圈装上
导磁体后的电流分布
1—导磁体 2—有效圈
 $h=7\text{mm}$, $a=5\text{mm}$,

6 什么是高频、中频、超音频电流？

高频电流是泛指比常用频率 ($50\sim 60\text{Hz}$) 高的一切电流的频率。近年来, 由于中频、超音频电流名词的出现, 高频电流主要指 $100\,000\sim 5\,000\,000\text{Hz}$ 的电流频率。

中频电流一般指 $500\sim 10\,000\text{Hz}$ 电流频率。

超音频电流一般指大于 $20\,000\text{Hz}$, 小于 $100\,000\text{Hz}$ 的电流频率。

7 什么是电流透入深度？

由于集肤效应, 导体或零件上的电流分布是不均匀的。

工程上规定,从表面电流最大值处 (I_0) 测到 $\frac{1}{e}I_0$ 处的深度为电流透入深度 d 。 $e = 2.718$ 如图1-10所示。

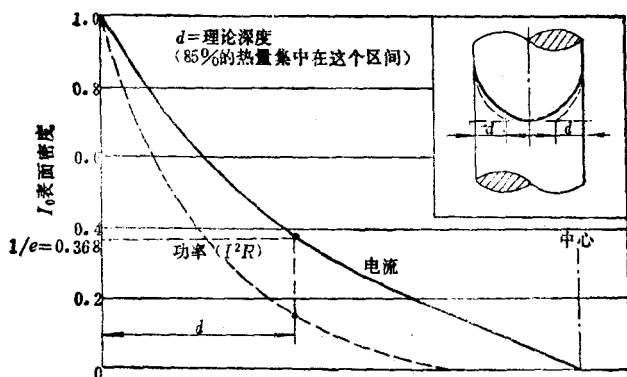


图1-10 工件截面上相对电流密度和相对功率密度分布

电流在 d 薄层内产生的热量为全部电流产生热量的85%。

电流透入深度 d 可按式计算:

$$d = 50300 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \quad (\text{mm}) \quad (1-4)$$

式中 f —— 电流频率 (Hz);

μ —— 材料的相对磁导率;

ρ —— 材料的电阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)。

从上式可知, 电流透入深度与 ρ 、 μ 、 f 三值有关, f 愈高, d 愈小。所以电流频率愈高, 电流透入深度愈小, 对于铁磁性材料, 在加热过程中, 随着温度升高, ρ 值与 μ 值又会发生很大变化, ρ 值随温度升高而升高, μ 值随温度升高到 770°C 居里点时, 急剧降低到 1。电流透入深度大大增加。如图1-11所示。

钢在居里点以下的电流透入深度称为冷透入深度 $d_{\text{冷}}$ ，在居里点以上的电流透入深度称为热透入深度 $d_{\text{热}}$ ，这两个透入深度可用下列简化公式计

算：

$$d_{\text{冷}} = \frac{20}{\sqrt{f}} \quad (\text{mm}) \quad (1-5)$$

$$d_{\text{热}} = \frac{500}{\sqrt{f}} \quad (\text{mm}) \quad (1-6)$$

对于感应器上电流透入深度，由于 ρ 、 μ 两值基本不变，可用下式计算：

$$d_{\text{热}} = \frac{67}{\sqrt{f}} \quad (\text{mm}) \quad (1-7)$$

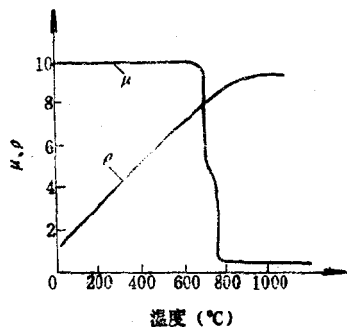


图1-11 钢在加热过程中 ρ 与 μ 的变化

表 1-1 列举了紫铜和钢在不同电流频率和温度时的电流透入深度。

表1-1 不同频率下铜和钢的电流透入深度(mm)

频 率 (Hz)	铜15℃ $\rho=2 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ $\mu=1$	钢15℃ $\rho=20 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ $\mu=10 \sim 40$	钢800℃ $\rho=120 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ $\mu=1$
50	10.0	10.0~5.0	70.8
500	3.0	3.0~1.5	22.0
1000	2.2	1.9~0.95	15.5
2500	1.3	1.5~0.7	10.0
8000	0.75	0.75~0.38	5.6
10000	0.7	0.7~0.35	5.0
50000	0.3	0.30~0.15	2.2
70000	0.27	0.226~0.113	1.9
250000	0.13	0.15~0.07	1.0
450000	0.1	0.09~0.045	0.75

8 电流透入深度是否就是淬硬层深度？

电流透入深度是指从电流密度最大的表面测到电流值为表面电流值的 $\frac{1}{e}$ 处的距离。

淬硬层深度是指从淬火表面测到 50% 马氏体 (或硬度要求值下限 $\times 0.8$) 处这一段距离。这是两个根本不同的概念, 决不能混淆。电流透入深度的大小取决于 f 、 ρ 、 μ 三者, 而淬硬层深度却取决于加热层深度、淬火温度、冷却速度与材料本身淬透性等因素。低淬透性钢尽管加热层很深、冷却很激烈, 但是淬硬层深度却很浅, 就是一个特殊的例子。

图1-12表示45钢淬硬层内的组织、硬度与温度变化关系。

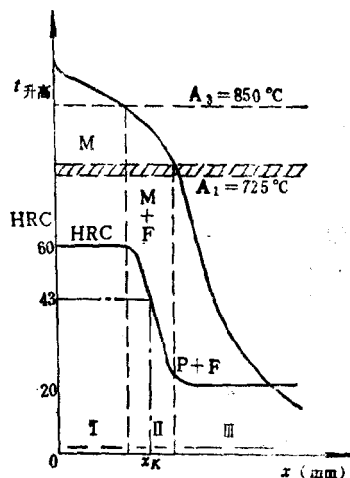


图1-12 45钢淬硬层内组织、温度、硬度与温度变化关系
 t —温度分布曲线 x_K —淬硬层深度
 HRC—硬度分布曲线 区I—加热温度高于 A_3 , 淬火后得马氏体 区II—加热温度在 A_1 与 A_3 之间, 淬火后得马氏体与铁素体 区III—未转变, 保持珠光体与铁素体

9 什么是透入式加热？什么是传导式加热？

何种加热类型较好？

透入式加热也称作热容量加热, 即当零件加热时, 电流