

梁文林 夏越良 编



**高频感应加热设备的  
原理、工程计算、  
调整与维修**

机械工业出版社

73.2812  
529

# 高频感应加热设备的原理、 工程计算、调整与维修

梁文林 夏越良 编



机械工业出版社

8710020

本书详细介绍了高压硅整流器(桥)、氧化锌(ZnO)压敏电阻器、新型  
真空管FD-111S和晶闸管交流调压电路。系统介绍了实现可控整流的各种  
方法;过电压与过电流的保护方法。详细介绍了振荡管工作状态的计算  
方法及电容反馈单回路电容和三回路电路的计算实例,并详细介绍了十三  
个维修实例。

## 高频感应加热设备的原理、工程计算、 调整与维修

梁文林 夏越良 编

\*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·印张 11<sup>5</sup>/<sub>4</sub>·插页 2·字数 290千字

1986年7月北京第一版·1986年7月北京第一次印刷

印数 0,001—3,360·定价 3.60元

\*

统一书号:15033·6341

0500172

## 前 言

近几年来,随着电子元件、器件的发展,高频感应加热设备有了某些新的发展。本书从节能的观点介绍了高压硅整流器(桥);新型过电压保护器——氧化锌( $ZnO$ )压敏电阻;新型振荡管 FD-911 S。从晶闸管技术在高频设备中的应用出发,详细分析了可以实现闭环控制的晶闸管交流调压电路。从工程实际出发系统地介绍了振荡管工作状态的常用计算方法及使用艾玛克计算器计算电容反馈单回路电路和三回路电路的实例,以及其它一些重要部件(如磁饱和稳压器)和电路的计算方法。当然,想把各种电路全部都介绍出来是不可能的,也是不必要的。只要读者掌握了基本原理,有了分析能力就可举一反三,本书第九章中的故障检修部分就是按这一观点编写的。

本书系统地介绍了高频感应加热设备中实现可控整流的各种方法;系统地介绍了设备中过电压与过电流的保护方法。编者根据自己的生产实践介绍了十三个维修实例,以使读者能从这些实例的故障、分析、解决方法中得到有益的启示。

本书在高频感应加热设备用于熔炼与淬火的基础上,加强了焊管设备电路的分析。书中所涉及的电路全部是国产的  $60kW \sim 400kW$  设备的电路,紧密地联系了我国的生产实际,所以针对性强。编者希望本书能对从事高频感应加热工作的工人、技术人员有所裨益,也希望对工科院校相应专业的师生有参考的价值。

本书第一章至第五章由梁文林执笔,第六章至第九章由夏越良执笔,全书由梁文林统稿。辽宁电子设备厂钟瑞璋、王中元二同志;洛阳拖拉机厂沈庆通同志对初稿提出了宝贵意见,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中一定会有错误及欠妥之处,恳切希望读者批评指正。

# 目 录

第一章 感应加热的原理与应用 .....	1	3-1-3 交、直流叠加控制 .....	25
§ 1-1 感应电流加热金属的原理 .....	1	3-1-4 移相控制 .....	28
§ 1-2 感应电流在导体中的分布 .....	2	一、电阻移相 .....	28
一、涡流在导体中的分布 .....	2	二、感应移相 .....	30
二、高频电流在载流导体中的分布特性 .....	5	三、电阻电感( $RL$ )移相 .....	30
§ 1-3 钢在加热过程中物理性质的变化 .....	5	3-1-5 高压硅整流器及其调压方式 .....	37
一、钢的物理性质的变化 .....	5	一、(大功率)高压硅整流器(桥)的型号	
二、铁氧体的相对磁导率 $\mu_r$ 随温度的变化 .....	6	命名方法及其技术参数 .....	37
§ 1-4 感应加热频率的选择 .....	6	二、大功率高压硅整流器(桥)电路 .....	38
一、高频熔炼 .....	7	三、GGA型高压硅整流器(桥)的选用 .....	39
二、高频淬火 .....	7	四、高压硅整流器代替闸流管整流系统的	
三、高频焊管 .....	7	优点 .....	39
§ 1-5 振荡器振荡功率的配置 .....	9	五、调压方式 .....	40
一、高频熔炼 .....	10	3-1-6 阳极变压器抽头调压 .....	40
二、高频淬火 .....	10	3-1-7 调压器调压 .....	40
三、高频焊管 .....	12	一、感应调压器的工作原理 .....	40
第二章 高频感应加热设备的组成		二、调压电路 .....	41
及整机效率 .....	16	3-1-8 电阻管调压 .....	43
§ 2-1 高频感应加热设备的组成 .....	16	3-1-9 晶闸管(可控硅)交流调压 .....	43
一、无闭环控制的高频感应加热设备 .....	16	一、单相交流调压 .....	45
二、闭环控制的高频感应加热设备 .....	17	二、三相交流调压 .....	46
§ 2-2 高频感应加热设备的整机效率 .....	19	3-1-10 各种整流方式的比较 .....	53
一、功率流程 .....	19	§ 3-2 可控整流电路、元件的	
二、整机效率 $\eta_r$ .....	19	过电压保护 .....	54
三、举例 .....	20	一、硒堆保护 .....	54
第三章 高频感应加热设备的电源 .....	21	二、阻容保护 .....	55
§ 3-1 振荡管阳极高压直流电源 .....	21	三、压敏电阻保护 .....	56
一、根据整流元件分类 .....	21	四、硅元件(硅整流元件、晶闸管)的	
二、根据实现调压的方式分类 .....	21	过电压保护 .....	58
3-1-1 闸流管及其可控特性 .....	21	§ 3-3 振荡管灯丝电源 .....	59
3-1-2 闸流管可控整流 .....	21	一、两级供电方式 .....	59
一、三相桥式半控整流电路(无零压管 $G_7$ )		二、连续调压方式 .....	60
直流电压 $U_d$ 的计算 .....	24	§ 3-4 振荡管的栅极电源 .....	61
二、三相桥式半控整流电路(有零压管 $G_7$ )		第四章 感应加热用振荡管 .....	63
直流电压 $U_d$ 的计算 .....	24	§ 4-1 振荡管的特性曲线及静态参数 .....	63
三、三相桥式整流电路中的		一、静态特性曲线 .....	63
最大反向电压 .....	25	二、静态参数 .....	64
		§ 4-2 低 $\mu$ 振荡管的优点 .....	66

§ 4-3 振荡管的使用注意事项 .....	67	§ 6-4 谐振式磁饱和稳压器的计算 .....	100
一、振荡管的冷却 .....	67	§ 6-5 偏压电源的设计 .....	104
二、对振荡管灯丝电压的要求 .....	68	§ 6-6 高压整流电路 .....	104
三、振荡管的极限参数 .....	68	§ 6-7 振荡管阳极馈电电路的计算 .....	105
§ 4-4 振荡管的冷却方式 .....	68	6-7-1 阳极串联馈电电路的计算 .....	105
一、振荡管阳极的冷却方式 .....	68	6-7-2 阳极并联馈电电路的计算 .....	106
二、灯丝、栅极、管芯及封接处的 冷却方式 .....	71	6-7-3 电容器的频率特性 .....	106
§ 4-5 振荡管的选择 .....	71	§ 6-8 栅极馈电电路的计算 .....	107
一、按振荡功率选管 .....	71	6-8-1 栅极串联电路的计算 .....	107
二、按放大系数 $\mu$ 选管 .....	72	6-8-2 栅极并联电路的计算 .....	107
三、按冷却方式选管 .....	72	§ 6-9 并联馈电中阳极与栅极阻流圈 的设计 .....	108
第五章 电子管振荡器 .....	73	第七章 控制电路 .....	111
§ 5-1 LC振荡器 .....	73	§ 7-1 设备的启闭 .....	111
一、LC 并联谐振回路 .....	73	7-1-1 设备启动的程序 .....	111
二、LC 振荡电路 .....	74	7-1-2 设备的停闭 .....	113
§ 5-2 LC振荡器中的能量转换关系 .....	77	7-1-3 遥控 .....	113
§ 5-3 振荡管的工作状态 .....	79	§ 7-2 工作指示 .....	113
一、振荡管的三种工作状态 .....	79	7-2-1 指示信号灯 .....	113
二、 $R_{\infty}$ 对工作状态的影响 .....	80	7-2-2 仪表 .....	114
三、反馈系数 $\beta$ (或栅极反馈电压幅值 $U_{g,m}$ ) 对工作状态的影响 .....	80	§ 7-3 安全保护装置 .....	114
四、 $R_{\infty}$ 和 $\beta$ 对振荡功率的影响 .....	80	7-3-1 低压侧的过电流保护 .....	114
五、工作状态的调整 .....	81	7-3-2 直流高压侧的过电流保护 .....	115
§ 5-4 振荡管工作状态的计算方法 .....	82	7-3-3 振荡管阳极电路中的保护装置 .....	116
一、艾玛克计算器 .....	82	7-3-4 晶闸管交流调压电源的 过电流保护 .....	116
二、艾玛克计算器的使用方法 .....	84	7-3-5 过电压保护 .....	117
§ 5-5 振荡器工作状态的确定和监察 .....	85	7-3-6 高整变压器(阳极变压器)合闸时 的过电流 .....	117
5-5-1 阳流表、栅流表监察工作状态 .....	85	7-3-7 其它保护措施 .....	117
5-5-2 高频电压表监察工作状态 .....	86	§ 7-4 高频测量仪表 .....	120
一、电容分压半波整流电路 .....	86	7-4-1 高频电压的测量 .....	120
二、电容分压桥式整流电路 .....	87	7-4-2 频率的测量 .....	120
第六章 高频感应加热设备的设计 .....	89	§ 7-5 控制电路实例(GP400-H2型设备) .....	121
§ 6-1 如何选择工业加热用振荡管 .....	89	7-5-1 控制电源和冷却电路 .....	121
§ 6-2 振荡管工作状态的计算 .....	89	7-5-2 灯丝部分的控制电路 .....	121
一、 $E_a$ 、 $E_g$ 、 $U_{a1m}$ 、 $U_{g,m}$ 的初选和 工作线的绘制 .....	90	7-5-3 接通高压和加热的控制电路 .....	122
二、计算实例 .....	90	7-5-4 指示信号和告警电路 .....	124
§ 6-3 常用振荡电路的计算方法 .....	92	7-5-5 阳压调节电路 .....	125
6-3-1 电容反馈单回路电路的 计算方法 .....	92	第八章 高频感应加热设备的调试 .....	127
6-3-2 三回路电路的计算方法 .....	97	§ 8-1 调试的目的 .....	127
		§ 8-2 调试前的准备工作 .....	127

§ 8-3 调试的步骤	127	图 I-1 FU-22 $\frac{S}{Z}$ (30kW)	170
§ 8-4 调试实例	128	图 I-2 FU-431 S (30kW)	170
8-4-1 GP100-C3型设备的调试	128	图 I-3 FU-23 $\frac{S}{Z}$ (400kW)	171
8-4-2 GP200-H2型设备的调试	133	图 I-4 FU-433 S (100kW)	171
8-4-3 晶闸管调压电源的调整	136	图 I-5 FD-5 S 低 $\mu$ 管 (250kW)	172
§ 8-5 焊管设备的负载调整	138	图 I-6 4023 A (300kW) (恒流曲线同 FU-914C)	172
§ 8-6 谐振式磁饱和稳压器的调试	141		
§ 8-7 超音频振荡器调试中的特殊问题	143	<b>II. 几种典型的高频感应加热设备的</b> 电原理图(各原理图引自产品说明书, 图中符号未作更改)	173
8-7-1 负阻现象	143	图 II-1 GP100-CD1型高频感应加热设备 的电原理图	173
8-7-2 消除负阻效应的方法	145	GP100-CD1型设备电原理图 明细表	174
8-7-3 阳压跌落的现象	146	图 II-2 GP100-C3型高频感应加热设备 的电原理图	175
§ 8-8 高频感应加热设备中的寄生振荡	146	GP100-C3型设备电原理图 明细表	176
8-8-1 寄生振荡的起因	147	图 II-3 GP100-H3型高频焊管设备的 电原理图	177
8-8-2 寄生振荡的检测	147	GP100-H3型设备电原理图 明细表	178
8-8-3 寄生振荡的消除	149	图 II-4 GP200-H2型高频焊管设备 电原理图	179
<b>第九章 高频感应加热设备的</b> <b>维护和修理</b>	151	GP200-H2型设备电原理图 明细表	180
§ 9-1 设备的维护工作	151	图 II-5(1) GP400-H2型高频焊管设备 方框图	182
9-1-1 维护工作的意义	151	图 II-5(2) GP400- $\frac{H1}{H2}$ 型高频焊管设备 高频部分电原理图	183
9-1-2 维护工作的组织和计划	151		
9-1-3 设备的维护项目	151		
§ 9-2 设备的修理技术	152		
§ 9-3 大功率电子管的选用和维护	161		
9-3-1 使用中应注意的问题	161		
9-3-2 电子管的硬化处理	162		
9-3-3 电子管的运输和贮存	163		
§ 9-4 闸流管的使用和维护	163		
<b>附录</b>	164		
<b>I. 阳极变压器和栅控变压器的接线组别</b>	164		
一、阳极变压器的接线组别	164		
二、栅控变压器的接线组别	166		
<b>II. 几种振荡管的恒流曲线</b>	170		

# 第一章 感应加热的原理与应用

众所周知，感应加热（包括工频、中频、高频感应加热）在工业中已获得广泛的应用。例如金属的熔化；金属的表面淬火；金属管的焊接；金属毛坯的锻造加热等都无一不利用感应加热。由于感应加热具有高的功率密度（单位加热表面上的功率一般在  $0.1 \sim 2 \text{ kW/cm}^2$  范围内），因而加热速度极快，能在数秒至数十秒的时间里将金属表面加热到  $800 \sim 1000^\circ\text{C}$ ，以实现钢件表面的淬火；能在极短时间里将钢管管坯边沿的焊合面加热到  $1250 \sim 1400^\circ\text{C}$ ，实现管缝的焊接。感应加热的原理是基于电磁感应现象。

## § 1-1 感应电流加热金属的原理

图 1-1 中示出了感应加热的四种应用实例。

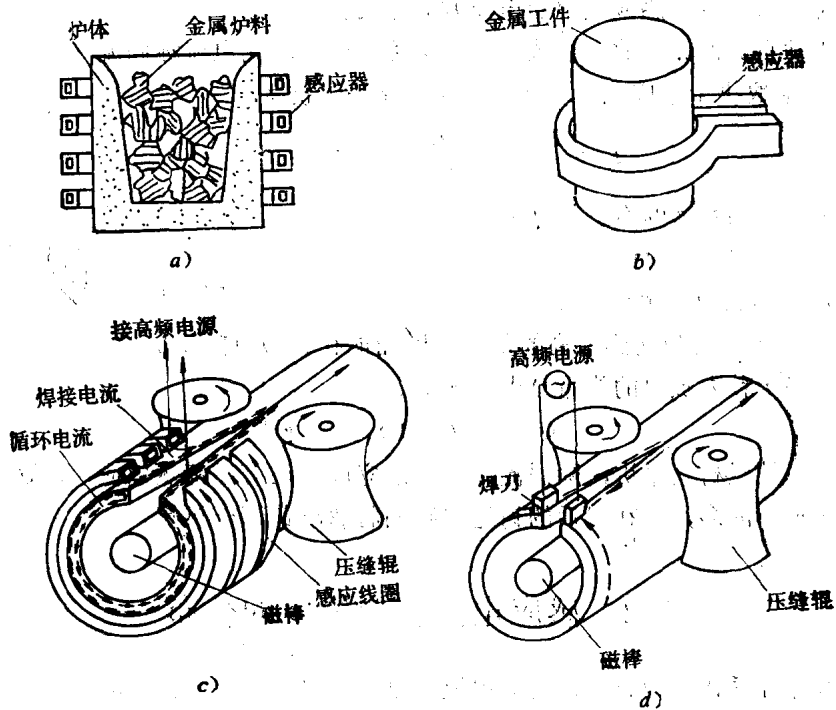


图 1-1 感应加热的应用实例

- a) 金属的熔炼    b) 金属的表面加热    c) 金属管的焊接(高频感应焊)    d) 金属管的焊接(高频接触焊)

当一个空气芯线圈两端加上频率为  $f$  的（正弦）交变电压时，将有交变电流流过此线圈，于是在线圈的周围将有磁通链绕，且各处存在不同数值的磁场强度与磁感应强度。线圈内部的磁感应强度  $B$  与磁场强度  $H$  存在如下关系：

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (1-1)$$



式中  $\mu$  是导磁材料的磁导率, 其值由式 (1-2) 决定

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (1-2)$$

式中  $\mu_r$ ——导磁材料的相对磁导率。

$\mu_0$ ——真空磁导率, 其值为  $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。

由式 (1-2) 看出, 当在空气 ( $\mu_r \approx 1$ ) 芯线圈内部放入相对磁导率为  $\mu_r \gg 1$  的钢件时, 内部的磁感应强度将大增。由于钢件处在交变磁场中, 磁通量  $\phi$  的变化将在与  $\phi$  正交的横截面内产生感应电动势  $e$ , 其值由下式决定

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \quad (1-3)$$

式中  $\phi$ ——工件上感应电流回路所包围的面积上的总磁通, 其数值随感应圈中的电流强度和工件材料的磁导率的增加而增大, 并与工件和感应圈之间的间隙有很大的关系。

$\frac{d\phi}{dt}$ ——磁通变化率。  $\phi$  值越大、频率越高, 磁通变化率越大,  $e$  值越大。

“-”号表明感应电动势  $e$  的方向在任何时候与  $\frac{d\phi}{dt}$  的变化方向相反。或者说, 工件中的涡流方向在每一瞬间都与感应圈中的电流方向相反。

因为金属工件自成回路, 故在横截面内产生感应电流, 此电流称涡流 (或称傅科电流), 并用  $I_f$  表示, 其值取决于感应电动势  $e$  及涡流回路的阻抗  $z$ ,

$$I_f = \frac{E}{z} = \frac{E}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \quad (\text{A}) \quad (1-4)$$

式中  $E$ ——感应电动势  $e$  的有效值 (V)。

$R$ ——涡流回路内的电阻 ( $\Omega$ )。

$X_L$ ——涡流回路内的感抗 ( $\Omega$ )。

由于  $z$  值很小, 涡流  $I_f$  可以达到很高的数值, 因而能在极短时间里加热工件到很高的温度。被加热工件在时间  $t$  秒内放出的热量  $Q$  由下式决定

$$Q = I_f^2 R t \quad (\text{J}) \quad (1-5)$$

应当指出, 对铁磁材料来讲, 除涡流产生热效应以外还有磁滞热效应, 但这部分热量比涡流产生的热量要小的多, 故在以后的讨论中我们将忽略此部分热量。

## § 1-2 感应电流在导体中的分布

弄清感应电流在导体中的分布; 高频电流流过导体时, 沿导体截面的分布; 当若干根通有高频交流电流的导体放得较近时, 每根导体中电流沿截面的分布, 对于制订感应加热工艺和设计感应器是有重要意义的。

### 一、涡流在导体中的分布

涡流在导体中的分布规律是, 导体表面的涡流最大, 愈深入导体内部涡流愈小。这种现象称之为集肤效应, 或趋表效应。

集肤效应可以用图 1-2 a) 作粗略的解释, 这是一个放置在外磁场中的圆柱形工件, 靠近中心部分的圆环 (即涡流回路), 其环内包围的磁通少, 故自感电势小, 涡流也就小。靠近

导体表面的圆环其内部包围的磁通多，故自感电势大，涡流也就大。

从能量的观点也容易理解产生集肤效应的原因。由于导体内部电阻率  $\rho \neq 0$ ，所以有能量损耗，即有电磁能转变成热能，因此当电磁波进入导体内部时，随着至中心的距离的增大，引起由导体表面到中心电磁能量的逐渐减小。

如图 1-1 b) 所示，当有高频电流流过感应器（线圈）时，在圆柱金属工件内要产生涡流，此涡流沿横截面由表面至中心按指数规律衰减（如图 1-2 b 所示）。

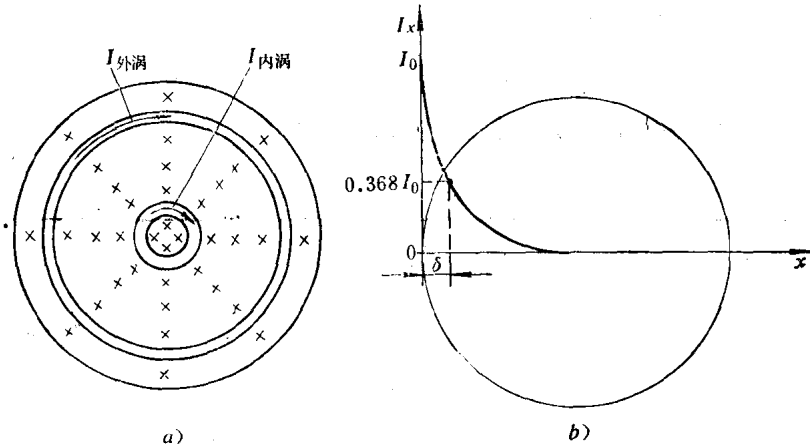


图1-2 涡流的分布

x —— 垂直于纸面通过工件的磁力线

$$I_x = I_0 e^{-\frac{x}{\delta}}$$

式中  $I_x$  —— 距离圆柱体表面  $x$  (cm) 处的电流。

$I_0$  —— 圆柱体表面的电流 (A)。

$x$  —— 距圆柱体表面的距离 (cm)。

$\delta$  —— 与频率、材料物理性质有关的系数，称电流透入深度 (cm)。

$e$  —— 自然对数的底。

工程上规定，当涡流强度从表面向内层降低到其数值等于表面最大涡流强度的 0.368 (即  $I_0/e$ ) 时，该处到表面的距离  $\delta$  称为电流透入深度。这样规定是由于分布在工件表面的涡流，并不能全部用于使工件表面加热，而是有一部分热量被传到工件内层或心部损耗了，还有一部分热量向工件周围热辐射损失掉了。由于涡流所产生的热量与涡流的平方成正比，因此由表面至心部，热量下降速率要比涡流下降速率快得多，如图 1-3 所示。按上述规定计算可认为 (85~90)% 的热量发生在厚度为  $\delta$  的薄层内。

电流透入深度  $\delta$  由式 (1-7) 确定，

$$\delta = 50306 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \quad (\text{mm}) \quad (1-7)$$

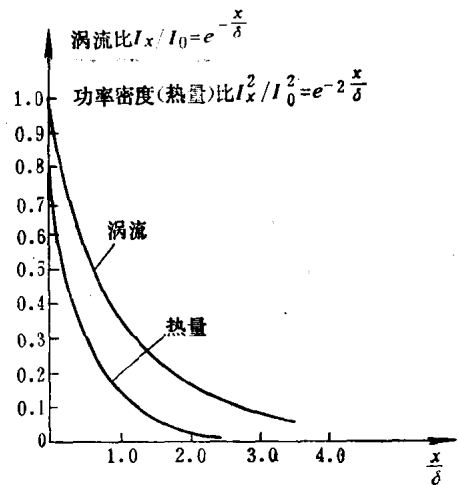


图1-3 涡流与热量的下降速率

其中  $\rho$  —— 金属材料的电阻率 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )。

$f$  —— 频率 (Hz)。

$\mu_r$  —— 金属材料的相对磁导率。

钢的相对磁导率  $\mu_r$  随温度的增加将急剧下降(见图 1-7)，常温下一般为 100(在非常强磁场状态下约为 16)，过居里点温度以后将下降为 1 左右。所以，钢在加热的初期其透入深度很浅，温度升高后其透入深度要增加很多。在高频淬火及高频焊管的工程实践中，电流透入深度的计算常常采用下面的简化公式，

$$\delta = \frac{k}{\sqrt{f}} \quad (\text{mm}) \quad (1-8)$$

式中  $k$  —— 与金属电磁特性有关的系数，其值见表 1-1。

表 1-1

钢 种	温 度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	$k$
碳 钢	20	30
	1000	600
奥氏体钢	20	450
	1000	600

由式 (1-7) 看出：(1) 当材料的电阻率  $\rho$ 、相对磁导率  $\mu_r$  给定后，透入深度  $\delta$  仅与频率  $f$  的平方根成反比，因此  $\delta$  可由频率  $f$  来控制。(2) 当  $\rho$ 、 $f$  给出后， $\delta$  与  $\mu_r$  的平方根成反比，所以磁性材料 ( $\mu_r$  值大) 的  $\delta$  值比非磁性材料 ( $\mu_r = 1$ ) 的  $\delta$  值要小得多，故磁性材料的屏蔽效果要比非磁性材料好得多。

表 1-2 示出了钢和铜的透入深度  $\delta$ 。由此表看出，如果用铜或钢做为高频电流的载流导体，由于高频电流有一定的透入深度，即电流集中在导体表面，因此有效载流截面积小于导体截面积，亦即高频时的电阻大于直流或低频时的电阻。为了减少载流导体的损耗，必须尽可能减小高频电阻，由于铜的电阻系数比钢要小，故常用铜材做为高频载流体。又由于高

表 1-2

$\delta$ 频 率	材 料	15 $^{\circ}\text{C}$ 紫铜	15 $^{\circ}\text{C}$ 钢	850 $^{\circ}\text{C}$ 钢
		$\mu_r = 1$ $\rho = 2 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$	$\mu_r = 25$ ① $\rho = 20 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$	$\mu_r = 1$ $\rho = 120 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$
50 Hz		10	6.4	78
500 Hz		3.2	2.0	24.6
1 kHz		2.3	1.4	17.4
2.5 kHz		1.4	0.9	11.0
8 kHz		0.8	0.5	6.2
70 kHz		0.27	0.17	2.1
250 kHz		0.14	0.09	1.6
450 kHz		0.11	0.045	0.9

① 强磁场状态下的相对磁导率。

频电流趋表，导体中心部分无电流流过，所以常以空心铜管（圆形截面或方形截面）作为高频载流体。在大功率振荡器中，空心铜管还可以通水冷却，以降低铜管的温升。

### 二、高频电流在载流导体中的分布特性

如果载流导体是单根导体，或者两根相距很远的导体，则每根导体被对称的磁场所包围，此时导体中的电流集中分布在表面的一个不太深的区域里，如图1-4所示，这也是高频电流的集肤效应。

1. 邻近效应 如果两根载流导体靠得很近，当两根导体中的电流方向相反时，磁场则密集在两根导体之间的区域，电流密集在两根导体相邻的内表面，当两根导体中的电流方向一致时，磁场则密集在两根导体的外侧区域，于是磁场能量在导体的外侧面按指数规律衰减，所以电流密集在外侧面。这种现象我们称之为邻近效应，如图1-5所示。频率越高，两导体靠得越近，邻近效应越显著。

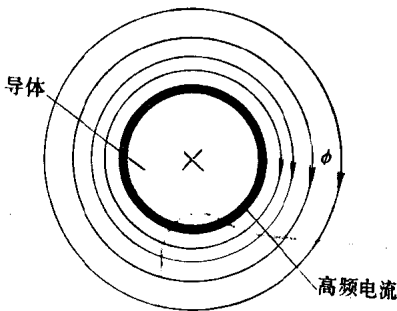


图1-4 高频电流集中在导体表面  
X——代表电流流入纸面

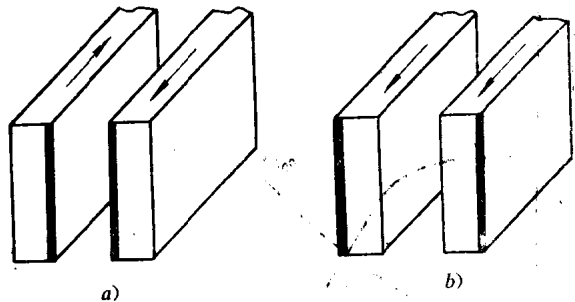


图1-5 高频电流的邻近效应  
a) 电流集中在内侧面 b) 电流集中在外侧面

根据高频电流的邻近效应，可以选择适当的感应器形状，利用反向电流互相邻近作用，实现对淬火工件的局部表面的集中加热；利用同向电流互相背离的作用，实现对内孔等表面的集中加热。在环状感应器中加热时，由于内置工件位置的偏移，或者圆环状感应器圆度不理想，致使工件局部区域的邻近效应（感应器中的电流和工件表面产生的感应电流——涡流的方向总是相反的，也产生邻近效应）特别显著，电流过分集中，致使该处温度较其它处温度为高。为了避免这种现象，生产中采用工件旋转加热的方法来防止。

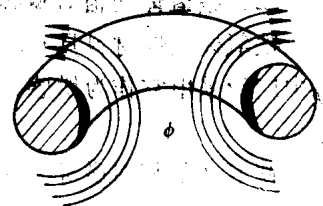


图1-6 高频电流的环状效应

2. 环状效应 高频电流沿圆环状导体流过时，磁力线密度最大的地方是圆环内表面，电流集中于导体的内侧，这种表面效应称为环状效应，如图1-6所示。环状效应对圆柱体外表面进行感应加热时，起着有利的作用，而对内孔进行感应加热时，环状效应是不利的。

## § 1-3 钢在加热过程中物理性质的变化

### 一、钢的物理性质的变化

物理性质的变化这里是指钢的相对磁导率 $\mu_r$ 、电阻率 $\rho$ 随温度变化而变化的关系。了解

这一变化，对于我们今后了解电子管振荡器在（钢）工件加热的过程中工作状态的变化是有帮助的。因为

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha (T - 20)] \quad (1-9)$$

式中  $\rho_0$ ——20℃时的电阻率 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )。

$\alpha$ ——电阻的温度系数 ( $1/^\circ\text{C}$ )。

$T$ ——温度 ( $^\circ\text{C}$ )。

由式 (1-9) 看出，钢的电阻率随温度升高而增大。在 800~900℃ 范围内各类钢的电阻率  $\rho$  基本相等，大约为  $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

钢的相对磁导率  $\mu_r$ ，在钢失去磁性以前基本不变，其数值与磁场强度有关，但在磁性转变温度（居里点）768℃ 以上，钢将失去磁性，此时  $\mu_r$  急剧下降为 1。

钢的相对磁导率  $\mu_r$  及电阻率  $\rho$  随温度变化的关系曲线如图 1-7 所示。

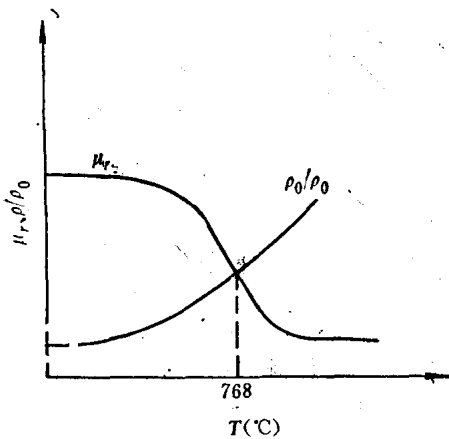


图1-7  $\mu_r$ 、 $\rho/\rho_0$ 随  $T$  变化的曲线

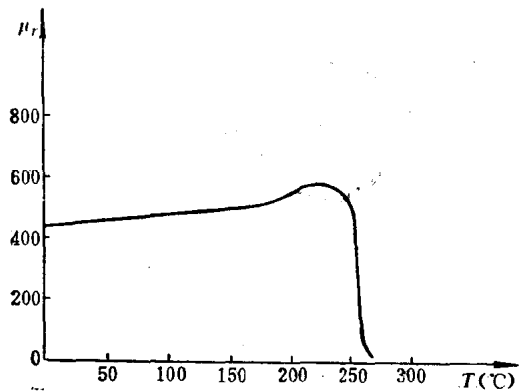


图1-8  $\mu_r$ 与温度的关系曲线

## 二、铁氧体的相对磁导率 $\mu_r$ 随温度的变化

铁氧体磁性材料具有较高的电阻率  $\rho$ 、涡流损耗小的特点，所以在几百千赫的高频焊机中广泛采用它作为增感元件，以使高频电磁能更多地集中在管缝的焊合面上，从而提高焊速。

铁氧体的相对磁导率  $\mu_r$  值的大小对于电磁能的集中有着重要的影响，也就是说， $\mu_r$  值对焊速有着重要的影响。铁氧体的  $\mu_r$  值随温度的升高是要下降的，但  $\mu_r$  值急剧下降的转折温度要比钢的转折温度（768℃）低得多。图 1-8 示出了高频焊接用磁棒（铁氧体）的典型磁特性曲线。

由图 1-8 看出，高频焊接磁棒的相对磁导率  $\mu_r$  在 250℃ 时开始急剧下降。生产中为了降低磁棒的温升，必须通冷却水冷却。

## § 1-4 感应加热频率的选择

合理的选用电流频率及设备功率，对于保证产品质量、合理使用能源、降低能源消耗、提高经济效益有着重要的意义。本节将讨论频率的选择。

### 一、高频熔炼

频率可在 70~500kHz 范围内选择, 一般选 200~300kHz 的电流频率。

### 二、高频淬火

电流频率的选择主要依据以下几点:

1. 加热层的深度 由表 1-2 看出, 钢在高温 (850℃) 时的电流 (热) 透入深度  $\delta_{he}$  要比室温 (15℃) 时的透入深度大得多, 差不多在十倍以上。设需要的淬硬层深度为  $\delta_{ha}$ , 考虑到前述特点及利用涡流层加热时热效率高的特点, 则要求

$$\delta_{he} > \delta_{ha} \left( \text{一般选 } \frac{\delta_{ha}}{\delta_{he}} \geq 0.5 \text{ 较好} \right)$$

一般, 温度为 800℃ 时, 式 (1-8) 中的  $k$  值取 500, 则

$$\frac{500}{\sqrt{f}} > \delta_{ha}$$

$$f < \frac{25 \times 10^4}{\delta_{ha}^2} \quad (1-10)$$

式中,  $\delta_{ha}$  单位为 mm;  $f$  的单位是 Hz。此式限制了电流频率的上限值。

2. 感应器的电效率要高 感应器电效率  $\eta$  与工件直径  $D$  和电流 (热) 透入深度  $\delta_{he}$  之比  $D/\delta_{he}$  的关系曲线示于图 1-9。要求  $D/\delta_{he} \geq 10$ , 即  $\frac{D}{500/\sqrt{f}} \geq 10$ , 则

$$f \geq \frac{25 \times 10^4}{D^2} \quad (1-11)$$

例如,  $D = 10 \text{ mm}$ , 要求  $f \geq 250 \text{ kHz}$ 。

3. 要使感应器发热小, 以保证热状态的机械强度。

实践证明, 感应器损耗不应超过  $0.4 \text{ kW/cm}^2$ , 为此  $\delta_{ha} \geq 0.25\delta_{he}$ 。因为  $\delta_{he} \approx \frac{500}{\sqrt{f}}$ , 所以,

$$f \geq \frac{15625}{\delta_{ha}^2} \quad (1-12)$$

此式限制了频率的下限值。

根据实践, 在频率的上限值与下限值之间的最佳频率由下式决定

$$f = \frac{60000}{\delta_{ha}^2} \quad (1-13)$$

硬化层深度与适应的频率范围参看表 1-3。

4. 对于特殊形状的零件, 如凸轮轴、模数 2~6 的齿轮、链轮等, 采用超音频频率 30~60kHz 进行淬火时, 可采用圆形感应器, 其淬硬层沿轮廓分布基本均匀。

### 三、高频焊管

频率的选择主要以焊接管的材质、壁厚为依据。另外, 由于频率的高低与电效率有关,

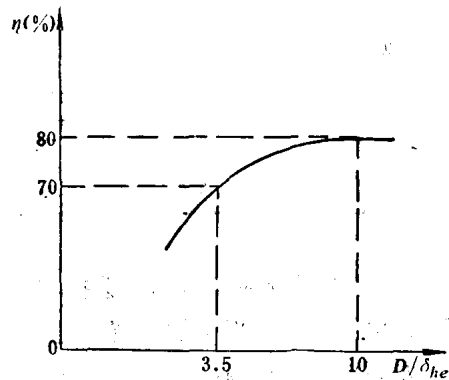


图1-9 感应器  $\eta$  与  $\frac{D}{\delta_{he}}$  的关系曲线

所以对焊接质量、焊接速度有相当大的影响，应予考虑。

表 1-3

频 率 (Hz)	硬 化 层 深 (mm)						
	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	10.0
最高频率	250000	100000	60000	30000	15000	8000	2500
最低频率	15000	7000	4000	1500	1000	500	150
最佳频率	60000	25000	15000	7000	4000	1500	500
推荐使用设备	电子管式	电子管式或机 式8000Hz	电子管式或机 式8000Hz	机 式 8000Hz	机 式 2500Hz	机 式 2500 Hz	机 式 500~1000Hz

1. 根据材质选择频率 管材的电流透入深度由式 (1-7) 决定。据此计算出的各种材质电流透入深度  $\delta$  见表 1-4。

表 1-4

$\delta$ (mm)	频 率	材 质					
		10kHz	100kHz	200kHz	300kHz	400kHz	500kHz
软钢(居里点以下)		0.18	0.06	0.04	0.03	0.03	0.03
软钢(居里点以上)		5.03	1.59	1.13	0.92	0.80	0.71
18-8不锈钢		4.26	1.35	0.95	0.78	0.68	0.60
铝		0.83	0.26	0.19	0.15	0.13	0.12
铜		0.66	0.21	0.15	0.12	0.10	0.09

2. 根据壁厚选择频率 频率的选择与壁厚有一定的比例关系。在一定壁厚范围内, 有一个较合适的频率, 在此频率下加热宽度适中, 又能保证加热均匀。一般薄壁管选高些, 厚壁管选低些。如频率选择过高, 加热宽度过窄, 边缘表面下部加热宽度小, 从而得不到均匀的焊缝, 使焊缝强度降低。如频率选择过低, 则加热区宽, 自冷效果差, 易氧化, 从而降低焊缝质量。

频率的高低对焊速也有影响。一般说, 频率高焊速快。据某厂的生产实践, 频率提高后, 在相同功率情况下焊接同一规格钢管时, 250kHz 时的焊速为 24m/min, 而 450kHz 时的焊速为 28m/min。另外, 频率提高后, 焊接性能有大的改善, 可保证钢管焊缝加热区在 0.1~0.5mm 之内, 同时还可以减少分路电流。

感应焊时的频率选择还要考虑壁厚与透入深度之比值。比值在 2 以下时, 循环电流不大, 如比值超过 3 时, 循环电流显著, 增加损耗, 降低焊速。

根据国外情况及我国的实践经验, 高频焊管时采用的频率以 350~450kHz 为宜。感应焊时的频率可选低些, 但最低不能低于 150kHz。焊接低合金管及有色金属管时, 应选择较高的频率, 最低不能低于 400kHz。

各种用途的感应加热所用频率见表 1-6。

表 1-5

用途 说明		频率 (Hz)					
		5 × 10 <sup>2</sup>	5 × 10 <sup>3</sup>	5 × 10 <sup>4</sup>	5 × 10 <sup>5</sup>	5 × 10 <sup>6</sup>	5
熔 炼	10kg以下			—	—		
	10~100kg			—			
	100~1000kg		—	—			
	1000kg以上	—	—				
表面淬火 (钢)	硬化层0.6~1.3mm				—		
	硬化层1.2~2.5mm			—	—		
	硬化层2.5~3.8mm			—			
	硬化层3.8~7.6mm			—			
齿轮淬火 (钢)	小 模 数				—		
	大 模 数			—	—		
薄板对焊	黄 铜				—		
	铜				—	—	
	钢				—		
	不 锈 钢				—		
厚板对焊	黄 铜			—			
	铜			—			
	钢			—			
	不 锈 钢			—			
感 应 加 热 电 源		工 频 电 源	发 电 机 组 可 控 硅 变 频 装 置		电 子 管 振 荡 器		

### § 1-5 振荡器振荡功率的配置

被加热材料的(感应)加热功率的准确值是难以通过理论计算得出的,即便算出,因为要用种种的假定和系数,因此与实际情况未必一致。一般在设计时都是利用实验或研究所得到的数据,再加上已有的经验给出数值范围,在此范围内选取合适的数值。感应加热功率的大小主要由工件生产率来确定,同时还要考虑前述的频率等问题。对于锻造穿透加热和熔炼,因为温度的上升需要到达材料的中心部分,故需要相当长的时间,因此功率密度可选的



小些。对于淬火和焊管，为保证浅的透入深度、窄的加热区，并能在短时间内完成加热、熔接，故要求大的加热功率，或要求在大功率密度下进行。

所需振荡器的振荡功率，可以在被加热材料的加热功率确定之后，用计算的方法估算得出；或者以表格形式给出实际生产中的数据，供选用时参考。

### 一、高频熔炼<sup>⊖</sup>

振荡器振荡功率主要依据熔炼金属的材质（黑色金属、有色金属及合金）、液体金属重量、熔炼时间来选择。具体选择方法一般有两种：一种是按照上述选择依据，考虑工业上已使用的振荡器功率来选择（参看表 1-6）；另一种是按照所熔炼金属的单位消耗功率、熔炼金属的重量来选择振荡功率。一般熔炼 1kg 金属的单位功率为 1~2kW，在保护气氛中熔炼 1kg 特种合金的单位功率为 100~200kW。

表 1-6

名 称	型 号	苏 联 ЛПЗ-37	苏 联 ЛПЗ-67	国 产 260
振荡功率 (kW)		30	60	60
液体金属(钢)重量 (kg)		25	50	50
熔炼时间 (min)		60	60	60
振荡频率 (kHz)		64~74	64~74	200
感应器匝数		14	9	9
感应器内径 (mm)		280	300	300

### 二、高频淬火

#### (一) 振荡功率的选择

高频淬火情况下，由于热量集中于表层，所以被加热零件所需要的功率常以单位面积上的功率，即功率密度（或称比功率、单位功率）来表征。

1. 零件功率密度的选择 零件功率密度  $\Delta p$  (kW/cm<sup>2</sup>) 的选择主要根据零件尺寸、淬硬层深度、加热时间及其它条件来选择。一般考虑的原则是 (1)  $\Delta p$  越大，加热速度越快，在电流频率  $f$  及最后加热温度相同条件下，获得的淬硬层越浅。(2)  $\Delta p$  越大，零件热传导散热越少。(3)  $\Delta p$  大，不适合于热传导加热，此时表面易过热。(4)  $\Delta p$  大，加热速度快，不适合对有孔、尖角等容易产生局部电流集中的零件的表面加热。

表 1-7 示出了  $f = 250\text{kHz}$  时，根据淬硬层深度选取加热时间与功率密度的一些数值关系。对于高频淬火情况的功率密度，一般在 0.1~2.0kW/cm<sup>2</sup> 范围内选取。

2. 振荡功率的选择 振荡功率  $P_{os}$  按下式估算

$$P_{os} = \frac{\Delta p \cdot S}{\eta_r \cdot \eta_L} \quad (1-14)$$

式中  $\Delta p$ ——零件的功率密度 (kW/cm<sup>2</sup>)。

$S$ ——零件的表面积 (cm<sup>2</sup>)。

$\eta_r$ ——淬火变压器效率，常取 0.8。

⊖ 目前生产中常采用可控硅中频熔炼。