



现代感应加热装置

潘天明 编著



冶金工业出版社

现代感应加热装置

潘天明 编著

北 京
冶金工业出版社
1996

内 容 简 介

本书较全面地介绍了适用于感应加热装置的各种电力半导体器件 *IGBT*、*SIT*、*VMOS*、*SCR*、*SITH* 等的结构、特点和应用技术，在介绍感应加热技术的必备知识的基础上，较详细地分析和讨论了电力半导体式感应加热装置的电路原理和设计计算，并列举包括低频、中频、超音频和高频在内的各种感应加热装置实例。书中还以一定篇幅介绍了电子式感应加热装置的基本原理和调整、维护知识。

本书可供从事感应加热装置的开发、使用和维护的专业技术人员，大专院校有关专业师生参考。也可作为感应加热设备的操作、维护人员的培训教材。

0007/21

图书在版编目 (CIP) 数据

现代感应加热装置/潘天明编著. —北京: 冶金工业出版社, 1996. 12
ISBN 7-5024-1925-X

I. 现… II. 潘… III. 感应加热设备 IV. TM924.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 20886 号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

中国人民警官大学印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1996 年 12 月第 1 版, 1996 年 12 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/32; 17 印张; 397 千字; 260 页; 1-4100 册

25.00 元

ST00170

前 言

感应加热技术是 20 世纪初才开始应用于工业部门的, 由于它具有加热速度快、物料内部发热和热效率高、加热均匀且有选择性、产品质量好、几乎无环境污染、易于实现生产自动化等一系列优点, 而得到迅速发展。感应加热技术现已在国民经济各部门中广泛应用于金属的熔炼、铸造、焊接、热处理、热锻造, 以及半导体的区熔提纯、单晶生长、外延等热加工工艺。

电力半导体器件的出现, 对感应加热装置产生了极大的影响, 采用电力半导体器件的感应加热装置, 无论是外观还是内在的电路结构都更加简单和单一化。与中频发电机和电子式高频加热装置相比, 电力半导体式感应加热装置具有效率高和省能、节约原材料、体积小、重量轻、无噪声、安全、寿命长、维护简单等一系列优点。因此, 从本世纪 70 年代开始, 世界上一些工业发达的国家都特别重视开发电力半导体式感应加热装置。中国在同一时期也开始了这方面的研究工作。最近十年, 北京有色金属研究总院先后与辽宁电子设备厂、本溪高中频电源设备总厂、天津市高频设备厂、无锡万利电炉有限公司和保定市红星高频设备厂等单位协作研究, 开发了应用晶闸管、*SIT* 或 *IGBT* 从低频到高频的各种类型电力半导体式感应加热装置。这些单位除提供书中所附的设备照片外, 还提供了有关资料, 在此表示感谢!

本书根据笔者的实际经验, 利用已有的感应加热装置的研究成果, 并在汇集、整理、分析国内外有关资料的基础上编写而成。在编写过程中, 注重理论联系实际, 阐述物理概念力求深入浅出, 并进行适当的数学分析。

本书重点阐述电力半导体式感应加热装置的电路原理、设计计算方法, 并辅以必备的基础知识, 例如重点介绍各种电力半导体器件的结构、特点和应用技术。考虑到大功率电子式感应加热装置的应用还较普遍, 因此, 本书仍以一定的篇幅介绍电子式感应加热装置的电路原理、调整和维护知识。

由于个人水平有限, 书中错误和不足之处一定不少, 敬请读者指正。

编 者

1996. 1. 28

目 录

1 电力半导体式感应加热装置	(1)
1.1 绪论	(1)
1.1.1 感应加热的基本知识	(1)
1.1.1.1 感应加热的特点和用途	(1)
1.1.1.2 感应加热的原理	(1)
1.1.1.3 感应加热的频率	(3)
1.1.2 感应加热装置综述	(6)
1.1.2.1 概述	(6)
1.1.2.2 电力半导体器件的比较和选择	(7)
1.1.2.3 电力半导体式感应加热装置的构成	(8)
1.1.2.4 储能元件 C 和 L	(9)
1.2 电力半导体器件	(14)
1.2.1 二极管	(15)
1.2.1.1 二极管的结构、符号、特性和参数	(15)
1.2.1.2 二极管的应用	(15)
1.2.2 晶体管	(16)
1.2.2.1 大功率晶体管 (GTR)	(16)
1.2.2.2 功率场效应晶体管 ($VMOS$)	(17)
1.2.2.3 静电感应晶体管 (SIT)	(19)
1.2.2.4 绝缘栅双极型晶体管 ($IGBT$)	(23)
1.2.2.5 晶体管的保护	(28)
1.2.3 晶闸管	(30)
1.2.3.1 逆阻断型换流关断晶闸管 (SCR)	(30)
1.2.3.2 可关断晶闸管 (GTO)	(33)
1.2.3.3 静电感应晶闸管 ($SITH$)	(37)
1.2.3.4 MOS 控制晶闸管 (MCT)	(39)
1.2.3.5 晶闸管的保护	(43)
1.3 谐振和耦合电路	(47)
1.3.1 谐振电路	(47)
1.3.1.1 串联谐振	(47)
1.3.1.2 并联谐振	(49)
1.3.1.3 复合谐振电路	(51)
1.3.1.4 谐振电路的特征	(58)
1.3.2 静电耦合电路	(59)

1.3.2.1	L 型电路	(59)
1.3.2.2	Π 型电路	(60)
1.3.2.3	T 型电路	(60)
1.3.3	电磁耦合电路	(61)
1.3.3.1	空芯变压器	(62)
1.3.3.2	铁芯变压器	(64)
1.4	整流器	(65)
1.4.1	主电路	(65)
1.4.1.1	概述	(65)
1.4.1.2	三相全控桥式整流电路的工作原理	(66)
1.4.1.3	三相全控桥式电路的计算	(68)
1.4.1.4	斩波电路	(71)
1.4.2	控制电路	(72)
1.4.2.1	概述	(72)
1.4.2.2	PTM-I 型锁相分频式相控触发电路	(72)
1.4.2.3	PTM-II 型锁相分频式相控触发电路	(76)
1.4.2.4	PTM-III 型锁相分频式相控触发电路	(77)
1.4.2.5	单片微机相控触发器	(79)
1.4.3	平滑滤波器	(85)
1.4.3.1	电感滤波器	(86)
1.4.3.2	电容滤波器	(88)
1.4.3.3	Γ 型滤波器	(89)
1.4.3.4	其他形式的滤波器	(90)
1.4.3.5	平滑滤波电路的比较	(92)
1.4.3.6	关于滤波电感的设计问题	(93)
1.5	逆变器	(94)
1.5.1	概述	(94)
1.5.2	并联逆变器	(94)
1.5.2.1	并联逆变器的工作原理	(94)
1.5.2.2	并联逆变器的主电路参数	(96)
1.5.2.3	并联谐振电路	(99)
1.5.2.4	并联逆变器的控制电路	(100)
1.5.2.5	并联逆变器的起动	(101)
1.5.2.6	并联逆变器的输出电路	(103)
1.5.3	串联逆变器	(105)
1.5.3.1	串联逆变器的工作原理	(105)
1.5.3.2	串联逆变器的主电路参数	(108)
1.5.3.3	串联谐振电路	(111)
1.5.3.4	串联逆变器的控制电路	(112)

1.5.3.5	串联逆变器的输出电路	(113)
1.5.3.6	串联和并联逆变器的比较	(114)
1.5.4	串并联逆变器	(115)
1.5.4.1	逆变器的工作区	(116)
1.5.4.2	逆变器主要参数的关系	(116)
1.5.4.3	逆变器主要元件的选择	(118)
1.5.5	采用具有自关断能力开关器件的逆变器	(119)
1.5.5.1	串联谐振式电压型逆变器	(119)
1.5.5.2	并联谐振式电流型逆变器	(120)
1.6	感应加热装置的设计	(122)
1.6.1	整机布置和结构设计	(122)
1.6.2	并联逆变式中频电源的设计	(123)
1.6.2.1	可调直流电流源参数的计算	(123)
1.6.2.2	逆变器参数的计算	(125)
1.6.2.3	负载电路参数的计算	(126)
1.6.3	串联逆变式中频电源的设计	(127)
1.6.3.1	可调直流电压源参数的计算	(127)
1.6.3.2	逆变器参数的计算	(129)
1.6.3.3	负载电路参数的计算	(129)
1.6.4	感性部件的结构设计计算	(130)
1.6.4.1	加热线圈和空芯电抗器	(130)
1.6.4.2	铁芯电抗器	(132)
1.6.4.3	高频淬火变压器	(135)
1.7	实用电路	(138)
1.7.1	串联逆变式晶闸管半桥低频电源	(139)
1.7.1.1	主电路	(139)
1.7.1.2	控制电路	(141)
1.7.1.3	电路的特点	(142)
1.7.1.4	类似电路	(142)
1.7.2	双混倍频式晶闸管中频电源	(142)
1.7.2.1	概述	(142)
1.7.2.2	主电路	(144)
1.7.2.3	控制电路	(146)
1.7.3	并联逆变式晶闸管中频电源	(147)
1.7.3.1	概述	(147)
1.7.3.2	双控的原理	(148)
1.7.3.3	双控的优点	(150)
1.7.3.4	起动	(151)
1.7.4	并联逆变式 <i>SITH</i> 中频电源	(151)

1.7.4.1	主电路	(151)
1.7.4.2	控制系统	(152)
1.7.4.3	实验结果	(154)
1.7.5	并联逆变式 <i>IGBT</i> 中频电源	(155)
1.7.5.1	概述	(155)
1.7.5.2	主电路	(155)
1.7.5.3	控制系统	(156)
1.7.5.4	实际数据	(157)
1.7.5.5	类似电路	(159)
1.7.6	60kHz/100kW 的 <i>SITH</i> 超音频电源装置	(159)
1.7.6.1	概述	(159)
1.7.6.2	主电路	(160)
1.7.6.3	控制系统	(161)
1.7.6.4	保护	(162)
1.7.6.5	实验结果	(163)
1.7.6.6	装置的特点	(163)
1.7.7	移相脉宽调制式 <i>SITH</i> 超音频电源	(164)
1.7.7.1	概述	(164)
1.7.7.2	移相 <i>PWM</i> 式串联逆变主电路	(165)
1.7.7.3	移相 <i>PWM</i> 式串联逆变控制电路	(166)
1.7.8	串联逆变式 <i>IGBT</i> 超音频电源	(167)
1.7.8.1	方案选择	(167)
1.7.8.2	主电路	(169)
1.7.8.3	控制电路	(169)
1.7.8.4	实验结果	(171)
1.7.8.5	类似电路	(172)
1.7.9	80kW/150kHz 的 <i>SIT</i> 高频电源	(174)
1.7.9.1	概述	(174)
1.7.9.2	80kW/150kHz 的 <i>SIT</i> 电源主电路	(176)
1.7.9.3	<i>SIT</i> 电源控制电路	(176)
1.7.10	300kW/200kHz 的 <i>SIT</i> 高频电源	(178)
1.7.10.1	主电路组成	(178)
1.7.10.2	控制系统	(180)
1.7.11	10kW/400kHz 的 <i>SIT</i> 感应加热电源	(182)
1.7.12	单管变频电路	(184)
1.7.12.1	并联谐振式单管变频电路	(184)
1.7.12.2	串联谐振式单管变频电路	(185)
1.7.13	<i>VMOS</i> 高频感应加热装置	(186)
1.7.13.1	概述	(186)

1.7.13.2	主电路结构	(187)
1.7.13.3	控制电路	(188)
1.7.13.4	内部构造	(189)
2	电子式感应加热装置	(190)
2.1	电子管振荡器的基本知识	(190)
2.1.1	电振荡	(190)
2.1.2	振荡电路能源的补充	(191)
2.1.3	电子管振荡器	(194)
2.1.4	工业用电子管振荡器	(196)
2.1.4.1	用途和特点	(196)
2.1.4.2	供电方式	(197)
2.1.4.3	栅极回路	(198)
2.1.4.4	接地点问题	(199)
2.1.4.5	振荡器的负载匹配方式	(200)
2.1.4.6	输出功率的调节方法	(202)
2.2	一般工业用的典型电子管振荡器	(202)
2.2.1	单回路振荡器	(202)
2.2.1.1	具有附加线圈的回路	(202)
2.2.1.2	无附加线圈的回路	(203)
2.2.2	双回路振荡器	(204)
2.2.3	三回路振荡器	(205)
2.3	振荡器的电源	(207)
2.3.1	概述	(207)
2.3.2	可控硅交流调压式阳极电源	(208)
2.3.2.1	交流调压电路	(208)
2.3.2.2	可控硅三相交流调压的实际应用	(212)
2.3.3	振荡管的灯丝电源	(215)
2.3.3.1	振荡管灯丝变压器接法	(216)
2.3.3.2	振荡管灯丝电路	(217)
2.3.3.3	灯丝电路实例	(219)
2.3.3.4	关于有效值问题	(221)
2.4	电子式感应加热装置实例	(226)
2.4.1	GP800-0.3-H ₁₁ 高频装置	(226)
2.4.1.1	概述	(226)
2.4.1.2	电路结构和原理	(226)
2.4.1.3	磁饱和稳压器	(227)
2.4.1.4	装置的特点	(229)
2.4.2	CYP200-0.035-C 型超音频电源	(229)
2.5	高频装置的调整和试验	(230)

2.5.1	安装和送电前后的检查、整定	(231)
2.5.1.1	整机各部件的正确安装	(231)
2.5.1.2	送电前检查	(231)
2.5.1.3	逐步送电检查和保护参数整定	(232)
2.5.2	振荡管阳极电源的调试	(233)
2.5.2.1	可控硅交流调压式阳极电路的调试	(233)
2.5.2.2	相序指示器	(234)
2.5.2.3	系统稳压精度测试	(235)
2.5.2.4	阳极电源的脉动系数测试	(236)
2.5.2.5	测量直流高压	(237)
2.5.3	振荡器的调试	(237)
2.5.3.1	决定振荡器工作状态及其性能的因素	(237)
2.5.3.2	起振试验	(240)
2.5.3.3	选择最佳参数	(240)
2.5.3.4	各种参数测试	(243)
2.5.3.5	连续负荷试验	(248)
2.5.4	调试中可能出现的异常现象及其处理	(248)
2.5.4.1	高压送不上	(248)
2.5.4.2	间歇振荡	(248)
2.5.4.3	中途停振	(249)
2.5.4.4	负阻效应	(249)
2.5.4.5	频率跃变	(249)
2.5.4.6	寄生振荡	(250)
2.5.4.7	高频干扰	(252)
2.6	高频装置的使用和维护	(253)
2.6.1	控制和测量系统	(253)
2.6.2	振荡管	(254)
2.6.2.1	振荡管的更换和安装	(254)
2.6.2.2	振荡管在运行中应注意的问题	(254)
2.6.2.3	振荡管的真空击穿和它的硬化处理	(255)
2.6.3	其他部件的维护和使用	(256)
2.6.3.1	电容器	(256)
2.6.3.2	高压变压器	(257)
2.6.3.3	水冷系统	(257)
参考文献		(259)

1 电力半导体式感应加热装置

1.1 绪论

1.1.1 感应加热的基本知识

1.1.1.1 感应加热的特点和用途

自工业上开始应用感应加热能源以来,已过去将近 80 年了。在这期间,感应加热理论和感应加热装置都有很大发展,感应加热的应用领域亦随之扩大,其应用范围越来越广。究其原因,主要是感应加热具有如下一些特点:

- (1) 加热温度高,而且是非接触式加热;
- (2) 加热效率高——节能;
- (3) 加热速度快——被加热物的表面氧化少;
- (4) 温度容易控制——产品质量稳定,省能;
- (5) 可以局部加热——产品质量好,节能;
- (6) 容易实现自动控制——省力;
- (7) 作业环境好——几乎没有热、噪声和灰尘;
- (8) 作业占地少——生产效率高;
- (9) 能加热形状复杂的工件;
- (10) 工件容易加热均匀——产品质量好。

在应用方面,感应加热可用于金属熔炼、透热、热处理和焊接等过程,已成为冶金、国防、机械加工等部门及铸、锻和船舶、飞机、汽车制造业等不可缺少的能源。此外,感应加热也已经或不断地进入到人们的家庭生活中,例如微波炉、电磁炉都是用感应加热为能源。

1.1.1.2 感应加热的原理

A 导体的感应加热

导体的导电机构主要是自由电子。如在导体上加电压,这些自由电子便将按照同一方向从一个原子移到另一个原子而形成电流。电子在移动过程中会遇到阻力,阻力愈大电流愈小,一般用电阻率 ρ 来表示导体的导电性能。由于电阻的存在,当电流流过导体时,都会引起导体发热,根据焦耳-楞茨定理可得:

$$Q = I^2 R t \quad (1-1-1)$$

式中 Q ——导体的发热量;

I ——通过导体的电流强度;

R ——导体的电阻;

t ——电流通过导体的时间。

在导体中流过电流时,在它的周围便同时产生磁场。通过的电流为直流时,产生的磁

场是固定的，不影响导体的导电性能；而通过交流电时，产生的磁场是交变的，会引起集肤效应（或称趋肤效应），使大部分电流向导体的表面流通，即有效导电面积减小，电阻增加。交流电流的频率愈高，集肤效应就愈严重。由式 1-1-1 可知，在电流 I 不变的情况下，由于电阻增加，使导体的发热量增加。同时，由于电流沿表层流通，热量集中于导体的表层，因此可利用高频电流对导体的表层进行局部加热。

同样，在高频电流通过彼此相距极近的导体，或者将直导体变成圆环、绕成线圈时，其电流密度也会发生相应变化，引起所谓邻近效应和环形效应（如图 1-1-1 和图 1-1-2 所示）。

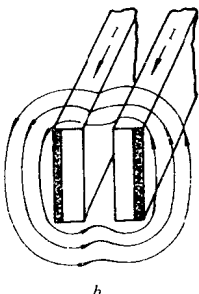
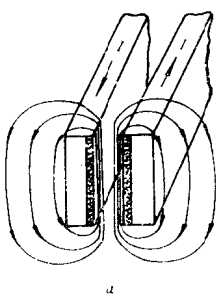


图 1-1-1 高频电流在平行放置的导体中的分布
a—导体中的电流方向相反；b—导体中的电流方向相同

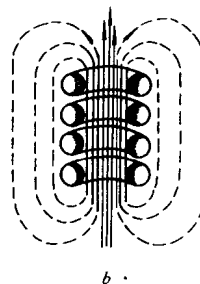
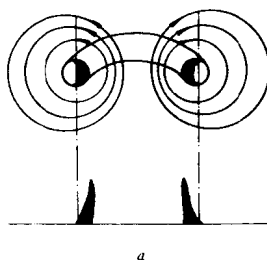


图 1-1-2 高频电流在线圈中的分布
a—圆截面导体的环形效应；b—绕成线圈的情况

无论是集肤效应、邻近效应和环形效应都是由于导体中流过交变电流时，在导体周围形成交变磁场，从而在导体中产生自感电动势迫使电流发生重新分配的结果。导体周围磁场的强弱直接与电流强度成正比。因此，平行放置的两根导体，在其电流为同方向时，则两根导体外侧磁场较内侧强（图 1-1-1 之磁力线），内侧中心的磁场强度几乎为零。两根导体流的电流是反方向时，则两导体内侧磁场最强。如果将导体绕成线圈并通以高频电流，则线圈内侧磁场较外侧强。

如果将材料放在高频磁场内（例如放到通有高频电流的线圈内部），则磁力线同样会切割材料，在材料中产生感应电动势，从而产生涡流。涡流也是高频电流，同样具有高频电流的一些性质。由于材料具有电阻，结果使材料发热，利用感应涡流的热效应进行加热，叫感应加热。

B 电流透入深度

如图 1-1-3 所示，把金属圆柱体放在流着交流电流的线圈中，尽管金属圆柱没和线圈接触，线圈本身的温度也很低，可是圆柱表面会被加热到发红，甚至熔化。这是由于电磁感应作用，在金属柱中感生与线圈电流方向相反的涡流，在涡流的焦耳热作用下，金属自身发热升温，这就是感应加热的原理。金属圆柱中的感生电流的分布如图 1-1-4 所示。这种分布以表面最强，在径向从外到里按指数函数方式减小。这种电流不均匀分布的现象，随电流频率升高而趋显著。为了简化电流计算，假定图 1-1-4a 斜线所示的全电流，折合成图 1-1-4b 所示的按表面电流密度均匀分布的形式，则其电流分布带的宽度可用下式表示：

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho \times 10^9}{\mu_r f}} = 5033 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \quad (1-1-2)$$

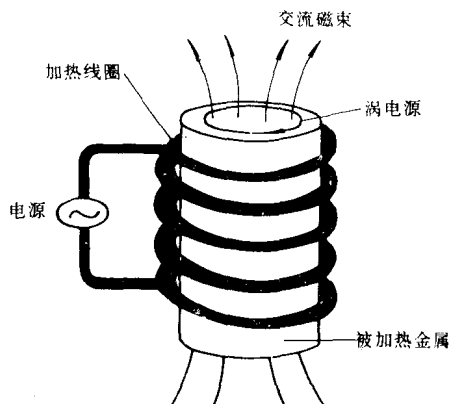


图 1-1-3 感应加热原理

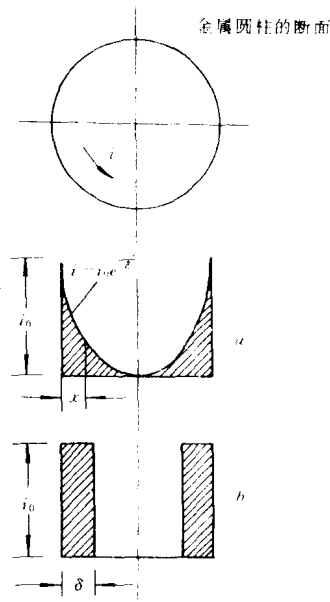


图 1-1-4 圆柱内电流分布

i_0 —圆柱表面电流密度

式中 δ ——电流分布带的宽度, cm;

ρ ——金属的电阻率, $\Omega \cdot \text{cm}$;

μ_r ——金属的相对导磁率;

f ——电流频率, Hz。

δ 是涡流密度降为表面电流密度的 $1/e$ (即 36.8%) 处的深度, 定义为电流透入深度。在电流透入深度范围内吸收的功率, 为金属圆柱吸收总功率的 86.5%, 因此, δ 便成为选择加热电流频率的重要参数。几种材料的温度、频率与 δ 的关系列于表 1-1-1。

常用铜管绕制感应线圈, 从技术经济指标考虑, 选用铜管的最佳壁厚为 $\Delta_1 = 1.57\delta$, 一般应取铜管壁厚 $\Delta \geq 1.3\delta$ 。

1.1.1.3 感应加热的频率^[2]

用于感应加热的电源频率可为 50Hz 到几 MHz。选择频率的最重要依据是加热效率和温度分布。其次是要考虑熔炼、透热和淬火等各加热工艺对电源频率的一些特殊要求。熔炼、透热加热工艺要求加热温度均匀, 而淬火则不需要加热温度均匀, 却要求满足淬硬层厚度。对于熔炼还需考虑功率密度和搅拌力。再者, 频率高的电源设备一般都比频率低的价格高, 功率大的设备必定比功率小的贵。因此, 选择电源频率最终需考虑综合经济技术指标。

(1) 加热效率和最低允许频率。如图 1-1-3 所示, 将直径为 D 的金属圆柱 (导体) 放入产生均匀磁场的线圈中进行感应加热时, 单位长圆柱吸收的功率可用下式近似地表示:

$$P = 2\pi^2 H_0^2 D \sqrt{\mu_r \rho f \times 10^{-9}} k \quad (1-1-3)$$

9710078

表 1-1-1⁽¹⁾ 几种材料的电流透入深度

条 件			电 流 透 入 深 度 l/cm					
频 率 f/Hz			50	500	1000	3000	10000	20000
碳 钢	磁性区	21℃	0.64	0.14	0.084	0.042	0.019	0.0025
		300℃	0.86	0.19	0.122	0.058	0.026	0.0035
		600℃	1.30	0.29	0.180	0.090	0.040	0.0054
	非磁性区	800℃	7.46	2.37	1.67	0.96	0.53	0.12
		1250℃	7.98	2.53	1.97	1.03	0.56	0.13
		1550℃ (熔化)	9.00	2.85	2.01	1.16	0.64	0.14
铜	50℃		1.01	0.32	0.23	0.13	0.071	0.05
	850℃		1.95	0.62	0.44	0.25	0.14	0.03
	1250℃ (熔化)		3.30	1.04	0.74	0.43	0.23	0.05
黄 铜 (含铜 65%)	650℃		2.52	0.79	0.56	0.33	0.18	0.04
	1000℃ (熔化)		4.57	1.44	1.02	0.59	0.32	0.07
铝	常温		1.07	0.37	0.26	0.14	0.08	0.01
	450℃		2.01	0.64	0.45	0.26	0.14	0.03
	750℃ (熔化)		3.70	1.17	0.83	0.48	0.26	0.06

式中 P ——单位长圆柱吸收的功率, W/cm ;

H_0 ——导体表面的平均磁场强度, 安匝/ cm ;

D ——圆柱导体的直径 (或炉内径), cm ;

μ_r ——导体的相对导磁率;

ρ ——导体的电阻率, $\Omega \cdot \text{cm}$;

f ——流过线圈的电流频率, Hz ;

k ——小于 1 的修正系数, 它是 $D/2\delta$ 的函数。当 $D/2\delta=2$ 时, $k=0.65$; $D/2\delta<2$ 时, k 值迅速减小。

由式 1-1-3 可知, 当磁场强度一定时, 电功率 P 与 $\sqrt{\mu_r \rho f}$ 和 k 值成正比, k 值越接近 1, 得到的功率 P 就越大, 也即加热效率越高。为提高效率就必须增大 $D/2\delta$, 即在 D 值一定时, δ 越小越好。然而 δ 值与 $\sqrt{f}$ 成反比, 减小 δ , 意味着需提高 f 。一般来说, 工作频率 f 高的设备其价格也贵, 且电源本身的效率也会低些。因此, 不能采用无限制地减小 δ 来提高效率。在综合考虑整套设备的技术经济指标时, 一般都以 $D/2\delta=5$ 作为极限来计算感应熔炉的最低工作频率。即把其值代入式 1-1-2 求 f 得:

$$f \geq 25 \times 10^8 \frac{\rho}{\mu_r D^2} \quad (\text{Hz}) \quad (1-1-4)$$

对于感应透热炉, 尚需考虑加热温度的均匀性, 一般取 $D/2\delta=2$, 因此

$$f \geq 4 \times 10^8 \frac{\rho}{\mu_r D^2} \quad (\text{Hz}) \quad (1-1-5)$$

在实际设计中, 往往选用较上两式算出的频率高一档的电源, 因为频率高得太多, 会

引起炉料的温差过大,反而会使加热时间增长。

应该指出,最低加热频率还与被加热物的形状和尺寸有关,限于篇幅,不再细述。

(2) 加热时的温度分布。当感应加热圆柱导体时,由于集肤效应,只有表面会快速升温,而中心部分则需靠热传导作用,从表面高温区向内部低温区传导热量,因此升温慢。表面与中心的温度差 Δt ,可以下式表示:

$$\Delta t = 25 \times \frac{P_n D}{k_c} k_t \quad (1-1-6)$$

式中 D —— 导体直径 (或炉内径), cm;

k_c —— 导体的热导率, W/(m·K);

k_t —— 与 $D/2\delta$ 和 P_n/P_a 有关的小于 1 的修正系数。当 $D/2\delta$ 值大于 8 以后, k_t 值几乎与 $D/2\delta$ 值无关; 只与 P_n/P_a 值有关, 且随 P_n/P_a 值增加而增大。当 $D/2\delta$ 小于 8 时, k_t 值随 $D/2\delta$ 下降而迅速减小;

P_a —— 功率密度 (等于导体吸收功率/导体表面积), W/cm²;

P_n —— 是 $P_a - P_r$, W/cm²;

P_r —— 导体的散热损失, W/cm²。

从式 1-1-6 可知,为了减小 Δt ,应尽量选小的 $D/2\delta$ 值和小 k_t 值。这说明为使被加热工件的温度均匀分布对 $D/2\delta$ 值的要求,与满足高的电效率对 $D/2\delta$ 的要求是矛盾的。在设计熔炼和透热设备时,要处理好这种矛盾。而在表面淬火工艺中,则不希望被淬火工件的温度均匀分布,即要求 Δt 大。此时可选大的 $D/2\delta$ 值,一般取 $D/2\delta \geq 10$, 即

$$f \geq 100 \times 10^8 \times \frac{\rho}{\mu_r D^2} \quad (1-1-7)$$

若考虑淬硬层深度,棒材和板材的表面淬火用电源频率,可按下式选取:

$$150/\delta_y^2 < f < 2500/\delta_y^2 \quad (1-1-8)$$

式中 δ_y —— 淬硬层深度, cm。

(3) 炉容与频率的关系。感应熔炼炉的基本特性取决于频率、功率密度和搅拌力三要素。搅拌力可用下式表示:

$$F = 316 \sqrt{\frac{\mu_r}{\rho f}} \times \frac{P}{\pi D H} \quad (1-1-9)$$

式中 F —— 搅拌力, kg/cm²;

P —— 炉料吸收的功率, W;

D —— 坩埚内径, cm;

H —— 熔体高度, cm。

式 1-1-9 表明,在炉料性质 (粘度、密度、电阻率等) 相同的情况下,搅拌力与加热功率成正比,即加热功率越大,搅拌越激烈; 升高电源频率,搅拌减弱; 坩埚体积增大,搅拌也减弱。为满足工艺要求,搅拌必须适度。因此,为了获得所需的熔化率,就得确保必要的加热功率。在炉子容量已定的情况下,为了满足熔化率的要求,且达到适度的搅拌,则电源频率就不能低于某一定值,这是为熔炼炉选择电源频率时需考虑的附加条件。换言之,相对于每一级频率,炉子容量有一界限 (表 1-1-2), 在此界限内,炉子工作的技术经济指标就高。

表 1-1-2 相对于频率的炉子容量极限

频率 f/Hz	50	150	500	1000	3000	10000
炉容/kg	700~450000	180~120000	40~22000	15~8000	3~1600	1~300

通过上述分析可知, 根据感应加热的应用场合来选择感应加热的频率, 会达到较好的效果。现将感应加热装置的适用频率列举于表 1-1-3。

表 1-1-3 感应加热装置的适用频率⁽¹⁾

频率 f/Hz		1	10	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
波长/cm		3×10^{10}	3×10^9	3×10^8	3×10^7	3×10^6	3×10^5	3×10^4
通俗称呼		超低频		低频	中频	超音频	高频	
感应加热的用途	容易搅拌	—	—					
	感应炉			—	—			
	锻造用钢坯加热				—	—		
	热处理				—	—	—	
	钎焊				—	—	—	—
	有缝管焊接					—	—	
	轴套轧制		—					
	电磁炉					—		
	钢铁加工感应加热			—				
	薄板加热				—			
	外延炉					—	—	
	高频热等离子							—
	各种加热装置				—	—		

1.1.2 感应加热装置综述

1.1.2.1 概述

随着电力半导体器件的开发和电力电子技术的不断发展, 感应加热装置的面貌也日新月异, 尤以装置的体积、重量和性能方面变化最为突出。例如: 同频率、同容量(100kW)的晶体管式高频装置与电子管式高频装置相比, 体积缩小 2/3, 重量减轻 2/3, 冷却水消耗量节约 1/2, 节约耗电量超过 1/3, 效率提高 35%; 而且前者寿命长, 安全可靠, 易实现自动控制, 有利于提高加热质量, 维护工作量小, 可随用随开; 后者则需预热后才能投入运行, 维护工作量大, 维护费用高。

半导体式感应加热装置的出现使感应加热用的频率选择概念发生很大变化。电子式感应加热装置的频率等级少, 不能根据加热工艺的要求选择更合适的工作频率, 往往不得不迁就频率而牺牲效率。而半导体式感应加热装置的频率应变性极强, 还具有频率自动跟随负载变化的特性, 可以选择理想的工作频率, 使装置效率最高, 从而达到节能、省时的目的。从节能角度出发, 频率等级似乎越细密越好, 但是过细、过密就涉及到配套的协调问

题。幸好同一频率等级的半导体感应加热装置的实际工作频率，允许在一定范围内变化。在一般情况下，至少允许围绕该频率等级值变化 $\pm 20\%$ 。加热工艺对工作频率的要求虽高却不苛刻，因此，结合目前国内外情况可以打破现有的频率等级划分，即使暂时做不到，也应逐渐向下列频率等级靠拢：50Hz，150Hz，300Hz，500Hz，1kHz，2kHz，3kHz，(4kHz)，5kHz，(7.5kHz)，10kHz，20kHz，30kHz，(40kHz)，50kHz，(75kHz)，100kHz，150kHz，200kHz，300kHz，400kHz，500kHz。其中，加括号的频率等级不一定要设，至少可暂时不设。另外，就可预见的电力半导体器件发展情况来看，近期不太可能满足开发500kHz以上感应加热电源的要求，这一频段暂时还只能用电子管振荡器去实现。可将上述频率等级中500Hz以下的称为低频，1~10kHz称为中频，20~75kHz称为超音频，100kHz以上称为高频。这种划分更符合中国的习惯，也较科学。

应该指出，符合前述频率等级的感应加热装置，全都可以采用电力半导体器件。

1.1.2.2 电力半导体器件的比较和选择^[3~10]

电力半导体器件种类繁多，各具特点。实践中，应根据感应加热装置的频率和容量，以及目前已商品化的电力半导体器件的开关速度高低，单管或单个模块的容量大小，价格高低来选用。

为方便起见，下面将各种电力半导体器件的性能特点和关键参数作粗略比较：

(1) 允许最高工作电压。无论是晶体管还是晶闸管都能满足以三相380V、50Hz作进线电源的高频装置对电力半导体开关的要求。因为晶体管中，除VMOS管最高允许电压只1000V外，其他几种都在1200V以上，所有的晶闸管都能达到几千伏水平，还适于更高进线电压（如，575V或1000V）的感应加热装置中使用。

(2) 允许最大工作电流。总的来说，已商品化的晶闸管的最大工作电流比晶体管的都大，可达千安以上。在晶体管中，以IGBT最大，已有800A的模块，其次是GTR。SIT最大的才180A，VMOS最小，耐压能到1000V的才30A左右。

(3) 通态压降。晶闸管的通态压降普遍低于晶体管，因此，导通损耗也小。晶体管中，以GTR的最小，其次是IGBT，一般只有几伏。SIT和VMOS工作在额定电流时，则在十几伏以上，导通损耗相当可观，只是由于它们的允许工作频率高，在100~500kHz区段，还没能为其他器件所代替。实际上，SIT和VMOS的导通呈电阻特性，它们的通态压降是随工作电流变化的，SIT的通态电阻比VMOS的小，因而功耗也小。

(4) 工作频率。晶体管和晶闸管的适用工作频率和容量如图1-1-5所示。

(5) 驱动功率。总的来说，晶体管中除GTR属电流驱动，驱动功率大外，其他晶体管（IGBT，VMOS和SIT）都属电压驱动，驱动功率小。相对晶体管（除GTR外）而言，晶

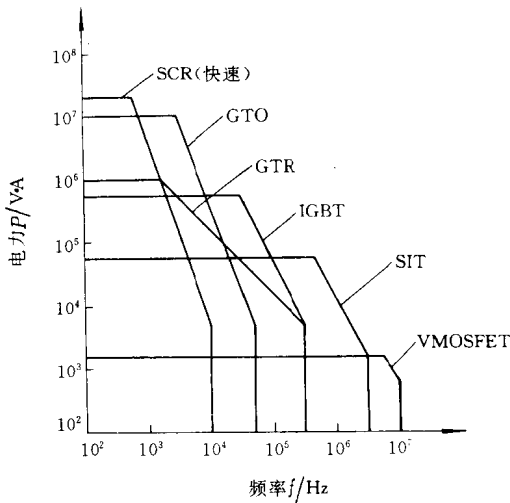


图 1-1-5 电力半导体器件的适用范围