



章舟 童军 编著



铸造感应电炉 使用指导

ZHUZAO GANYING DIANLU
SHIYONG ZHIDAO



化学工业出版社

TG232.3

5

章舟 童军

铸造感应电炉 使用指导

ZHUZAO GANYING DIANLU
SHIYONG ZHIDAO



化学工业出版社

· 北京 ·

本书从生产实践角度出发,全面介绍了铸造生产中感应电炉的基本原理、技术参数和操作经验、故障排除等知识,主要内容包括感应电炉的选型与坩埚式感应电炉参数计算、电路分析,感应电炉试炉、运行操作中的注意事项和故障排除。书中详细分析了感应电炉控制电路的工作原理、电源调试和故障排除方法;以实例形式,介绍了各类铸铁、铸钢及其零部件感应电炉熔炼铸造的生产技术和要点。本书是作者多年实践经验的总结。全书内容贴近实际,便于理解。

本书可供铸造行业的技术人员和一线工人阅读,也可供有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

铸造感应电炉使用指导/章舟,童军编著. —北京:
化学工业出版社, 2013. 11
ISBN 978-7-122-18525-9

I. ①铸… II. ①章…②童… III. ①铸造设备-熔
炼设备-感应电炉-使用方法 IV. ①TG232.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 227967 号

责任编辑:刘丽宏
责任校对:徐贞珍

文字编辑:吴开亮
装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京云浩印刷有限责任公司

装订:三河市前程装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张16 $\frac{3}{4}$ 字数323千字 2014年2月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:68.00 元

版权所有 违者必究

前言

F O R E W O R D

随着我国铸造业以及熔炼技术的发展，感应电炉已成为其中重要的设备组成部分。为了帮助铸造领域工程技术人员和一线工人学习和掌握铸铁感应电炉熔炼的相关知识和技能，指导他们的生产和实践，我们编写了这本《铸造感应电炉使用指导》。

全书从生产实践角度出发，全面介绍了铸造用感应电炉的基础知识和理论，主要包括感应电炉加热的基本原理，坩埚式感应电炉电参数计算和电路分析，感应线圈匝数计算方法，炉衬材料和烘炉工艺；全面说明了感应电炉试炉、运行操作中的注意事项和故障排除，详细分析了感应电炉控制电路的工作原理、电源调试和故障排除方法；以实例形式，介绍了各类铸铁、铸钢及其零部件感应电炉熔炼铸造的生产技术和要点。本书是笔者及同行多年来实践经验的总结，贴近实际，便于理解，以满足广大读者的专业知识需求。

本书的编写得到广大同行的大力支持，在此，对给予本书大力支持的有关专家和引用文献资料的作者们表示感谢。

限于笔者的经验与水平，书中难免有不妥之处，请读者给予指正。

编著者

目录

C O N T E N T S

第1章 铸造熔炼用感应电炉概述

1.1 感应电炉的工作原理 / 2

1.1.1 感应加热的基本工作原理 / 2

1.1.2 感应电炉的分类 / 7

1.1.3 感应电炉的用途 / 8

1.1.4 感应电炉的特点 / 11

1.1.5 感应电炉的发展趋势 / 12

1.1.6 中频感应电炉的组成 / 13

1.2 坩埚式感应电炉 / 21

1.2.1 坩埚式感应电炉的工作原理及特点 / 21

1.2.2 坩埚式感应电炉的参数计算 / 24

1.2.3 感应加热负载电路分析 / 28

1.2.4 熔炼炉感应器的计算举例 / 34

1.3 如何选购铸造中频感应电炉 / 38

1.3.1 中频电源负载主电路的两种主要形式 / 38

1.3.2 电源和炉体的配置方式 / 40

1.3.3 铸造企业用电条件 / 40

1.3.4 炉体容量、电源功率和频率的选择 / 41

1.3.5 价格和质量、技术及售后服务选择 / 47

1.4 炉衬材料 / 49

1.4.1 感应电炉对炉衬耐火材料的要求 / 49

1.4.2 炉衬耐火材料分类 / 50

1.4.3 坩埚炉衬的打结方法 / 51

1.4.4 酸性炉衬 / 51

1.4.5 中性、碱性炉衬 / 51

1.5 提高中频炉炉龄 / 52

1.5.1 正确选择适合熔炼的优质炉衬材料 / 53

- 1.5.2 提高炉龄不可忽视的要素 / 54
- 1.5.3 中频感应电炉的试炉及熔炼操作注意的问题 / 57
- 1.6 成型炉衬的生产及应用 / 58**
 - 1.6.1 成型炉衬的材料 / 60
 - 1.6.2 成型炉衬的工艺流程 / 62
 - 1.6.3 成型炉衬的安装形状与结构 / 62
 - 1.6.4 成型炉衬的安装及使用 / 64
 - 1.6.5 成型炉衬应用实例 / 65

第2章 感应电炉电源设备的试炉、维护保养与节能

- 2.1 电源设备 / 67**
 - 2.1.1 感应电炉电源的特点和分类 / 67
 - 2.1.2 并联谐振中频电源 / 68
 - 2.1.3 串联谐振中频电源 / 70
 - 2.1.4 电源效率与快速熔炼和节能 / 74
 - 2.1.5 中频电源的维修和安全操作 / 75
- 2.2 中频感应电炉启动时故障分析及处理 / 92**
 - 2.2.1 设备无法启动 / 92
 - 2.2.2 启动较困难 / 93
 - 2.2.3 启动困难 / 93
 - 2.2.4 启动后马上停机 / 94
 - 2.2.5 启动后过流跳闸 / 94
 - 2.2.6 启动无反应 / 94
- 2.3 中频感应炉运行中故障处理 / 95**
- 2.4 中频感应电炉的维护保养与安全操作及事故处理 / 100**
 - 2.4.1 中频感应电炉的维护保养 / 100
 - 2.4.2 中频感应电炉的安全操作要领 / 101
 - 2.4.3 中频感应电炉的事故处理方法 / 101
- 2.5 中频炉熔炼操作规程 / 103**
- 2.6 中频感应电炉熔炼的节能措施 / 104**
 - 2.6.1 中频感应电炉节能方面存在的问题 / 104
 - 2.6.2 中频感应电炉各部分损耗分析 / 104
 - 2.6.3 节能措施 / 105
 - 2.6.4 筑炉、熔炼及管理对节能的影响 / 109

2.7 新型中频感应电炉的特点及应用 / 111

2.7.1 新型中频感应电炉特点 / 111

2.7.2 中频感应电炉容量与功率 / 113

2.7.3 试炉及熔炼操作注意问题 / 114

2.7.4 中频感应电炉熔炼操作 / 114

第3章 感应电炉的辅助设施

3.1 机械化装料设备 / 116

3.1.1 带式运输机 / 116

3.1.2 起重电磁铁 / 117

3.1.3 底开式圆筒型料桶 / 117

3.1.4 底开式箱型料桶 / 118

3.1.5 翻转式圆筒型（或箱型）料桶 / 118

3.1.6 固定式翻转箱型料桶 / 118

3.2 浇包（盛钢桶） / 118

3.2.1 形式与规格 / 119

3.2.2 盛钢桶的砌筑 / 120

3.2.3 盛钢桶的烘烤 / 122

3.3 钢水温度的测量 / 123

3.3.1 热电偶高温计测温法 / 123

3.3.2 光学高温计测温法 / 128

3.3.3 钢水结膜测温法 / 131

3.3.4 钢水沾勺测温法 / 132

3.3.5 钢棍测温法 / 133

3.4 改善环境 / 133

3.4.1 感应电炉的消烟除尘 / 134

3.4.2 感应电炉的通风 / 138

第4章 感应电炉熔炼铸铁实例

4.1 感应电炉熔炼铸铁概况 / 144

4.1.1 冲天炉到感应电炉熔炼方式 / 144

4.1.2 中频感应电炉铁液特性及对策 / 147

4.1.3 工频无芯感应电炉熔炼作业铁液特性及故障对策 / 150

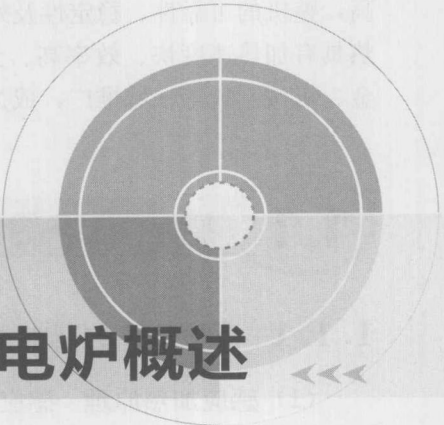
4.1.4 感应电炉熔炼灰铸铁（球铁）注意事项 / 157

- 4.1.5 感应电炉熔炼使用增碳剂的实践和注意事项 / 160
- 4.1.6 感应电炉熔炼炸炉与沸炉现象 / 167
- 4.2 铸铁生产的感应电炉的选用 / 169**
 - 4.2.1 中频感应电炉应用实践概况 / 169
 - 4.2.2 感应电炉炉衬打结 / 174
 - 4.2.3 提高感应电炉炉龄的途径 / 177
 - 4.2.4 使用感应电炉必须掌握的内容 / 180
- 4.3 铸铁感应电炉生产铸件实例 / 181**
 - 4.3.1 感应电炉中用废钢生产 HT250 铸件 / 181
 - 4.3.2 中频电炉熔炼高强度铸铁的炉前控制 / 185
 - 4.3.3 高韧性球墨铸铁轮毂的生产 / 188
 - 4.3.4 蠕虫状石墨铸铁的炉前控制及凝固规律 / 191
 - 4.3.5 耐热铸铁风帽 / 199
 - 4.3.6 多元合金高铬铸铁算条 / 202

第 5 章 感应电炉熔炼铸钢实例

- 5.1 铸钢的材料特点 / 207**
 - 5.1.1 铸钢 / 207
 - 5.1.2 铸钢的特点 / 208
- 5.2 铸钢基本知识 / 208**
 - 5.2.1 铸造碳钢 / 208
 - 5.2.2 铸造低合金钢 / 227
 - 5.2.3 铸造高合金钢 / 248
- 5.3 感应电炉熔炼铸钢实例 / 250**
 - 5.3.1 ZG45 的熔炼 / 250
 - 5.3.2 ZG35CrMnSi 的熔炼 / 252
 - 5.3.3 ZG1Cr18Ni9Ti 的熔炼 / 253
 - 5.3.4 ZGMn13 碱性感应电炉熔炼 / 255

参考文献



第1章 铸造熔炼用感应电炉概述

中频电源及中频感应电炉作为金属熔炼生产设备,因其具有易于变换熔炼品种,便于控制熔炼质量,操作简单,以及功率密度大、熔炼速度快、热效率高、起熔方便等诸多优点而受到了铸造生产厂家的青睐。很多铸造厂相继购买并安装了中频感应电炉以替代传统的冲天炉和工频炉。

自1966年瑞士公司BBC研制成功第一台感应熔炼的晶闸管中频电源装置以来,各工业发达国家相继推出了系列产品,很快替代了传统的中频发电机旋转式变频电源和各种陈旧的冶炼设备和加热设备。由于晶闸管中频电源效率高,制造周期短,安装简单,易于实现自动化控制,其应用范围遍及感应熔炼。随着微电子技术的快速发展,中频电源应用微电子技术,使中频电源的控制功能大为扩展和增强,提高了可靠性、稳定性,电源功率越作越大,体积越作越小,成本也越来越少,受到了工业界人士的一致认可和欢迎。目前,世界上中频熔炼炉的容量已超过20t,保温炉容量已超过50t,各种金属自动化加热设备更是广泛使用。

高质量的消失模铸件获得的前提是应获得优质的合金铁液,熔炼炉是获得优质的原铁液的关键设备,例如熔炼状况较好的冲天炉、中频感应电炉或者二者双联。由于消失模铸造大部分属于中小件,中频感应电炉又具有熔炼速度快、效率高、无环境污染、易于控制等突出优点,1~5t中频感应电炉国产设备技术成熟,价格适中,用中频感应电炉熔炼,可避免增硫、增磷问题,使铁液中P不大于0.07% (质量分数)、S不大于0.05% (质量分数)。因而,中频感应电炉成为中小型铸造企业生产ADI铸件的主选熔炼设备。为此,本章将重点阐述中频感应电炉的工作原理及组成,感应电炉成型炉衬的应用,中频感应电炉的试炉及熔炼操作注意的问题,中频感应电炉的维护保养与安全操作及事故处理,中频感应电炉启动时六种故障分析及处理,中频感应电炉运行中的14种故障处理等感应电炉熔炼技术。

中频感应加热技术作为一门新兴的电气应用技术得到了迅速发展。新一代集成化感应加热电源技术已趋于成熟,随着自动调节、电子保护、监控环节的性能提

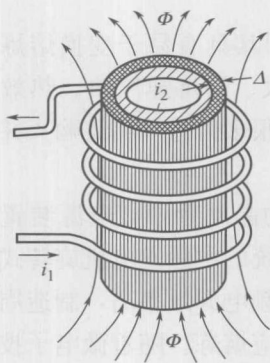
高,整机的可靠性、稳定性及效率都有了改善,广泛应用于熔炼工业领域。感应加热具有加热速度快、效率高、无环境污染、易于控制等突出优点,因而迅速在冶金、机械制造等领域推广,成为中小型铸造企业快速熔炼的主要设备。

1.1 感应电炉的工作原理

<<<

1.1.1 感应加热的基本工作原理

- (1) 感应加热原理 感应加热是电热应用的较好形式,它是利用电磁感应原理将电能转变为热能。当交变电流 i_1 通入感应圈时,感应圈内便产生交变磁通 Φ ,使置于感应圈中的工件(图 1-1 中为钢管)受到电磁感应而产生感应电势 e 。



$$\text{感应电势} \quad e = -\frac{d\Phi}{dt}$$

如果磁通 Φ 是呈正弦变化的,即 $\Phi = \Phi_M \sin \omega t$

$$\text{则} \quad e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\Phi_M \sin \omega t$$

$$e \text{ 的有效值} \quad E = 4.44 f \Phi_M \quad (1-1)$$

感应电势 e 在工件中产生电流 i_2 , i_2 使工件内部(工件近表面透入深度 Δ 层)开始加热,其焦耳热为

$$Q = 0.24 I_2^2 R t \quad (1-2)$$

图 1-1 感应器和工件中的电流

式中 I_2 ——工件中感应电流的有效值, A;

R ——工作电阻, Ω ;

t ——时间, s。

为了使金属能加热到一定温度,在金属内必须有足够大的电流 I_2 ,为此在金属内必须感应出足够大的电势 E 。由式(1-1)可知,感应电势 E 与磁通 Φ_M 、频率 f 有关。为了获得必需的感应电势,可以提高电源频率。同样的发热效果,频率越高,磁通 Φ_M 及感应圈中的电流 i_1 就可以越小,所以近代的感应加热除用工频(50Hz)电源外,还广泛采用中频($50 \sim 10^4$ Hz)和高频($7 \times 10^4 \sim 2 \times 10^6$ Hz)电源。再则,如果图 1-1 所示的金属截面增大,那么在同样磁通密度的情况下,通过金属的 Φ 也就增大,于是感应电势 E 以及金属内感应得到的功率也增大(金属中产生的功率为 $P = EI \cos \varphi = 4.44 f I \Phi_M \cos \varphi \times 10^{-3} \text{ kW}$)。可见感应电势和发热功率不仅与频率和磁通强弱有关,而且与金属的截面大小、截面形状等有关,当然还与金属本身的导电、导磁等特性有关。

- (2) 电磁感应的三个效应 电磁感应导体上产生的交流电流的分布是不均

匀的，主要受到三个效应，即集肤效应、临近效应和圆环效应的影响。

① 集肤效应、透入深度 Δ 及有效加热层 ξ 。直流电流流经导体时，电流在导体截面上是均匀分布的，但交流电流流经导体时，电流沿导体截面上的分布将是不均匀的，最大电流密度出现在导体的表面层。这种电流集聚于表面的现象叫做集肤效应。集肤效应可解释如下：当电流通过导体时，在导体的外部和内部都建立了磁通，磁力线的形状是以导体的中心为圆心的同心圆 [图 1-2(a)]，因为电流是交变的，磁场也是交变的，显然与导体表面部分相交链的磁力线，比与导体内部（接近中心部分）所交链的磁力线要少，于是导体中心部分的自感电势，或者说中心部分的电感和阻抗，大于表面部分的电感和阻抗。电流总是沿阻抗最小的路径流动，所以电流会集聚到导体的表面。电流频率越高，自感电动势的作用越强，集肤效应也越显著。

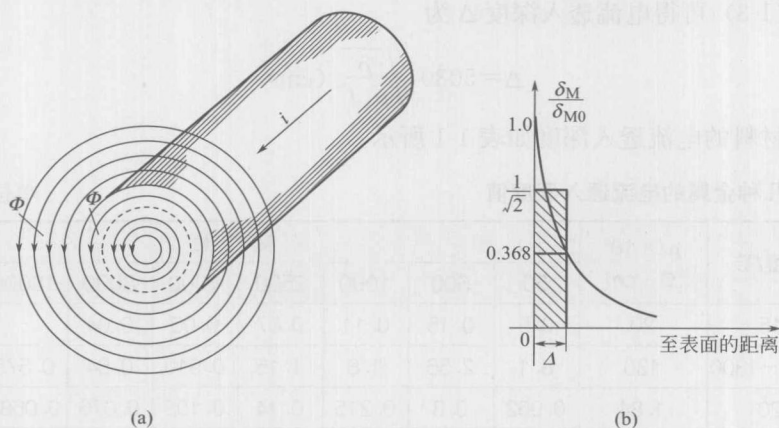


图 1-2 电流透入深度示意图

δ_{M0} —表面上电流密度的幅值； δ_M —任一点上电流密度的幅值

以上是导体中通过交变电流时电流在导体中产生的集肤现象。另一种情形是导体放在交变电磁场中，也就是感应加热工件的情形，工件中的涡流也是交变电流，它沿截面的分布也是集聚在表面一层。

由电磁场理论可以推导得电流沿导体表面的分布规律是

$$\delta = \delta_0 \lambda^{-\frac{2\pi}{c}} \times \frac{\sqrt{\mu_r f}}{\rho} \times x \quad (1-3)$$

式中 δ , δ_0 ——距表面 x 处和表层 ($x=0$) 处的电流密度；

c ——光速；

ρ ——导体或工件的电阻率， $\Omega \cdot \text{cm}$ ；

μ_r ——相对磁导率；

f ——频率，Hz；

λ ——电磁波波长。

可见电流密度由表层向中心都是近似按一指数函数迅速下降,如图 1-2(b)所示。假设在距离表面 Δ 处,电流密度已衰减至 0.368 (即 $1/e$)。为了简化感应加热的整个计算,引入一个电流在金属中透入深度的概念,即认为电流只是在深度为 Δ 的薄层中以均匀的电流密度 $\frac{\delta_{M0}}{\sqrt{2}}$ 流过,其余部分无电流流过。这样就把复杂的指数函数的计算简化成普通乘积的等效计算。然而这一等效计算方法是否与实际产生的焦耳热相一致呢?我们知道,电流在导体中所产生的焦耳热是与电流平方成正比,在电流密度衰减至 $1/e$ 时,其功率已衰减至 $1/e^2 = 0.135$,亦即在电流透入深度 Δ 层中所产生的热量为导体中总功率的 0.865,对实用计算来说,已能满足感应加热计算的要求。这就是用“ Δ ”代表加热深度的物理概念。

由式(1-3)可得电流透入深度 Δ 为

$$\Delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \quad (\text{cm}) \quad (1-4)$$

常见材料的电流透入深度如表 1-1 所示。

■ 表 1-1 几种金属的电流透入深度值

单位: cm

金属	温度/ $^{\circ}\text{C}$	$\rho/\times 10^6$ $\Omega \cdot \text{cm}$	频率/Hz							
			50	500	1000	2500	4000	8000	10000	7000
钢	15	20	0.5	0.15	0.11	0.07	0.05	0.04		
	1000~1300	130	8.1	2.56	1.8	1.15	0.910	0.64	0.575	0.215
铜	20	1.84	0.962	0.3	0.215	0.14	0.108	0.076	0.0683	0.0258
铝	20	2.95	1.2	0.38	0.27	0.17	0.137	0.095	0.032	0.032
黄铜	20	7	1.9	0.6	0.42	0.266	0.211	0.15	0.051	0.051

应当指出,在纵向交变磁场中半径为 r_2 的圆柱形导体,由电磁感应产生的涡流密度的分布随着频率的降低也有向导体内部扩张的趋势。但无论在怎样低的频率下,也得不到均匀分布的电流,其中心线上的电流密度始终为零。电流透入深度的概念只有在频率足够高时才有其物理意义,当频率低到一定值时,引用电流透入深度就失去了意义。为此,引入有效加热层 ξ 的概念。有效加热层是指圆柱形导体在纵向交变磁场中,在导体由表至里的某一深度层中吸收全部能量的 86.5%,当频率较高时,即 $\Delta/r_2 < 0.4$ 时, $\xi \approx \Delta$,当频率较低时,即 $\Delta/r_2 > 0.4$ 时, $\xi \approx 0.4r_2 < \Delta$ 。从 ξ/r_2 与 Δ/r_2 的关系曲线(图 1-3)可以看出,如果过多地降低频率,即当 $\Delta/r_2 > 0.4$ 时,已不能进一步改善电流在导体截面上的均布状态,所以“有效加热层”的深度极限为 $0.4r_2$ 。

② 邻近效应。相邻两导体通以交流电流时,在相互影响下导体中的电流要重新分布。当两电流方向相反时电流聚于导体内侧;方向相同时,电流被排于导体外

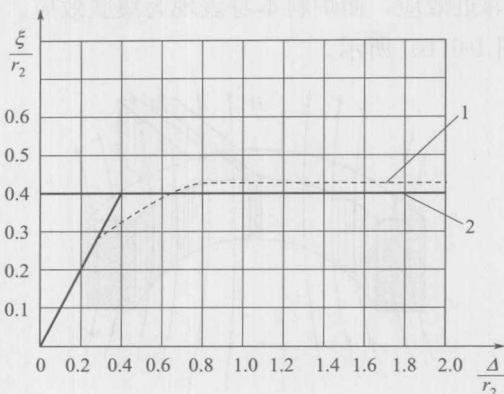


图 1-3 圆柱体有效加热层对频率的关系曲线

1—计算的；2—近似的

侧（图 1-4）。这种现象称为邻近效应。

邻近效应可解释如下：假如在任何瞬间两平行导体中的电流方向相反时，在导体之间由两电流所建立的磁场方向相同，总磁场增大，而两导体外侧的磁场却减弱。两导体之间的磁通不仅通过空气，而且也通过导体内部。显然导体外侧比内侧交链较多的磁通，因而导体外侧的电感和阻抗较内侧为大。因此，导体外侧电流密度较内侧为小。导体间的距离越近，邻近效应越显著。

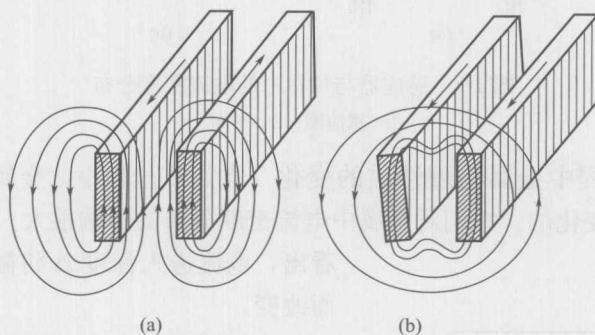


图 1-4 邻近效应

③ 圆环效应。若将交流电流通过圆环形螺管线圈时，则最大电流密度出现在线圈导体的内侧（图 1-5），这种现象叫做圆环效应。导体的径向厚度与圆环直径之比越大，这种效应就越显著。通常磁力线在环内集中，在环外分散，一部分磁力线穿过导体本身，因此导体的外侧较内侧有较多的磁通，这样导体外侧的电感和阻抗较内侧为大，电流向内侧集聚。

感应电炉即是对这几种效应的综合利用。在感应器中置以炉料 [图 1-6(a)]，在感应器两端施加交流电压，即产生交变磁场。此时感应器本身表现为圆环效应，

感应器与炉料间即为邻近效应，而炉料本身表现为集肤效应。感应器和炉料中的电流密度 (δ) 分布如图 1-6(b) 所示。

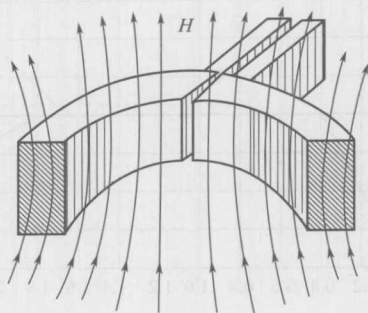


图 1-5 环形导体中的电流分布

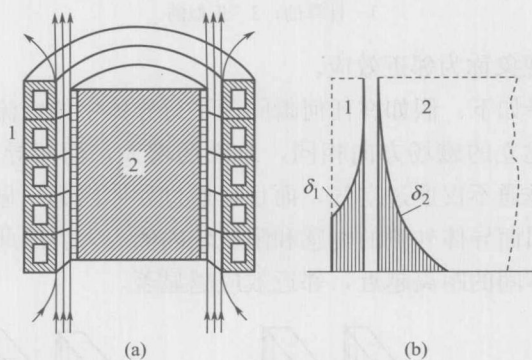


图 1-6 感应器与炉料中的电流密度分布

1—感应圈；2—炉料

(3) 加热过程中金属物理性质的变化 在加热过程中，金属材料的电阻率 ρ 和磁导率 μ 都是变化的。它们对金属中电流密度分布的影响很大。从式(1-4)也可看出，电流透入深度 Δ 将随着 ρ 、 μ 的变化而改变。

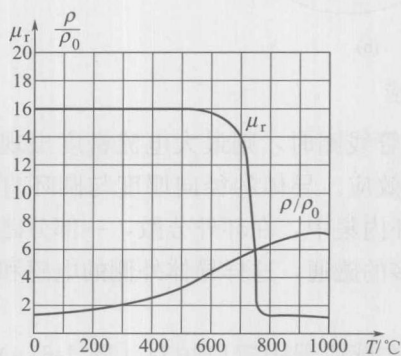


图 1-7 45 钢 μ_r 和 ρ 与温度的关系曲线

磁导率 (μ) 代表材料的导磁性能， $\mu = \frac{B}{H}$ 。当磁场强度一定时，钢的磁导率随着温度的升高而下降。开始时下降得很缓慢，一般可忽略不计。当温度达居里温度时，便急剧下降到相对磁导率为 1 (图 1-7)，所以高温时，电流透入深度会增加很多。在居里点以前，铁磁物质的 $B-H$ 曲线是非线性的，相对磁导率 μ_r 与磁场强度

有关。感应加热由于采用非常强的磁场，磁路相当于饱和，因此相对磁导率的起始值一般较低，约为 16，有时甚至更低。

电阻率 ρ 代表材料的导电性能。在不同的温度下，几种金属的电阻率 ρ 可见表 1-2。

表 1-2 中示出常温时钢的电阻率为 $2 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ；当温度升到 $800 \sim 900^{\circ}\text{C}$ 时，电阻率增加到约 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ；温度再继续上升，电阻率也基本上维持等于这一数值，不再改变。

■ 表 1-2 不同温度下几种金属的电阻率 ρ

单位： $\times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$

温度 /℃ 金属	20	30	100	200	300	400	500	600	800	900	1000	1200	1300
钢	20		25	33		52		79	118		122	126	130
铝	2.66		3.86		5.96	8	9.6						
铜	1.84	1.91	2.4	3.12		4.8		5.76		8	8.6		

1.1.2 感应电炉的分类

感应电炉按结构分，有坩埚式（通常称为无芯感应电炉）和沟槽式（通常称为有芯感应电炉）两大类。坩埚式按频率分，有工频和中频。沟槽式又可分为立式和卧式。

在铸造领域，感应电炉有三种用途：熔化、保温和浇注。因此，按用途又有熔化炉、保温炉和浇注炉之分。

工频坩埚式感应电炉主要用于铸铁和有色金属的熔炼。由于电磁搅拌力大，炼钢时炉衬寿命很短，因此，不宜炼钢，除非能解决耐火材料的寿命问题。对于含气量要求严格的有色金属（如无氧铜），也不宜用工频坩埚式感应电炉。工频坩埚式感应电炉作保温炉用时，感应线圈较短，约为坩埚高度的 $1/4$ 。

中频坩埚式感应电炉适用于钢铁及有色金属的熔炼和保温。与工频坩埚式感应电炉相比，中频坩埚式感应电炉的优点是功率密度大，起熔方便，不需要三相平衡装置，在同等生产率条件下，炉体尺寸小。由于它可以倒空，更便于变换金属品种。

坩埚式感应电炉的特点是炉衬形状简单，筑炉方便，易于检查和修补炉衬，可随开随停。

沟槽式感应电炉主要用于铜、铝、锌等有色金属的熔炼、保温和铸铁的保温，以及浇注线上用作浇注炉。

沟槽式感应电炉的特点是炉子电效率和功率因数比坩埚式感应电炉的高。缺点是沟槽部分耐火材料不容易检查和修补，不生产时也需要通电流保温，变换金属品

种困难。它较适用于单一品种的生产。

1.1.3 感应电炉的用途

感应加热的最大特点是将工件直接加热，其优点是工人劳动条件好、工件加热速度快、温度容易控制、加热过程中不会混入金属杂质及金属烧损小等，因此应用得比较广泛。感应加热的主要缺点是设备复杂。当前在机械制造工业和冶金工业方面感应加热主要用于淬火、透热、熔炼、钎焊和烧结等方面。

(1) 淬火 将工件加热到一定的温度再快速冷却下来，使工件的金相组织得到一定的变化，以此增加工件的硬度和耐磨性，称为淬火。但淬火后工件变脆，抗疲劳性变差。为解决这个矛盾，出现了表面淬火，即只将金属表面加热（内部不加热），再快速冷却下来，这样，金属表面淬了火，增加了工件的硬度和耐磨性，而内部没有淬火，仍保持一定的强度。

感应加热是表面淬火最理想的一种加热方式。由于邻近效应和集肤效应的影响，感应加热时只是工件中靠近外表面透入深度为 Δ 的一层直接发热，内部发热很少；如果控制加热时间，增大加热功率，使直接加热层的热量来不及传到工件的内部，这就可以满足表面的淬火要求。

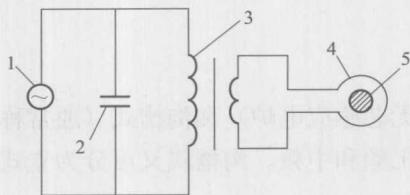


图 1-8 表面淬火举例
1—中频电源；2—中频电容器；
3—淬火变压器；4—感应线圈；5—工件

图中，中频电容器 2 的作用是补偿负载的功率因数，电源 1 通过变压器 3 使线圈 4 中流过很大的中频电流而将工件表面加热。对一般工件 5 加热只有几秒钟，工件内部温度根本来不及上升，然后断电，并迅速喷水使工件表面冷却。感应线圈用铜管通水冷却，线圈的形状要刚好包住工件，它与工件间的间隙要尽可能的小。

图 1-8 是表面淬火的一例。图中，中频电容器 2 的作用是补偿负载的功率因数，电源 1 通过变压器 3 使线圈 4 中流过很大的中频电流而将工件表面加热。对一般工件 5 加热只有几秒钟，工件内部温度根本来不及上升，然后断电，并迅速喷水使工件表面冷却。感应线圈用铜管通水冷却，线圈的形状要刚好包住工件，它与工件间的间隙要尽可能的小。

淬火层的深度是一个重要的工艺要求，它对产品的质量有很大的影响。淬火层的深度主要决定于加热电源的频率，频率越高，则透入深度就越小，直接加热层及淬火深度也越浅。淬火加热电源的频率分为中频和高频两大类。淬火深度与频率的关系见表 1-3。

淬火层的深度是一个重要的工艺要求，它对产品的质量有很大的影响。淬火层的深度主要决定于加热电源的频率，频率越高，则透入深度就越小，直接加热层及淬火深度也越浅。淬火加热电源的频率分为中频和高频两大类。淬火深度与频率的关系见表 1-3。

■ 表 1-3 淬火深度与频率关系

淬火深度/mm	10	6	4	3	2	1.5	1
电源频率/kHz	0.5	1.5	4	8	15	25	60

电源的功率对淬火层深度也有影响。功率越大，加热时间越短，直接加热层的热量来不及向内部传播，淬火层就越浅。中频淬火所需的电源功率和淬火面积有

关,一般取单位面积的功率为 $0.5\sim 2\text{kW}/\text{cm}^2$ 。

(2) 透热 在加热过程中使整个工件的内部和表面温度大致相等,叫做透热。透热主要用于锻造、热冲压、挤压、热轧和弯管等加工前的加热及带材、管材和线材的退火等。感应加热用于透热的主要优点是,改善工人劳动条件、加热效率高、速度快、减少金属的烧损、便于控制温度、保证加热质量、易于组成自动线生产等,因此得到越来越广泛的应用。

感应加热时电源频率对感应器的效率有很大影响。感应器的总效率 η 由电效率 $\eta_{\text{电}}$ 和热效率 $\eta_{\text{热}}$ 组成。送入感应器的电功率 P 可分为两部分:第一部分功率 P_1 以铜耗的形式消耗在感应器的线圈中,使线圈发热,热量又被冷却水带走,这部分功率是无用的;第二部分功率 P_2 在工件的直接加热层中转化成热。 P_2 与 P 之比就是电效率 $\eta_{\text{电}}$ 。

$$\eta_{\text{电}} = \frac{P_2}{P} \quad (1-5)$$

$$P = P_1 + P_2 \quad (1-6)$$

直接加热层的热功率 P_2 又可分为两部分:一部分 P_3 用来提高这一层的温度及传导到工件内部以提高工件内部的温度,这是有用的;另一部分 P_4 以热传导和辐射等方式散到周围空间。 P_3 与 P_2 的比就是热效率 $\eta_{\text{热}}$ 。

$$\eta_{\text{热}} = \frac{P_3}{P_2} \quad (1-7)$$

$$P_2 = P_3 + P_4 \quad (1-8)$$

感应器的总效率等于 P_3 与 P 之比

$$\eta = \frac{P_3}{P} = \eta_{\text{电}} \eta_{\text{热}} \quad (1-9)$$

感应器的结构设计得合理,效率就高,感应器设计得不合理,效率就要降低。

为了得到同样的加热效果,可把电源频率 f 提高,线圈中的电流 I_1 及铜损 P_1 就可以减小,电效率 $\eta_{\text{电}}$ 就可以提高。频率提高使工件的透入深度也要减小,圆柱形钢工件的直径 d 与“热态”透入深度 Δ_k 之比就增大,其电效率 $\eta_{\text{电}}$ 和 d/Δ_k 的比值有关。当 d/Δ_k 等于3.5时,其电效率约为75%;当频率增加到使 d/Δ_k 等于10时,其电效率接近90%。再增加电源频率对电效率的影响就不大了,所以一般以 $d/\Delta_k=3.5$ 作为电源频率的下限。下限频率 f_{min} 为

$$f_{\text{min}} = \frac{30000}{d^2} \quad (1-10)$$

感应器的热效率 $\eta_{\text{热}}$ 与感应器中选用隔热层时所决定的热损有关。又因频率越高,直接加热层就越浅,要使工件表面和芯部获得接近的温度,只能靠长时间的传导,但传热时间过长,热量在周围介质中损失 P_4 就过多,以致热效率 $\eta_{\text{热}}$ 降低,而且达不到快速透热的效果。当 d/Δ_k 大于5时,热效率 $\eta_{\text{热}}$ 显著下降,而电效率 $\eta_{\text{电}}$ 增加不多,