

铸铁 感应电炉 熔炼及应用实例



童军 章舟 连炜 | 编著

Z
HUTIE
G D
ANYING
R J Y S
INGYONG
HILI



化学工业出版社



www.cip.com.cn

读科技图书 上化工社网

Z G D R J Y S

铸铁感应电炉熔炼及应用实例

- 本书结合铸铁件感应电炉熔炼的生产实践，在介绍感应电炉工作原理和操作事项的基础上，重点通过列举实例介绍各类铸铁及其零部件感应电炉熔炼铸造的生产技术和要点，包括灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁、可锻铸铁、冷硬铸铁、耐热铸铁和铬系铸铁等。
- 本书可供铸造领域的技术人员、管理人员以及企业技术工人在实践中参考，也可供大专院校师生、科研人员阅读。



销售分类建议：机械/铸造

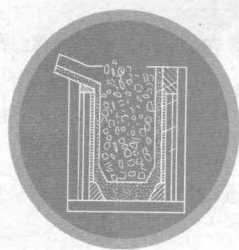
ISBN 978-7-122-02262-2



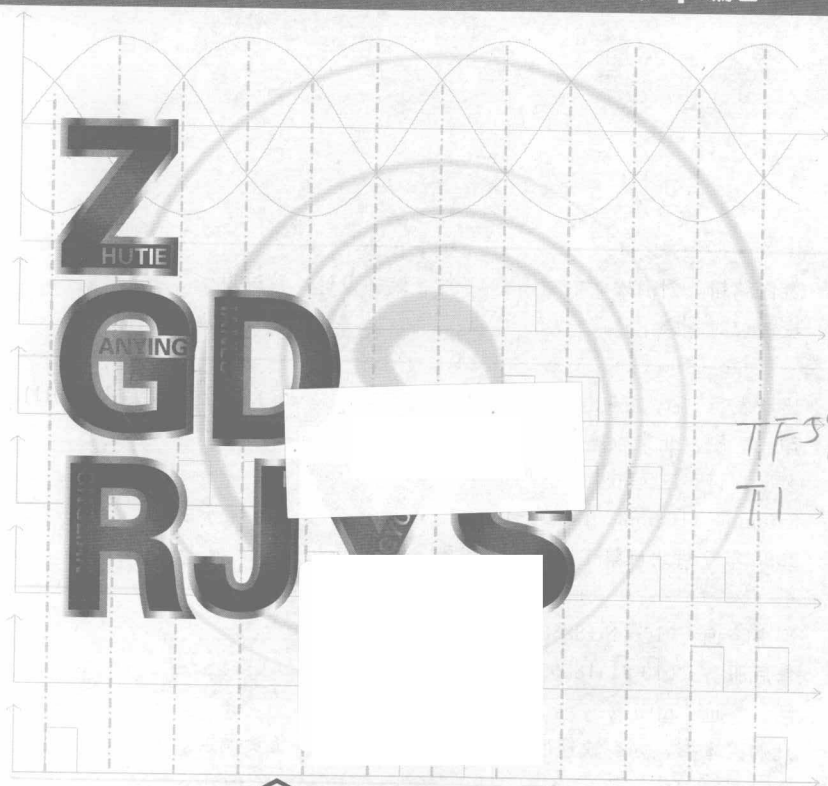
9 787122 022622 >

定价：25.00元

铸铁 感应电炉 熔炼及应用实例



童军 章舟 连炜 | 编著



北京燕山出版社



化学工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

铸铁感应电炉熔炼及应用实例/童军, 章舟, 连炜编著. —北京: 化学工业出版社, 2008. 3
ISBN 978-7-122-02262-2

I. 铸… II. ①童…②章…③连… III. 铸铁-电炉-熔炼 IV. TF593

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 025882 号

责任编辑: 刘丽宏

装帧设计: 尹琳琳

责任校对: 宋 玮

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: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

850mm×1168mm 1/32 印张 9¼ 插页 1 字数 247 千字

2008 年 5 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: 25.00 元

版权所有 违者必究

前言

铸造是机械工业重要的基础工艺和技术,广泛地应用于机械制造、能源、交通、电力、化工、建筑及社会生活的各个领域,并随着各相关技术的发展而不断发展和完善。

近几年来,由于电力供应状况的改善和对铸件品质要求的提高,在铸造生产中愈来愈多地采用感应电炉进行熔炼,感应电炉常常是铸造车间建设和技术改造中优先考虑选用的设备。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,我们编写了本书。

本书共分7章,前两章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;重点介绍了感应电炉的电源设备,并以实例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;其中故障实例是编著者多年从事中频电源设计和维修所积累的经验。第3章~第7章以实例形式,介绍了各类铸铁及其零部件感应电炉熔炼铸造的生产技术和要点,包括灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁、可锻铸铁、冷硬铸铁、耐热铸铁和铬系铸铁的感应电炉熔炼实例。

全书主要由童军、章舟、连炜编写,其中第1章~第4章由童军编写,第5章、第6章由章舟编写,第7章由连炜编写。孟昌辉编写了第1章1.6节。

在本书编写过程中,得到了《铸造技术》杂志编辑部的大力支持,西安机电研究所西安中电电炉有限责任公司、联合矿产(天津)有限公司、长沙环宇石英砂有限公司提供了部分技术资料,在

化学工业出版社相关图书推荐

书名	定价/元
金属型铸件生产指南	45
铸铁件生产指南	30
铸钢件生产指南	32
有色金属铸件生产指南	29
砂型铸造生产技术 500 问 (上册)	38
砂型铸造生产技术 500 问 (下册)	39
熔模精密铸造技术问答	35
铸铁感应电炉熔炼及应用实例	25
铸铁及其熔炼技术问答	25
呋喃树脂砂铸造生产及应用实例	20
压铸件生产指南	22
消失模铸造生产及应用实例	19
液态模锻与挤压铸造技术	62
有色合金消失模铸造原理与技术	26
有色金属熔炼与铸造	35
铸件质量控制及检验	29
铸铁	38
铸铁件生产实用技术	38
铸造铝、镁合金	39
铸造钛、轴承合金	29
铸造锌、铜合金	32
中国材料工程大典·第 18 卷, 材料铸造成型工程·上	170
中国材料工程大典·第 19 卷, 材料铸造成型工程·下	135

以上图书由化学工业出版社机械-电气分社出版。如需要以上图书的内容简介和详细目录, 或者更多的专业图书信息, 请登录 www.cip.com.cn。如果出版新著, 请与编辑联系。

地址: 北京市东城区青年湖南街 13 号 (100011)

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686)

编辑: 010-64519283 (刘丽宏)

目 录

第 1 章 铸造熔炼用感应电炉

1.1 感应电炉的工作原理及发展	1
1.1.1 感应加热的基本工作原理	1
1.1.2 感应电炉的分类	8
1.1.3 感应电炉的用途	9
1.1.4 感应电炉的特点	14
1.1.5 感应电炉的发展趋势	16
1.2 坩埚式感应电炉	17
1.2.1 坩埚式感应电炉的工作原理及特点	17
1.2.2 坩埚式感应电炉的参数计算	22
1.2.3 感应加热负载电路分析	26
1.3 熔炼炉感应器的计算举例	34
1.3.1 已知数据	34
1.3.2 参数选择	35
1.3.3 参数计算	35
1.4 炉衬材料	38
1.4.1 感应电炉对炉衬耐火材料的要求	38
1.4.2 炉衬耐火材料分类	40
1.4.3 坩埚炉衬的打结方法	40
1.4.4 酸性炉衬	41
1.4.5 中性、碱性炉衬	41
1.5 筑炉工艺和烘炉方法	43
1.5.1 联合矿产(天津)有限公司烘炉工艺	43
1.5.2 长沙环宇石英砂有限公司烘炉工艺	46

1.5.3	西安机电研究所西安中电电炉有限责任公司 烘炉工艺	46
1.5.4	感应炉炉衬的打制和烧结	48
1.5.5	无芯感应炉酸性干式打制炉衬及其应用与维护	50
1.5.6	提高中频感应炉炉龄的途径	54
1.6	成型炉衬的生产及应用	56
1.6.1	成型炉衬的材料	57
1.6.2	成型炉衬的工艺流程	60
1.6.3	成型炉衬的安装形状与结构	61
1.6.4	成型炉衬的安装及使用	62
1.6.5	成型炉衬应用实例	64

第2章 感应电炉的电源设备

2.1	感应电炉电源的特点和分类	66
2.2	并联谐振中频电源	67
2.3	串联谐振中频电源	72
2.4	电源效率与快速熔炼和节能	75
2.5	中频电源的维修和安全操作	76
2.5.1	中频电源的触发电路工作原理	76
2.5.2	中频电源的调试	86
2.5.3	中频电源操作工艺	95
2.5.4	中频电源的故障排除和实例	97

第3章 铸造厂感应电炉应用实践

3.1	感应电炉的选型	111
3.2	从冲天炉到感应电炉熔炼方式的转变	117
3.3	铁液特性及对策	121
3.3.1	中频感应电炉铁液特性及对策	121
3.3.2	工频无芯感应电炉熔炼作业、铁液特性及故障	

对策	125
3.4 感应电炉熔炼铸铁注意事项	137
3.4.1 感应电炉熔炼灰铸铁(球铁)注意事项	137
3.4.2 感应电炉熔炼使用增碳剂的实践和注意事项	139
3.4.3 感应电炉熔炼沸炉现象探讨	148
3.5 中频感应电炉熔炼的节能措施	152
3.5.1 中频感应电炉节能方面存在的问题	152
3.5.2 中频感应电炉各部分损耗分析	152
3.5.3 节能措施	153
3.5.4 筑炉、熔炼及管理对节能的影响	159

第4章 灰铸铁感应电炉熔炼实例

4.1 HT250 刹车鼓的生产	161
4.2 中频电炉熔炼高强度铸铁的炉前控制	162
4.3 低合金铁素体灰铸铁阀体的研制	167
4.4 中频电炉同炉生产不同牌号铸铁件的实践	169
4.5 空调压缩机 D 型石墨铸铁缸体的生产	174
4.6 钢琴铸铁琴板声学性能的提高	176
4.7 灰铸铁件的氮气泡及其防止	180
4.8 大中吨位变频电炉熔炼铸铁的质量控制	184
4.9 高镍奥氏体铸铁的生产工艺特征	187
4.10 镍奥氏体铸铁冲盘的生产	193

第5章 球墨铸铁感应电炉熔炼实例

5.1 QT600-3 滑管的铸造工艺设计	197
5.2 球墨铸铁活塞环铸件的生产	201
5.3 Q6108 球铁活塞环头环的生产	205
5.4 276Q 微型汽车发动机曲轴的铸造	207
5.5 铸态 QT850-3 球墨铸铁曲轴的生产	209

5.6 高韧性球墨铸铁轮毂的生产	212
------------------------	-----

第6章 蠕墨铸铁、可锻铸铁、冷硬铸铁、耐热铸铁的感应电炉熔炼实例

6.1 蠕虫状石墨铸铁的炉前控制及凝固规律	216
6.2 等温淬火对球墨可锻铸铁力学性能的影响	227
6.3 冷硬铸铁凸轮轴的铸造技术与质量控制	234
6.4 消失模工艺铸造耐热铸铁风帽	236

第7章 铬系铸铁感应电炉熔炼实例

7.1 中、低铬铸铁磨球铸造	241
7.2 高铬铸铁磨球的生产	249
7.3 我国高铬抗磨白口铸铁磨片材料的发展	252
7.4 高铬铸铁转子的生产工艺	257
7.5 高铬铸铁杂浆泵耐磨件的生产	261
7.6 高韧性高铬铸铁衬板的研制和应用	266
7.7 多元合金高铬铸铁算条的研制和应用	270
7.8 提高铬系铸铁性能的措施	275
7.8.1 重稀土钇对铬系合金白口铁组织及性能的影响 ..	275
7.8.2 高铬铸铁“正火液”的特性与应用	278

参考文献

第 1 章

铸造熔炼用感应电炉

1.1 感应电炉的工作原理及发展

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 。

感应电势

$$e = -\frac{d\phi}{dt}$$

如果磁通 ϕ 是呈正弦变化的，即 $\phi = \phi_M \sin \omega t$

则
$$e = -\frac{d\phi}{dt} = -\phi_M \omega \cos \omega t$$

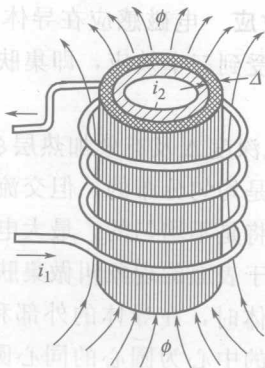


图 1-1 感应器和工件中的电流

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

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:

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

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 (50~10⁴ Hz) 和 高频 (7×10⁴~2×10⁶ 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 $P = EI \cos \phi = 4.44 f I \phi_M \cos \phi \times 10^{-3} \text{ kW}$)。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 电磁感应在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。

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倒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 ——相对导磁率；

f ——频率，Hz。

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，其余部分就无电流流过。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。

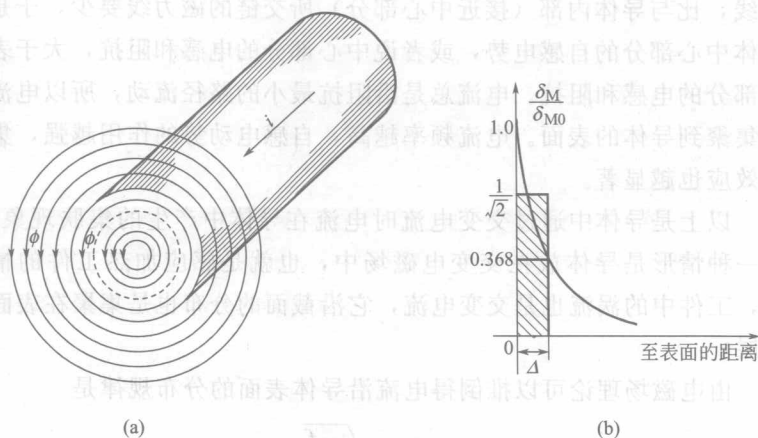


图 1-2 电流透入深度示意图

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

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 所列。

表 1-1 几种金属的电流透入深度值 单位：cm

金属	温度/℃	$\rho/\times 10^6$ $\Omega \cdot \text{cm}$	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（如图 1-3 所示）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 $0.4r_2$ 。

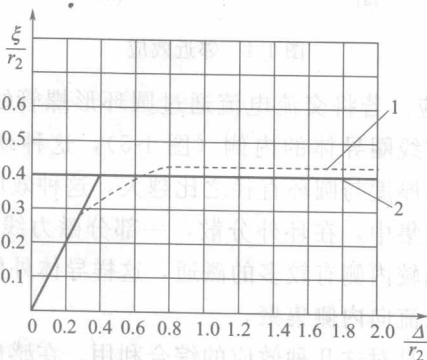


图 1-3 圆柱体有效加热层对频率的关系曲线

1—计算的；2—近似的

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，电流被排于导体外侧（如图 1-4 所示）。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 [图 1-4(a)]，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。

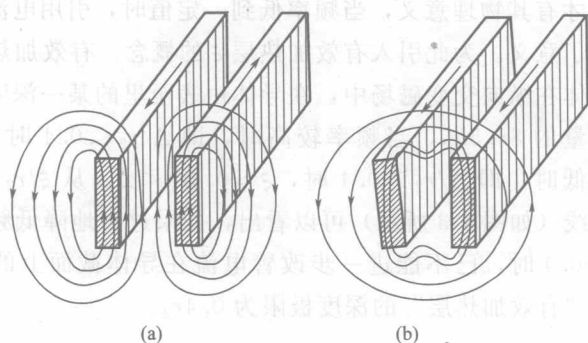


图 1-4 邻近效应

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[见图 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。

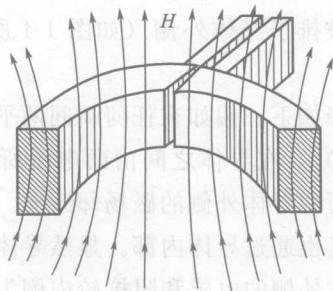


图 1-5 环形导体中的电流分布