



铁坩埚无芯工频感应电炉

设计、制造、使用



机械工业出版社

本书对铁坩埚无芯工频感应电炉从基础知识到设计计算方法，从制造到使用维护均有详细介绍。在设计计算方面不仅介绍了计算方法与程序，还选了几个不同类型电炉实例进行了分析讨论。在使用维护方面，不仅介绍了日常使用与维护，也介绍了常见故障与排除方法。同时又介绍了十五个已经生产实践验证，效果较好的电炉实例。最后还简要介绍了在低温加热范围内工频感应加热的应用。

铁坩埚无芯工频感应电炉

设计、制造、使用

青岛压铸厂 杨明义 编

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

民族印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张 $17 \frac{1}{8}$ 插页 2 字数 270 千字

1978 年 7 月北京第一版·1978 年 7 月北京第一次印刷

印数 00,001—10,500·定价：1.35 元

统一书号：15033·4487

前 言

在波澜壮阔的无产阶级文化大革命开始的 1966 年,我国工人阶级满怀为伟大领袖毛主席争光,为伟大的社会主义祖国争光的雄心壮志,制造成功铁坩埚无芯工频感应电炉,用于熔炼铝合金,为有色金属熔炼炉开辟了一个新的途径。

这种新型炉子的出现很快引起了广泛重视。有关科研,设计与生产单位相继研究、试验、制造与使用。在短短的几年时间内,已遍及全国各省市。实践证明,它的技术经济指标超过了其他类型的有色金属熔化炉,对促进有色金属的熔化与铸造起了一定的作用。

本书是根据近年来研究、制造与生产实践经验,并汇集了各方面的成果与资料编写成的。为了适应生产需要,本着以实用为主兼顾理论探讨的编写原则,应用了一般的数学运算,使具有初中以上文化程度的同志都可阅读、理解并掌握它。

近年来,虽然这种电炉得到了很大的发展与提高,然而它毕竟还是一个历史不长的新生事物,还有待进一步完善与提高。

在编写这本书的过程中,得到了西安电炉研究所,第一机械工业部第一设计院,山东工学院,铁道部四方机车车辆厂,哈尔滨电表仪器厂等单位有关同志的支持,并提出了宝贵意见,编者对此表示深切的谢意。限于编者水平,缺点和错误一定不少,欢迎广大读者给予批评指正。

青岛压铸厂 杨明义

1977 年 6 月

目 录

第一章 无芯工频感应电炉概述	1
1-1 电炉概述	1
1-2 有关电炉的电磁知识	5
1-2-1 电磁感应	5
1-2-2 螺管线圈的效应	6
1-2-3 集肤效应(渗透深度)	8
1-2-4 邻近效应与圆环效应	10
1-2-5 交流电路中的功率因数	11
1-2-6 铁磁材料的磁性	14
1-3 能量的转换与损耗	17
1-3-1 电能转换为热能	17
1-3-2 热损耗与热效率	19
第二章 电炉的设计	21
2-1 电炉设计的基本知识	21
2-1-1 设计程序与基本概念	21
2-1-2 设计任务书	23
2-1-3 铁坩埚的条件与设计参数的关系	26
2-1-4 感应器与坩埚间的漏磁距离和轭铁结构对电参数 的影响	34
2-1-5 炉料单位体积所放出的功率	35
2-1-6 金属熔液的电动现象与弯液面	37
✓ 2-2 铁坩埚无芯工频感应电炉的电气计算	40
2-2-1 电炉的电气计算方法	40
2-2-2 单相电炉的电气计算举例	55
2-2-3 三相电炉电气计算举例	96
第三章 电炉电气计算分析及其它有关设计问题	131

3-1 电炉电气计算与实际运行中的几个问题	131
3-2 电炉的无功功率补偿	135
3-3 电炉的热损耗计算与保温炉的设计	143
3-3-1 电炉的热损耗计算	144
3-3-2 保温炉的设计	152
3-4 电炉感应器的重量、电流密度、温升与冷却水的计算	160
3-5 电炉轭铁的计算与设计	175
3-6 被熔金属弯液面的校核	180
第四章 与电炉有关的其他方面几个设计问题	188
4-1 相平衡问题的提出与容抗相平衡器的设计	188
4-1-1 相平衡问题	188
4-1-2 容抗平衡器法与容抗平衡器的设计	192
4-2 电炉的温度测量与温度自动控制	220
4-2-1 温度测量	220
4-2-2 温度自动控制	223
4-3 电炉的电气控制线路	226
4-4 电炉控制柜与电容器架	248
4-4-1 控制柜	248
4-4-2 电容器架	264
4-5 炉壳、炉盖和炉架与倾炉机构	266
4-5-1 电炉炉壳与炉盖	266
4-5-2 炉架与倾炉机构	272
4-6 电炉的母线设计与平面布置	277
4-6-1 电炉的供电线与母线	277
4-6-2 电炉的平面布置	288
第五章 电炉制造	291
5-1 坩埚制造	291
5-2 感应器加工	294
5-2-1 感应器的成形	294

5-2-2	感应器的整形与焊接	302
5-2-3	感应器的水压试验与绝缘处理	303
5-2-4	圆铜管改制为矩形铜管的简易方法与焊接异形铜管的制作	306
5-3	炉体与倾炉机构中的主要部件加工问题	311
5-3-1	炉体部分	311
5-3-2	倾炉机构主要部件的加工	316
5-4	軋铁加工	317
5-4-1	剪条与冲孔	320
5-4-2	涂漆与组装	321
5-4-3	軋铁的附加件	322
5-5	电炉的组装	324
5-5-1	电气部件的组装	325
5-5-2	炉体的组装	326
5-6	电炉的调试	330
5-6-1	电炉调试前的准备工作	330
5-6-2	调试步骤与方法	333
5-6-3	调试记录的整理	339
5-6-4	电炉调试总结	347
5-6-5	调试中发现问题的分析	348
第六章	电炉的使用与维护	350
6-1	当电炉熔化不同金属时的技术经济指标	351
6-1-1	熔点不同的金属变换	351
6-1-2	比重不同与熔化热不同的金属变换	354
6-2	电炉的维护与安全措施	356
6-2-1	日常生产中的维护	357
6-2-2	坩埚漏料报警装置	362
6-2-3	冷却水绝缘管长度的选择	364
6-3	电炉使用中的故障与故障排除	365
6-3-1	电流不正常的减少或增加	366

6-3-2	熔化率突然下降	367
6-3-3	冷却水出水温度不正常的变化	369
6-3-4	坩埚带电	371
6-3-5	感应器水管结垢的清理	372
6-3-6	感应器绝缘损伤与修复	374
6-3-7	感应器水管防冻	376
6-4	电炉的操作步骤与注意事项	376
6-4-1	一般操作	377
6-4-2	具有相平衡器电炉的操作	379
6-5	铝合金、镁合金熔炼	386
6-5-1	铝合金熔炼	386
6-5-2	镁合金熔炼	391
6-6	锌合金、轴承合金熔炼	395
6-6-1	锌合金熔炼	395
6-6-2	轴承合金熔炼	396
6-7	延长坩埚寿命的措施与坩埚涂料	397
6-8	铝合金熔化过程中增铁问题的探讨	402
6-9	电炉电动力的利用与“两区搅拌”法	406
第七章	铁坩埚无芯工频感应电炉实例	409
7-1	铝合金熔化炉	410
7-1-1	60 公斤铝合金保温兼熔化炉	410
7-1-2	150 公斤铝合金熔化炉	412
7-1-3	300 公斤铝合金熔化炉	415
7-1-4	机械倾倒并装有相平衡器的 500 公斤铝合金熔化 炉	422
7-1-5	液压倾倒 750 公斤铝熔化炉	430
7-2	镁合金熔化炉	438
7-2-1	100 公斤镁合金熔化炉	438
7-2-2	300 公斤镁合金熔化炉	440
7-2-3	1.5 吨镁合金熔化炉	443

7-3 锌合金熔化炉	446
7-3-1 250 公斤锌合金熔化兼保温炉	446
7-3-2 750 公斤机械倾倒式锌合金熔化炉	449
7-3-3 1.5 吨三相锌合金熔化炉	452
7-4 轴承合金熔化炉	455
7-4-1 800 公斤轴承合金熔化炉	455
7-4-2 2.5 吨轴承合金熔化炉	458
7-4-3 1 吨锑、铜、锡中间合金熔化炉	462
7-5 石墨-铁坩埚工频感应电炉	465
第八章 铁坩埚无芯工频感应电炉综述	469
8-1 各种有色金属熔化炉的技术经济指标	469
8-2 铁坩埚无芯工频感应炉在低温方面的应用	474
8-3 对铁坩埚无芯工频感应电炉的展望	479
附录	482
一、本书采用主要代表符号及其意义	482
二、铁坩埚工频感应电炉熔化不同金属的基本运行曲线	490
三、铁坩埚用黑色金属的物理性能	492
四、几种有色金属的物理性能	495
五、电炉用保温材料的物理性能	497
六、电炉用绝缘材料的物理性能	500
七、移相电容器	501
八、电炉用测量仪表资料	502
九、电炉设计计算中应用的主要数学公式与常用数学表	506
十、电炉无功功率补偿自动化装置工作原理说明	525
十一、工频感应电炉可控硅调压装置	534
十二、将单相电流转化为三相平衡电流的电容平衡法	537

第一章 无芯工频感应电炉概述

1-1 电 炉 概 述

工频感应电炉是最近才发展起来的一种熔炼炉，由于它具有一些优点，因之得到了广泛采用。它不同于电阻炉、电弧炉，它是利用感应加热的原理使被熔金属升温以至熔化。

感应电炉又有高频感应电炉和中频感应电炉与工频感应电炉之分，无论是高频感应或中频感应均需将电网所供电力通过变频设备变为所需频率才能供电炉使用。虽然这些电炉都具有各自的优点，但都需附加变频设备。因此投资大、效率低、直到目前还均限于较小功率的电炉采用高频或中频。而工频感应电炉是直接使用电网供电频率(50 赫芝)无需变频设备，因此设备简单，效率较高，炉子的功率也可以增大，故其使用范围较广。

在工频感应电炉中，又有有芯与无芯之分，它的主要区别是指在被熔金属中，有或没有通过导磁体和感应线圈。有芯工频感应电炉是在导磁体与感应线圈周围有一熔池(或叫熔沟)，被熔金属形成一个二次级短路环而被加热。无芯工频感应电炉是由耐火材料或铁做成坩埚，而感应线圈与导磁体在坩埚的周围，对于炉料来讲其中心并无导磁体，故叫无芯工频感应电炉。

无芯工频感应电炉，由于坩埚材料的不同，又分打结炉衬电炉与铁坩埚电炉。因为坩埚材料不同，对于电炉性能、使用范围就有很大差异。打结炉衬的无芯工频感应电炉适用于熔

炼熔点在 850°C 以上的金属及其合金,如铁、铜等。其主要特点是炉温高、但操作较复杂、功率因数较低同容量的电炉投资较大。铁坩埚无芯工频感应电炉一般是使用于 850°C 以下,故适用于熔炼低熔点金属,其结构和操作较简单,相对来讲功率因数较高,特别适用于各种有色金属熔炼与铸造,故在有色金属铸造厂内得到广泛采用。

本书所介绍的仅是铁坩埚无芯工频感应电炉,其它电炉均不涉及,这一章是简要概述此类电炉的概况,以及一些理论知识。在理论方面也只是为了讲明道理,便于使用,故仅作一般介绍,目的仅仅限于帮助读者明确概念,以便理解以下各章所讨论的问题,但不能满足读者对个别问题进一步探讨的要求。

整套无芯工频感应电炉是由炉体、控制柜、电容器柜等几个主要部分所组成。图 1-1 是无芯工频感应电炉炉体的基本结构示意图。它是由坩埚、感应器、轭铁等几个主要部分所组成。

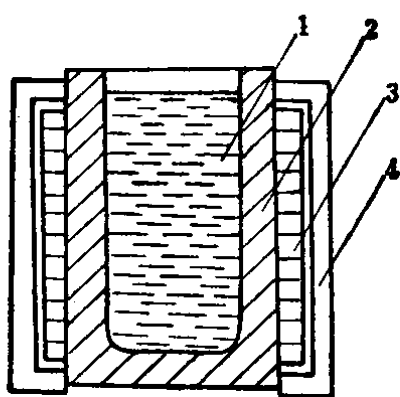


图 1-1 无芯工频感应电炉炉体基本结构示意图

1—被熔金属 2—坩埚
3—感应器 4—轭铁

坩埚为铸铁或钢板制成的圆柱体空筒,它既是被熔金属的容器,又是吸收热功率的主要部件,它对电炉性能有重要作用。

感应器(实为一螺管线圈)为产生磁场的部分,多用矩形铜导线绕制而成,匝间包有绝缘玻璃丝布。除温度较低,功率较小的感应电炉外,较大的电炉或使用温度较高的电炉,为了防止感应器过热,矩形铜导线均为中空铜管。有的矩形空心,有的特制异形,管内通水以冷却。

感应器(实为一螺管线圈)为产生磁场的部分,多用矩形铜导线绕制而成,匝间包有绝缘玻璃丝布。除温度较低,功率较小的感应电炉外,较大的电炉或使用温度较高的电炉,为了防止感应器过热,矩形铜导线均为中空铜管。有的矩形空心,有的特制异形,管内通水以冷却。

轭铁是用硅钢片组装而成,置于感应器四周,顺磁力线方向排列,它的主要作用:

- (1) 加固感应器以防震动;
- (2) 防止磁场扩散,以避免炉架或外壳产生涡流而发热;
- (3) 减少磁阻,减少无功电流,以改善功率因数和提高电功率。

轭铁的形状有多种设计,如图 1-2 的 *a*、*b*、*c*、*d*、*e*, 其中 *a*、*b* 为一般常用型, *c* 型便于装卸感应器, *d* 型在铁坩埚与感应器高度不适应时采用,以进一步提高功率因数, *e* 型在三相无芯工频感应电炉上采用。

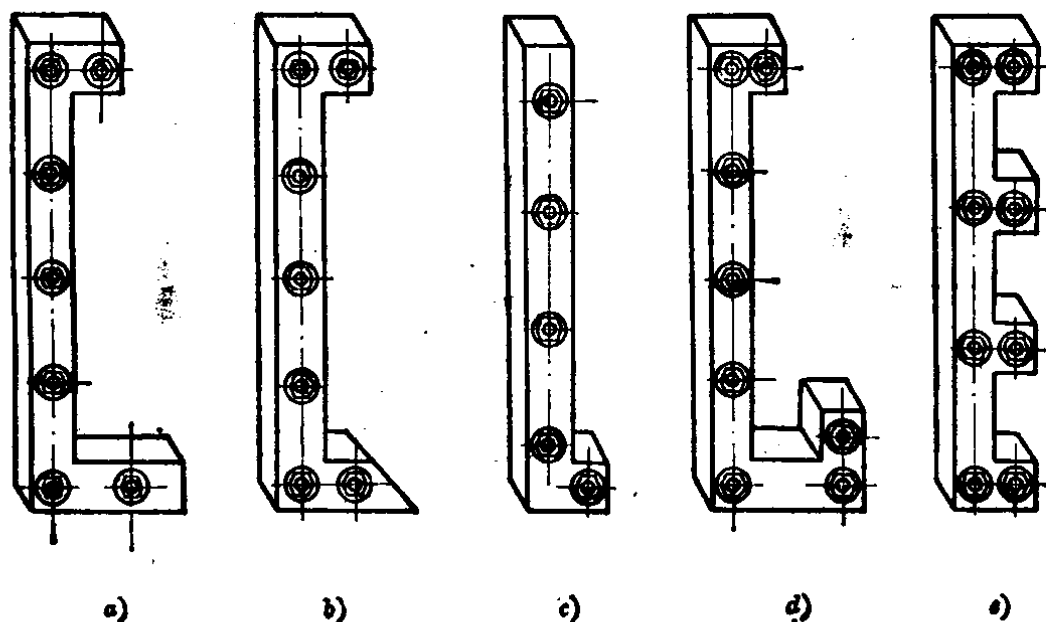


图 1-2 轭铁形状图

炉壳为固定感应器和轭铁坩埚之用,根据生产要求不同有多样设计,总的分类为固定型与倾倒型。固定型多用于小容量或每次小量浇铸者(如压铸机送料,连续小型浇铸等)。倾倒型多用于专作熔化炉,或需将金属熔液倒入料包再行浇铸的生产方式。固定型多以钢板作外壳,倾倒型多以型钢作

骨架。固定型炉壳较简单,倾倒型除炉壳外尚需倾倒机构。

控制柜是操作控制电炉的枢纽,并作为监视电炉运行情况之用。控制柜上装有控制开关,按钮、继电器与测量仪表等。操作者可按电炉熔炼工艺进行操作。它随时反映电炉运行中的各种参数,如电压、电流、功率、功率因数、炉料温度、冷却水的水温、水压等,并可随时反映不正常运行情况,发出事故预报信号,如水温过高、水压不足、电流过大等。

电容器的投资一般占全套电炉投资一半左右。电容器柜的占地面积往往比电炉占地面积还大,电容器的合理运行对电炉取得较好的技术经济指标很重要,正确的维护电容器是电炉运行的一项重要工作。

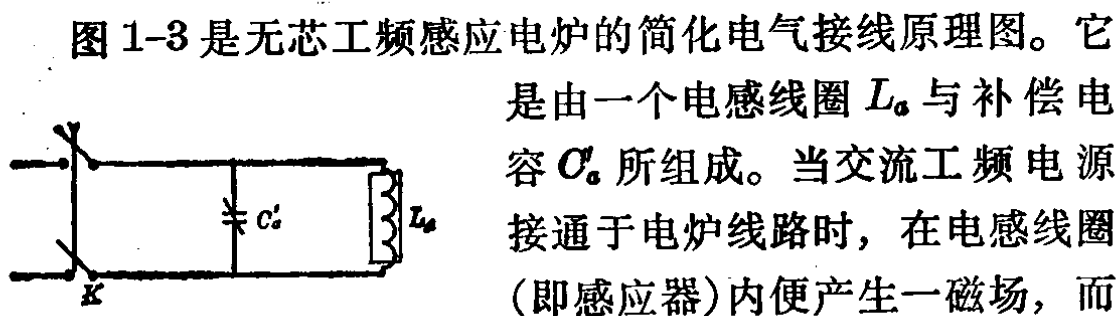


图 1-3 简化电气
接线原理图

是由一个电感线圈 L_e 与补偿电容 C_e 所组成。当交流工频电源接通于电炉线路时,在电感线圈(即感应器)内便产生一磁场,而感应炉料(对于铁坩埚的无芯工频感应电炉,从功率转换角度看,

铁坩埚亦应视炉料的一部分),炉料产生相应的感应电流(涡流)而发热,形成了能量转换(亦称为功率转换)。因感应器是感性负载,故其电流比电压迟后一个角度,功率因数较低。为了改善这一状况,此类电炉多与感应器并联一定数量的电容器。因电容器的电流比电压超前一个角度,如两者配合适当,综合电源线路的电流可达到与电压同一相位(即同一角度),这样可使在同样的输入功率条件下输入电流最小。这不但可以减小开关与线路容量,以及因电流大而增加的损耗,并对供电也是有益的,这一措施对此类电炉来讲是必要的。

1-2 有关电炉的电磁知识

1-2-1 电磁感应

当电流通过导体时,在导体周围的空间里产生一磁场,磁场可用磁力线来表示。磁场与电流之间存在着不可分割的相互关系,磁力线的方向为电流方向所决定。即当电流从一方向变为反方向时,磁力线亦从一方向变为反方向。磁场强度与该导体通过的电流强度成正比。通有电流的直导线,其周围的磁场如图 1-4 所示,图中 I 为电流方向,围绕导体的是磁力线。

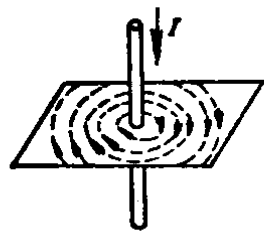


图 1-4 通有电流的直导线周围的磁场

如果在一个磁场的范围内,有一闭合导体,该磁场的强度或磁力线的方向如有变化,均能使此闭合导体内产生一感应电流。感应电流的大小及方向与磁场强弱,变化速度(即每秒导体所切割磁力线的数目)及磁力线的方向,存在着固定关系如图 1-5 所示。

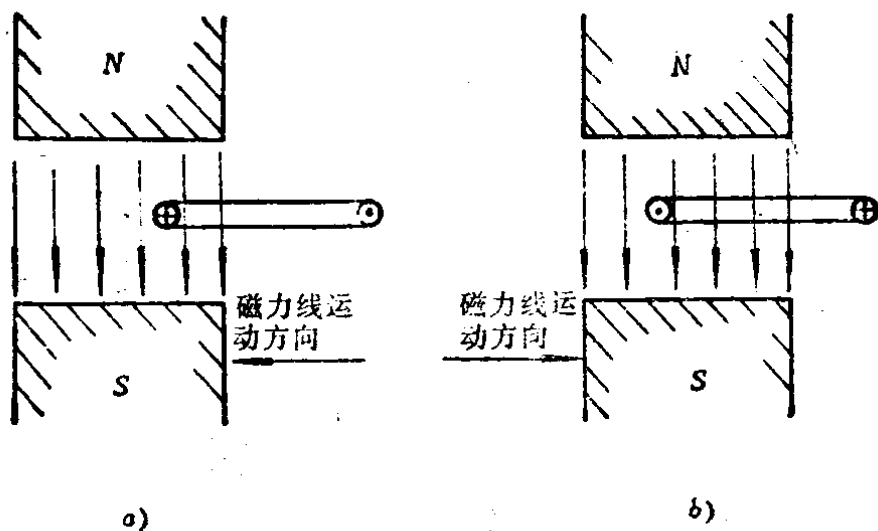


图 1-5 磁力线切割闭合导体时感应电流的方向

其中图 1-5a 表示磁力线自右向左移动, 图 1-5b 表示磁力线自左向右移动。因为导体切割磁力线, 故在闭合导体内产生感应电流, 电流的方向因切割磁力线的方向不同而不同。

上述现象即为电磁感应。简言之, 当导体内有电流通过时, 该导体周围即产生一磁场; 当一闭合导体如被变化的(无论是磁场强弱或磁力线方向的变化)磁力线所切割, 则在导体内产生一感应电流, 这一现象是感应电炉的最基本原理。

1-2-2 螺管线圈的效应

在直导线内通有电流时, 电流方向与磁力线方向的关系与螺钻关系一致, 如图 1-6 所示。磁力线总是闭合的。从图 1-6 可以看出, 如令螺钻的前进方向和电流方向一致, 则钻柄

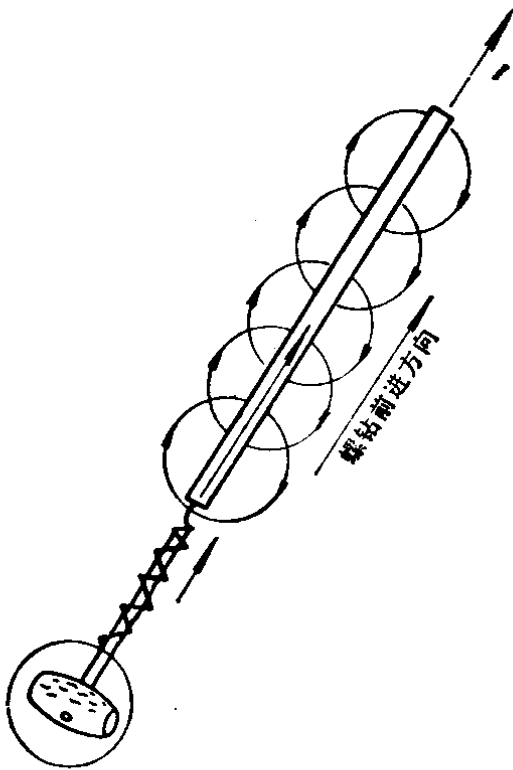


图 1-6 直导线的电流方向与磁力线方向关系

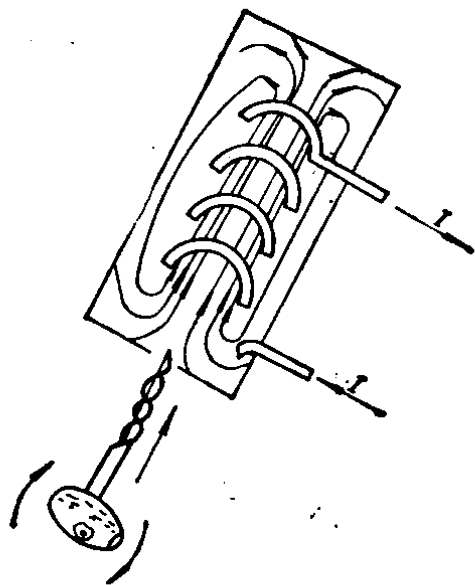


图 1-7 螺管线圈中电流与磁力线关系

旋转方向就是磁力线的方向。同理，如令钻柄旋转方向与电流的方向一致(当导体为螺管状时)，则螺钻前进的方向就是磁力线的方向，如图 1-7 所示。如果通过此螺管线圈电流的方向及强弱有所变化，则其所产生磁力线的方向也随电流方向的变化而变化，随电流的强弱而强弱。当螺管线圈通以交流电时，则其所产生磁力线方向变化次数与该交流电流频率相一致，其任一瞬时的强弱与该电流瞬时的强弱相一致。

螺管线圈所产生磁力线总数与该线圈的安匝数(即安培与匝数的乘积)成正比。在总安匝数不变时，螺管线圈内磁场强度与该线圈的长度成反比即：

$$H = \frac{0.4\pi NI}{L}$$

式中 H ——磁场强度(奥斯特)；

N ——线圈匝数；

I ——线圈电流(安培)；

L ——线圈长度(厘米)。

在螺管线圈所产生的磁场内，如有另一闭合导体，其位置与螺管线圈所产生的磁力线相交如图 1-8，则当螺管线圈所产生的磁力线强弱或方向

有变化时，此闭合导体内便由于电磁感应而产生一感应电势与电流。感应电炉即利用此原理。将螺管线圈通以交流电，使之产生一强大的交变磁场，被熔化的金属在此螺管线圈内构成一闭合导体，感应出强大电流，从而产生热量将被熔金属熔化。

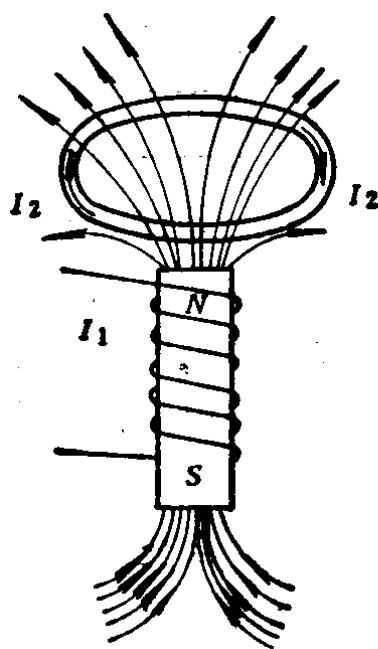


图 1-8 闭合导体与磁力线相交时产生的感应电流

1-2-3 集肤效应(渗透深度)

同样一个导体当通过交流电时与通过直流电时其电阻值并不一样。我们用电阻表所测量的导体电阻一般都是其直流电阻值。

如将某一导体使其通过直流电时,其直流电阻为:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

式中 R ——电阻阻值;

ρ ——导体材料的电阻率;

L ——导体长度;

S ——导体截面积。

同一导体如通以交流电,则其电阻值与直流电阻值不同了。因为交流电流不能象直流电流那样均匀地通过导体全部截面,而被限制在导体表面一定深度的一层中流动。在导体的表面层电流密度最大,从表层向内层电流密度逐渐减小,这种电流在导体中集中在表层的现象称为集肤效应。

为什么交流电流通过导体会有集肤效应,而直流电流通过导体就没有这一效应呢?这可用上述的电磁感应原理予以解释。

直流电流通过导体时,因电流方向不变,导体周围所产生的磁力线方向也不变,故这一磁场对此导体不产生感应电势。交流电流通过导体时,由于交流电流的方向,大小(瞬时值)都在不断地变化,因此,它产生的磁场强弱,磁力线方向,也都在不断的变化,这一变化的磁场,对此导体即产生一感应电势,因此而引起导体中电流分布的不均匀。

如图 1-9, 设有一导体其半径为 r . 通过方向为($\times$)的交

流电流。为便于理解，我们可以将导体的截面以其中心为圆心，看成是半径为 r_1 与 r_2 的两个(或数个)单元的电流环，每个环的宽度为 d_1 ，每个环似一匝线圈。当有交流电流通过导体时，导体内必产生磁通，而离中心较远的环 2 所链结的磁通较少。又因导体被感应电势的大小，与所链结的磁通多少成正比，故环 1 感应电势比环 2 感应电势大。因此，当有交流电流通过导体时，电流的大部分将从感应电势较小的表层通过，致使在导体截面上电流分布不均。电流较多的集中导体表层，向内逐渐减少。这一物理现象即为集肤效应。

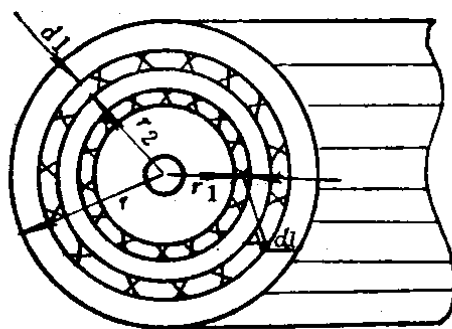


图 1-9 圆形导体的电流集肤效应示意图

在工频感应电炉的设计计算中，凡涉及集肤效应时，常用渗透深度一词表达，它是这样一个物理概念：即当导体通过交流电时，电流密度从导体表面向内逐步渗透，这个渗透有一定深度，或者说即是导体上磁力线能渗透过的深度。

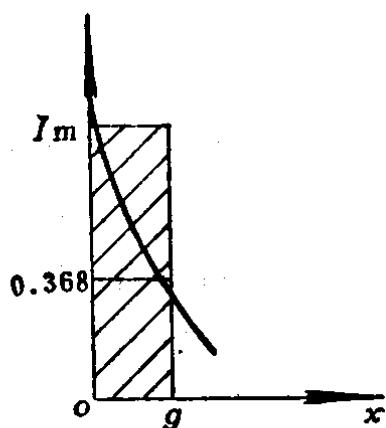


图 1-10 平面导体中电流集肤效应示意图

平面导体中电流的分布情况如图 1-10。在电炉设计中，为了简化计算过程，都取渗透深度 δ 为从导体表面算起，至电流密度衰减至表面最大电流密度的 $1/e$ 倍时的距离 ($e=2.71$) 为计算所取的渗透深度。这样，便被假定为，在深度为 δ 的薄层中，电是均匀分布的，而薄层以外则没有电流通过，这虽与实际情况有所不同，但计算结果误差并不大。