

感应炉冶炼

王振东 何纪龙 编著

冶金工业出版社

内 容 提 要

本书较为系统地介绍了感应冶炼的理论和实践知识。对工频感应炉、中频感应炉、高频感应炉、真空感应炉和等离子感应炉的设备与冶炼工艺均有比较详细的论述。本书适于从事特种冶炼、铸造、金属材料研究的技术人员和中等、高等院校的师生参考。

感 应 炉 冶 炼

王振东 何纪龙 编著

责任编辑 王华宗

★

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

★

850×1168 1/32 印张21 1/8 字数 559 千字

1986年10月第一版 1986年10月第一次印刷

印数00,001~2,240册

统一书号: 15062·4338 定价5.90元

前 言

十九世纪初期，随着物理学的进展，英国物理学家法拉第于1831年发现了电磁感应现象，随后提出了著名的法拉第电磁感应定律。电磁感应定律的提出，使人们对电能与磁能之间的相互转化关系有了新认识，从而为电机技术和感应加热技术的产生奠定了理论基础。但是，直到十九世纪末期，人们才开始把电能应用到冶金生产领域。

1887年第一台试验性的有芯感应炉问世；1901年诞生了第一台炼钢用的无铁芯感应炉。从此，开始了感应冶炼的新纪元。

经过近百年的发展，特别是二次世界大战以后，由于航空、电子、机械等工业的发展，对金属材料的要求越来越高，电弧炉、平炉、转炉冶炼的钢质量满足不了这些要求，所以，必须发展特种冶炼工艺。因此，在最近的几十年里感应冶炼工艺和设备得到了很快的发展。目前，它已成为特种冶炼的重要组成部分。

感应冶炼已发展成为普遍使用的工艺技术，它包括：非真空感应冶炼、真空感应冶炼和等离子感应冶炼。在非真空感应冶炼中又分工频、中频、高频等三种感应冶炼。利用感应冶炼可以生产铸铁、铸钢、特殊钢、高温合金、精密合金以及其它有色合金等。因此，感应冶炼在冶金生产中占有重要的地位。

我国于四十年代开始采用感应炉炼钢。第一台容量为1000磅的中频感应炉安装在当时四川电化冶炼厂。五十年代中和六十年代初国产非真空感应炉和真空感应炉相继问世，为我国发展感应冶炼奠定了基础。三十多年来我国的感应炉制造技术得到较快的发展。目前，以锦州、湘潭、上海、西安等地的电炉制造厂为骨干，已经初步形成了我国的感应炉制造业。数千台各种类型的感应炉，包括工频、中频、高频感应炉和真空感应炉在冶金、机械、航空等工业部门和科研单位与高等院校的生产、科研和教学

中运行。这些炉子用于生产各种优质铸铁、铸钢、特殊钢、高温合金、精密合金等，为满足国民经济的发展作出了贡献。因此，感应冶炼技术也得到了普及和发展。

为了适应形势发展的需要，应该把感应冶炼方面的知识和经验进行系统地整理。为此，我们根据工作中积累的资料，参考了国内外有关文献，编写了《感应炉冶炼》这本书，供有关人员参考。

限于我们的水平，书中难免有误，请识者给予批评指正。

本书第二章的一部分和第八章由何纪龙编写，其余各章由王振东编写。在本书编写过程中承蒙中国金属学会特殊钢委员会副主任委员杨昌乐高级工程师和阎承宗高级工程师的指导和帮助，在此表示感谢。

编写时引用了有关电炉制造厂、特殊钢厂和研究单位的资料，也在此一并致谢。

作者

1984年3月北京

目 录

第一章 感应电炉的工作原理	1
第一节 感应电炉的基本电路	1
第二节 感应电炉的工作原理	2
第三节 感应电流的分布特征	8
第四节 加热时金属的物理性能的变化	14
第五节 电磁力的作用	15
第二章 感应冶炼设备	20
第一节 工频感应炉	20
第二节 中频感应炉	30
第三节 高频感应炉	44
第四节 等离子感应炉	48
第五节 真空感应炉	59
第三章 感应冶炼用坩埚	80
第一节 坩埚的分类及质量要求	86
第二节 坩埚用耐火材料	86
第三节 坩埚砂料的粒度配比	94
第四节 添加剂及其作用	98
第五节 坩埚的成型	102
第六节 坩埚的烧结	111
第七节 坩埚制作实例	122
第八节 坩埚的使用和维护	133
第九节 坩埚的漏钢预报	144
第四章 感应冶炼用原材料	149
第一节 钢铁原料和返回料	150
第二节 钨、钼、铌及其铁合金	152
第三节 镍、铬、钴及其铁合金	158
第四节 硅、锰及其合金	167

第五节	钒、硼及其合金	174
第六节	铝、钛及其合金	177
第七节	稀土金属及其合金	181
第八节	特种添加剂	186
第九节	造渣材料	189
第五章	钢液的脱氧	195
第一节	氧的存在形式及危害	195
第二节	沉淀脱氧	198
第三节	扩散脱氧	235
第四节	真空下的碳脱氧	243
第五节	真空下的氢脱氧	254
第六节	真空下低价氧化物的挥发脱氧	257
第六章	钢中非金属夹杂物	264
第一节	钢中非金属夹杂物的种类	264
第二节	非金属夹杂物的性质与特点	268
第三节	非金属夹杂物对钢与合金性能的影响	276
第四节	钢中夹杂物的来源及降低途径	291
第五节	钢中夹杂物形态的冶金控制	300
第七章	钢中气体和杂质的去除	310
第一节	钢中的氢	310
第二节	钢中的氮	341
第三节	钢中的硫	367
第四节	钢中的微量有害元素	406
第八章	工频感应炉冶炼	431
第一节	工频感应冶炼铸铁的基本工艺	431
第二节	工频感应冶炼球墨铸铁	448
第三节	工频感应冶炼时的能耗和节能措施	458
第九章	高、中频感应炉冶炼	466
第一节	高、中频感应冶炼方法及其工艺特点	466
第二节	碱性坩埚熔化法冶炼工艺	469
第三节	碱性坩埚氧化法冶炼工艺	490
第四节	酸性坩埚冶炼工艺	496

第五节	感应冶炼用炉渣	501
第六节	感应冶炼时的成分控制	504
第十章	等离子感应炉冶炼	539
第一节	等离子感应炉的冶炼特点	539
第二节	等离子感应炉的精炼效果	541
第三节	等离子感应炉冶炼工艺	549
第四节	等离子感应炉的冶金质量	554
第五节	等离子感应炉的技术指标	557
第十一章	真空感应炉冶炼	559
第一节	真空感应冶炼的特点	559
第二节	真空感应冶炼工艺	563
第三节	真空感应冶炼的典型工艺	581
第四节	熔体与坩埚之间的相互反应	584
第五节	合金元素的挥发和成分的变化	594
第六节	真空下钢液的镁处理	602
第十二章	感应冶炼新技术	612
第一节	感应炉冶炼的脱磷方法	612
第二节	感应炉内氩气精炼	628
第三节	氩氧脱碳在感应炉中的应用	634
第四节	感应炉内喷粉脱硫	633
第五节	钢液的氢气精炼	643
第十三章	感应炉冶炼的配料计算	648
第一节	配料计算的现实意义	648
第二节	配料计算的依据	648
第三节	全新料配料计算方法	650
第四节	部分返回料冶炼时的配料计算方法	654
第五节	调整钢液成分的计算方法	660

第一章 感应电炉的工作原理

第一节 感应电炉的基本电路

无铁芯感应电炉加热和熔化金属的方法不同于电弧炉、电阻炉、等离子炉等。它是利用电磁感应金属内部形成的感应电流来加热和熔化金属的。为使必需的电磁感应现象产生，感应电炉由变频电源、电容器、感应线圈和坩埚中的金属炉料等组成基本电路。基本电路如图1-1所示。

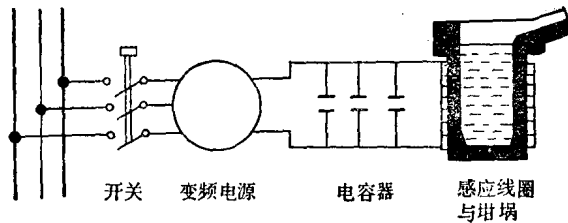


图 1-1 感应电炉的基本电路

变频电源将50赫兹的工频电流增频后变成150~200000 赫兹的电流，并把这种电流输送给由感应线圈与电容器组成的回路中。

感应线圈是用铜管绕成的螺旋形线圈，铜管通水进行冷却。变频电流通过感应线圈时使坩埚中的金属炉料因电磁感应而产生感应电流。利用这种电流把炉料加热、熔化。

由电容器和感应线圈组成的振荡回路是感应电炉电路中的重要组成部分。

总之，无论什么形式的感应电炉，它的基本电路都包括上述组成部分。

第二节 感应电炉的工作原理

无铁芯感应电炉工作的基本原理基于电磁感应原理和电流热效应原理。简单地说，由于电磁感应使金属炉料内产生感应电流，感应电流在金属炉料中流动时产生热量，使金属炉料加热和熔化。

无铁芯感应电炉炼钢的许多特点都和它的工作原理有关。进一步了解电磁感应现象对掌握这种炼钢方法是非常重要的。

电磁感应现象和由此而产生的金属感应加热过程是一系列复杂的物理过程，它包括电、磁、传热等物理过程。要定量地描述这些物理过程是很困难的，只能对电和磁的关系、电磁感应现象、电和热的关系等作一简要的介绍。

一、电和磁的关系

1. 磁场的产生

1820年丹麦物理学家奥斯特发现在通电的导体周围存在着磁场，从而揭开了电和磁相依存在的关系。由导体中电流所产生的磁场的极性和电流的流动方向有关，它服从右手拇指法则（右手握导体，四指为磁力线方向则拇指表示N极方向）。

电流通过螺旋线圈时产生的磁场形态如图1-2。线圈内的磁场强度和通过的电流强度、线圈的匝数成正比，和线圈的长度成

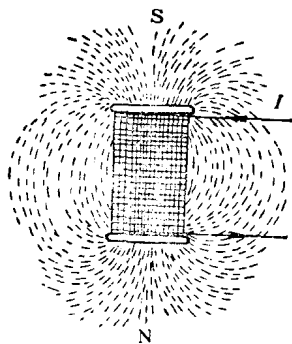


图 1-2 电流通过螺旋线圈所产生的磁场

反比，磁场的极性服从右手拇指法则。

2. 电流的获得

电流可以产生磁场，那么利用磁场能否获得电流呢？英国物理学家法拉第在1831年做了如图1-3所示的实验发现，当把导体 AB 在磁场中作切割磁力线的运动时，在闭合回路中就有电流产生。若导体 AB 静止不动而改变闭合回路内的磁力线数量或磁场的极性时，同样会在闭合回路中产生电流。这一现象揭示了电和

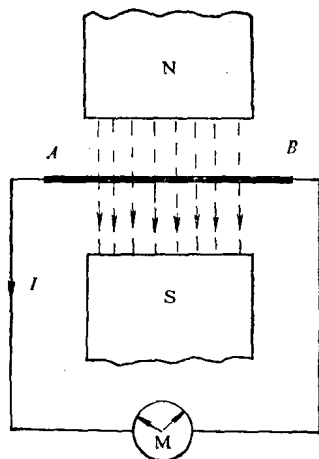


图 1-3 导体切割磁力线运动

磁的关系，证明了两者是可以互相转化的。这种电磁之间的现象称之为电磁感应现象。

二、法拉第电磁感应定律

法拉第电磁感应定律是描述电磁之间关系的重要的物理学定律，它是感应加热的理论基础之一，电磁感应现象的产生包括两种情况：

1) 当闭合回路的一部分 AB 导体在磁场中做切割磁力线运动时，闭合回路中就产生感应电流。如图1-4所示，当导体 AB 向右运动时穿过闭合回路的磁力线数量就不断增加，磁通量相应增大。相反，当导体 AB 向左运动时穿过闭合回路的磁力线数量就

不断减少，磁通量相应减少。由此可见，当闭合回路的一部分（ AB ）导体在磁场中作切割磁力线运动时，此闭合回路中的磁

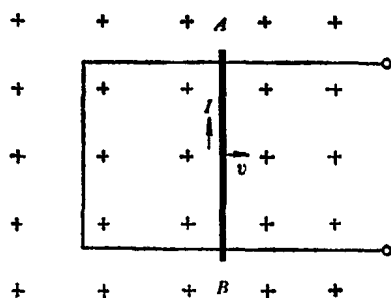


图 1-4 导体 AB 在磁场中移动

通量一定会发生变化，在闭合回路中就产生了感应电动势，从而产生了电流。这种电流称之为感应电流。

这种情况是在静止不变的磁场中导体作切割磁力线的运动。由此产生的电磁感应现象的物理本质可用导体内的自由电子受到洛伦兹力的作用来说明。如图1-5所示^{〔1〕}，导体 AB 以速度 v 向右运动时，导体内的自由电子也获得了定向速度 v 。这时自由电子就要受到洛伦兹力 F 的作用。在 F 的作用下自由电子 e 从 A 向

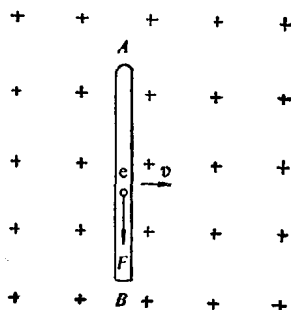


图 1-5 自由电子受洛伦兹力作用

B 端运动。结果造成 A 端缺少电子而出现正电荷， B 端电子增多而出现负电荷， A 和 B 之间产生电势差， A 端电势高， B 端电势

低。随着 AB 两端产生电势差，导体中出现电场并阻止电子由 A 向 B 继续迁移。 AB 两端电势差越大，阻止电子迁移的电场力就越大。当作用于电子的电场力和洛伦兹力相平衡时，电子就停止迁移。此时的电势差值就是感应电动势值；此时连接 AB 两端形成闭合回路时在回路中就产生感应电流。

2) 当闭合回路(包括导体 AB)静止不动，而穿过闭合回路的磁力线数量或方向发生变化时，在闭合回路中同样会产生感应电动势，并在其作用下产生感应电流。

这种情况是磁场产生变化而导体静止不动时产生的电磁感应现象。其物理本质是由于变化的磁场在其周围产生了一种电场，如图1-6。而这一电场又作用于导体中的自由电子，使自由电子

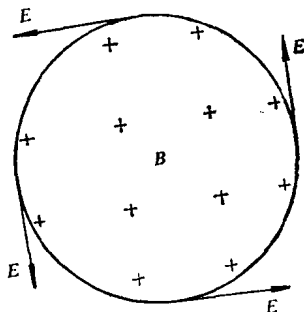


图 1-6 变化磁场产生的涡旋电场

产生定向运动，于是在回路中就产生了感应电流。变化的磁场周围所产生的电场是涡旋电场。涡旋电场不同于静电电场，它的电力线是围绕着变化的磁场的一些无头无尾的封闭线，与起于正电荷终止于负电荷的静电场电力线不同。在图1-6中，如果磁感应强度 B 值增加，则涡旋电场 E 的方向就如图所示的方向。根据回路的对称性，在回路上各点的涡旋电场 E 的方向必然与回路相切。回路中的自由电子在涡旋电场的作用下作圆周定向运动，于是回路中就出现了感应电流，或称为涡流。回路中电荷在涡旋电场力的作用下做功，在回路中就产生了感应电动势。

上述两种不同情况所产生的电磁感应现象的物理本质虽然不

同，但都遵循着同一法则，这一法则就是法拉第电磁感应定律：
在闭合回路中所产生的感应电动势的大小，和穿过该回路的磁通量的变化率成正比例。

法拉第电磁感应定律的数学表示形式为

$$E = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} N \times 10^{-8} (\text{伏}) \quad (1-1)$$

这里 E ——闭合回路中的感应电动势；

N ——螺旋线圈匝数；

$\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ ——磁通量变化率，每秒钟切割磁力线数目；

$$\Delta\phi = HS$$

H ——磁场强度，奥斯特；

S ——螺旋线圈包围的空间的横断面面积，厘米²。

三、电流的热效应——焦耳—楞茨定律

当感应电流在闭合回路内流动时，自由电子要克服各种阻力。于是，必须消耗一部分能量做功，这就是要克服导体的电阻，使一部分电能转换成热能。感应电流具有的这种热效应，可使闭合回路中导体的温度升高。

物理学家焦耳和楞茨各自独立地通过实验得出了由电能转换为热能的规律——焦耳—楞茨定律：电流通过导体所散发的热量与电流的平方、导体的电阻和通电时间成正比例。用公式表示如下：

$$Q = 0.24 I^2 R t (\text{卡}) \quad (1-2)$$

这里 I ——通过导体的电流，安培；

R ——导体的有效电阻，欧姆；

t ——通电时间，秒。

综上所述，电磁感应现象和电流的热效应即法拉第电磁感应定律和焦耳—楞茨定律为感应加热方法提供了物理基础。

四、感应电炉的加热过程

如何利用上述原理把金属炉料加热并熔化呢？下面结合感应

电炉的具体情况加以说明。

1. 交变电流产生交变磁场

如图1-7所示，当交变频率的电流通过坩埚外侧的螺旋形水冷线圈时，在线圈所包围的空间和四周就产生了磁场。该磁场的极性和强度随交变电流的频率而变化，因此是一个交变磁场。交

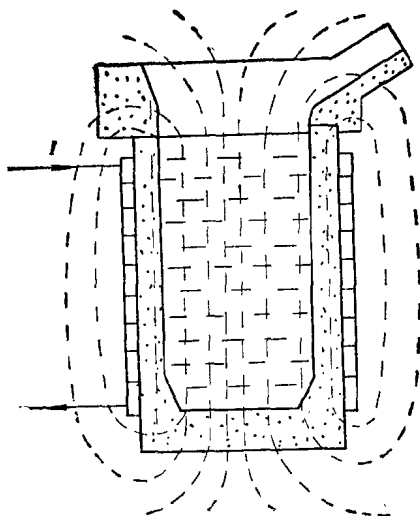


图 1-7 磁场分布示意图

变磁场的磁力线一部分穿透金属炉料，还有一部分穿透坩埚材料。该交变磁场的极性、强度、磁通量变化率，简言之，磁场的方向和磁力线的数量与稀密程度等决定于通过水冷线圈的电流强度、频率和线圈的匝数和几何尺寸。

2. 交变磁场产生感应电流

如图2-4所示，磁场的一部分磁力线穿透坩埚内的金属炉料，当磁力线的极性和强度产生周期性的交替变化时，磁力线被金属炉料所切割，就相当于导体做切割磁力线的运动。在坩埚内的金属炉料之间所构成的闭合回路内就产生了感应电动势 E ，其大小可用下式表示：

$$E = 4.44f\phi \text{ (伏特)} \quad (1-3)$$

这里 ϕ ——交变磁场的磁通量，奥斯特/厘米²；

f ——交变电流的频率，赫兹。

在感应电动势 E 的作用下金属炉料中产生了感应电流。感应电流 I 的大小服从欧姆定律，其大小用下式表示：

$$I = \frac{4.44f\phi}{R} \text{ (安培)}$$

这里 R ——金属炉料的有效电阻，欧姆。

3. 感应电流转化为热能

金属炉料内产生的感应电流在流动中要克服一定的电阻，从而由电能转化为热能。利用这种热能使金属炉料加热并熔化。感应电流产生热量的多少服从焦耳—楞茨定律。

我们可以看出，整个加热过程是一个能量转化的过程。首先将电能转化为磁场能，然后由磁场能再转化为电能，最后由电能转化成热能使金属加热。从这一点看出感应电炉的加热方法不同于电弧、等离子、电阻、电子束等加热方法。由于能量形式的多次转化不可避免地会多多少少的有些损失，因此感应电炉加热的效率较低。这就要求从电气线路上采取措施加以补偿，以减少损失提高效率。

第三节 感应电流的分布特征

感应电流在炉料中的分布特征，对冶炼时电源频率的选择、炉料熔化速度、选择合理的炉料块度等都有着非常重要的意义。感应电流在金属导体中的分布服从集肤效应。

一、感应电流的集肤效应

直流电通过导体时，电流沿导体的横断面均匀分布。也就是说，在导体的横断面上任意点的电流密度是相等的，如图1-8a。

交变频率的电流通过导体时，电流沿导体的横断面分布是不均匀的。电流密度由表面向中心依次减弱，即是电流有趋于导体表面的现象，这种现象称为电流的集肤效应。

感应电流是交变频率的电流，它在炉料中的分布符合集肤效应。变频电流沿导体横断面的分布情况如图1-8b。

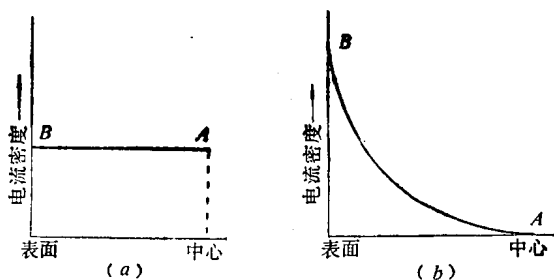


图 1-8 沿导体横断面的电流密度分布

为什么感应电流会产生集肤效应呢？可以利用图 1-9 来加以解释。图中圆形断面是处于交变磁场中导体的横断面， A 和 B 分别为该断面上的中心和表面两点。当交变磁场变化时，包围 A 点的磁力线数量多于 B 点。所以 A 点的感应电动势比 B 点高，导致电流从 A 点向 B 点流动，从而出现了电流聚集在导体表面层的集肤效应。

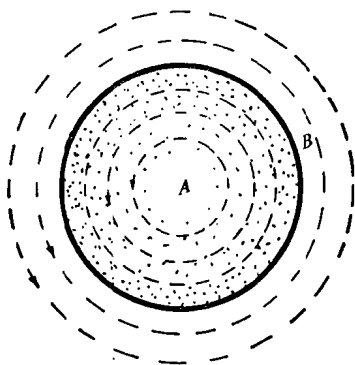


图 1-9 交变电流的集肤效应

钢液处于交变磁场中时所产生的感应电流也是沿液柱的外侧聚集分布的，如图1-10所示。交变电流通过感应线圈的某一瞬间

会产生磁场 A ，当感应电流因自感现象而产生的磁场忽略不计时，钢液中磁力线如图1-10所示。从液柱中心纵断面看，由于两侧感应线圈上的电流方向相反，在液柱内形成的磁力线方向是同向的。液柱中央的磁通量最大，向侧面依次减弱。因此，产生的

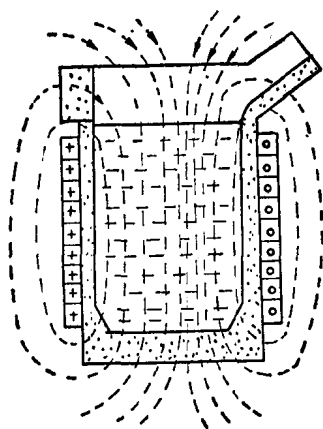


图 1-10 钢液柱的集肤效应

感应电动势是中央最高，向两侧依次降低，液柱内的感应电流则从中央向外侧流动。于是就出现了感应电流集聚到外侧的集肤现象。

总之，无论炉料还是钢液内部所产生的感应电流的分布都符合集肤效应。由于电流聚集在表面层，对感应电炉炉料熔化、频率选择以及钢液的运动等一系列问题均产生重要的影响，进一步了解集肤效应对解决感应电炉的实际问题是很重要的。

二、电流的透入深度

炉料和钢液中的感应电流是服从集肤效应由表面向中心依次减弱的。其分布的规律可用下面的公式和图1-11表示^[2]。

$$I_x = I_A e^{-x/\Delta} \text{ (安培)} \quad (1-4)$$

这里 I_x ——距离导体表面 x 厘米处的电流强度，安培；

I_A ——导体表面的电流强度，安培；

x ——表面到测量处的距离，厘米；