

感应炉冶炼

王振东 曹孔健 何纪龙 著



化学工业出版社

感应炉冶炼

王振东 曹孔健 何纪龙 著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书全面系统地介绍了感应炉冶炼的基本理论和生产实践,详细地论述了工频感应炉、中频感应炉、真空感应炉、等离子感应炉和增压感应炉的冶炼设备和基本工艺,详细地介绍了感应炉冶炼的脱氧、脱硫、脱磷、去除杂质元素和非金属夹杂物以及合金元素控制等相关理论与实践知识。本书为我国全面介绍感应炉炼钢的专门著作。适用于从事特殊钢与合金生产、科研和金属材料研究的人员参考,可以作为大专院校相关专业师生的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

感应炉冶炼/王振东,曹孔健,何纪龙著. —北京:
化学工业出版社, 2007. 6
ISBN 978-7-122-00810-7

I. 感… II. ①王…②曹…③何… III. 感应炉-冶金
IV. TG232. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 099045 号

责任编辑:陶艳玲

文字编辑:张燕文

责任校对:郑捷

装帧设计:关飞

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:三河市万龙印装有限公司

850mm×1168mm 1/32 印张26 字数718千字

2007年9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: 58.00 元

版权所有 违者必究

前 言

19 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并提出了电磁感应定律，奠定了感应加热的理论基础。1887 年第一台试验性有铁芯感应炉问世，1901 年诞生了第一台用于炼钢的无铁芯感应电炉。从此，开始了感应炉冶炼的新纪元，至今已有百余年的历程。

经过百余年的发展，特别自第二次世界大战以后，由于航空航天、电子信息、石油化工以及机械等工业的迅速发展，对金属材料的需求日益提高，一般的冶炼方法生产的金属材料难以满足高质量的要求。特种冶炼工艺得到快速的发展。感应炉冶炼随之成为特种冶炼的重要组成部分，受到各工业发达国家的普遍重视并得到大力发展。

感应炉冶炼已发展成为特殊钢和合金生产的重要冶炼工具。它包括工频感应炉冶炼、中频感应炉冶炼、真空感应炉冶炼、等离子感应炉冶炼和新兴的增压感应炉冶炼等多种工艺方法。利用感应炉冶炼生产铸铁、铸钢、特殊钢、不锈钢耐蚀钢、电热合金、功能合金、高温合金等，为发展国民经济提供大量的特种材料。

我国于 20 世纪 40 年代开始采用感应炉炼钢。1942 年抗日战争时期，资源委员会下属的四川綦江电化冶炼厂炼钢分厂，建立了我国第一台容量为 1000lb^① 的中频感应炉，主要生产合金钢。20 世纪 50 年代中期我国自国外引进一批小容量高中频感应炉和真空感应炉，主要从事新材料的研发工作。在此期间湘潭电机厂先后试制成功 50~430kg 中频感应电炉。1962 年由锦州新生电器公司试制成功国产第一台容量为 10kg 的真空感应炉。随后该公司又先后

① 1lb=0.45359237kg。

试制成功了容量分别为 50kg、200kg 的真空感应炉，并成批量生产，为我国真空感应炉冶炼工艺的普及与发展做出了贡献。20 世纪 60 年代末我国感应炉制造业已初具规模，容量在 500kg 以下的感应炉的应用较为普及。

改革开放以来，特别自 20 世纪 90 年代以后，随着国民经济的快速发展，我国感应炉的制造和应用得到了迅速发展与普及。目前，国内已能制造容量为 40t 的工频感应炉、20t 的中频感应炉和 1.5t 的真空感应炉。重点特殊钢企业先后自国外引进了 3~20t 真空感应炉。感应炉冶炼技术也得到了迅速的提高。感应炉冶炼产品在国民经济中占有的地位日趋重要。

为了适应当前形势发展，著者将 1984 年出版的《感应炉冶炼》一书进行了更新、充实。新版《感应炉冶炼》一书的写作过程中，得到了电炉制造厂、特殊钢厂、功能合金厂以及有关科研单位的大力支持和帮助。夏凌远、方健强、马殿军、降向东等为著者提供了相关技术资料、数据和图纸，在此深表感谢。

由于水平所限，书中不妥之处，望读者给予批评指正。

著者

2007 年 4 月于北京

目 录

1 感应炉的工作原理	1
1.1 感应炉的基本电路	1
1.2 感应炉的基本原理	2
1.3 感应电流的分布特征	7
1.4 感应加热时金属物理性能的变化	12
1.5 感应炉内电磁力的作用	13
参考文献	17
2 感应炉冶炼用设备	18
2.1 工频感应炉及其电源	19
2.2 中频感应炉及其电源	28
2.3 高频感应炉及其电源	43
2.4 等离子感应炉及其电源	47
2.5 真空感应炉及其电源	56
2.6 增压感应炉及其电源	98
参考文献	103
3 感应炉冶炼用坩埚	104
3.1 感应炉冶炼对坩埚材料的要求	104
3.2 坩埚用耐火材料	110
3.3 坩埚砂料的粒度配比	126
3.4 坩埚砂料添加剂及其作用	130
3.5 坩埚的成型方法	137
3.6 坩埚的烧结	147
3.7 坩埚的制作实践	158
3.8 坩埚的使用与维护	172
3.9 坩埚的漏钢预报	184
参考文献	187

4 感应炉冶炼用原材料	189
4.1 感应炉冶炼对原材料的要求	189
4.2 钢铁料和返回料	190
4.3 硅、锰及其铁合金	196
4.4 铬及其铁合金	209
4.5 镍、钴及其铁合金	218
4.6 钼、钨及其铁合金	224
4.7 铌、钽及其铁合金	230
4.8 钛、钒、硼及其铁合金	233
4.9 含氮铁合金	240
4.10 铝、镁、钙及其合金	243
4.11 稀土金属及其合金	247
4.12 特种添加剂	256
4.13 造渣材料	257
参考文献	263
5 感应炉冶炼钢液的脱氧	264
5.1 氧在钢中的形态及其危害	264
5.2 感应炉内的沉淀脱氧	267
5.3 感应炉内的扩散脱氧	293
5.4 真空碳脱氧	298
5.5 真空氢脱氧	310
5.6 真空低价氧化物挥发脱氧	312
参考文献	317
6 感应炉冶炼钢中气体和杂质的去除	318
6.1 钢液的脱氢	318
6.2 钢液的脱氮	339
6.3 钢液的脱硫	363
6.4 钢液的脱磷	397
6.5 钢液中微量有害元素的去除	428
参考文献	448
7 感应炉冶炼钢中非金属夹杂物	451
7.1 钢中非金属夹杂物按化学组成分类	451

7.2	钢中非金属夹杂物按光学显微镜检测分类	457
7.3	钢中非金属夹杂物的特点	459
7.4	非金属夹杂物对钢与合金性能的影响	467
7.5	钢中非金属夹杂物的来源	476
7.6	减少钢中非金属夹杂物的途径	477
	参考文献	480
8	工频感应炉冶炼	481
8.1	工频感应炉冶炼铸铁的基本工艺	481
8.2	工频感应炉冶炼球墨铸铁	498
8.3	工频感应炉冶炼的能耗及其节能措施	507
	参考文献	514
9	中频感应炉冶炼	515
9.1	中频感应炉冶炼方法的分类	515
9.2	中频感应炉冶炼的工艺特点	516
9.3	碱性坩埚熔化法冶炼的基本工艺	519
9.4	碱性坩埚氧化法冶炼的基本工艺	535
9.5	酸性坩埚熔化法冶炼的基本工艺	543
9.6	感应炉冶炼用炉渣	551
9.7	感应炉冶炼时钢的化学成分控制	555
9.8	感应炉冶炼不锈钢时相组成的控制	595
9.9	感应炉冶炼炉内氩气精炼	603
9.10	感应炉冶炼的配料计算	608
	参考文献	623
10	真空感应炉冶炼	625
10.1	真空感应炉冶炼的特点	625
10.2	真空感应炉冶炼的基本工艺	629
10.3	真空感应炉冶炼钢的化学成分控制	655
10.4	真空感应炉冶炼的加镁工艺	667
10.5	真空感应炉内钢液与坩埚材料之间的相互作用	680
10.6	真空感应炉内钢液的氢气精炼	687
	参考文献	691
11	等离子感应炉冶炼	693

11.1	等离子感应炉的冶金特点	693
11.2	等离子感应炉的精炼效果	695
11.3	等离子感应炉冶炼的基本工艺	705
11.4	等离子感应炉的冶金质量	710
11.5	等离子感应炉的技术指标	712
	参考文献	713
12	增压感应炉冶炼	714
12.1	增压感应炉的冶金特点与应用	715
12.2	增压感应炉冶炼的基本工艺	719
12.3	增压感应炉冶炼时影响钢液氮合金化的因素	721
12.4	增压感应炉冶炼时钢液含氮量的计算方法	727
12.5	增压感应炉冶炼工艺参数的确定	734
	参考文献	739
13	感应炉分钢种冶炼的工艺要点	740
13.1	超低碳镍铬奥氏体不锈钢的冶炼工艺要点	740
13.2	高纯铁素体不锈钢的真空感应炉冶炼工艺要点	751
13.3	铁铬铝电热合金的感应炉冶炼工艺要点	760
13.4	高纯铁铬铝耐热合金的真空感应炉冶炼工艺要点	769
13.5	高速工具钢的感应炉冶炼工艺要点	773
13.6	冷锻不锈钢的感应炉冶炼工艺要点	782
13.7	高温合金的感应炉冶炼工艺要点	797
13.8	软磁合金的真空感应炉冶炼工艺要点	809
	参考文献	816

感应炉的工作原理

1.1 感应炉的基本电路

无铁芯感应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。

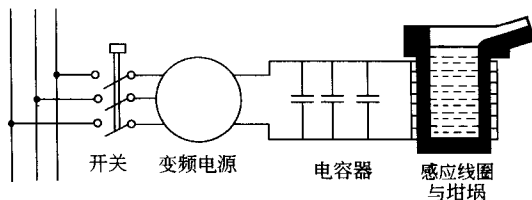


图 1-1 感应炉的基本电路

变频电源将 50Hz 的工频电流增频后变为 150~200000Hz 的电流，并把这种电流输送到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炉电路中的重要组成部分。

总之，无论什么形式的感应炉，它的基本电路都包括上述组成

感应炉的基本原理

铁芯感应炉工作的基本原理基于电磁感应原理和电流热效应。简单地讲，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因电阻而产生热量，使金属炉料加热和熔化。

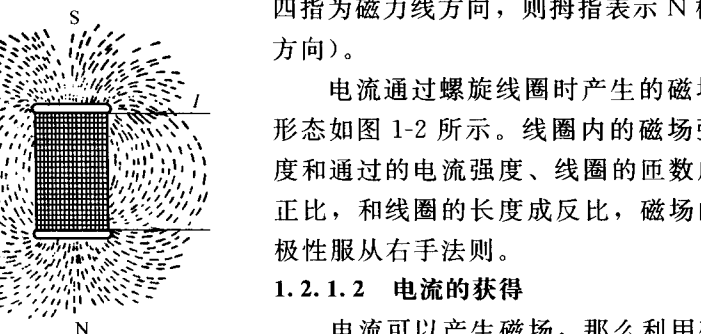
铁芯感应炉炼钢的许多特点都和它的工作原理有关。进一步研究磁感应现象对掌握这种炼钢方法是非常重要的。

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过程，它包括电、磁、传热等物理过程。要定量地描述这些过程是很困难的，现仅对电和磁的关系、电磁感应现象、电和磁系等进行简要的介绍。

电和磁的关系

磁场的产生

20 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，从而知道了电和磁相互依存的关系。由导体中电流所产生的磁场的方向和电流的流动方向有关，它服从右手法则（右手握导体，四指为磁力线方向，则拇指表示 N 极方向）。



1-2 电流通过螺旋线圈所产生的磁场

电流通过螺旋线圈时产生的磁形态如图 1-2 所示。线圈内的磁场度和通过的电流强度、线圈的匝数成正比，和线圈的长度成反比，磁场极性服从右手法则。

1.2.1.2 电流的获得

图 1-2 电流通过螺旋线圈所产生的磁场

验,发现当导体 AB 在磁场中作切割磁力线运动时,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磁的关系,证明了两者是互相转化的。这种电磁之间相互转化的现象称为电磁感应现象。

1.2.2 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导体 AB 在磁场中作切割磁力线运动时,

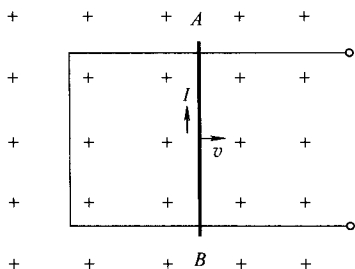


图 1-4 导体 AB 在磁场中移动

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

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仑兹力的作用来说明。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

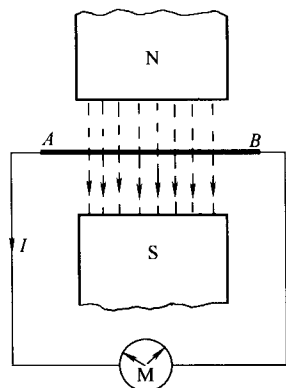


图 1-3 导体切割磁力线运动

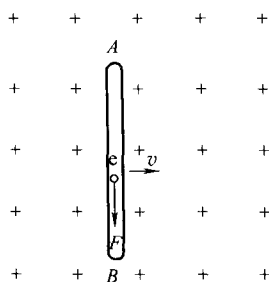


图 1-5 自由电子受洛伦兹力作用

到洛伦兹力 F 的作用。在 F 的作用下自由电子 e 从 A 向 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 所示。这一电场作用于导体中的自由电子，使自由电子产生定向运动，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，如果磁场感应强度 B 增加，则涡旋电场 E 的方向为如图所示的方向。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

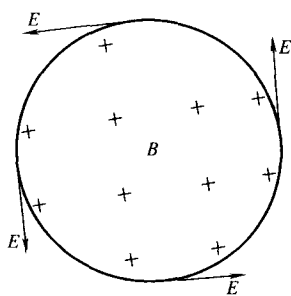


图 1-6 变化磁场产生的涡旋电场

1 感应炉的工作原理
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

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

式中 E ——闭合回路中的感应电动势，V；

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， $\Delta\phi =$

$$HS \times 79.57;$$

H ——磁场强度，A/m；

S ——螺旋线圈包围的空间的横断面面积， cm^2 。

1.2.3 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：

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

式中 I ——通过导体的电流，A；

R ——导体的有效电阻， Ω ；

t ——通电时间，s。

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。

1.2.4 感应炉的加热过程

如何利用上述原理把金属炉料加热并熔化呢？下面结合感应炉的具体情况加以说明。

1.2.4.1 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

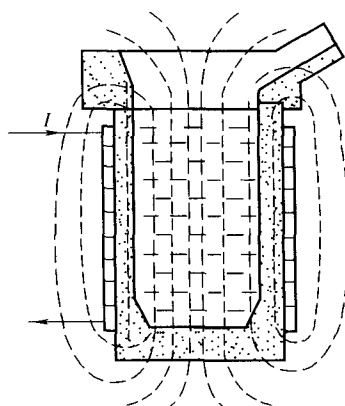


图 1-7 磁场分布示意图

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，亦即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。

1.2.4.2 交变磁场产生感应电流

如图 1-7 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，就相当于导体作切割磁力线的运动。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：

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

式中 ϕ ——交变磁场的磁通量，Wb；

f ——交变电流的频率，Hz。

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：

$$I = \frac{4.44 f \phi}{R} \quad (\text{A}) \quad (1-4)$$

式中 R ——金属炉料的有效电阻, Ω 。

1.2.4.3 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。

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,最后由电能转化为热能使金属加热。从这一点看出感应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有些损失,因此感应炉加热的效率较低。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。

1.3 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。

1.3.1 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 1-8 (a) 所示。

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 1-8 (b) 所示。

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

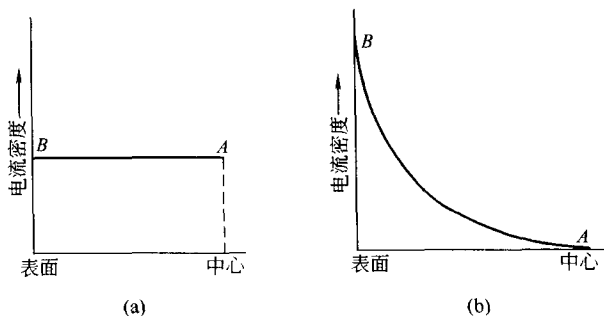


图 1-8 沿导体横断面的电流密度分布

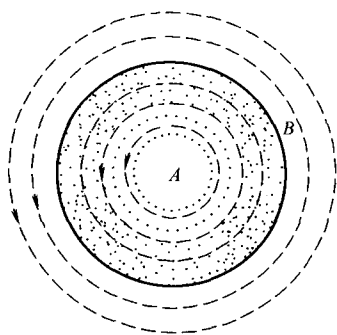


图 1-9 交变电流的集肤效应

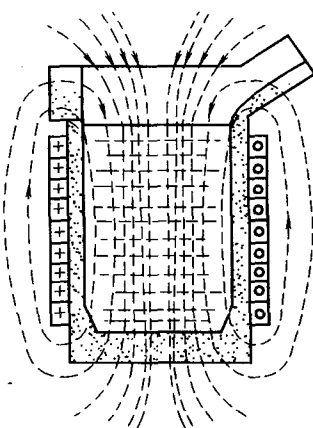


图 1-10 钢液柱的集肤效应

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。

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，当感应电流因自感现象而产生的磁场忽略不计时，钢液