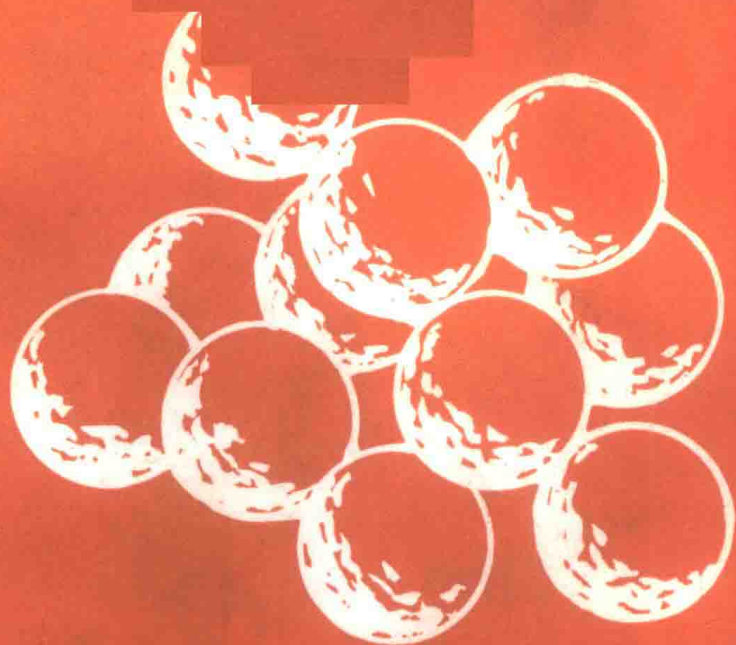


金属感应热处理

刘志儒等 编著

上 册



机械工业出版社

金属感应热处理

上册

刘志儒 卢锦宝 编著

王东升 审校



机械工业出版社

全书分上、下两册出版。上册主要讲述高频、中频和工频感应加热的基本理论、感应器设计、感应加热的热处理工艺、各种典型零件感应加热淬火的生产实例等。下册系统介绍高中频感应加热设备的工作原理、调试以及使用和维修方面的基本问题，同时也介绍了各种国产的感应加热设备。

本书是上册，共分12章。可供从事金属材料及热处理的工程技术人员、科研人员以及其他有关人员阅读和参考。也可供大专院校金属热处理专业的师生参考。

金属感应热处理（上册）

刘志儒 卢锦宝 编著

王东升 审校

*

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）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $20^{3/4}$ · 插页1 · 字数548千字

1985年9月北京第一版·1985年9月北京第一次印刷

印数 0,001—6,200 · 定价5.15元

*

统一书号：15033·5843

前 言

感应加热技术自三十年代开始大量应用于工业生产以来，由于感应加热理论和应用技术的不断进步，迄今已成为一项节能、无污染和少氧化脱碳的快速加热技术，并具有容易实现机械化和自动化生产的特点。因此采用感应加热表面淬火的零件日益增多，采用感应透热淬火的型材和零件也越来越多。另外感应加热技术在铸造、锻造、焊接和烧结等领域中也获得日益广泛的应用。

我们收集国内外近十多年来的有关技术资料，也包括我们自己做的一些工作，进行分析总结，编著成这本书，谨供从事感应热处理的工程技术人员和操作人员参考。本书的出版希望能够有助于把这项技术更合理、更有效和创造性地用于解决生产实际问题，从而使生产达到优质、高产和低能耗，更好地为四个现代化建设服务。

本书分上下两册出版，上册主要介绍感应加热的基本理论、感应器设计和感应热处理工艺，并且列举各种典型零件的感应热处理实例。下册系统介绍高中频感应加热设备的工作原理、调试以及使用和维护方面的基本问题，同时也列举国产的各种频率的感应加热设备。

全书由刘志儒同志主编，参加上册编著的还有卢锦宝同志，上册请王东升同志审校；参加下册编著的还有俞松尧和卢锦宝两位同志，下册请王新生和王东升两位同志审校。

本书在编写过程中，曾得到许多工厂的大力支持和帮助，提供了大量的宝贵资料，丰富了本书的内容，增强了本书的实用性。特此向上海热处理厂、第一汽车制造厂、第二汽车制造厂、大连起重运输机厂、大连机床厂、无锡电炉厂、天津高频设备厂、锦州电炉电机厂、哈尔滨松江拖拉机厂等许多单位致以衷心的感谢。

由于我们的水平有限，实际经验不足，难免有错误和不妥之处，希望各位读者多提宝贵意见。

作者

目 录

第1章 感应加热原理	1
1.1 电磁转换与感应加热	1
1.2 涡流在金属表面层中的分布	4
1.2.1 磁场强度 H 分布的基本方程	4
1.2.2 涡流分布特性与电流透入深度	7
1.2.3 热态与冷态的涡流透入深度	8
1.3 钢铁材料感应加热的物理过程	10
1.3.1 电磁场在金属中的建立时间	10
1.3.2 透入式加热	11
1.3.3 传导式加热	12
1.4 两种加热方式的特点	13
1.4.1 透入式加热的特点	13
1.4.2 充分发挥透入式加热优点的条件	13
1.4.3 传导式加热的特点	14
1.4.4 传导式加热的热效率与温度分布特性	15
1.5 零件表面的热辐射损失	17
1.6 感应加热的能量参数	18
1.6.1 加热比功率 p_0	18
1.6.2 各参数的影响	18
1.7 感应加热过程中电参数变化的电工学分析	19
1.7.1 电子管式高频加热装置	20
1.7.2 机械发电机式中频加热装置	25
第2章 钢在快速加热时的组织转变	28
2.1 钢在快速加热时的相变温度和相变动力学	28
2.1.1 加热速度对相变温度的影响	28
2.1.2 纯铁的加热相变	31
2.1.3 珠光体向奥氏体转变的相变动力学	35

2.2 钢的奥氏体形成机理	45
2.2.1 奥氏体形成的浓度条件	47
2.2.2 加热相变过程的激活能	51
2.2.3 碳在奥氏体中的扩散系数	54
2.3 钢在快速加热时的相变组织	56
2.3.1 初始奥氏体晶粒大小与原始组织和加热速度的关系	56
2.3.2 本质细晶粒钢感应加热时奥氏体晶粒的长大特性	60
2.3.3 奥氏体的均匀化	64
2.4 钢的快速加热对冷却转变的影响	68
2.5 晶粒的超细化和快速循环加热淬火法	77
2.5.1 晶粒的超细化	77
2.5.2 晶界强化效应	79
2.5.3 超细化材料的力学性能	82
2.5.4 快速循环加热淬火法	89
第3章 感应加热后的淬火冷却	94
3.1 冷却特点	94
3.2 冷却能力及其测定	96
3.3 快速水流冷却的动力学	104
3.4 冷却速度的影响与马氏体转变过程中的回火现象	109
3.5 冷却方法、冷却介质的选择与淬火裂纹问题	113
第4章 表面淬火时的残余应力	123
4.1 热处理过程中的内应力	123
4.2 表面淬火时内应力的产生过程和特征	125
4.3 表面淬火区边界处的残余应力	130
4.4 残余应力对零件疲劳抗力的影响	133
4.5 金属的接触疲劳及残余应力的影响	137
4.6 影响残余应力分布的因素	142
第5章 感应加热淬火零件的性能及工艺因素的影响	158
5.1 实验方法的选择	158
5.2 拉伸性能及工艺因素的影响	161
5.3 抗弯性能及工艺因素的影响	169
5.4 扭转性能及工艺因素的影响	174

5.5 冲击值及工艺因素的影响	177
5.6 硬度及工艺因素的影响	179
5.7 疲劳性能及工艺因素的影响	183
5.8 耐磨性	185
第6章 表面淬火感应器的设计与制造	190
6.1 感应器的结构组成与分类	190
6.1.1 感应器的结构	190
6.1.2 感应器的分类	191
6.2 感应器设计的基本要求及其考虑方面	192
6.2.1 感应器和零件之间的间隙	192
6.2.2 感应器的效率	193
6.2.3 高频电流的特性及其应用	195
6.3 感应器基本参数的选择	206
6.3.1 制造感应器用的铜料厚度	206
6.3.2 感应器与零件之间的间隙	207
6.3.3 感应器的截面形状和尺寸	208
6.3.4 感应器的匝数	209
6.3.5 感应器冷却水路及淬火喷水孔的设计	210
6.3.6 汇流排的结构形式	215
6.3.7 感应器与高中频变压器的连结方式	219
6.4 外圆表面加热感应器的设计	219
6.5 内圆表面加热感应器的设计	227
6.6 平面加热感应器的设计	231
6.7 特殊形状感应器的设计	235
6.8 感应器的制造与搪瓷	267
第7章 高中频感应加热表面淬火工艺	272
7.1 表面淬火零件的技术条件	272
7.2 设备频率与加热比功率的选择和确定	274
7.2.1 设备频率的选择	274
7.2.2 加热比功率的选择	277
7.3 加热方法和冷却方案的选择与确定	278
7.4 感应加热淬火的工艺参数	281

7.4.1	电参数	281
7.4.2	加热温度和加热时间	285
7.4.3	冷却时间	294
7.5	感应加热淬火件的回火	295
7.5.1	炉中回火	295
7.5.2	自回火	297
7.5.3	感应加热回火	299
7.6	感应加热热处理件的质量检查	300
7.7	感应加热淬火缺陷及其解决方法	304
7.8	深层感应加热表面淬火	307
7.8.1	深层感应加热表面淬火的特点和应用	307
7.8.2	深层感应加热表面淬火工艺	309
7.8.3	深层感应加热表面淬火与其它表面硬化处理的比较	310
7.9	感应加热的温度测量和工艺过程的控制	312
7.9.1	感应加热温度测量的特殊性	312
7.9.2	用热电偶直接测温	313
7.9.3	用光电辐射间接测温	321
7.9.4	感应加热工艺过程的温度自动调节原理	335
第8章	齿轮感应加热表面淬火	344
8.1	齿轮的工作条件及使用寿命	344
8.1.1	齿轮工作时的损坏形式	344
8.1.2	提高齿轮使用寿命的基本途径——表面硬化处理	346
8.1.3	残余应力对弯曲疲劳强度的影响	351
8.1.4	齿轮表面硬化处理的工艺方法	357
8.1.5	提高齿轮使用寿命的途径	360
8.2	齿轮的全齿感应加热淬火	362
8.2.1	齿轮硬化层形式与频率关系	362
8.2.2	全齿淬火比功率的选择	365
8.2.3	全齿淬火感应器	366
8.2.4	齿轮全齿淬火机床	368
8.3	沿齿面单齿感应加热表面淬火	369
8.4	沿齿沟单齿感应加热表面淬火	374

8.4.1 沿齿沟淬火感应器.....	374
8.4.2 沿齿沟淬火的典型实例.....	376
8.5 沿齿廓分布硬化层的其它淬火法.....	381
8.5.1 低淬透性钢的感应透热淬火.....	381
8.5.2 渗碳后进行感应透热淬火.....	389
8.5.3 双频淬火.....	390
8.6 齿轮表面淬火的变形与开裂.....	392
8.6.1 齿轮表面淬火变形及其防止.....	392
8.6.2 齿轮表面淬火裂纹及其防止.....	397
第9章 轴类零件感应加热表面淬火	400
9.1 轴类零件的工作条件和表面淬火要求.....	400
9.1.1 轴类零件的失效形式及提高其使用寿命的基本途径.....	400
9.1.2 提高轴类零件使用寿命的措施.....	402
9.1.3 轴类零件感应加热表面淬火的基本要求.....	416
9.1.4 轴类零件表面感应加热淬火时存在的一般问题的改进 措施.....	424
9.2 花键轴高中频感应加热表面淬火.....	427
9.3 汽车半轴的中频感应加热表面淬火.....	430
9.4 镗杆高频感应加热表面淬火.....	439
9.5 机床主轴的多工位表面淬火.....	441
9.6 曲轴中频感应加热表面淬火.....	444
9.7 凸轮轴的高中频感应加热表面淬火.....	453
9.8 钻杆及岩心管高频感应加热表面淬火.....	458
9.9 簪直辊中频感应加热表面淬火.....	463
第10章 其它机械零件及工模具的高频感应加热表面淬火	467
10.1 套筒形零件内孔的高频感应加热表面淬火	467
10.2 机床导轨的高频感应加热表面淬火	470
10.3 大模数蜗杆的高频感应加热表面淬火	473
10.4 J6型绞盘机主销颈及轴套的高频感应加热表面淬火	475
10.5 C2型蒸汽机车滑板和月牙板的高频感应加热表面淬火	476
10.6 138载重汽车曲轴前节的高频感应加热表面淬火.....	478
10.7 起重机行走轮的中频感应加热表面淬火	479

10.8	起重机弹子盘的中频感应加热表面淬火	481
10.9	滚丝模的高频感应加热表面淬火	483
10.10	游标卡尺量爪面的高频感应加热淬火	486
10.11	剪刀刃的高频感应加热表面淬火	488
10.12	汽车转向拉杆球头销的中频感应加热表面淬火	491
10.13	履带板的中频感应加热局部回火	493
10.14	汽车钢板弹簧平衡轴承套的中频感应加热表面淬火	494
10.15	锉刀的高频感应加热表面淬火	495
第11章	零件和坯料的穿透感应加热	499
11.1	穿透感应加热的特点	499
11.2	穿透感应加热感应器主要参数的理论计算	501
11.2.1	最佳频率的选择	502
11.2.2	感应器主要尺寸的确定	507
11.2.3	穿透感应加热时间的计算	509
11.2.4	加热功率的计算	511
11.2.5	感应器工件系统阻抗的计算	516
11.2.6	感应器铜管截面尺寸的计算	525
11.3	穿透加热感应器的设计与计算	528
11.3.1	穿透加热感应器的设计计算程序	530
11.3.2	步进式穿透加热圆柱感应器计算的举例	535
11.3.3	不同直径的杆状零件和方形坯料穿透加热感应器的计 算方法	546
11.4	穿透感应加热在零件热处理中的应用	548
11.4.1	棒材的中频调质处理	549
11.4.2	汽车板弹簧透热淬火	554
11.4.3	轴承套圈中频感应穿透加热淬火	556
11.4.4	钢球中频感应穿透加热淬火	568
11.5	穿透感应加热的其它应用	571
11.5.1	感应间接加热的应用	571
11.5.2	感应加热化学热处理	573
第12章	工频感应热处理	587
12.1	工频感应器的供电	587

12.1.1 单相工频感应器的供电线路	588
12.1.2 三相工频感应加热供电线路	593
12.1.3 三倍频率的供电线路	595
12.2 工频感应器的结构与设计	597
12.3 典型零件的工频感应加热表面淬火	606
12.3.1 大型柱塞工频感应加热表面淬火	606
12.3.2 冷轧辊的工频感应加热表面淬火	610
12.3.3 铁道重型载重车轮及起重机车车轮工频感应加热表面 淬火	628
12.4 管状零件工频感应加热调质处理	638
12.4.1 等截面钢管的工频感应加热淬火与回火	638
12.4.2 变截面钢管的感应加热	643
12.5 其它形式的工频感应加热	647

第 1 章 感应加热原理

1.1 电磁转换与感应加热

任一导体通过电流时,在其周围就同时产生磁场。磁场强度的大小和方向,是根据导体中电流的大小和方向而定的。对于一个螺旋线圈的导体来说,若电流强度 I 的单位用安培,螺旋管的长度 l 用厘米表示,则磁场强度 H 为:

$$H = \frac{4\pi nI}{10 \times l} \quad (\text{奥斯特}) \quad (1-1)$$

式中 n ——线圈的匝数, nI 称为安培匝数。

由式 (1-1) 可以看出,螺旋线圈的磁场强度和安培匝数成正比。

每条磁力线都是环绕电流的闭合线,无起点和终点之分,它们都和闭合电路互相套连 (见图 1-1 和 1-2)。磁力线方向和电流方向的关系,遵从右手螺旋定则。

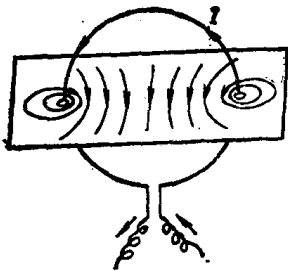


图 1-1 圆电流的磁力线 [1]

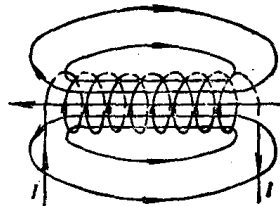


图 1-2 螺旋线圈电流的磁力线 [1]

在铁磁性介质中,由于介质被磁化,磁感应强度将由 H 增大到 B , 并用下式表示:

$$B = \mu H$$

式中 μ ——介质的导磁率,在真空介质中, $\mu = 1$, 在空气、

水、铜、铝、奥氏体钢等非铁磁性介质中， $\mu \approx 1$ ；而在 α -Fe、铬、镍及其合金等铁磁性介质中， $\mu \gg 1$ 。 μ 的大小还和磁场强度有关。钢在感应加热时，通常 $\mu = 20 \sim 100$ 。

在磁场里，垂直穿过某一横截面的磁力线根数叫做磁通量。在磁场中设想一个面积元 dS ，其法向和该处 B 矢量之间的夹角为 α ，则通过 dS 的磁通量为 $d\phi = B \cdot dS \cos \alpha$ ，因此通过一个有限面积的磁通是：

$$\phi = \int_S B \cos \alpha dS$$

若 $\alpha = 0^\circ$ ，则通过磁场面积为 S 的磁通是：

$$\phi = BS = \mu HS \quad (1-2)$$

当线圈中的电流是交变电流时，在线圈内部和其周围就产生一个交变磁场。在感应加热时，置于感应线圈内的零件就被这个交变磁场的磁力线所切割（见图 1-3）。根据电磁场理论，变化着的磁场就产生感应电动势 e ，并可用法拉第电磁感应定律表示如下：

$$e = \oint E \cdot dL = - \frac{d\phi}{dt} \quad (1-3)$$

式中负号表明， E 这个感应电场有反抗磁场的作用。

由于感应加热时，所用工业电流的频率是按正弦规律变化的：

$$I = I_m \sin 2\pi ft \quad (1-4)$$

所以其磁通量亦有着相对应的正弦关系，即：

$$\phi = \phi_m \sin 2\pi ft \quad (1-5)$$

故：

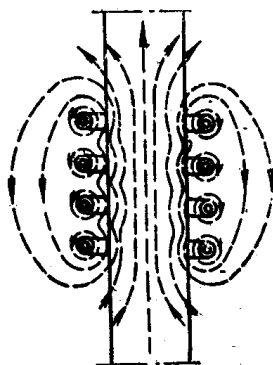


图1-3 磁力线通过工件内部示意图⁽²⁾

$$\frac{d\phi}{dt} = \phi_m 2\pi f \cos 2\pi ft$$

或者:

$$\frac{d\phi}{dt} = \phi_{md} \cos 2\pi ft$$

将上式代入式 (1-3) 得:

$$e = -\phi_{md} \cos 2\pi ft \quad (1-6)$$

式中 $\phi_{md} = \phi_m 2\pi f$, 为磁通变化的振幅。它不但取决于零件截面上的最大磁通 ϕ_m , 还与电流频率 f 成正比。在其它条件相同时, f 越高, 感应电动势 e 也就越大。

由于感应电动势的存在, 在零件表面薄层内将形成封闭的电流回路 (见图1-4)。通常把这种电流称为涡流。如上所述, 由于感应电动势与原电路电势是反向的, 所以在每一瞬间涡流方向总是与感应线圈中的电流方向相反。涡流强度 I_f 决定于感应电

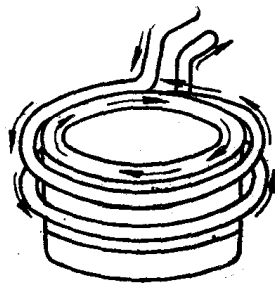


图1-4 在工件表面产生的涡流⁽²⁾

动势 e 及涡流回路的阻抗 $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ (欧姆)。根据欧姆定律, 则:

$$I_f = \frac{e}{Z} \text{ (安)}$$

由于 Z 通常很小, 故 I_f 能达到很高的数值, 使涡流回路产生大量的热, 其热量可由焦耳-楞次定律确定:

$$Q = 0.24 I_f^2 R t \text{ (卡)} \quad (1-7)$$

零件实行感应加热主要是依靠这种热量。其次在感应加热铁磁性材料过程中, 当起始加热温度尚未超过该材料的磁性转变点 (居里点) 的温度之前时, 还会由于如图 1-5 所示的“磁滞现象”所引起的热效应。即通过感应线圈的电流是交变电流时, 磁场强度则在 $+H_s \sim -H_s$ 之间发生变化, 磁感应强度 B 就沿着 b, c, d, e, f, g, b ,

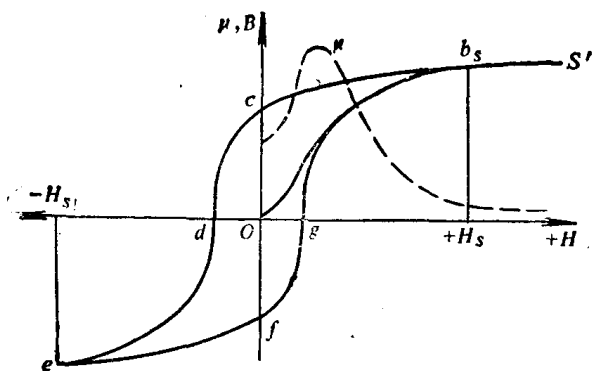


图1-5 磁化曲线与磁滞回线^{〔8〕}

封闭回线进行变化，这条封闭回线称为磁滞回线。该磁滞回线所包围的面积，反映磁化周期所发生的磁滞损失，并以热能的形式释放出来，对零件起着加热的作用。但是这种磁滞损失引起的热效应，在加热中的作用是次要的，而且当加热温度超过材料的磁性转变温度时，材料就失去磁性，因而磁滞现象也就随之消失。

1.2 涡流在金属表面层中的分布

零件在感应加热中的外部能源是来自交变磁场，因此确定磁场强度在零件中的分布情况，对了解零件的热量与温度的分布，是极为重要的。

1.2.1 磁场强度 H 分布的基本方程

为了简化问题的讨论，现就实心圆柱形零件中电磁场的分布问题进行分析，所得结论对其它形状零件说来，在原则上也适用。用黑体字写出的磁场强度 H 、电场强度 E 和磁通 ϕ 等代表矢量，并假定零件周围的瞬时磁场强度与零件距离无关，而且不受零件存在的影响，则在零件表面处的磁场强度为 H 。(图 1-6 a)，在 r 处为 H (图 1-6 b)。环绕任何封闭回线的磁场强度的线积分所包围电流为：

$$I = \frac{1}{4\pi} \oint H ds \quad (1-8)$$

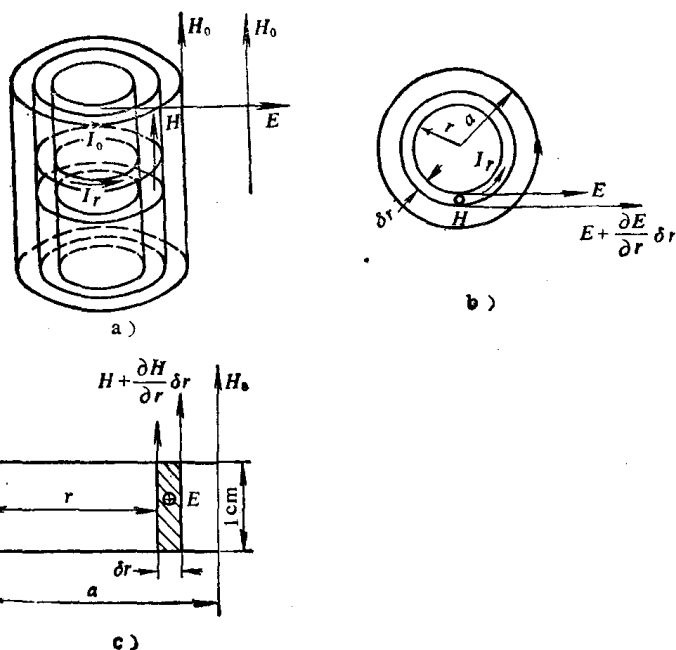


图1-6 感应加热时实心圆柱形零件中的电磁场强度

因此，环绕图 1-6 c 中阴影面积取线积分得电流 I 为：

$$I = \frac{1}{4\pi} \left[H - \left(H + \frac{\partial H}{\partial r} \delta_r \right) \right] = -\frac{1}{4\pi} \delta_r H \quad (1-9)$$

而且在 r 处的电流密度是：

$$I_r = -\frac{1}{4\pi} \frac{\partial H}{\partial r} \quad (\text{安/厘米}^2) \quad (1-10)$$

在半径 r 的周界上（图 1-6 c 所示阴影区），由于磁场强度 H 变化而感应出的电动势为 $E2\pi r$ ，其中 E 表示每厘米长度上的电场强度，因此产生的电流 I 是：

$$I = \frac{E2\pi r}{R_r} \quad (1-11)$$

式中 R_r ——薄层单位长度上的电阻。

$$R_r = \frac{\rho 2\pi r}{\delta_r} \quad (1-12)$$

将式 (1-12) 代入式 (1-11) 得:

$$I = \frac{E2\pi r}{\rho 2\pi r / \delta_r} = \frac{E\delta_r}{\rho} \quad (1-13)$$

通过图 1-6 c 的影线区的电流密度 I_r 由下式确定:

$$I_r = \frac{E}{\rho} \quad (1-14)$$

因式 (1-10) 和式 (1-14) 相等, 所以得:

$$\frac{\partial H}{\partial r} = -\frac{4\pi E}{\rho} \quad (1-15)$$

环绕任何封闭回线的电场强度的积分所包围的磁通也可由下式得出:

$$\oint E ds = -\frac{d\phi_c}{dt} \quad (1-16)$$

如果在环形区内的总磁通是 ϕ_r , 那么:

$$\phi_r = \mu H A_r = \mu H 2\pi r \delta_r \quad (1-16 a)$$

假定 H 是一个正弦函数, 那么:

$$\frac{d\phi_r}{dt} = \mu A_r \frac{dH}{dt} = j\omega\mu H 2\pi r \delta_r \quad (1-17)$$

又可将 (1-16) 式写成:

$$\left(E + \frac{\partial E}{\partial r} \delta_r \right) 2\pi (r + \delta_r) - E 2\pi r = -j\omega\mu 2\pi r \delta_r H \quad (1-18)$$

按 ϕ_r 是在 r 和 $r + \delta_r$ 之间磁通的增量, 耦合于式 (1-18) 中的两个电动势的增量。因此:

$$2\pi E \delta_r + 2\pi r \frac{\partial E}{\partial r} \delta_r + 2\pi \frac{\partial E}{\partial r} \delta_r^2 = -j\omega\mu 2\pi r \delta_r H \quad (1-18 a)$$

略去微量项 δ_r^2 , 得:

$$\frac{\partial E}{\partial r} + \frac{E}{r} = -j\omega\mu H \quad (1-19)$$

综合式 (1-15) 和式 (1-19) 可得: