

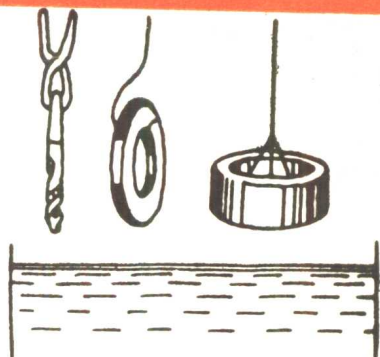
机械工人学习材料

JIXIE GONGREN XUEXI CAILIAO

淬火感应器的选用、设计与制造

林信智 编著

热处理



机械工业出版社

452
28

内容提要 本书较全面地介绍了外圆周、内孔、长轴、平面、曲轴、齿轮、端头、槽口、凸轮及球面等10种类型、100余种高、中频淬火感应器的各种结构形式、适用范围、感应器的选用以及简易的设计方法。书中汇集的各类感应器插图大多数是完整、细致，可直接用于生产。对感应器设计所需基础理论知识也作了初步论述，同时还较详细地介绍了感应器的制造材料及工艺。

本书取材于生产实际，内容丰富，浅显易懂，实用性强，可供热处理工人、技术人员阅读，也可供大中专学校的金属材料及热处理专业师生参考。

淬火感应器的选用、设计与制造

林信智 编著

★

责任编辑：程淑华 版式设计：吴静霞

封面设计：郭景云 责任校对：熊天荣

责任印制：王国光

★

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 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $6^{3/4}$ · 字数 159 千字

1991年3月北京第一版·1991年3月北京第一次印刷

印数 0,001—3,520 · 定价：4.35 元

★

科技新书目：235-009

ISBN 7-111-02459-1/TG · 578

前 言

感应热处理是金属热处理一个重要的新的分支，它具有加热速度快、不氧化、不脱碳、不污染环境、节省能源、并能放置在加工线上、易于实现机械化和自动化等多方面的优点，因此近年来得到迅速地发展。众所周知，感应淬火必须使用感应器，而在某种意义上来说，感应器是感应淬火技术的核心，因为它设计是否先进与合理、制造是否精良，将直接影响零件的加热效果、淬火质量和生产效率。因此感应淬火的工艺研究、工艺改进和新产品的淬火工艺试验多是围绕感应器进行的。

然而，我国以淬火感应器为主题的书籍甚少，许多感应热处理工作者为无处查找感应器的设计资料而苦恼。为使感应热处理工作者能有一本小型的参考书，并通过对它的阅读能初步掌握淬火感应器的设计方法和制造过程，这就是本书的宗旨。

感应器的计算是很复杂的，用计算结果进行设计往往与生产实际有很大出入，因此本书很少涉及计算内容。本书以从事实际工作的同志为对象，介绍了工厂实用的感应器的设计资料，插图很多，有些插图具有工程图性质。本书按淬火零件的形状将感应器分为十类，共介绍了一百余种，此外还介绍了感应器常用的导电材料、导磁材料和绝缘材料，以及感应器的制造工艺。

本书经中国机械工程学会热处理学会感应加热专业委员

会主任委员李敏宝高级工程师审校，沈瑶、李其耀、常光甲及魏凤楼等多位专家为本书提供了感应器的设计资料和制造经验，一汽高频试验室的多位同志为本书描绘了插图，作者在此向他们致以衷心的感谢。

由于作者的学识和技术水平有限，书中错误和不当之处在所难免，望专家和广大读者给予批评指正。

作者 90年9月4日

目 次

前言

一 基础知识和基本概念	1
1 电磁感应与感应加热(1)——2 表面效应(集肤效应)(5)——3 邻近效应(7)——4 圆环效应(10)——5 导磁体的槽口效应(13)——6 透 入式加热和传导式加热(14)——7 电流频率的选择(18)——8 比功率和同 时加热淬火的最大面积(22)——9 同时加热淬火法、连续加热淬火法和纵 向加热整体淬火法(27)——10 感应器名词介绍(39)	
二 圆柱形零件同时淬火感应器的选用与设计	41
1 支架销同时淬火感应器(46)——2 小轴同时淬火感应器(47)—— 3 淬火区位置不同的小轴同时淬火感应器(49)——4 带有封水罩的同时淬 火感应器(50)——5 突缘类零件同时淬火感应器(51)——6 轴类零件全长 淬火的同时淬火感应器(53)——7 装配式小轴同时淬火感应器(55)	
三 长轴类零件表面淬火感应器的选用与设计	57
1 圆环式连续淬火感应器(57)——2 多匝连续淬火感应器(60)——3 汽车半轴连续淬火感应器(61)——4 镗杆连续淬火感应器(65)——5 钻杆 及岩心管高频连续淬火感应器(67)——6 半圈式连续淬火感应器(68)—— 7 长轴类零件整体表面淬火感应器(75)	
四 齿轮淬火感应器的选用与设计	79
1 全齿加热淬火感应器(79)——2 齿轮轴连续淬火感应器(83)——3 单齿表面淬火感应器(84)——4 大模数齿轮单齿连续淬火感应器(86) ——5 齿沟齿侧淬火感应器(87)——6 中频齿沟连续淬火感应器(90)—— 7 低淬性钢齿轮淬火感应器(94)	
五 曲轴淬火感应器的选用与设计	96
1 分合式曲轴淬火感应器(97)——2 半圈式曲轴淬火感应器(103)	
六 凸轮轴及凸轮类零件淬火感应器的选用与设计	109

1 凸轮轴淬火感应器 (109)——2 汽车减震器凸轮淬火感应器 (120)
——3 刹车凸轮淬火感应器 (123)

七 球面零件淬火感应器的选用与设计129

1 汽车转向节球头支承中频淬火感应器 (129)——2 汽车转向拉杆球头销淬火感应器 (131)——3 小型球头销淬火感应器 (133)——4 大型球头销淬火感应器 (134)——5 连接球头淬火感应器 (135)

八 平面及平面类零件淬火感应器的选用与设计136

1 高频平面连续加热淬火感应器 (136)——2 中频平面连续加热淬火感应器 (138)——3 机床导轨高频淬火感应器 (140)——4 机床导轨中频淬火感应器 (142)——5 钢轨和道岔尖轨中频淬火感应器 (143)——6 平面齿盘同时加热淬火感应器 (146)——7 平台表面淬火感应器 (146)

九 端头和端面淬火感应器的选用与设计147

1 气门调整螺栓顶部淬火感应器 (147)——2 进排气阀端头淬火感应器 (150)——3 油嘴端头淬火感应器 (151)——4 支承圈侧端面淬火感应器 (152)

十 内孔表面淬火感应器的选用与设计153

1 直径大于 75 mm 的长内孔淬火感应器 (154)——2 直径 25~75 mm 的长内孔淬火感应器 (156)——3 直径 20~30 mm 的内孔淬火感应器 (157)——4 直径小于 20 mm 的内孔淬火感应器 (159)——5 盲孔淬火感应器 (160)——6 液压马达内曲线导轨中频淬火感应器 (161)——7 主轴内锥孔中频淬火感应器 (163)——8 液压缸孔高频淬火感应器 (164)

十一 槽口淬火感应器的选用与设计165

1 刹车齿轮槽口淬火感应器 (166)——2 爪式联轴节槽口淬火感应器 (168)——3 变速箱导块槽口淬火感应器 (169)——4 V 型槽口淬火感应器 (172)

十二 两有效圈串联或并联感应器的选用与设计172

1 两有效圈中轴线平行的串联感应器 (172)——2 两有效圈中轴线重合的串联感应器 (173)——3 两圈或多圈的并联感应器 (173)

十三	感应器制造中, 导电材料的选择和方管成形	178
十四	感应器制造中, 导磁材料的选择及制作	182
	1 硅钢片导磁体(182)——2 中频铁氧导磁体(186)——3 高频铁氧导磁体(186)——4 高、中频铁氧导磁体的自制粘结(189)	
十五	绝缘材料选择及有效圈的搪瓷	190
十六	中频淬火感应器的制造	193
	1 淬火感应器接触板的制造 (193)——2 中频同时淬火感应器的有效圈加工(195)——3 感应器的总成焊接和焊后加工(199)——4 装配式中频淬火感应器的制作(202)	
十七	高频淬火感应器的制造	203
	1 感应器夹头的制作(203)——2 感应器连接软线的制作(206)——3 有效圈的制作(209)	

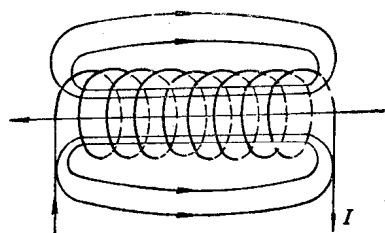


图 1 螺旋线圈及其磁力线分布示意图

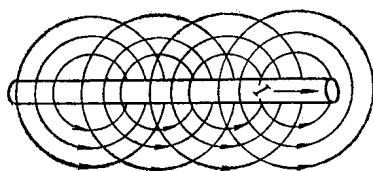


图 2 单根长直导线中的电流及其周围磁力线分布示意图

磁场的强弱还可以用另一个物理量表示，即磁感应强度 B ，它与磁场强度 H 有关，也与介质的导磁特性有关，其表达式为：

$$B = \mu H \quad (\text{T}) \quad (3)$$

式中 μ ——磁导率 (H/m)。

它表征磁介质被磁化程度的量，是衡量各种物质导磁性能好坏的物理量。

由实验确定真空的磁导率 μ_0 为：

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \quad (\text{H/m})$$

为了便于比较各种物质的导磁性能，需要引入相对磁导率的概念。任何一物质的磁导率 μ 与真空磁导率 μ_0 的比值叫相对磁导率 μ_r ：

$$\mu_r = \mu / \mu_0 \quad (4)$$

$$\text{或} \quad \mu = \mu_r \mu_0 \quad (5)$$

相对磁导率为无量纲的物理量，它说明在相同的条件下，任一物质的磁感应强度是真空中多少倍。

根据各种物质导磁性质的情况，可将物质分为三种类型。

磁导率 μ 比真空的磁导率 μ_0 稍大一点物质称为顺磁性物质，如空气、铅、锡等，它们的相对磁导率 μ_r 值在 $1.000\ 003 \sim$

1.000 014之间；磁导率 μ 比真空的磁导率 μ_0 略小一点物质称为反磁性物质，如氢、铜、石墨、银、锌等，它们的相对磁导率 μ_r 值在0.999 995~0.999 97之间。磁导率 μ 远大于真空的磁导率 μ_0 的物质称为铁磁性物质，如铁、钢、铸铁、镍、钴等，它们的相对磁导率 μ_r 大到几百至几千，而且不是常数。例如，钢的温度超过居里点（磁性转变点）770℃，其磁导率下降为1。在电流强度等条件相同的情况下，铁磁性物质中所产生的磁场比顺磁性物质和反磁性物质中的磁场强几千甚至几万倍以上。工厂中用于感应加热的零件材料一般都由铁磁物质构成。图3是室温下工业纯铁与不同成分的钢的磁导率 μ 随磁场强度 H 的变化曲线。

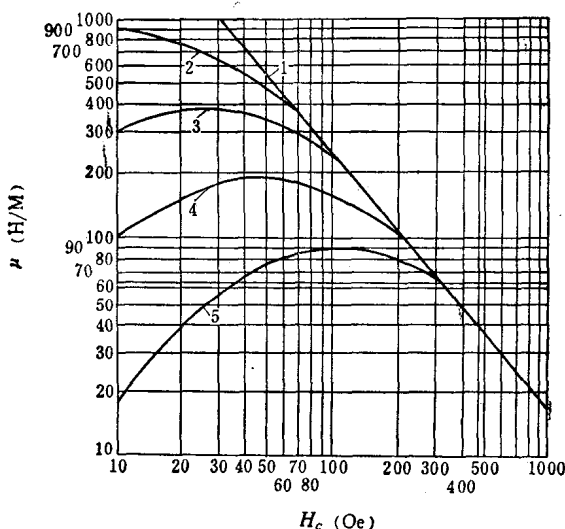


图3 室温下磁导率 μ 与磁场强度 H 的关系

1—工业纯铁 2—含C 0.3%的钢 3—含C 0.45%的钢 4—含C 0.6%的钢 5—含C 0.83%的钢

注：1 Oe $\approx$ 79.6 A/m

在磁场里，垂直穿过某一横截面积 S 的磁力线根数叫做磁通量 ϕ ，用下式表示：

$$\phi = BS = \mu HS \quad (\text{Wb}) \quad (6)$$

当线圈中通有交变电流时，在线圈的内部及其周围就产生一个交变磁场，置于线圈内部的工件就被交变磁场的磁力线所切割，于是在铁磁材料的工件上将有感应电动势产生，并在电动势作用下产生涡流（见图4）。按电磁感应定律，感应电动势 e 可用下式求得：

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (\text{V}) \quad (7)$$

由于感应加热的电流是按正弦规律变化：

$$I = I_m \sin 2\pi ft$$

所以该电流所产生的磁通的变化也遵循正弦规律变化：

$$\phi = \phi_m \sin 2\pi ft$$

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

于是得感应电动势 e ，

$$e = -\phi_m 2\pi f \cos 2\pi ft \quad (8)$$

零件中涡流回路的阻抗 Z 按下式计算：

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (\Omega) \quad (9)$$

式中 R ——涡流回路电阻；

X_L ——涡流回路感抗。

则涡流强度 i 等于：

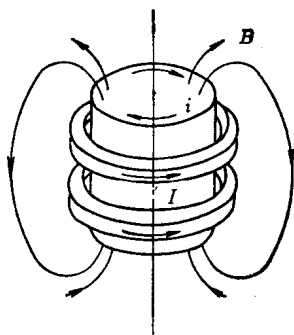


图4 零件在交变磁场中产生涡流

$$i = \frac{e}{Z} \quad (\text{A}) \quad (10)$$

由于 Z 通常很小, i 自然很大, 使涡流回路产生很大热量, 其热量可由焦耳-楞次定律确定:

$$Q = i^2 R t \quad (\text{J}) \quad (11)$$

进行感应加热主要依靠这种热量, 其次磁性材料的“磁滞现象”也能引起一定的热效应。

2 表面效应 (集肤效应) 当直流电通过导体时, 电流在导体截面上的分布是均匀的, 即各处电流密度相等。但是, 当交流电通过圆柱导体时, 电流分布是中心密度小, 越接近表面, 密度越大, 当电流频率相当高时, 导体的中心可以没有电流, 而全部集中在导体的表面层,

电流密度 I_0

这种现象称为高频电流的表面效应, 如图 5 所示。产生表面效应的根本原因是交流电通过导体时产生与外加电动势方向相反的自感电动势, 而自感电动势在圆

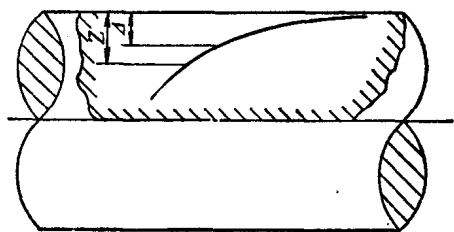


图 5 高频电流的表面效应

柱导体中心最强、表面最弱, 因此使电流趋向表面。

由于表面效应的作用, 导体横截面上的电流密度从表面到中心按指数规律递减, 距表面 Z 处的电流 I_z 由式 (12) 确定:

$$I_z = I_0 e^{-\frac{2\pi}{c} \sqrt{\frac{\mu f}{\rho}} Z} \quad (12)$$

式中 I_0 ——表面电流的最大值;

c ——光速;

μ —— 导体材料的磁导率;

ρ —— 导体材料的电阻率;

f —— 电流频率。

在工程上, 以 I_s 的幅值降到 I_0 的 $1/e$ ($e = 2.178$, 则 $1/e \approx 36.79\%$) 处的深度为电流透入深度, 并用 Δ 表示 (见图 5), 用式 (13) 进行计算。

$$\Delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho 10^9}{\mu f}} = 5.03 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \times 10^4 \quad (\text{mm}) \quad (13)$$

由式 (13) 可知, 电流透入深度 Δ 与 ρ 、 μ 、 f 有关, 当 ρ 增大, μ 、 f 减小时, Δ 将增大。

铁磁性的工件放在感应器中, 感应器通入高频交流电流, 于是在工件表面出现涡流。涡流是由进入工件的交变磁场引起的, 而磁场从工件的表面到心部也是按指数曲线衰减, 因此涡流的最大值也集中在工件的表面, 这也同样称做表面效应。由式 (11) 可知, 热量 Q 与涡流强度 i 的平方成正比, 所以热量的最大值也发生在工件的表面层。由理论计算得知, 电流透入深度 Δ 层内所发生的热量占涡流所发生全部热量的 86.5%。图 6 表示了涡流的分布与表面层所发生热量的关系。

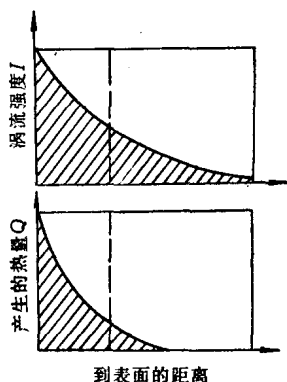


图 6 涡流的分布和
表层热量的关系

钢铁材料在感应加热过程中, 其 ρ 和 μ 是变化的。电阻率 ρ 同磁场强度无关, 但却随温度上升而增大。磁导率 μ 不仅与磁场强度有关 (见图 3), 而且与材料的温度有关, 当温度上升到居里点时减小到 1。例如, 含 C 0.8% 的碳钢从室温 20°C 升高到

800℃时, 电阻率 ρ 由 $\rho_{20^\circ\text{C}} \approx 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$, 升高到 $\rho_{800^\circ\text{C}} \approx 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$, 而磁导率由 $\mu_{20^\circ\text{C}} \approx 100$ 降到 $\mu_{800^\circ\text{C}} = 1$ 。从式 (13) 可以看出, 当电流频率 f 不变时, 由于 ρ 和 μ 的变化可以有不同的电流透入深度, 材料在室温下的电流透入深度称为冷态电流透入深度, 用 $\Delta_{20^\circ\text{C}}$ 或 $\Delta_{\text{冷}}$ 表示。由于此时 ρ 和 μ 基本是定值, $\Delta_{20^\circ\text{C}}$ 只与频率 f 有关:

$$\text{紫铜的冷态电流透入深度: } \Delta_{20^\circ\text{C}} \approx \frac{67}{\sqrt{f}} \quad (\text{mm}) \quad (14)$$

$$\text{结构钢的冷态电流透入深度: } \Delta_{20^\circ\text{C}} \approx \frac{20}{\sqrt{f}} \quad (\text{mm}) \quad (15)$$

材料在高温时的电流透入深度称为热态电流透入深度, 例如1000℃时的热态电流透入深度用 $\Delta_{1000^\circ\text{C}}$ 或 $\Delta_{\text{热}}$ 表示。这是感应淬火选择频率时的重要参数。此时由于 ρ 与 μ 已是定值, 所以 $\Delta_{1000^\circ\text{C}}$ 和 $\Delta_{800^\circ\text{C}}$ 也只与频率 f 有关, 对于结构钢可用式(16)、式 (17) 计算:

$$\Delta_{1000^\circ\text{C}} \approx \frac{600}{\sqrt{f}} \quad (\text{mm}) \quad (16)$$

$$\Delta_{800^\circ\text{C}} \approx \frac{500}{\sqrt{f}} \quad (\text{mm}) \quad (17)$$

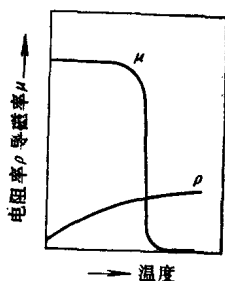


图7 钢的 ρ 、 μ 与温度的关系示意图

图7是钢的 ρ 和 μ 与温度的关系曲线。

表1是不同材料在不同温度不同电流频率下的电流透入深度。

3 邻近效应 两邻近的导体, 例如两汇流排或感应线圈与被感应加热的零件, 在有电流通过的情况下, 由于电流磁场的相互作用, 在导体上的电流将重新分布, 这种现象被称为邻近效应。

表 1 各种材料在不同电流频率下的电流透入深度

材 料	温度 (°C)	电阻率 ($\times 10^{-6}$ $\Omega \cdot \text{cm}$)	磁导 率 (H/ m)	在下列电流频率时 (Hz) 电流透入深度 (mm)						
				50	10^3	2.5×10^3	8×10^3	150×10^3	250×10^3	500×10^3
结构钢	20	10	60	2.8	0.64	0.4	0.22	0.05	0.04	0.03
奥氏体钢	20	20	1	32.2	7.15	4.5	2.5	0.58	0.46	0.32
结构钢和奥氏体钢	1000	130	1	85.5	19.0	12.0	6.7	1.55	1.2	0.85
铝	20	2.9	1	12.0	2.7	1.7	0.95	0.21	0.17	0.12
铝	600	11.3	1	24.0	5.4	3.4	1.7	0.42	0.34	0.24
紫 铜	20	2.0	1	9.5	2.1	1.34	0.75	0.16	0.13	0.095
黄 铜	20	7.0	1	18.7	4.2	2.57	1.48	0.32	0.26	0.19
黄 铜	650	14.7	1	27.4	6.1	3.86	2.16	0.47	0.39	0.27

应。

如图 8 a 所示的两根矩形截面的导体通有大小相等、方向相反的交变电流，其邻近效应的表现为电流在两导体内侧的表面层流过，导流层的厚度就是电流透入深度。在磁场方面的表现是，两导体之间磁场强度增强，两导体的外侧磁场强度减弱。产生这种邻近效应的原因是两导体之间的总磁通不仅通过中间的空气，也从导体内部通过，所以各条电流线交链的磁通量不同，导体外侧的电流线交链的磁通比内侧的多，因此感应电动势外侧比内侧大，致使电流从导体内侧通过。

如图 8 b 所示的两根矩形截面的导体通有大小相等、方向相同的交变电流，其邻近效应的表现为，电流在导体外侧的表面层流过，导流层的厚度就是电流透入深度。在磁场方面的表现是，两导体内侧磁场互相抵消，强度最弱，而导体外侧磁场叠加，强度最强。产生这种效应的原因是两导体内侧电流线所交链的磁通

大于导体外侧电流所交链的磁通，因此导体内侧的感应电动势大于外侧的感应电动势，使电流趋于外表面。

邻近效应不局限于两矩形截面的导体，两圆形截面的载流导体同样也会出现邻近效应，其表现形式与矩形截面的载流导体时的情况相同。

同轴电缆导体上电流的分布也决定于邻近效应。同轴电缆，是由中间的圆柱形导体和其外部套着的管子组成，两者中轴线重合，见图9所示。图中两条电路，其中电路1由内导体轴线和外导体外表面组成，电路2由内导体表面和外导体内壁组成。当然电路的末端联在一起，使电路闭合。很明显，沿电路1中的电流线将比沿电路2中的电流线

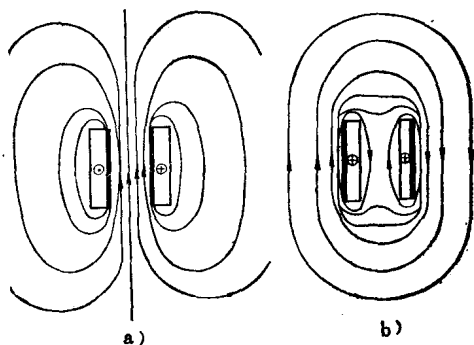


图8 反向及同向交变电流所表现的邻近效应

a) 反向电流 b) 同向电流

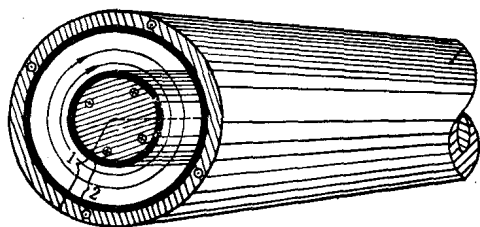


图9 同轴电缆中的邻近效应

交链更多的磁通，具有更大的感应电动势，使电流阻抗增加，于是电流只在电路2通过，形成了同轴电缆的邻近效应。

同轴电缆在输送高频或中频电能时，远比矩形截面或其他截面的导线阻抗小，材料利用率高。

邻近效应在感应线圈与被感应加热的零件之间也有表现。图

10是邻近效应对涡流分布的影响。图 a 表明有效导体是单根圆管用于加热平板时，平板上的涡流呈圆弧状，并与圆管导体相对应；图 b 表明有效导体是单根方管时，平板上的涡流层是平直的；图 c 是圆环感应器用于加热实心圆柱零件时，间隙各处均等，有效圈上的电流层和零件表面的涡流层均是平直而均等的；图 d 表明圆环感应器内零件放斜了，造成间隙各处不等，在间隙小的地方感应器上的高频电流层及零件上的涡流层都比较厚，而间隙大的地方两者都比较薄。

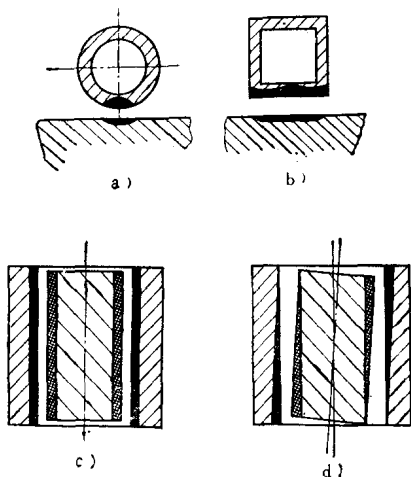


图10 邻近效应在感应加热时的表现

a) 单根圆管导线加热平板 b) 单根方管
导线加热平板 c) 圆环感应器间隙均等时
加热零件 d) 圆环感应器间隙不
等时加热零件

导体之间的距离越小，邻近效应越强烈（图11）；电流频率越高，邻近效应越强烈。

高、中频供电系统的母线和电缆及感应器汇流排的设计都要充分利用邻近效应，在保证绝缘强度的情况下，其间距越小越好，可以明显地减少回路阻抗。

4 圆环效应 圆环形的导体通入高频（或中频）交变电流时所产生的磁场在环内空间集中，环外分散，见图12。环内的磁通不仅穿过环外空间，同时也穿过环形导体自身，这样就使环形导体外侧交链的磁通多于内侧，于是环形导体外侧产生较大的感应电动势，迫使电流在环形导体内侧的电流透入深度层中流过，

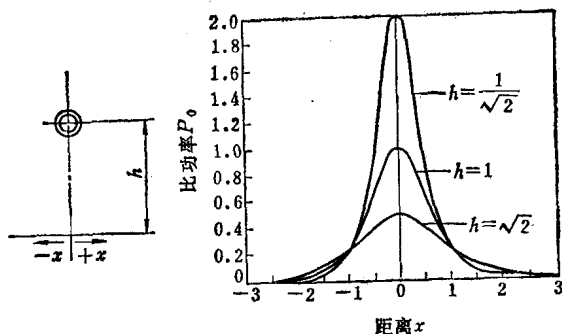


图11 导体间的距离对邻近效应的影响

这种现象称为高频电流的圆环效应。

用圆环效应也可以解释螺旋管形多匝线圈中的电流分布情况，电流将沿螺旋管形多匝线圈的内侧电流透入深度的层中流过。如果在螺旋管形线圈中放入一个圆柱形的钢质工件，如图13。当线圈中通入高频电流，由于圆环效应的作用，电流将沿线圈的内侧流过。由于磁通集中于线圈内部，在圆柱形工件上产生

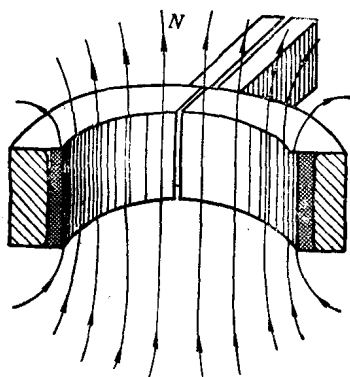


图12 圆环效应

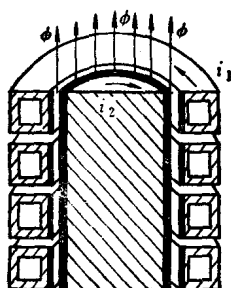


图13 多匝螺旋管形线圈中置入圆柱形工件时的电流分布