

402308

铸造用感应电炉

李恩琪 殷经星 张武城 编著



机械工业出版社

前 言

《铸铁用感应电炉》于1984年出版后因其内容丰富，实用性强而颇受该专业的工程技术人员、技术工人及专业师生的欢迎，遂于1985年再次印刷发行以飨读者，不久又告罄尽。

近10多年来，由于电力供应状况日趋改善，国内在铸造生产中愈来愈多地采用感应电炉进行金属的熔化、保温和浇注作业。在“七五”和“八五”计划中，感应电炉常常是铸造车间建设和技术改造中优先考虑的选用设备。据不完全统计，在此期间引进的铸造用感应电炉数量超过200多台套。这不仅是由于感应电炉与其它类型的金属熔炼设备相比有着熔化能耗低、金属烧损小、化学成分控制方便、操作灵活、方便等优点，而且由于感应电炉的作业环境好，对环境污染（包括噪声）小，便于生产组织和管理等优点所致。

随着电子技术的飞速发展，配置固态电路静止变频装置的中频感应电炉在国外几乎已替代了在60~80年代初曾得到广泛应用的工频感应电炉（除沟槽式感应电炉外）。在国内，它在铸造生产用的感应电炉应用中所占的比重也愈来愈大，有替代工频感应电炉的趋势。中频感应电炉不仅在铸铁的熔化、保温和浇注作业方面得到了广泛的应用，且由于它适合于批料（间歇）熔化作业以及对金属熔液搅拌力的可调节特点，使得它在耐热合金钢熔炼及有色金属熔化方面的应用也日趋扩大。因此，从事感应电炉设计和制造、铸造车间工艺设计以及在现场从事感应熔炼、保温和浇注作业的工程技术人员、技术工人迫切希望能得到一本较为全面地、系统地介绍它的工作原理、技术发展、设备选型及应用和维修等方面的参考书籍。为此，我们在原书的基础上修订了《铸造用感应电炉》一书，以满足读者的需要。根据技术的发展和该书出版后读者的意见作了如下的增删：

- 1) 将原来的阐述对象从铸铁扩大到包括有色金属在内的各种金属的感应熔化、保温及浇注作业的应用；
- 2) 增加近10年来发展的配置固态电路静止变频电源的中频电炉设备及其应用的内容；
- 3) 增加近10年来我国有关政府部门制订和颁布实施的与感应电炉的制造及应用有关的能源、产品分级及环保等方面的标准；
- 4) 删除原书中落后的技术内容以及与本书阐述对象偏离较大的内容，力求内容简炼；
- 5) 按法定计量单位对原书的有关计量单位作全面修改。

本书的编写工作由李恩琪、颜文非（西安机电研究所）、殷经星（上海市机电设计研究院）、张武城（北京市机电研究院）分工完成。全书由殷经星统编与审校。

本书编写过程中承蒙颜竹芳先生、长沙石英砂厂钟军厂长和上海盛江特种耐火材料厂卓龙妙厂长等提供了不少技术资料，在此深表谢意。

美国PILLAR、INDUCTOTHERM、AJAX公司，德国JUNKER公司及瑞士ABB公司也为本书提供了最新的技术资料，在此谨致谢意。

由于我们的理论和实践经验有限，书中错误和不足之处在所难免，敬请读者指正。

编 者

1996年7月

目 录

前言

第一章 概述 1

第一节 感应加热的基本概念 1

一、电磁感应与感应加热 1

二、电流分布和交流电效应 2

第二节 感应电炉的分类和用途 3

第三节 感应电炉的特点 4

第四节 发展趋向 5

第二章 坩埚式感应电炉 7

第一节 坩埚式感应电炉的工作原理及特点 7

第二节 坩埚式感应电炉的设计计算 11

一、电炉容量及坩埚几何尺寸的确定 11

二、频率的选择 13

三、电炉热损失计算 14

四、“感应器—金属炉料”系统有功功率 20

五、“感应器—金属炉料”系统电参数计算 21

六、磁轭计算 25

七、设备能量平衡 28

八、计算举例 29

九、经验估算法 40

第三节 炉型和机械结构 42

一、炉型 42

二、炉体 46

三、炉体倾侧力矩的计算 59

四、炉盖及其起闭机构 66

五、倾炉机构 69

第四节 冷却水系统及设计计算 76

一、对冷却水水质的要求和常用水处理办法 77

二、冷却水系统设计要点和典型冷却水系统 81

三、冷却水计算 86

四、使用维护和检查 92

第五节 坩埚式感应电炉标准及典型布

置 93

一、坩埚式感应电炉的标准 93

二、坩埚式感应电炉设备布置 97

参考文献 102

第三章 沟槽式感应电炉 103

第一节 沟槽式感应电炉的基本原理 103

一、工作原理和特点 103

二、熔沟中液态金属受力情况 105

第二节 沟槽式感应电炉的设计计算 107

一、电炉的输入功率及感应体数量选择 108

二、感应体电气参数设计计算 108

三、计算举例 116

第三节 炉型和机械结构 122

一、结构特点和熔化特点 122

二、炉型 124

三、感应体及其结构 126

四、感应体的快速更换 130

第四节 熔沟部位炉衬蚀损状况的判断 131

一、 $R-X$ 曲线图法 131

二、 $\Delta\theta-\tau$ 图法 137

三、日常记录表 139

参考文献 139

第四章 感应电炉的电气设备 140

第一节 工频感应电炉电源系统 140

一、主电路 140

二、仪表 142

三、保护 142

第二节 功率因数自动调节 143

一、计算机功率因数自动调节系统 144

二、采用可编程序控制器的功率因数自动调节系统 144

第三节 三相平衡原理及自动调节 146

一、电容—电抗平衡装置工作原理 146

二、三相平衡自动调节 149

第四节 漏炉报警和地漏监视装置 150

一、接触式漏炉报警装置工作原理 150

二、地漏监视装置工作原理	151	一、光学高温计	230
第五节 固态中频电源	152	二、浸入式快速微型热电偶及其它热 电偶	232
一、特点和分类	152	三、辐射温度计和比色温度计	233
二、并联谐振中频电源	152	第四节 铁液的运送和称量	234
三、串联谐振中频电源	164	一、浇包运送	234
四、串并联谐振中频电源	167	二、管道运送	238
五、中频电源的保护	168	三、铁液称量	239
第六节 电源与电炉的配置方式	169	第五节 改善作业环境	240
第七节 感应电炉母线的布置、选择及 参数计算	170	一、感应电炉的消烟除尘	240
一、母线的布置	170	二、感应电炉的通风	244
二、母线的选择	171	三、高次谐波对电网污染的防治	246
三、母线电参数计算	172	参考文献	248
第八节 感应电炉对电网的影响及对策	176	第七章 感应电炉的作业	249
一、串联谐振	176	第一节 坩埚式感应电炉的熔化作业方 式	249
二、冲击电流	177	一、熔化时的若干冶金学问题	249
三、电压不平衡	177	二、作业制度的选择	255
四、谐波	177	三、批料熔化法	259
参考文献	180	四、运行指标	261
第五章 炉衬材料和筑炉	181	五、中频电源与电炉的配置	262
第一节 炉衬耐火材料的分类	181	六、配置双重输出电源的电炉的熔化 作业	266
一、感应电炉对炉衬耐火材料的要求	181	第二节 炉前成分调整	267
二、炉衬耐火材料按化学成分分类	183	一、取样时间	267
第二节 坩埚式感应电炉的炉衬材料及 其筑炉	183	二、铁液内各类元素的烧损及添加	267
一、坩埚炉衬的结构形式	183	第三节 感应双联熔炼作业	274
二、硅砂炉衬	185	一、感应双联熔炼及其经济性	274
三、中性、碱性炉衬	207	二、感应双联熔炼的形式	275
第三节 沟槽式感应电炉的炉衬材料及 其筑炉	211	三、感应保温电炉	277
一、酸性硅砂炉衬材料	212	四、感应双联作业的熔炼特点	278
二、中性炉衬材料	212	五、保温电炉容量和功率的选择	280
三、碱性炉衬材料	216	第四节 计算机在熔化、保温和浇注工 序中的应用	282
四、面料及隔离料	217	一、熔化工序中的计算机过程控制	283
参考文献	218	二、保温和浇注电炉的控制系统	287
第六章 感应电炉的辅助设施	219	第五节 有色金属合金的感应熔炼	288
第一节 配料和装料设备	219	一、铜合金的感应熔炼	290
一、机械化装料设备	219	二、铝合金的感应熔炼	298
二、炉料运送方式及设备布置	220	三、锌合金的感应熔炼	303
第二节 炉料预热设备	223	参考文献	304
一、炉料预热目的及效果	223	第八章 感应电炉的安装、运行、维 护和安全操作	305
二、预热设备	224		
第三节 金属熔液的温度测量	230		

第一节 感应电炉的安装和运行	305
一、安装前的准备工作	305
二、电炉及电气设备的安装调试	305
三、感应电炉试炉及运行过程中的注 意事项	307
第二节 日常维护、检修要点	308
第三节 安全操作注意事项及事故处理 方法	313
一、感应电炉的保护装置	313
二、安全操作注意事项	314
三、事故处理方法	314
参考文献	316
第九章 感应电炉在浇注作业方面 的应用	317
第一节 倾侧式浇注电炉	318
一、坩埚式感应浇注电炉	318
二、沟槽式感应浇注电炉	318
第二节 气压式及气压-塞杆式浇注电炉	320
一、定量浇注	322
二、气压控制系统	324
三、气压-塞杆式浇注系统	330
四、带中间包的浇注系统	333
五、孕育处理和镁处理工艺的发展	335
六、浇注电炉的容量和功率的选择	337
七、炉衬材料与铁液性质的配合	340
八、生产应用实例	340
第三节 塞杆底注式浇注电炉	341
一、塞杆底注式浇注电炉的特点和形 式	341
二、塞杆底注法的定量原理和自动控 制	346
三、塞杆和浇口砖	348
第四节 电磁泵式浇注电炉	350
一、电磁泵的工作原理及分类	350
二、电磁泵式浇注电炉的结构及平面 布置	352
三、电磁泵式浇注电炉的优点及问题	354
参考文献	355

附录	356
附录 I 符号意义及说明	356
表 I-1 本书主要符号及其代表意义 和单位	356
表 I-2 本书所用基本单位及其国际 符号	359
附录 II 金属材料的物理性质	359
表 II-1 被熔金属材料的有关物理参 数	359
表 II-2 金属的比焓 i_{cA} ; i_2	361
表 II-3 被熔金属液和耐火材料的辐 射率 ϵ	362
附录 III 常用耐火材料和绝热材料的主 要性能	363
表 III-1 常用耐火制品的主要性能	363
表 III-2 常用绝热材料(制品)的主 要性能	366
表 III-3 粘土质和高铝质耐火混凝土 理化指标	368
表 III-4 常用耐火混凝土配制方法及 养护制度	369
表 III-5 中国耐火锥号、塞格火度锥 号与温度对照表	370
表 III-6 金属筛网规格表	370
附录 IV 常用电工材料技术性能和规格	371
表 IV-1 工频单条矩形母线载流量	371
表 IV-2 工频多条矩形母线载流量	372
表 IV-3 工频单相交错组合矩形铜母 线长期容许电流	373
表 IV-4 工频单相交错组合矩形铝母 线长期容许电流	374
表 IV-5 绝缘材料耐热分级	375
表 IV-6 常用绝缘漆	375
表 IV-7 玻璃纤维带、漆布带和粘带	376
表 IV-8 层压制品	377
附录 V 感应电炉及配套设备(材料)生 产厂一览表	378

第一章 概 述

第一节 感应加热的基本概念

一、电磁感应与感应加热

法拉第于 1831 年建立的电磁感应定律说明，在一个电路围绕的区域内存在交变磁场时，电路两端就会产生感应电动势，当电路闭合时则产生电流。感应电动势的大小等于磁通变化率，其方向决定于磁通增量的正负，可用公式表示为

$$e = - N \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d\Psi}{dt} \quad (1-1)$$

式中 e ——电动势瞬时值；

Φ ——电路内的总磁通；

Ψ ——电路的磁链；

t ——时间。

如果磁通按正弦变化，则电动势的有效值可写成

$$E = 4.44 f N \Phi \quad (V) \quad (1-2)$$

式中 f ——频率；

N ——匝数；

Φ ——磁通的振幅值。

感应电炉中有一个感应线圈，当它通上交流电时即建立交变磁场。要加热的金属炉料放置于交变磁场中，由于电磁感应作用，金属炉料内产生电流，电流通过金属炉料电阻时使金属炉料发热。可见，感应电炉是应用电磁感应原理将电能传递给金属炉料，而电能变换为热能的方式属于电阻加热。1840 年焦耳确定了电阻发热的关系式

$$Q = I^2 R t \quad (J) \quad (1-3)$$

式中 Q ——电流通过电阻产生的热量 (J)；

I ——电流 (A)；

R ——金属炉料等效电阻 (Ω)；

t ——通电时间 (s)。

感应电炉主要是利用这个热量使金属炉料发热熔化。

要进行感应加热，必须满足两个基本条件：用交流电；被加热的物体必须是金属材料。

在感应电炉中，传递给金属炉料的功率正比于金属炉料的电阻率和磁导率，这也就是说，高电阻金属材料（如铸铁、钢等）比低电阻金属材料（如铜、铝）的加热效果好；铁磁性材料（居里点前）要比非铁磁性材料加热效果好。在加热过程中，炉料得到的功率也将因电阻率和磁导率的变化而变化。一般金属材料的电阻率随温度的升高而增加，非铁磁性材料的磁导率与温度无关，磁性材料的磁导率，在居里点前与温度关系不大，在居里点后急剧下降。图 1-1 示出 45 钢的电阻率和磁导率相对变化曲线。

二、电流分布和交流电效应

交流电流在导体上的分布是不均匀的，它受集肤效应、邻近效应和圆环效应的影响。

集肤效应是指交流电流在导体表面密度最大，越向中心越小。集肤效应是由载流导体自身磁场所造成的。导体自身磁场在导体内建立反电动势，它的方向与外加电动势相反。在导体内部几层，穿透的磁通最多，反电动势也最大；在导体外面几层，穿透的磁通较少，反电动势也小。因此，导体表面的合成电动势比里面几层的合成电动势大，致使电流分布趋向表面。电流密度从表面向里面近似按指数曲线迅速衰减，如图 1-2 所示。在距离表面 x 处的电流密度可用下式求出：

$$I_x = I_0 e^{-x/\delta} \quad (1-4)$$

式中 I_x ——距表面 x 处的电流密度 (A/cm^2)；

I_0 ——表面电流密度 (A/cm^2)；

e ——自然对数底 ($e \approx 2.718$)；

δ ——电流透入深度 (cm)。

电流透入深度是指电流密度减少到表面电流密度的 $1/e$ 时距离表面的距离 (见图 1-2)。 δ 用下式表示：

$$\delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \quad (\text{cm}) \quad (1-5)$$

式中 ρ ——导体材料电阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)；

μ_r ——导体材料相对磁导率；

f ——电流频率 (Hz)。

当导体为圆柱形 (如坩埚式感应电炉中的金属炉料) 时，导体内电流的总和可认为等于在 δ 层内均流过与表面电流同样大小的电流密度 (I_0) 时的电流总和。在 δ 层内的能量为全部能量的 86.5%。

几种金属材料的电阻率 ρ 和 50Hz 时的电流透入深度 δ ，见下表。

金属电阻率 ρ 及电流透入深度 δ (50Hz 时)

项 目		$\rho_{20^\circ\text{C}}$ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	$\rho_{\text{液态}}$ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	$\delta_{\text{液态}}$ (cm)
金 属 及 其 合 金	钢	10×10^{-6}	110×10^{-6}	7.46
	铸铁	10×10^{-6}	136×10^{-6}	8.30
	锌	$6.0 \times 10^{-6} \sim 6.2 \times 10^{-6}$	$33.4 \times 10^{-6} \sim 36 \times 10^{-6}$	4.11~4.26
	H62 黄铜	6.8×10^{-6}	40×10^{-6}	4.50
	H68 黄铜	7.0×10^{-6}	38.5×10^{-6}	4.41
	H90 黄铜	4.2×10^{-6}	28×10^{-6}	3.76
	铝	2.9×10^{-6}	24×10^{-6}	3.49
	镍	$10 \times 10^{-6} \sim 12 \times 10^{-6}$	$108 \times 10^{-6} \sim 109 \times 10^{-6}$	7.39~7.42
	硬铝	4.95×10^{-6}	28×10^{-6}	3.76
	铜	1.75×10^{-6}	21×10^{-6}	3.26

注：由 ρ_{20} 换算到其它温度电阻率的公式： $\rho_\theta = \rho_{20} [1 + \alpha (\theta - 20)]$ ， α 为电阻温度系数， θ 为温度。

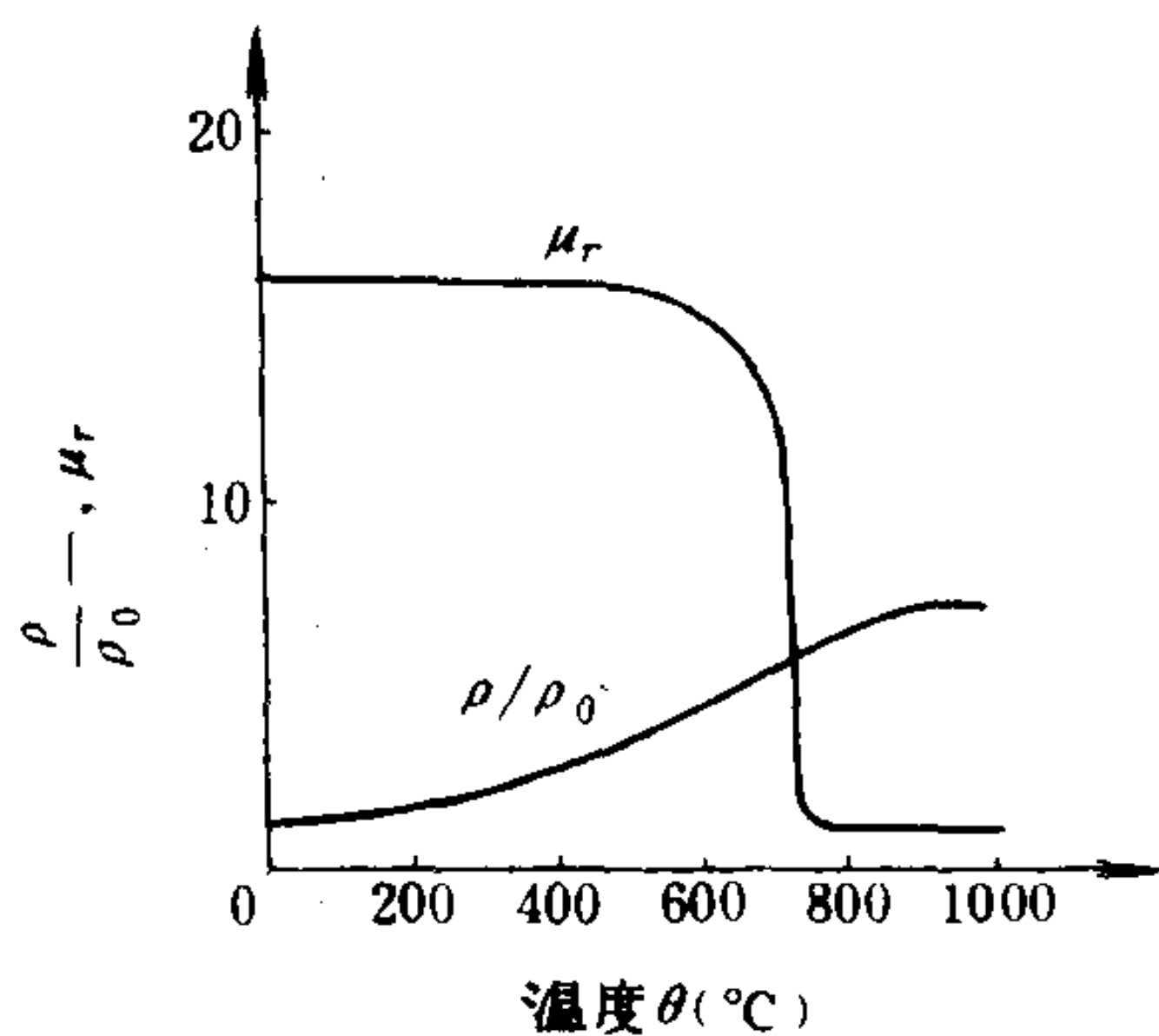


图 1-1 45 钢电阻率 ρ 、磁导率 μ 与温度的关系曲线

μ_r —相对磁导率 ρ_0 —0°C 时的电阻率

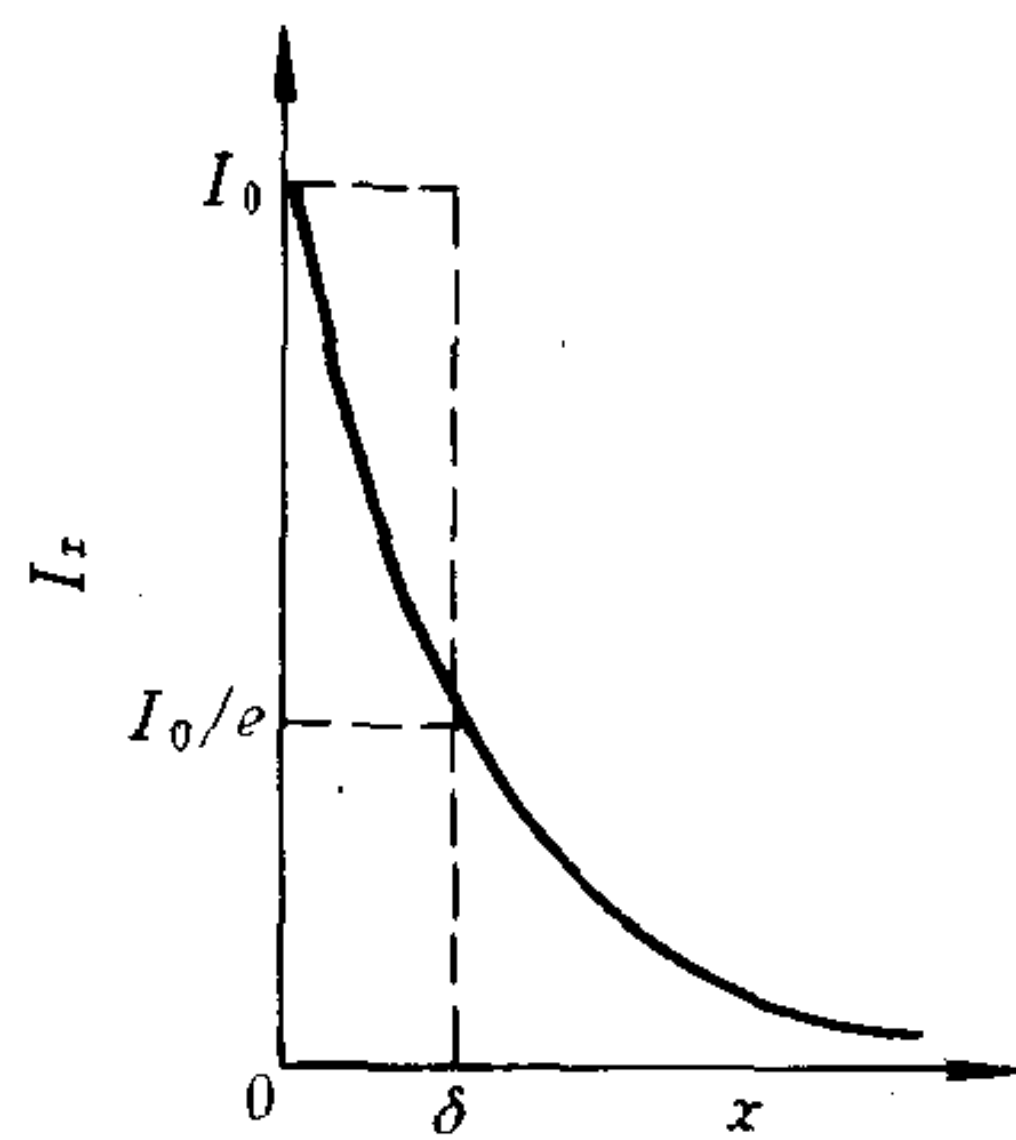


图 1-2 电流密度衰减曲线

同一种金属材料在各种频率时的电流透入深度可按式换算

$$\delta_f = 7.07 \sqrt{\frac{1}{f}} \delta_{50} \quad (1-6)$$

式中 δ_f ——频率为 f 时的电流透入深度 (cm);

δ_{50} ——频率为 50Hz 时的电流透入深度 (cm)。

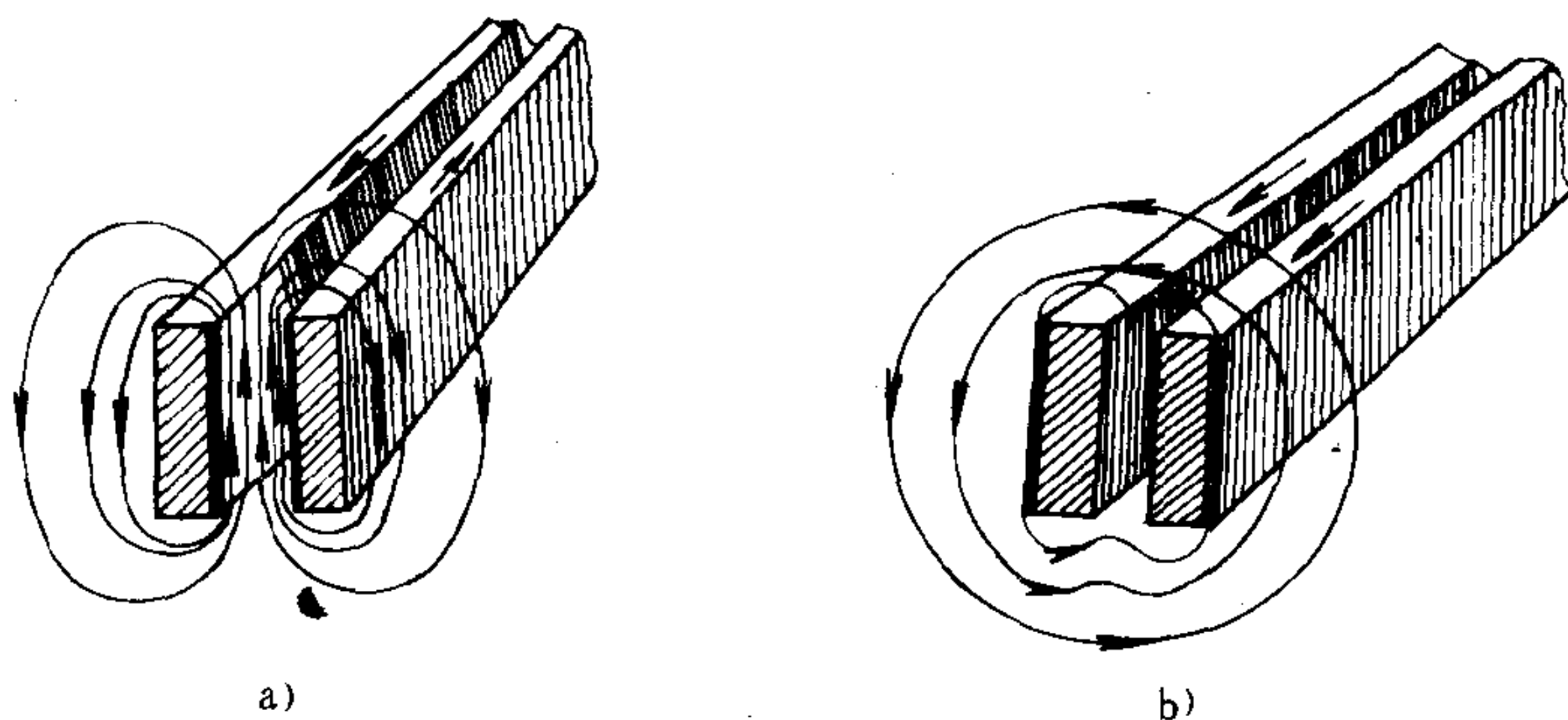


图 1-3 两平行导体在通过交流电情况下磁场及电流分布

a) 两导体电流方向相反 b) 两导体电流方向相同

当两条通有交流电的导体靠近时, 在互相影响下, 两导体中的电流要作重新分布, 这种现象叫邻近效应, 其实质与集肤效应相似。由于邻近效应, 载有反向电流的两条导体靠近时, 电流趋向于导体内侧 (如图 1-3a 所示); 载有同向电流的两条导体靠近时, 电流趋向于导体外侧 (如图 1-3b 所示)。导体间的距离越近, 邻近效应越显著。

当交流电通过螺线管 (或环状线圈) 时, 则电流趋向于导体内侧 (见图 1-4), 这种现象叫圆环效应。

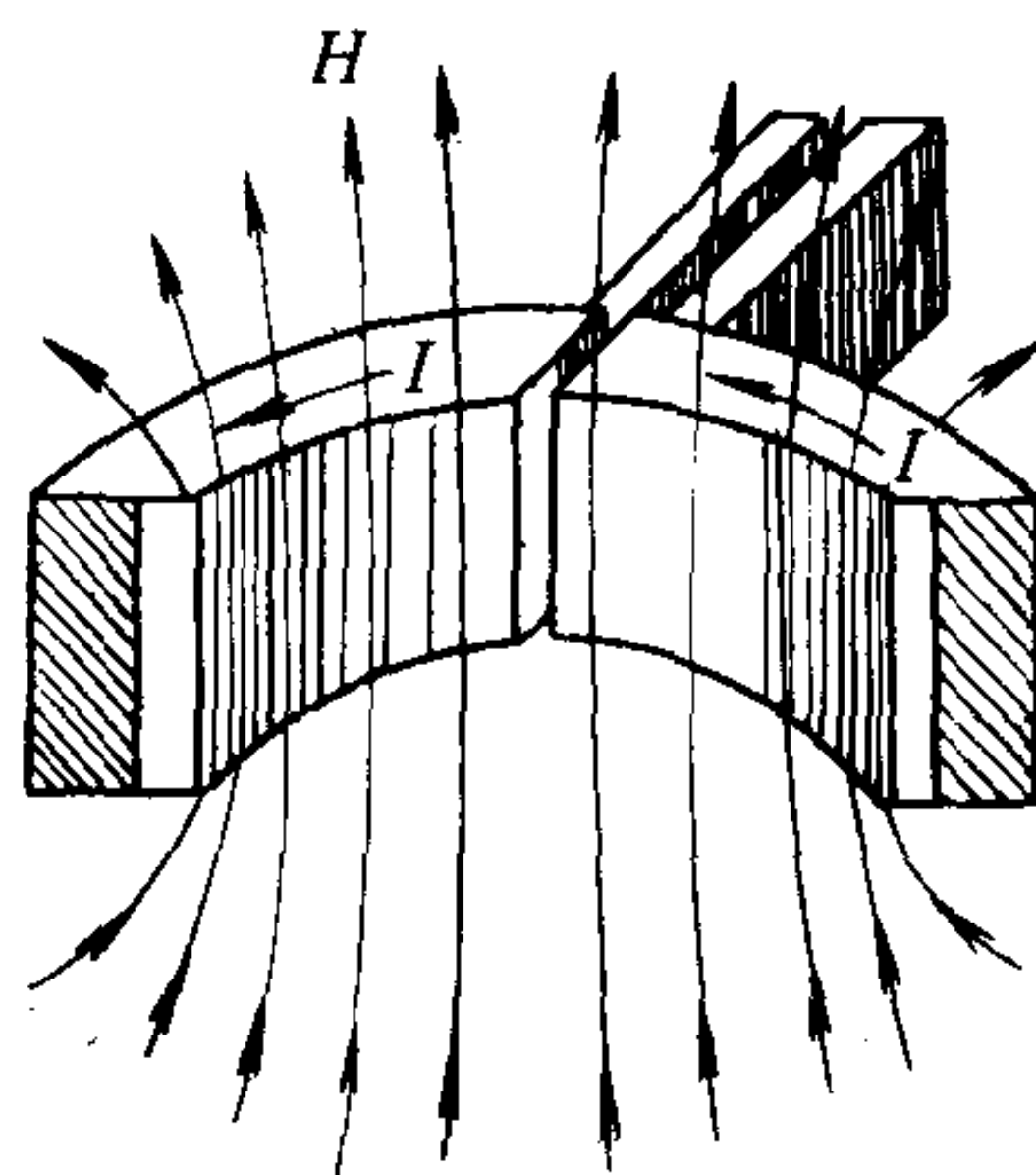


图 1-4 环形导体中的电流分布

第二节 感应电炉的分类和用途

按结构分, 有坩埚式 (通常称为无心感应电炉) 和沟槽式 (通常称为有心感应电炉) 两大类。坩埚式按频率分, 有工频和中频[⊖]。沟槽式又可分为立式和卧式。

在铸造领域, 感应电炉有三种用途: 熔化、保温和浇注。因此, 按用途又有熔化炉、保温炉和浇注炉之分。

工频坩埚式感应电炉主要用于铸铁和有色金属的熔炼。由于电磁搅拌力大, 炼钢时炉衬寿命很短, 因此, 不宜炼钢, 除非能解决耐火材料的寿命问题。对于含气量要求严格的有色金属 (如无氧铜) 也不宜用工频坩埚式感应电炉。工频坩埚式感应电炉作保温炉用时, 感应线圈较短, 约为坩埚高度的 1/4。

中频坩埚式感应电炉适用于钢铁及有色金属的熔炼和保温。与工频坩埚式感应电炉相比,

[⊖] 是指工频以上到 10000Hz 的频率范围。

中频坩埚式感应电炉的优点是功率密度大，起熔方便，不需要三相平衡装置，在同等生产率条件下，炉体尺寸小。由于它可以倒空，更便于变换金属品种。

坩埚式感应电炉的特点是炉衬形状简单，筑炉方便，易于检查和修补炉衬，可随开随停。

沟槽式感应电炉主要用于铜、铝、锌等有色金属的熔炼、保温和铸铁的保温，以及浇注线上用作浇注炉。

沟槽式感应电炉的特点是炉子电效率和功率因数比坩埚式感应电炉的高。缺点是沟槽部分耐火材料不易检查和修补，不生产时也需要通电保温，变换金属品种困难。它较适用于单一品种的生产。

第三节 感应电炉的特点

近年来，在铸造生产中，广泛采用感应电炉。这是因为感应电炉具有较多的特点。

1. 熔炼工艺稳定，铸件有较高的机械强度 在感应电炉中，可以熔炼各种成分的铸铁，由于熔炼过程中氧化损耗少，又能较方便地调节铁液的成分和温度，获得的铁液质量较稳定。一般情况下，使用感应电炉代替冲天炉熔炼铸铁，往往能使铸件的废品率降低 $1/2 \sim 2/3$ ，这就给企业带来较高的经济收益。

最近几年，国外出现了高强度低应力铸件的生产新工艺。其方法是在配料中使用 $40\% \sim 80\%$ 的废钢，首先得到低碳原铁液，再升温到 1450°C 进行增碳处理，并使其化学成分达到工艺规定的数值，然后再将铁液过热到 $1500 \sim 1550^\circ\text{C}$ 保温 $10 \sim 30\text{min}$ ，出炉后进行孕育处理，并严格控制铁液的结晶过冷度。用这种方法生产的铸铁件不但强度高，且其收缩量仅为 0.3% ，因此铸造应力极小，故称为低应力铸件，铸造生产过程就可以免去退火工序，节省能源，并改善环境的卫生条件。而这种低应力铸件的生产是和感应电炉的应用不可分开的。

感应电炉熔炼所获得的铸铁含气量（氮、氢、氧）比冲天炉熔炼的铸铁少 $1/3 \sim 1/4$ ，非金属夹杂物少，铸件强度高，性能可靠。一般情况下可以减少铸件的截面积，使金属材料的消耗降低 $20\% \sim 25\%$ 。节省金属原材料，且使机械设备的重量降低。

2. 用感应电炉熔炼有色金属可减少熔化烧损或实现无氧化熔炼 采用感应电炉熔炼铝或铝合金时，由于无火焰炉膛内强烈的氧化性火焰的冲刷，熔化速度快，再加上近来使用中频感应电炉熔化，以提高熔化速度，降低电磁搅拌，因此熔化时的氧化烧损低于火焰炉。

采用沟槽式感应电炉熔化铜时，由于炉膛易于密闭，易于通入还原性保护气氛防止铜液氧化，致使这种形式感应电炉已成为生产无氧铜线材和棒（板）材的典型理想炉型。

3. 可利用廉价的原材料 在感应电炉熔炼过程中，由于在铁液中存在电磁搅拌作用，特别有利于熔炼各种加工切屑和细小的边角料。这些细小废料加入铁液表面后，很快被卷入铁液之中熔化，氧化烧损较少，而这些细小的废料在其它形式铸铁熔炼炉中是很难直接利用的。由于感应电炉能大量使用各种廉价废料，从而可以大幅度降低炉料的成本。

在使用感应电炉后，虽然电能费用要比燃料费用贵，但由于铸件废品率的减少和炉料成本降低等因素的影响，节省的费用总是大于电费开支的增加，因而电炉设备的投资可以迅速回收。

4. 减少环境污染 由于感应电炉没有能量载体的燃烧生成物，排出的烟气和粉尘较少，发出的噪声也远远低于冲天炉，工人的劳动强度和劳动条件都得到改善，只要条件许可，在

铸铁生产中使用感应电炉熔炼、双联和保温浇注，往往是十分有利的。

应指出，在使用感应电炉后，由于铸件的强度提高，在设备的可靠性得到提高的同时，还可以适当减轻设备的重量；而铸件耐磨性能的提高又延长了设备的使用寿命。设备的可靠性、寿命和重量大小往往能反映一个国家机械制造业水平的高低。由此可知，在铸造生产中感应电炉应用的普及程度也能反映每个国家机械工业水平。因此，根据我国的具体情况，逐步推广和应用感应电炉具有极其重要的意义。

第四节 发展趋向

由于现代机械制造业和冶金工业的飞速发展，对铸件提出了优质、精化和节能三大要求。为适应这些要求，当前感应电炉的发展趋向如下。

1. 中频感应电炉的应用日趋扩大 随着大功率晶闸管变频电源的开发和可靠性的提高，中频感应电炉正在逐步替代工频感应电炉而在铸造业获得愈来愈广泛的应用。目前世界上最大的变频电源功率已达 8000kW。在我国，已投产应用的中频感应电炉已达 20t（配置 5000kW/200Hz 变频电源）。而容量在 1t 及以下的感应电炉几乎已被中频感应电炉替代。

中频感应电炉的优点是：

- 1) 功率密度大，熔化速度快，起熔方便，适合于节能的批料熔化方法。相同容量的先进的中频感应电炉的熔化单耗要比工频感应电炉的低。
- 2) 操作使用灵活方便，适合于经常变换熔化金属品种的场合。
- 3) 可选择电源频率，使中频感应电炉更适合于轻有色金属的熔化。
- 4) 由于功率密度高，无相平衡装置，土建费用小。因此，在国外相同生产率的中频感应电炉的初次投资费用较工频感应电炉低 10%~15%。
- 5) 从冶金学角度看，在中频感应电炉内熔化的金属只存在“一次过热”现象。

正是上述诸优点，使得中频感应电炉在国外已基本上取代了工频感应电炉（除沟槽式感应电炉外），在国内也呈现出取代工频感应电炉的趋势。

2. 坩埚式感应电炉的应用已扩大到铸铁保温领域 由于坩埚式感应电炉（包括短线圈感应电炉和中频坩埚式感应电炉）具有使用灵活；电磁搅拌力量可调整；调节铁液成分及控制铁液温度方便；炉衬耐火材料更换方便等优点，使得坩埚式感应电炉作为铸铁保温炉正日益得到广泛应用。

3. 具有感应加热装置的浇注炉应用迅速扩大 随着各种高效率的铸造生产线的出现，浇注工序机械化和自动化的要求更为迫切。准确的浇注温度是保证获得高质量铸件的重要条件，能贮存一定量金属液的浇注炉有利于组织生产。因此，各国近 20 年来相继开发出来的气压式、塞杆式、气压-塞杆式以及电磁泵式保温浇注炉，迅速改变了铸造浇注工序的落后面貌，提高了铸件质量，减少了废品，取得了良好的经济效益。

4. 计算机（或微处理机）在感应电炉的自身作业、故障诊断、炉况监控乃至熔炼和浇注车间的过程控制方面的应用日益扩大 80 年代后期起，随着配置晶闸管静止变频装置的中频感应电炉的应用日趋扩大，在感应电炉的作业的自动控制（如根据加入炉料量和预设浇注温度，自动投入必需的电功率），变频装置的故障自动诊断系统以及炉况监控等方面的工作均逐渐由微处理机来完成，大大地减轻了劳动强度，提高了感应电炉的作业可靠性。

90年代起出现的由微处理机实现的一个电源同时向两台电炉以随意的功率比例的供电控制方法,使电源的功率利用系数几乎可以达到100%,无论从节能的角度还是作业灵活性的角度来看,均是一个巨大的进步。

在浇注电炉方面,微处理机的应用使得浇注作业的自动化程度和浇注精度得到进一步的提高。

熔炼过程的计算机控制实现了整个熔炼过程中前后各个工序的合理的衔接。该控制系统大致可包括如下四个方面。

- 1) 原材料管理(如配料计算、配料优化、库存管理、化学成分的调整等);
- 2) 熔炼过程控制(如电能调节与温度控制,保温作业控制,炉衬自动烧结等);
- 3) 炉况监控(如冷却水温监控及故障诊断与报警);
- 4) 数据存储及评价。从管理角度看,炉次、班、日、周、月的各项数据存储及对它们的统计和评价,对提高铸件质量、降低能耗、提高生产率都有重要的意义。

第二章 坩埚式感应电炉

第一节 坩埚式感应电炉的工作原理及特点

坩埚式感应电炉示意图见图 2-1。由铜管绕制成的感应线圈绕在坩埚外面，金属炉料装在坩埚内。当感应线圈通以交流电时产生交变的纵向磁通，一部分磁通穿过金属炉料，在金属炉料表面一定深度内产生感应电流，金属炉料因此发热直到熔化。在整个金属炉料的加热过程中，热量从金属炉料表面向中心传递。

坩埚式感应电炉中漏磁通较大，自然功率因数很低，一般在 0.15~0.25 (对铸铁而言)。漏磁通产生的无功功率需要用电容器进行补偿。感应线圈与补偿电容器组成振荡回路，当谐振时，“感应器—金属炉料”系统对外电路来说为纯阻性负载，这时功率因数为 1。为了减少漏磁，往往在感应线圈外面装有一组由硅钢片叠成的导磁体。导磁体也起着感应线圈径向定位作用。

感应线圈和金属炉料中的电流方向和电流密度的分布，见图 2-2 和图 2-3。

金属炉料吸收的单位功率可用下式^[1]表示：

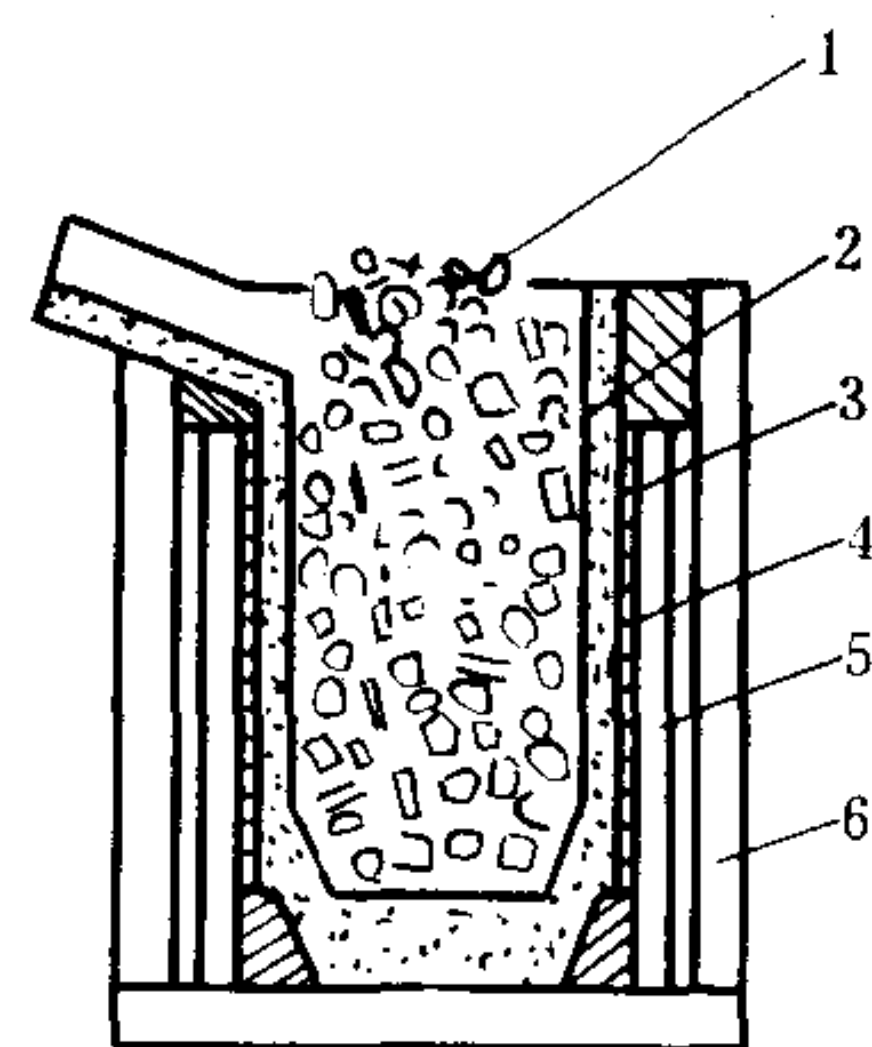


图 2-1 坩埚式感应电炉示意图

1—金属炉料 2—耐火材料坩埚 3—冷却圈 4—感应线圈 5—导磁体 6—构架

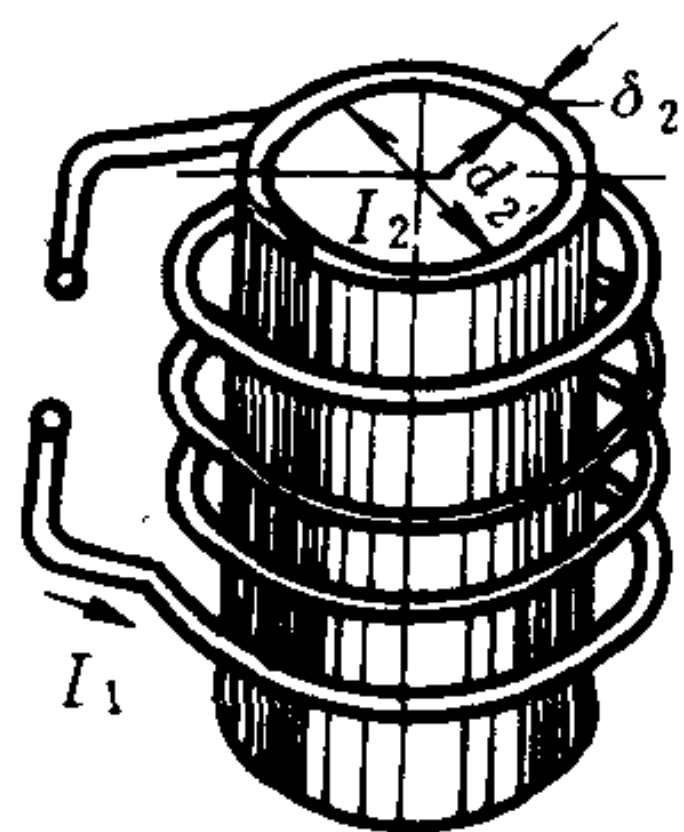


图 2-2 感应线圈与被加热金属中的电流方向

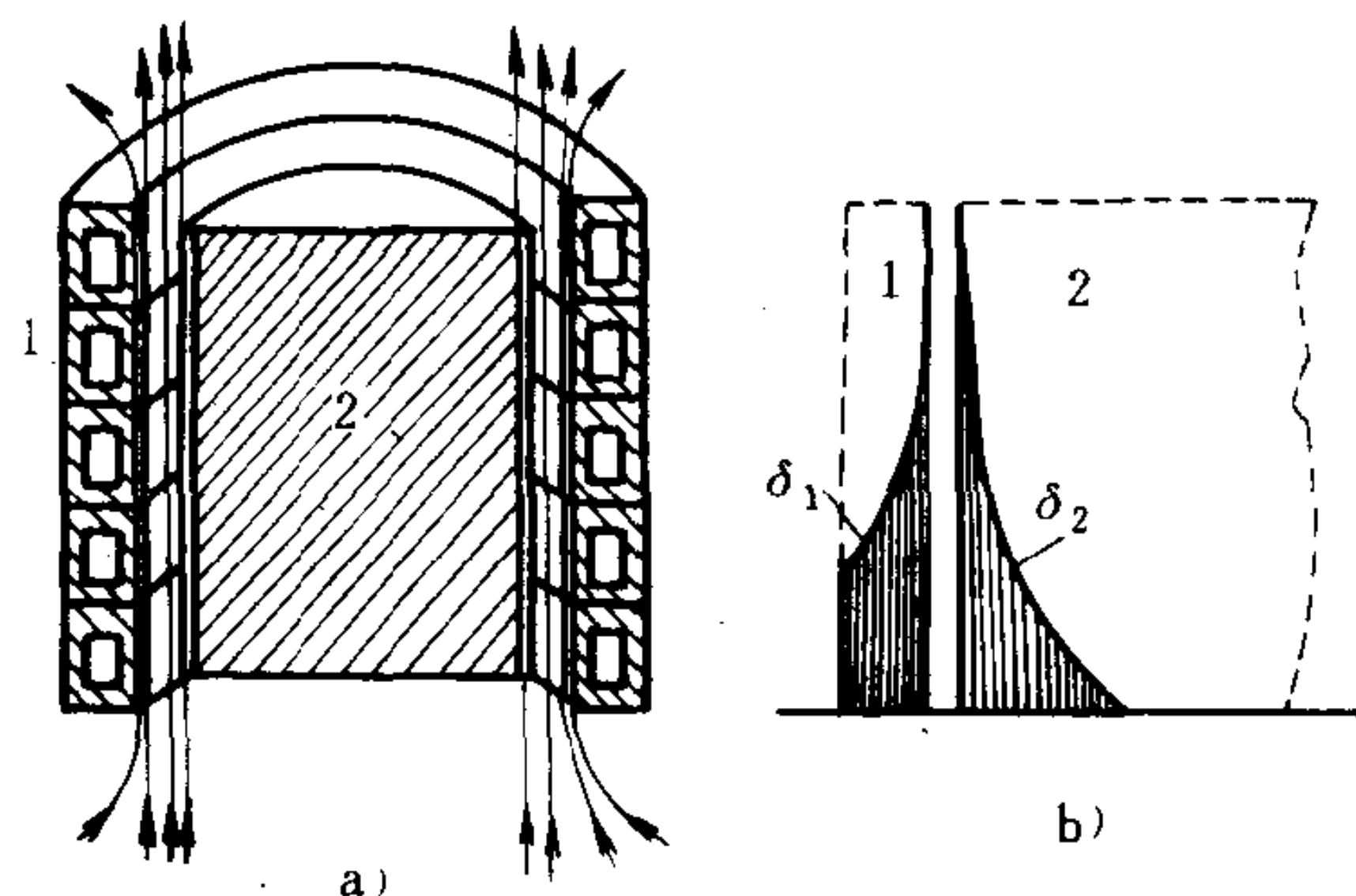


图 2-3 感应器与金属炉料中的电流密度分布
1—感应线圈 2—金属炉料

$$P_{20} = KH^2 q_f \sqrt{\rho_2 \mu_{r2} f} \quad (2-1)$$

式中 P_{20} ——金属炉料单位表面吸收的功率 (输入到金属炉料的功率) (kW/m^2);

K ——常数;

H ——磁场强度 (A/m);

q_f ——金属炉料直径 (或坩埚内径) d_2 对金属炉料中电流透入深度 (δ_2) 之比的函数, 见图 2-4^[2];

ρ_2 ——金属炉料电阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$);

μ_2 ——金属炉料相对磁导率;

f ——电流频率 (Hz);

从式 (2-1) 可看出, 在磁场强度不变情况下, 电流频率越高, 金属炉料吸收的功率也越大; 当金属炉料的电阻率和磁导率变化时, 金属炉料吸收的功率也将发生变化。

由于金属的电阻率随着温度的升高而增加, 因此, 加热过程中, 金属炉料中电流的透入深度和金属炉料吸收的功率也相应增加。

随着频率的提高, 炉子的电效率也增高, 当频率提高到使 $d_2/\delta_2 > 10$ 时, 炉子电效率达到最大值

$$\eta_d = \frac{1}{1 + \frac{d_1}{d_2} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2 \mu_{r2}}}} \quad (2-2)$$

式中 η_d ——最大电效率;

d_1 、 d_2 ——感应器内径与金属炉料直径 (cm);

ρ_1 、 ρ_2 ——感应器与金属炉料的电阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$);

μ_{r2} ——金属炉料的相对磁导率。

可见, 单块金属炉料吸收的功率与 d_2/δ_2 值有关。正是这个原因, 中频坩埚式感应电炉可使用小尺寸金属炉料, 不要起熔体也能顺利起熔; 而在工频坩埚式感应电炉中, 由于 δ_2 比中频坩埚式感应电炉的大, 如果金属炉料尺寸小, 则吸收功率很小, 起熔很困难, 因此工频坩埚式感应电炉必须留剩一部分金属液作起熔体。

在坩埚式感应电炉内, 被熔化金属由于受到电磁力作用产生强烈搅拌, 这是坩埚式感应电炉的一个主要特点。

从电学原理可知, 带有同方向电流的两导体互相吸引, 而带反方向电流的两导体互相排斥。感应线圈中电流与熔化金属中的感应电流方向相反, 线圈与铁液之间有斥力, 线圈受到向外推力, 熔化金属则受到向坩埚中心的径向作用力, 如图 2-5a 所示。熔化金属之间, 可以看成很多同方向平行载流导线, 相互间有压缩力, 力的方向如图 2-5b 所示。金属液受斥力和压缩力, 两力合成作用结果, 使熔化金属产生如图 2-5c 所示的方向运动, 这种运动称为电磁搅拌。

在坩埚内部, 电磁搅拌作用有助于金属炉料和合金元素的迅速熔化, 化学成分和温度均匀 (即均质性好), 搅拌作用还有利于脱氧、脱气、除去夹杂物等优点。

但是由于电磁搅拌力, 使金属表面出现驼峰, 过高的驼峰会使中间部分的炉渣被顶起, 推向坩埚壁的周围。由于炉渣不能覆盖住整个金属液面, 加剧金属氧化。炉衬与活性渣接触表面积增加, 加剧了炉衬侵蚀。剧烈运动的金属液强烈地冲刷炉衬, 使炉衬蚀损增大。因此, 必须把搅拌力限制在不妨碍正常熔炼过程的数值内。

电磁搅拌力可按下式计算

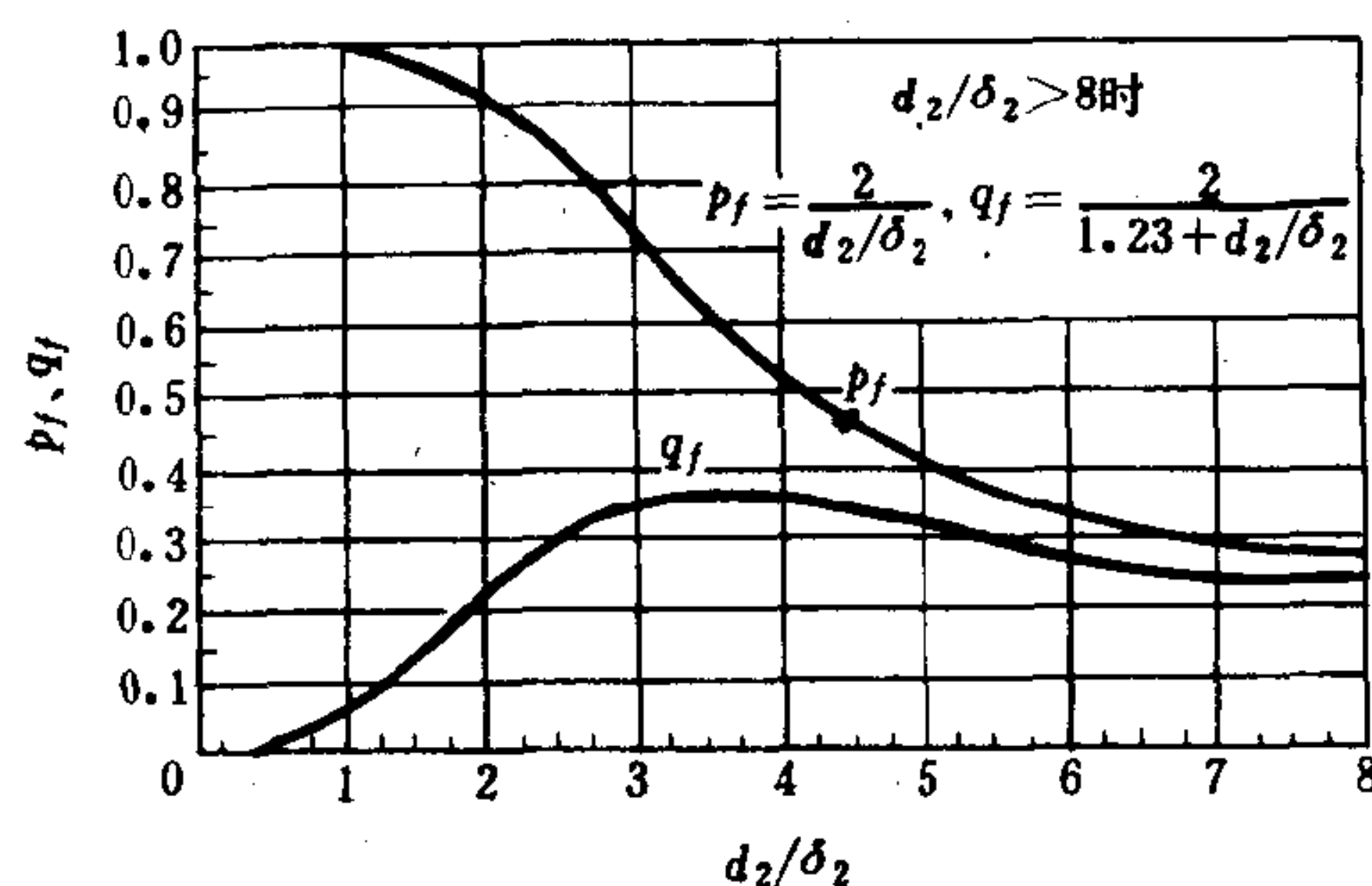


图 2-4 圆柱形金属炉料的 p_f 、 q_f 值

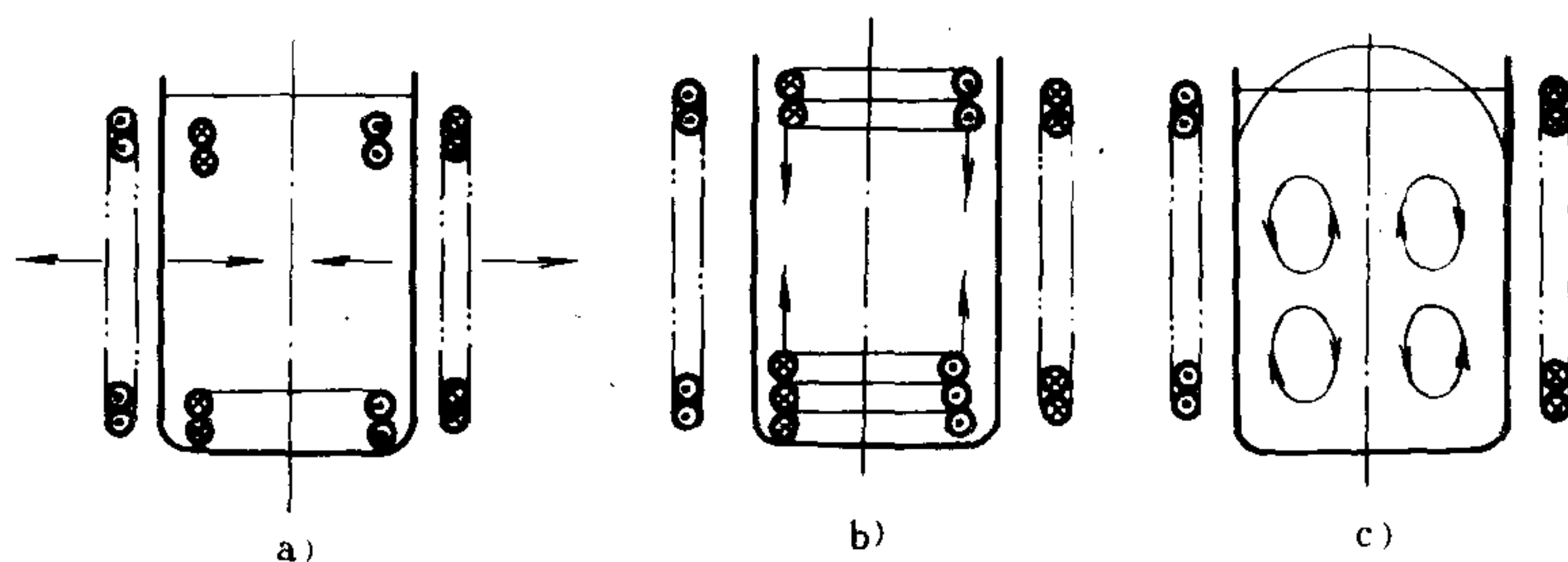


图 2-5 坩埚式感应电炉内熔化金属的运动方向

$$F_j = 31600 \sqrt{\frac{1}{\rho_2 f} \frac{P_2}{S}} \quad (2-3)$$

式中 F_j ——电磁搅拌力 (Pa);

P_2 ——感应器的输出功率 (即输入到金属炉料的功率) (kW);

ρ_2 ——熔化金属炉料的电阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$);

f ——频率 (Hz);

S ——被感应器包围的金属炉料表面积 (cm^2)。

从式 (2-3) 中可看出, 搅拌力与输入功率成正比, 与频率平方根成反比。由此可知, 工频坩埚式感应电炉中搅拌力要比中频坩埚式感应电炉大得多。中频坩埚式感应电炉比工频坩埚式感应电炉的功率密度大, 在相同功率条件下, 中频坩埚式感应电炉比工频坩埚式感应电炉炉体尺寸小。

为了限制搅拌力, 在一定频率时就要限制单位容量输入功率。不同频率、不同容量 G_L 时电炉 (感应器) 最大输入功率 P_g 可根据图 2-6 查出。

在工频坩埚式感应电炉中, 驼峰相当高。因此设计炉子时, 常有意使金属液面高出感应器上端面, 利用熔融金属本身重量来抑制驼峰, 以减少金属表面氧化烧损。据计算和实践表明, 金属液面高出感应器上端面的值, 约为金属总高度的 20%~30% 时, 不会影响炉子效率, 反而稍有利于提高炉子的单位功率。感应器需要降低的高度 (即驼峰高度 h_t)

可按式求出:

$$F_y = h_t \rho_y \times 10^2 \quad (2-4)$$

式中 F_y ——金属液静压力 (Pa);

h_t ——驼峰高度 (cm);

ρ_y ——液态金属密度 (g/cm^3)。

当 $F_j = F_y$ 时

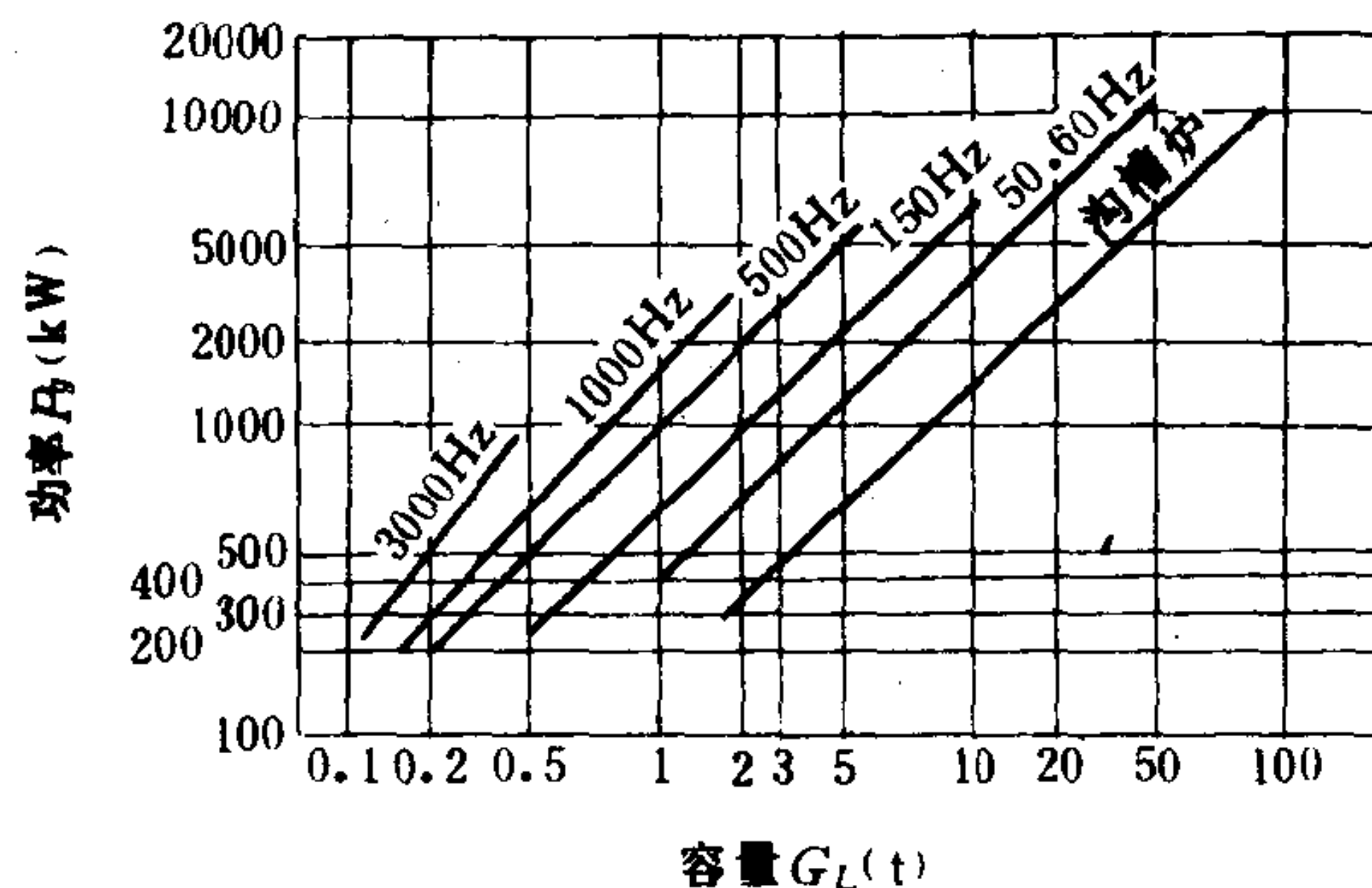


图 2-6 不同频率时感应电炉的功率界限

$$h_i = \frac{316P_2}{\rho_y S \sqrt{\rho_2 f}} \quad (\text{cm}) \quad (2-5)$$

工频坩埚式感应电炉中，根据不同的需要，一般取

$$h_1 \approx h_2 - (0.5 \sim 1)h_i \quad (2-6)$$

式中 h_1 ——感应器高度 (cm);

h_2 ——熔化金属高度 (cm)。

熔化铝的感应电炉，其感应器高度 h_1 应比熔化铁的感应电炉小。

感应器与金属液相对位置如图 2-7 所示。对大容量炉子，把感应器分成三组，开始熔炼时三组都用，当金属熔化后，上面一组断电，以抑制金属液的搅拌驼峰。

图 2-8a 所示的搅拌，常称为两段四区搅拌。两段四区搅拌的缺点是密度悬殊的合金会产生成分偏析。若是整体搅拌就能克服这缺点。用改变感应器接线方式可以实现整体搅拌，如图 2-8b、c 所示。对某些有特殊需要的坩埚式感应电炉，在熔化冷料时把几组线圈并联或串联，由单相供电。需要搅拌时，几组线圈改接成两相供电（两相相位差 90° ）或改接成三相交流供电以产生移动磁场，使坩埚内熔化金属得到整体两区搅拌。搅拌速度与电流频率、磁场极距的乘积成正比^[3]。

当工频坩埚式感应电炉既用作熔化炉，又可作为保温炉使用时，可以将感应线圈设计成数个并联的线圈叠加而成。图 2-9 即是由四个单独可控功率的线圈组成一个感应器，根据炉料高度和功率需求，通过开关，使一个或两个线圈接通输入功率，接入下部、中部或上部线圈，以求获得不同区域的熔池搅拌运动、不同程度的搅拌运动以及不同的需求功率。类似作用的工频感应保温电炉在我国已于 1992 年被开发应用，使用效果较为满意^{[4][5]}，不足之处是线圈引出头过多。

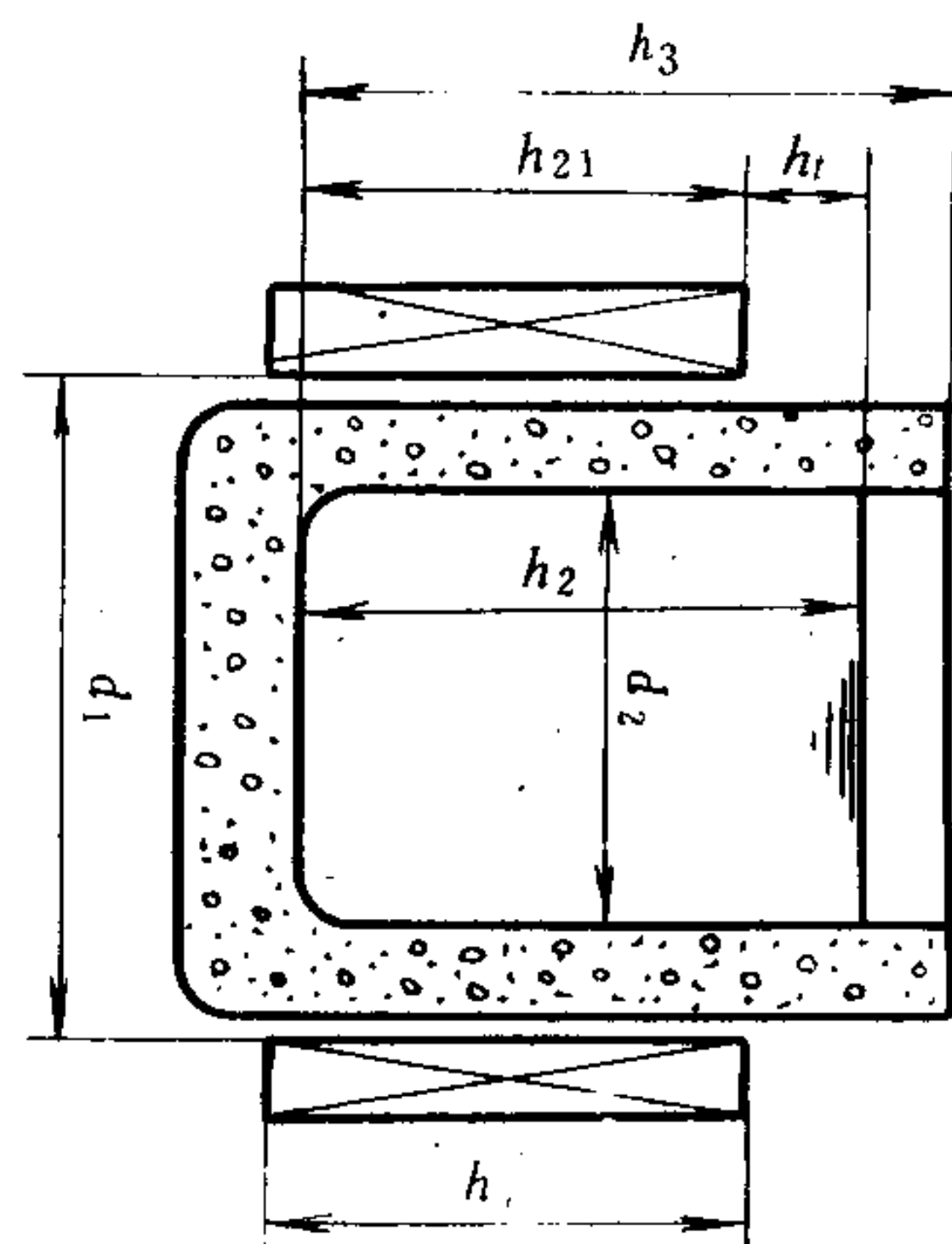


图 2-7 感应器与金属液相对位置

h_1 —感应器高度 h_2 —金属炉料高度 h_3 —坩埚高度 h_t —驼峰高度 h_{21} —被感应器包围的金属炉料高度 d_1 —感应器内径 d_2 —金属炉料直径（坩埚内径）

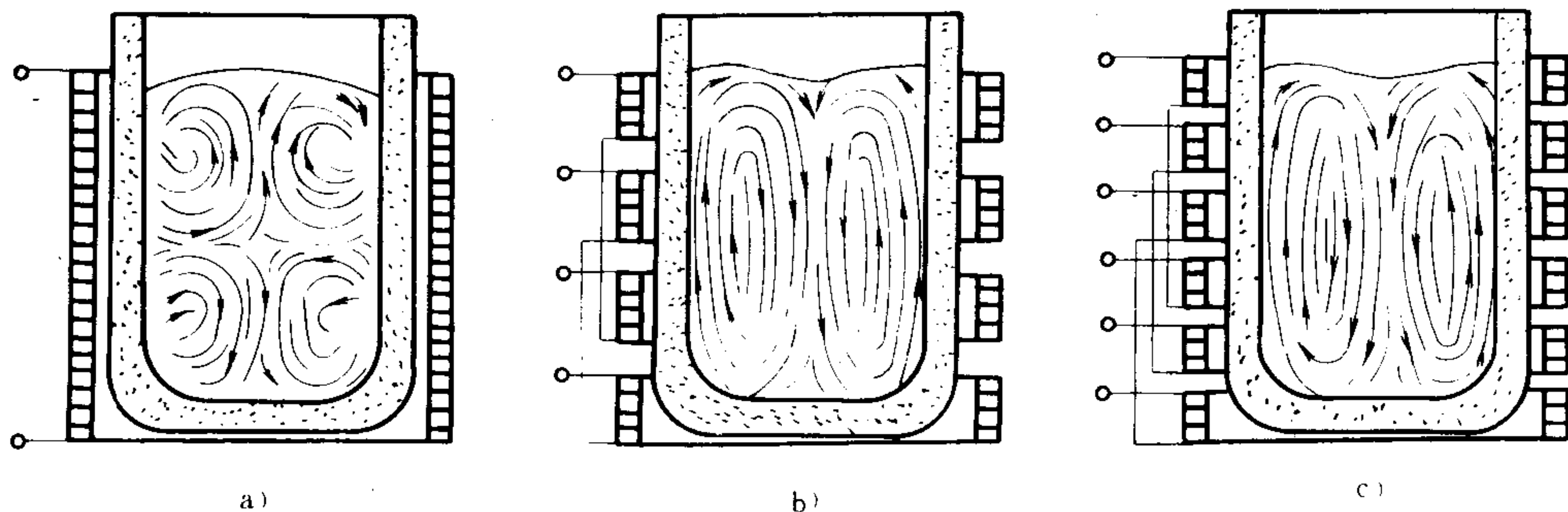


图 2-8 四区和两区搅拌

a) 单相供电，两段四区搅拌 b) 两相供电，整体搅拌 c) 三相供电，整体搅拌

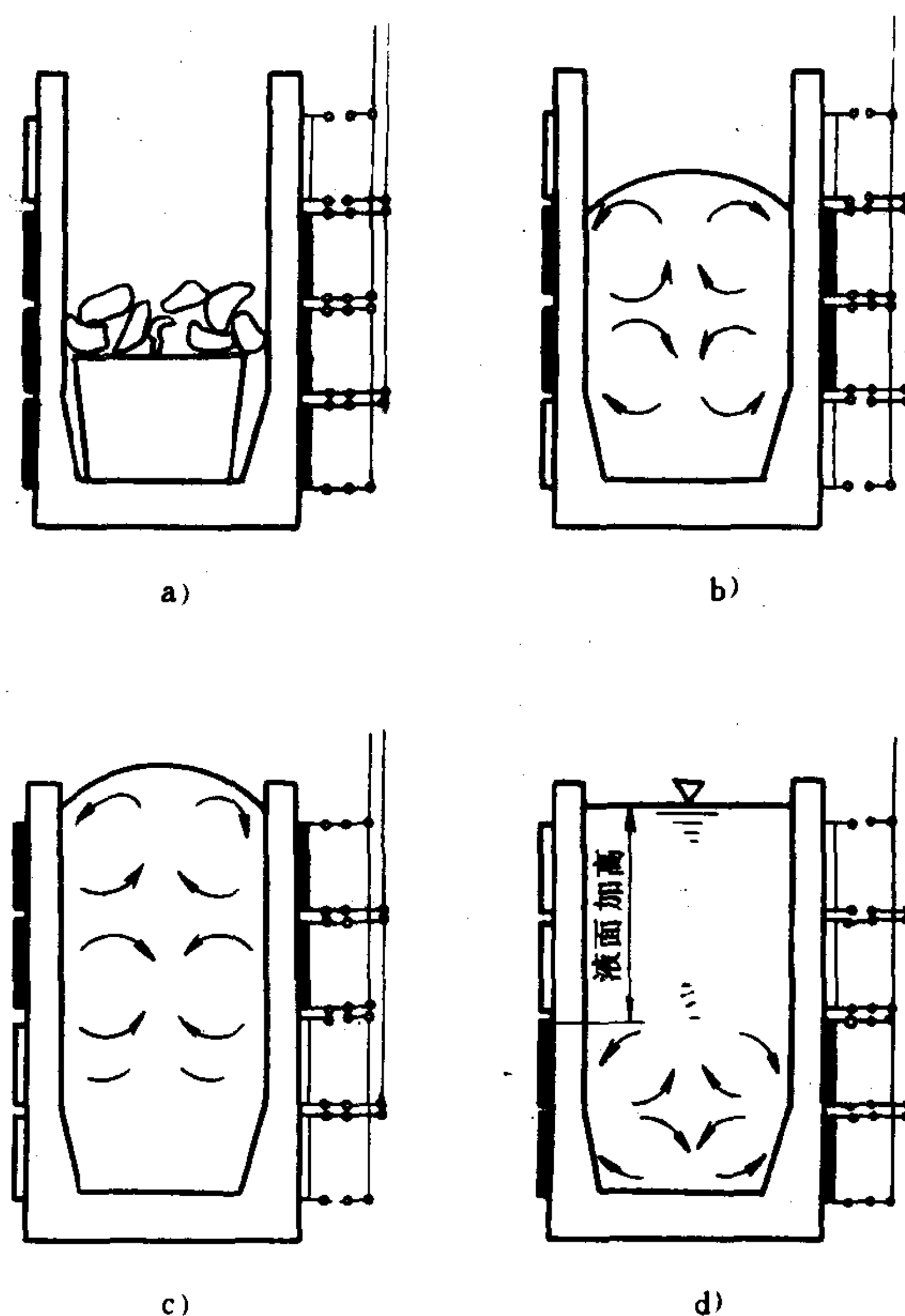


图 2-9 带有四个可控功率线圈的感应电炉

- a) 冷料起动，大功率输入 b) 熔化状态，熔池半满，功率中等，熔池搅拌剧烈
c) 熔池全满，搅拌剧烈 d) 熔池全满，保温状态，熔池搅拌微弱

第二节 坩埚式感应电炉的设计计算

计算所需要的原始资料：

1) 金属炉料的牌号；

2) 金属炉料的物理性能

密度 (g/cm^3)，固态和液态

电阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)，固态和液态

磁导率 (H/cm)

比焓 ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$ 或 J/kg)

比热容 ($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$)；

熔化潜热 (J/kg)；

3) 熔化温度或保温温度 ($^{\circ}\text{C}$)；

4) 熔化率 (t/h) 或过热能力 ($\text{t}/\text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$)。

一、电炉容量及坩埚几何尺寸的确定

1. 电炉容量选择 确定容量要考虑熔化率或过热能力、单个铸件质量、经济性以及要否

留起熔体等因数。

需要的金属液可由一台电炉来提供，也可由几台电炉同时运行来提供。金属液需要量较大，又是连续使用时，一般采用几台电炉同时运行。这种供液方式较为灵活可靠，但与单台运行相比，占地面大、投资稍贵。金属液需要量不大，或是间断使用场合，则采用单台电炉较合适。

电炉熔化率越高，生产效率也越高。要提高熔化率，必须增加输入功率。而输入功率又与电磁搅拌力成正比。输入功率过高，会引起剧烈的搅拌作用，加速炉衬磨损，影响炉衬寿命与金属质量。因此，电炉输入功率受一定限制，如图 2-6 所示。一般工频坩埚式感应电炉按 1.5~2.5h，中频坩埚式感应电炉按 1~1.5h 左右熔化完一炉金属来考虑。目前我国生产的工频和中频坩埚式感应电炉容量和生产率关系大多是这范围。

2. 坩埚有效容积 V_L

$$V_L = \frac{G_L \times 10^6}{\rho_y} \quad (\text{cm}^3) \quad (2-7)$$

式中 ρ_y ——液态金属的密度 (g/cm^3)，铁液的密度为 $6.9 \sim 7.1 \text{g/cm}^3$ ，其它金属密度见附录 I；

G_L ——电炉容量 (t)。

3. 坩埚与感应器的几何尺寸计算

坩埚内径 d_2

$$d_2 = \sqrt[3]{\frac{4V_L}{\pi y}} \quad (\text{cm}) \quad (2-8)$$

式中 y ——金属液高度 h_2 与坩埚内径 d_2 之比，即 h_2/d_2 。对一般熔化炉来说，在 1.3~1.6 范围内选择，小容量电炉选大值。则

$$h_2 = y d_2 \quad (\text{cm}) \quad (2-9)$$

感应器内径 d_1

$$d_1 = d_2 + 2\Delta_{12} \quad (\text{cm}) \quad (2-10)$$

式中 Δ_{12} ——坩埚壁厚，包括电绝缘层、绝热层及炉衬材料的厚度。

坩埚的壁厚，是为了保证有一定的电绝缘层和良好的绝热层，使感应器的绝缘不致于被熔化金属的高温所烧坏。一定的坩埚壁厚，还保证炉衬材料有良好的刚度及合理的分层结构（即分为烧结层、半烧结层、松散层）。

但坩埚壁厚的增加，会降低电炉的电效率、感应器的输入功率及电炉功率因数 $\cos\varphi$ ，使生产效率降低。图 2-10 示出 1.5t 工频坩埚式感应电炉炉衬厚度变化时，电炉的功率因数 $\cos\varphi$ 、感应器的输入功率 P_g 及补偿电容容量 P_Q 的变化关系。图 2-11 示出 8t 工频坩埚式感应电炉炉衬壁厚与电炉电效率 η_d 的关系。

因此炉衬厚度的选择，必需考虑到上述综合因素。其数值按表 2-1 选取。

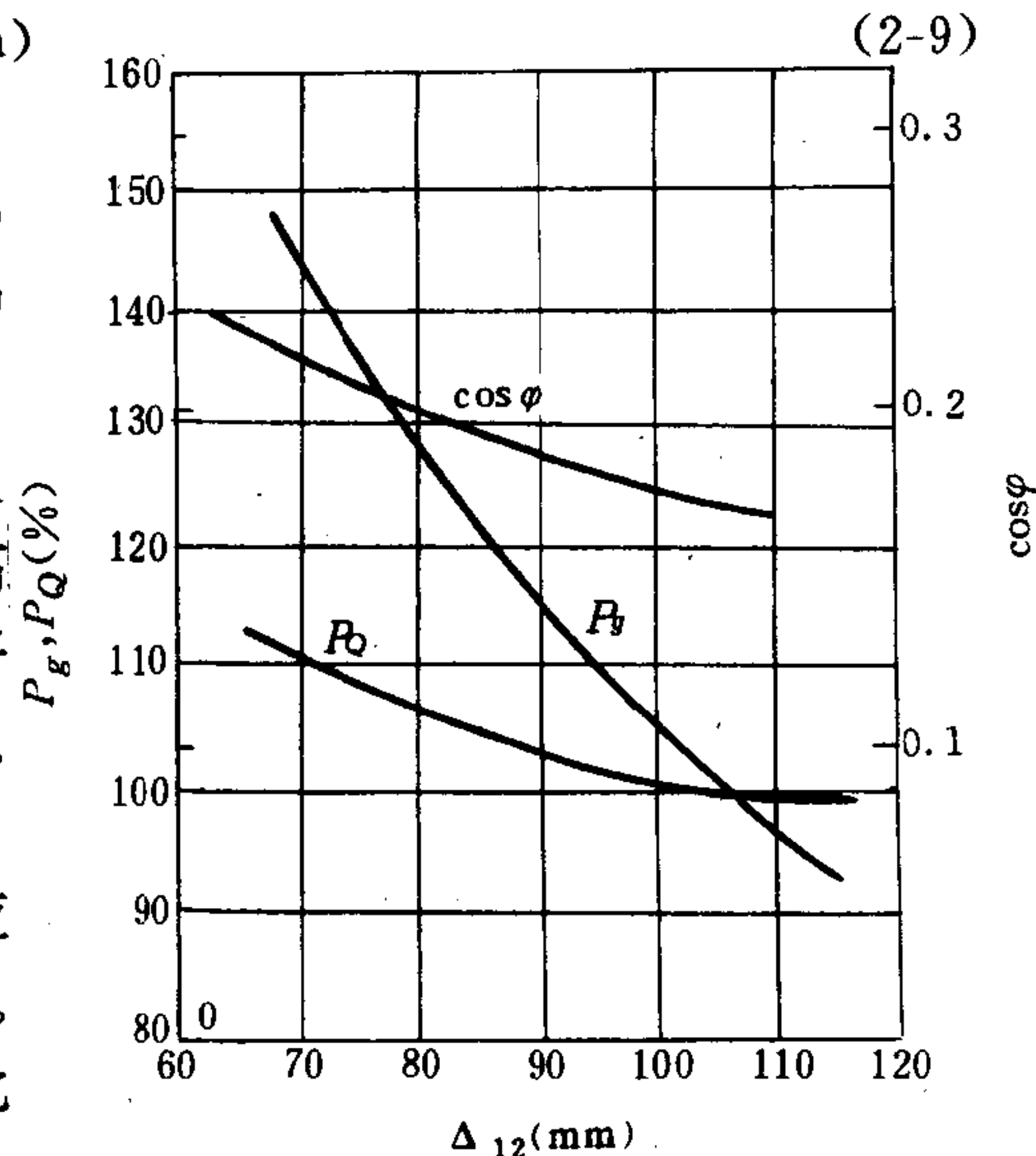


图 2-10 1.5t 工频坩埚式感应电炉
炉衬厚度变化时的电气特性