

感应加热手册

〔英〕 约翰·戴维斯 彼得·辛普森 著

张淑芳 柳祥训 蔡慰望 译

张惠林 校

国防工业出版社

内 容 简 介

本书共分十四章，附录五节，介绍了感应加热和热传导的基本理论和感应加热在工业中的各种应用；阐述了工频、中频、高频等各种感应加热电源系统的适用范围、优缺点及设计方法和步骤，并列举了不少实例；对感应加热的经济性和安全防护问题作了专门论述。

本书既可供从事感应加热设备设计和使用感应加热设备的热处理车间、锻造车间、熔炼车间的工程技术人员参考，也可供高等院校电热专业的教师和学生参考。

Induction Heating Handbook

John Davies Peter Simpson

McGraw-hill book Company (UK) Limited 1979

*

感应加热手册

〔英〕 约翰·戴维斯 彼得·辛普森 著

张淑芳 柳祥训 蔡慰望 译

张惠林 校

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 15³/₄ 插页 2 416 千字

1985年5月第一版 1985年5月第一次印刷 印数：0,001—7,700册

统一书号：15034·2860 定价：3.40元

出版者的话

本书是有关感应加热的专著。书中论述了感应加热和热传导等基本理论；介绍了不同类型的感应加热方法和各种电源系统及辅助设备的优缺点、设计、安装和使用等各方面的内容；对大家所关心的感应加热的经济性和安全问题，也以专门章节进行了讨论。这些内容反映了近二十年来在感应加热技术方面的重要发展和变化。

随着工业技术的不断发展，感应加热技术在我国的应用范围也日益扩大。但系统论述各种感应加热技术和适用范围、不同用途的感应加热设备的优缺点及电源频率选择原则等问题的专著并不多见。本书将在这些方面为从事感应加热设备的设计、安装、使用、维修等工作的工程技术人员提供比较实用的参考资料，也将为电热专业的教学和科研人员提供有益的参考教材和实验数据。

本书在结构编排方面则存在明显的不足。例如，感应加热原理和热传导等基础理论的论述放在全书的中后部，而感应加热的经济性讨论却放在感应加热原理的前面，这就显得有些杂乱。

需要指出的是，本书经济性一章中所引用的资料已经老化，即使是新的资料也不一定适合我们的国情。保留这一章的目的不在于那些具体的数字，而在于其中所提出的分析方法。

目 录

第一章 绪言	1
§ 1.1 感应加热的发展背景	1
§ 1.2 感应加热原理	2
§ 1.3 感应加热的应用	6
§ 1.4 电源装置	9
§ 1.5 经济性、安全性和周围环境	11
第二章 穿透感应加热	12
§ 2.1 穿透加热的应用介绍	12
§ 2.2 温度效应	23
§ 2.3 热辐射和热对流	29
§ 2.4 穿透感应加热时的温度分布	31
§ 2.5 电流深度和辐射热的影响	33
§ 2.6 在一个加热周期内温度的分布	34
§ 2.7 穿透感应加热的频率选择	37
§ 2.8 感应圈设计的技术条件	40
§ 2.9 感应线圈的等效电路设计法	52
§ 2.10 感应线圈的近似设计法	59
§ 2.11 感应线圈的机械结构	67
§ 2.12 板坯的二次加热	71
§ 2.13 行波感应加热	73
§ 2.14 多层感应线圈	78
§ 2.15 适于挤压加工的阶梯式加热	79
§ 2.16 按比例缩小的模拟方法	80
第三章 表面感应加热	82
§ 3.1 热处理冶金原理	86
§ 3.2 淬火与冷却方式	93
§ 3.3 感应热处理中的频率选择	99

§ 3.4	表面感应淬火过程中的温度分布	106
§ 3.5	感应圈设计的应用细则	108
§ 3.6	感应圈的机械结构	111
第四章	感应加热的其它应用	116
§ 4.1	钎焊和铜焊	116
§ 4.2	管子熔焊	130
§ 4.3	树脂釜及其它容器的加热	142
§ 4.4	涂料干燥	144
§ 4.5	塑料加工中的感应加热	145
§ 4.6	退火及消除应力	146
§ 4.7	纵向磁通感应加热	149
§ 4.8	横向磁通加热	150
§ 4.9	半导体生产工艺	152
§ 4.10	感应加热的其它应用	158
第五章	感应熔炼	161
§ 5.1	感应熔炼的原理	161
§ 5.2	无芯感应炉	169
§ 5.3	槽式感应炉	179
§ 5.4	无芯感应炉和槽式感应炉的对比	184
§ 5.5	熔炼炉的特殊性能	189
第六章	工频加热系统	197
§ 6.1	优点和局限性	197
§ 6.2	负载匹配	199
§ 6.3	控制及开关装置	204
§ 6.4	晶体管电路功率控制器	208
§ 6.5	工频的测量系统	210
§ 6.6	工件装卸设备	210
§ 6.7	熔炼炉系统	214
§ 6.8	频率倍增器	215
§ 6.9	双频系统	217
第七章	中频电动交流发电机系统	218
§ 7.1	序言	218
§ 7.2	中频发电机的原理	219

§ 7.3	感应交流发电机的机械特点	225
§ 7.4	发电机的电特性	228
§ 7.5	负载匹配和调节	233
§ 7.6	控制系统	239
§ 7.7	自动调压器	240
第八章	可控硅中频系统	243
§ 8.1	可控硅中频变频器的由来	243
§ 8.2	中频感应加热负载的特性	244
§ 8.3	对可控硅变频器的要求	244
§ 8.4	可控硅整流器的特性	245
§ 8.5	基本的变频器系统	247
§ 8.6	扫频系统	249
§ 8.7	负载谐振系统	252
§ 8.8	效率和阻抗特性对比	255
§ 8.9	控制和保护系统	257
§ 8.10	结构和布置	259
§ 8.11	投资费和运行费	262
§ 8.12	变频器和电动交流发电机之间的对比	263
第九章	高频系统	265
§ 9.1	高频发生器的基本原理	265
§ 9.2	工业用高频加热振荡器真空管	274
§ 9.3	理想的工业用振荡真空管特性	275
§ 9.4	工业用三极真空管的结构	277
§ 9.5	磁聚焦三极管	282
§ 9.6	C级振荡器的设计	285
§ 9.7	阳极高压电源	293
§ 9.8	控制电路	296
§ 9.9	功率控制系统	298
§ 9.10	负载匹配输出电路	303
§ 9.11	高频测量	311
§ 9.12	发生器的可靠性	312
第十章	辅助设备	314
§ 10.1	测量技术	314

§ 10.2	工频测量	315
§ 10.3	中频测量	316
§ 10.4	高频测量	317
§ 10.5	综合测量和控制	320
§ 10.6	温度测量	322
§ 10.7	其它测量	325
§ 10.8	温度控制系统	325
§ 10.9	功率控制和调整	328
§ 10.10	电缆和汇流排	329
§ 10.11	操作设备	333
第十一章	经济性	346
§ 11.1	各种电源的经济性和热效率	346
§ 11.2	淬火和焊接的成本分析	349
§ 11.3	锻造加热的比较	353
§ 11.4	熔炼炉的成本	359
§ 11.5	其它经济因素	362
第十二章	感应加热理论	363
§ 12.1	引言	363
§ 12.2	半无限大板材的集肤效应	363
§ 12.3	半无限厚板材的功率和磁通	371
§ 12.4	宽矩形板材中的感应功率和磁通	377
§ 12.5	实心圆柱体中的功率和磁通	382
§ 12.6	空心圆柱体中的感生功率	391
§ 12.7	非线性理论	398
§ 12.8	邻近加热	401
第十三章	热传导	406
§ 13.1	序言	406
§ 13.2	功率、平均温度和时间之间的关系	406
§ 13.3	在圆柱形坯料中的温度分布	407
§ 13.4	圆柱形钢坯的保温周期	411
§ 13.5	圆柱形钢坯中电流深度的影响	413
§ 13.6	圆柱形钢坯中的辐射影响	417
§ 13.7	矩形板材	418

§ 13.8	辐射	420
§ 13.9	表面淬火时的热传导	425
§ 13.10	有初始轴向温度分布的钢坯	432
§ 13.11	在导管中的冷却水	434
第十四章	安全和环境条件	444
§ 14.1	概述、制造厂的义务	444
§ 14.2	安全员、用户和雇员的职责	445
§ 14.3	国际安全条例	446
§ 14.4	国际电工技术委员会(IEC)的安全建议	447
§ 14.5	环境和专有名词	449
附录 1	电加热术语	451
A1.1	电加热设备按频率的分类	451
A1.2	技术词汇	451
附录 2	平板中的温度分布	456
A2.1	仅从一面加热的平板	456
A2.2	平板从单面预先加热后的保温	458
A2.3	从两面加热的平板	460
A2.4	经两面预热后的平板的保温	462
附录 3	感应加热设备对电源的影响	468
A3.1	序言	468
A3.2	电源设备——工程质量	469
A3.3	感应加热炉电源设备的选择	472
A3.4	关于感应加热负载和公用电源系统连接的建议	473
A3.5	感应炉负载的连接	480
A3.6	起动电流, 电压降的计算	482
附录 4	单位换算表	485
附录 5	电阻率、比热、导热率和温度的关系	487
参考文献		489

第一章 绪 言

§ 1.1 感应加热的发展背景

1831年米迦勒·法拉第 (Michael Faraday) 发现的电磁感应是一切感应加热的基础。根据初级线圈中电流的变化, 可以在邻近的闭合次级线圈中产生感应电流的现象, 他创立了现代感应加热的概念。感应加热本质上的特征就是由初级线圈中的交变电流引起闭合的次级线圈中磁通量的变化。大约在一百年以前, 这一原理已被用于电动机、发电机、变压器和无线电通讯等方面, 然而无论是在电路或磁路中, 任何热效应都被看成是一种有害的副作用。为此, 工程师们为了最大限度地减少有害的涡流发热, 对变压器和电动机的磁心采用了叠片式结构, 使平行于绕组轴线方向具有较低的磁阻, 而使垂直于磁通方向的磁心圆周上又具有较高的电阻。遵循法拉第的上述研究工作, 后来又提出了许多定律, 例如楞茨和诺埃曼定律。这些定律表明感应电流的磁通反抗原磁通, 而且反抗作用与原磁通变化的频率成正比。1868年福考特 (Foucault) 提出了涡流理论, 希维赛德 (Heaviside)^[1]发表了以“铁心中电流的感生”为题的论文, 论述了能量由绕组向实体铁心中传输的问题。与此同时, 汤姆逊 (Thomson)^[2]也对感应加热的理论作出了贡献。

本世纪初叶, 在法国、瑞典和意大利提出了利用无心感应炉进行中频熔炼的建议, 而且还提出了利用电容器来补偿无功功率的设想。诺思拉普 (Northrup) 博士^[3]研制出了一种工业应用的中频感应炉。此后, 由于缺少合适的电动机-交流发电机组和容量足够大而性能可靠的电容器, 所以中频熔炼炉也就停滞在感应加热应用初期的发展水平上。到了1927年, 英国电炉公司 (EFCO) 在谢菲尔德安装了第一台中频炉。自此以后, 大量的各型感应加

热装置得到了稳步的发展。同时，也认识到感应加热法对锻轧和金属钎焊的局部加热也是适用的。

在第二次世界大战期间，进一步的发展表明感应加热法有以下的优点：具有极其精确的加热深度和加热表面积；不需要外部热源，因而热损耗低、工作环境清洁；被加热的物体不需同感应器接触且易于实现高功率密集，因而加热时间很短；上述因素的综合能理想地适合于生产过程的自动化^[4,5]。

§ 1.2 感应加热原理

最初福考特和希维赛德提出了关于涡流和感应加热的理论，随后对此形成了一个稳定的理论研究工作的潮流^[1,2,6~28]。但这方面的工作还未应用于感应加热线圈和电源的改进，而只是在目前才日益被人们所理解和加以应用。第十二章中包括了感应加热的这些理论，感应加热对不同形状例如实心和空心圆筒以及平板等工件可产生特殊的加热效果。给出不同形状的工件和金属材料的加热实例，阐明了感应加热电流透入深度、频率、电阻率和导磁率之间的相互关系。电流透入深度、磁场和工件尺寸对感生功率的影响在第十二章中也作了叙述。

感应加热所遵循的主要依据是：电磁感应、“集肤效应”和热传导三项基本原理。在第十二和第十三章中详细地论述了这些原理，而第二至第五章论述了这些原理的应用。

虽然可以用类似于众所周知的变压器原理来表示感应加热的基本概念，但对于感应加热来说，还不如用一个模拟的单匝短路次级线圈来说明。图 1.1 表示由感应加热器和负载所表明的上述概念。必须强调的是，这只是一个非常简要的说明，在本节后面第十二章中的三、四节特别对这些原理作了更为严密的阐述。

图 1.1(a) 所表示的是一种简单形式的变压器，当漏磁为零时，负载电流应等于电源电流乘以线圈的匝数比。初级线圈和次级线圈中的损耗与绕组的损耗有直接关系。

如果把次级线圈看成是单匝的，则次级线圈中的短路电流将

很大，电能的消耗也相当大，图 1.1(b) 显示了这种影响，而且初级线圈和次级线圈的“损耗”将等于电源功率。因而必须使初级线圈和次级线圈的耦合更为理想化，以便达到能统一为简单匝数比的效果。

用上面的观点进一步将图 1.1(c) 所示的圆柱体加热负载的电路看作是一台具有多匝初级线圈和单匝短路次级线圈的变压器，初级线圈和次级线圈彼此间由较小的空气间隙隔开。这里必须说明，当电流频率较高时，将有“集肤效应”存在，关于这一问题在后面的章节中将详细论述（见第十二章二、一节）。感应电流密度从加热工件的表面至中心是逐渐降低的，而电流的频率越高降低的比率也越大。电流密度的这种降低率也取决于被加热材料的电阻率和相对导磁率两个物理量。

图 1.1(e) 表示感应电流的分布随透入深度而变化以及控制电流分布的因素。电流密度大约降到表面电流密度值的三分之一处的深度即为“集肤深度”。

“初级线圈”和“次级线圈”（感应器和工件）的电流透入深度均取决于图 1.1(e) 所表示的三个参数。感应加热所用的感应器一般都是用紫铜制作的，通常采用水来冷却，如图 1.1(c) 所示。感应器和工件要紧密地耦合，它们之间的空气间隙的最小值应与工件进出感应器的运动保持协调。在某些情况下，为了减少工件加热时的辐射热损失，在感应器的表面包上绝热层，从而增大了工件和感应器之间的“空气间隙”。

图 1.1(d) 表示的是由集肤层所形成的一种等效短路次级线圈，其电阻值取决于工件的尺寸大小，由图可以看出，等效电路可视为一块薄板，它的尺寸取决于圆柱钢件的直径大小。这样考虑的主要目的是最大限度地使热量消耗在工件（负载）的加热上，而使感应器所损耗的热量为最小值，即设计出最高效率的感应器。图 1.1(f) 给出了一个理想化了的感应加热效率的关系式，这一关系式表明具有高电阻率和高导磁率的负载（即钢）其效率可接近 100%。如果负载是电阻率和相对导磁率很低的有色

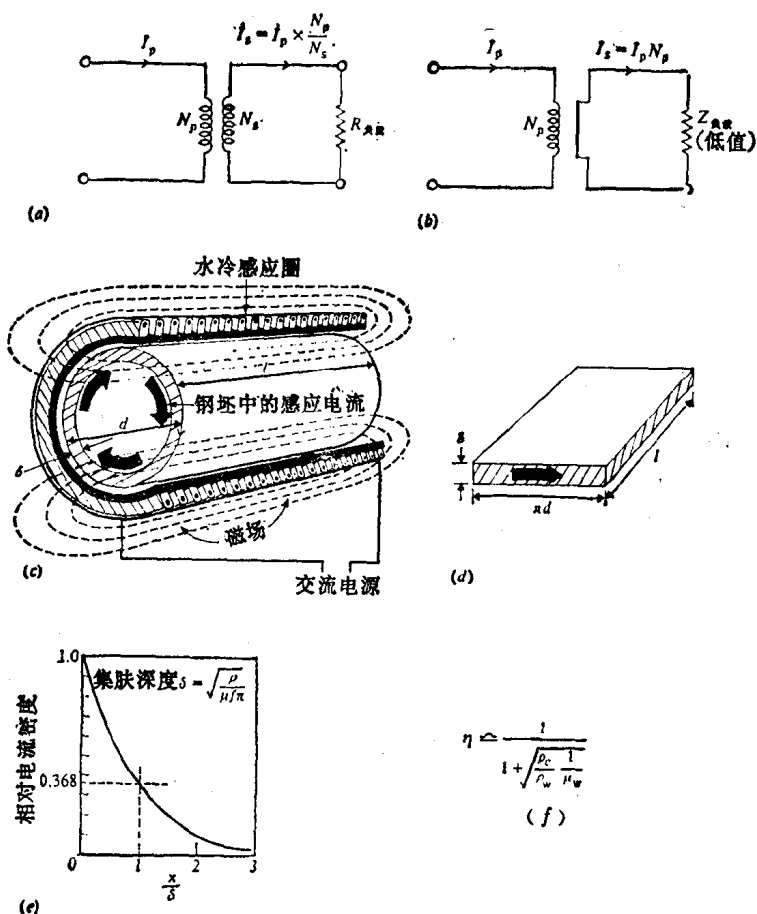


图1.1 感应加热线圈和负载的基本概念

(a) 变压器, (b) 短路次级线圈效应, (c) 感应器与负载, (d) 等效负载, (e) 集肤深度, ρ —电阻率, μ —导磁率, f —频率, (f) 感应器和负载的效率关系式。

金属(例如铜), 则这种效率大约只有 50%。

钢的表面淬火需要薄的集肤层深度, 它所用的装置是建立在高频感应加热基础上的, 表面淬火加热趋于局部化, 因而感应器的匝数较少, 功率密度可达 $10 \sim 50$ 兆瓦/米²。对于穿透加热, 如图 1.1(e) 所示, 集肤层应相当深, 所需的频率较低, 所采用

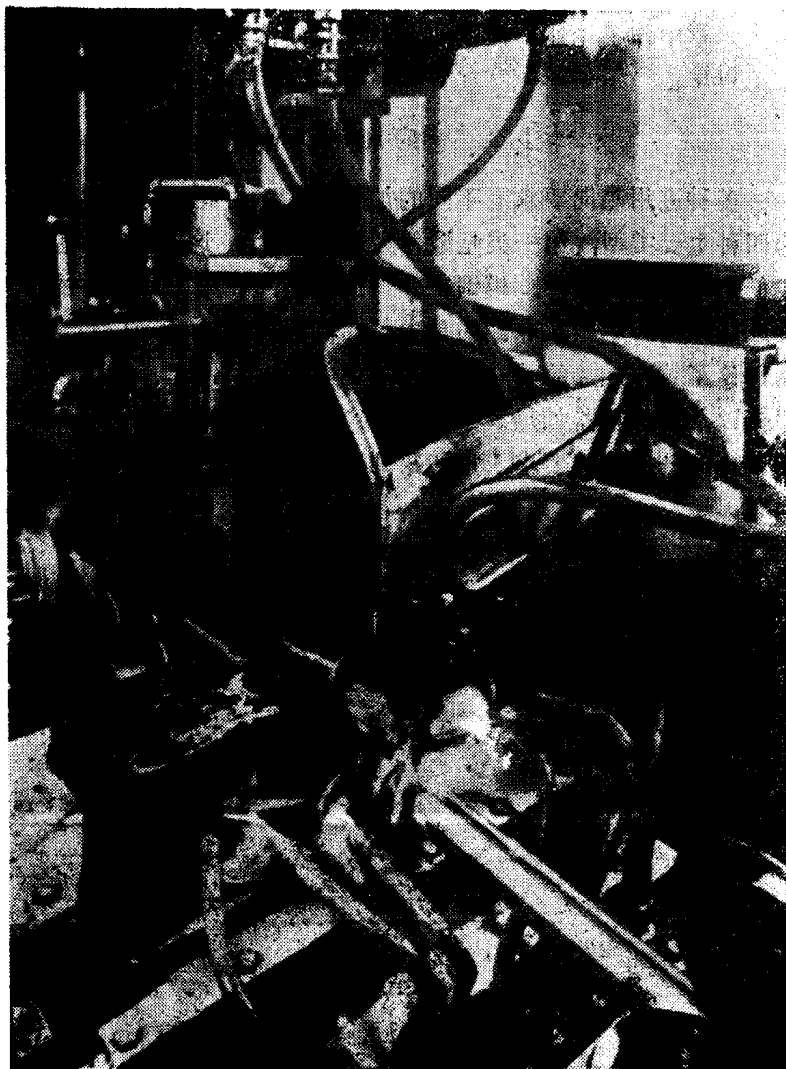


图1.2 用带钢以 100 米/分的速度高速焊制钢管 ($\phi 37 \times 1.12$ 毫米),
采用的射频加热装置, 其功率为 95 千瓦 (Inductron 公司)

的功率密度可为 $0.1 \sim 10$ 兆瓦/米²。

上述各因数同热流、温度之间的关系是复杂的，这一问题在第十三章中作了论述。而钢的表面加热的冶金原理在第三章中进行了讨论。

§ 1.3 感应加热的应用

多种应用趋向要求有不同的加热方式，由此可将感应加热分为四种主要类型：第一类是锻件穿透加热^[24]，这类加热包括频率低而周期长的锻件，模锻件和退火加热，在第二章中讲述了这种加热方法；第三章介绍的是中频和高频表面淬火加热；第四章讨论了感应加热的其它用途，如中频和高频钎焊、铜焊、管子焊接以及用于容器加热、半导体生产等；第五章论述了低频、中频熔炼的一些特殊要求，也涉及到了现代感应炉的一些工艺性问题^[25]。

图 1.2~1.6 都是上述感应加热应用的一些实例，在第十章中介绍了工件传送设备。

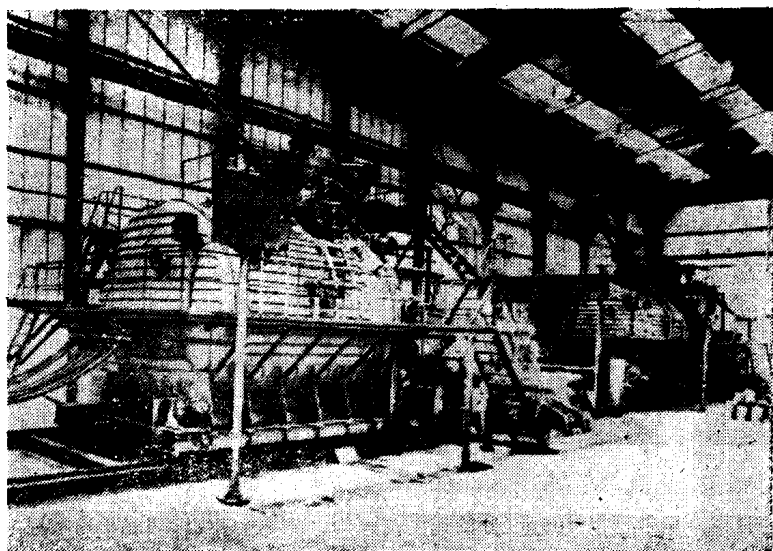


图1.3 频率为 250 赫、容量为 5000 公斤的真空感应熔炼炉
(Elphiac-Balzars公司)

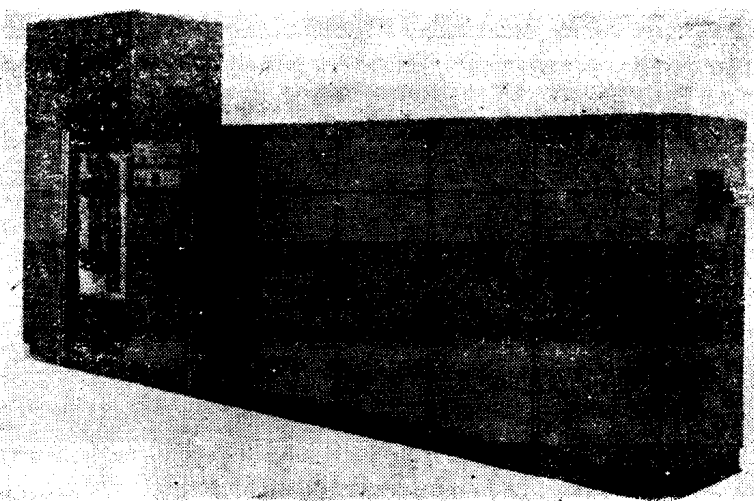


图1.4 这是一台功率为 2 兆瓦、频率为 1000 赫的静止式变频器
(Radyne公司)

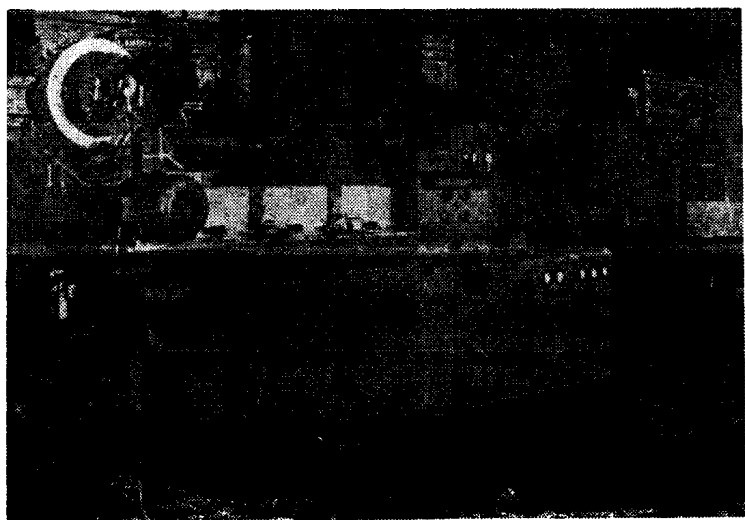


图1.5 这是一台热剪下料设备，将 6 米长的棒料加热至锻造温度进行剪切。每小时可剪切 2 吨钢坯，剪切工件的最大断面可达 75 毫米²。此下料法免去了生产过程中的中间贮料仓，并消除了由于冷剪下料而带来的冶金方面的问题 (GKN Birwetco "Us-Kside" 公司)

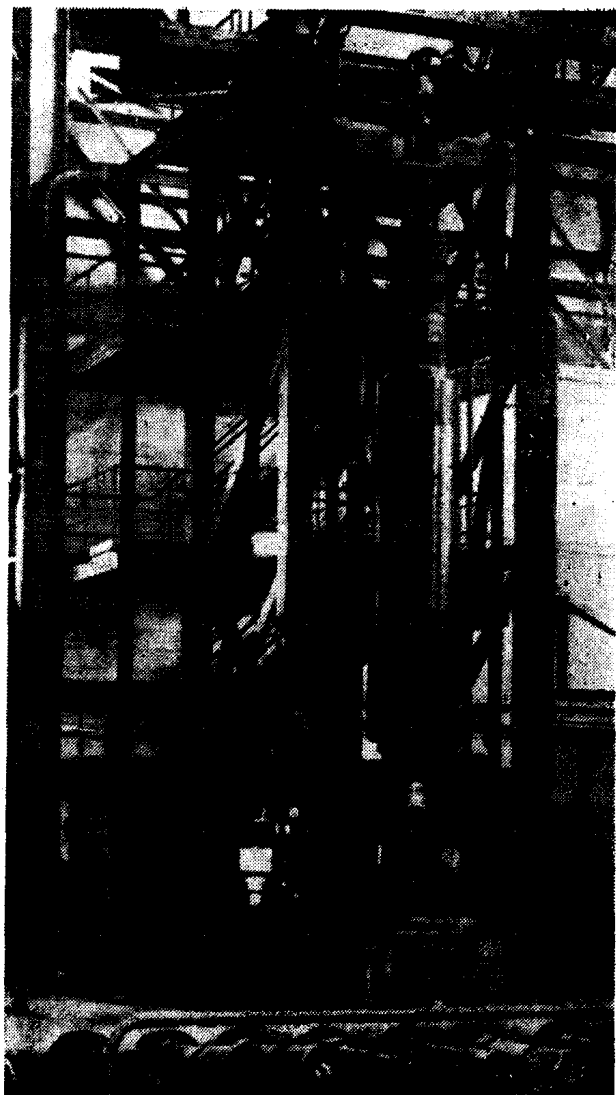


图1.6 用于钢轧辊连续表面淬火的装置，其功率为 900 千瓦，
频率为 250 赫 (Elphiac-Intertherm)

§ 1.4 电 源 装 置

感应加热的电源在第六至九章中作了论述，电源可分为四种类型。

§ 1.4.1 工频电源装置 (50~60赫和150~540赫)

——第 六 章

工频加热装置不需要变换电源频率，只需要变压器、隔离开关、负载匹配电容器、功率控制和辅助设备。其电流穿透层深度通常为 10~100 毫米，装置的功率可达数十万千瓦。

§ 1.4.2 电动机——交流发电机组电源 装置 (500~10000赫)

——第 七 章

这种装置的频率变换是由感应电动机驱动频率一定的感应交流发电机来实现的。其功率可由改变励磁电压加以控制，并可用带抽头的反馈环路对交流发电机的输出功率加以调节；接通负载是由输出端的接触器来完成的，并可通过中频电容器来匹配不同的负载。每台机组可获得高达 500 千瓦左右的功率，虽然已制造出了少数能超过 500 千瓦功率的机组，但通常还是将多台机组串列使用。这种装置加热的电流穿透层深度的变动范围约为 1~10 毫米。

§ 1.4.3 静止式变频电源装置 (500~50000赫)

——第 八 章

这类电源装置是近十年来感应加热电源方面唯一的最大进展^[26, 27]。该装置采用了第九章所介绍的各种不同电路来变换频率。这类装置实质上是建立在可控硅整流器 (SCR) 或闸流晶体管整流器基础上的，其定型设备的功率可达 2 兆瓦。在加热周期中，这种装置的频率可以迅速地变换，因而可随负载的变化使阻