

金属感应热处理

刘志儒等 编著

下 册



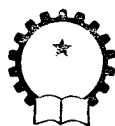
机械工业出版社

金属感应热处理

下 册

刘志儒 俞松尧 卢锦宝 编著

王新生 王东升 审校



机械工业出版社

本书分上、下两册出版。上册主要讲述高、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。

本书是下册，共分 8 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(下册)

刘志儒 俞松尧 卢锦宝 编著

王新生 王东升 审校

责任编辑：丁文华

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

人民交通出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850×1168¹/₃₂·印张 12¹/₄·插页 2·字数 329 千字

1987 年 10 月北京第一版·1987 年 10 月北京第一次印刷

印数 0,001—3,430·定价：3.70 元

统一书号：15033·6567



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工人参考，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、调试以及使用和维修方面的基本问题，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

IV

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

概 述.....	1
第1章 高频感应加热设备	12
1.1 高频感应加热设备的基本原理和组成.....	12
1.2 高频感应加热设备的整流电路.....	14
1.2.1 不可控整流电路.....	14
1.2.2 可控整流电路.....	27
1.2.3 带交直流叠加移相器的三相全波桥式半控整流电路.....	34
1.2.4 带三相电阻移相器的三相全波桥式半控整流电路.....	41
1.2.5 带感应移相器的三相全波桥式半控整流电路.....	45
1.2.6 高压硅堆在高频设备整流电路中的应用.....	47
1.2.7 可控硅交流调压在高频设备整流电路中的应用.....	49
1.3 高频感应加热设备的振荡电路.....	54
1.3.1 LC 振荡的物理过程	54
1.3.2 LC 自激振荡电路的基本原理	59
1.3.3 振荡管的特性和作用.....	61
1.3.4 高频感应加热设备的振荡电路.....	70
1.3.5 振荡槽路的基本型式.....	82
1.3.6 高频感应加热设备振荡电路的负载特性.....	86
1.4 高频感应加热设备的控制电路.....	97
1.4.1 控制电路的安全保护装置.....	97
1.4.2 高频设备的控制电路.....	104
1.5 高频感应加热设备的产品系列.....	107
1.5.1 GP10系列高频感应加热设备	108
1.5.2 GP30-CR13、GP60-CR13型高频感应加热设备	109
1.5.3 GP100-C2、GP100-C3及GP200-C2型高频感应 加热设备.....	114
1.5.4 YG60-250和YG100-250型高频感应加热设备.....	127
1.5.5 高频感应加热设备的发展.....	127

VI

1.6 高频感应加热设备的安装和调试	160
1.6.1 高频感应加热设备的安装	160
1.6.2 高频感应加热设备控制电路的调试	164
1.6.3 稳压器的调试	165
1.6.4 三相全波半控整流器的调试 (理相)	168
1.6.5 高频振荡器功率输出的调试	178
1.6.6 高频设备电参数的制定和正确操作	183
1.7 高频感应加热设备的维护和故障排除	185
1.7.1 高频感应加热设备的维护	185
1.7.2 高频感应加热设备中易损元件的维护和使用	187
1.7.3 高频感应加热设备的故障分析和排除	192
1.7.4 高频感应加热设备的技术安全操作	193
第2章 中频感应加热设备	201
2.1 中频发电机原理	201
2.1.1 中频感应加热设备的组成及其变频过程	201
2.1.2 中频发电机的基本原理	202
2.1.3 中频发电机输出电压的自动调节	208
2.1.4 中频发电机的工作特性	215
2.2 中频发电机的产品系列	219
2.2.1 BPW(L)S40/4、BPW(L)S50/2.5、 BPW(L)S100/2.5型中频发电机	219
2.2.2 BPLS-250/1、BPLS-200/2.5型中频发电机	227
2.2.3 BPS-600/2.5和 BPS-500/1型中频发电机	230
2.3 中频发电机的正确使用与维修	234
2.3.1 中频变压器	235
2.3.2 中频电容器	237
2.3.3 中频发电机的使用、维护与故障排除	239
第3章 可控硅中频电源装置	241
3.1 概况	241
3.1.1 可控硅中频电源装置与中频发电机组的性能比较	241
3.1.2 可控硅中频装置的分类	243
3.1.3 可控硅中频装置的发展与应用	244
3.2 可控硅中频电源装置的基本工作原理	245

3.3 可控硅中频电源装置的整流电路	246
3.3.1 三相桥式全控整流电路的工作过程	246
3.3.2 三相桥式全控整流电路的计算	249
3.4 可控硅中频电源装置的逆变电路	254
3.4.1 逆变器工作原理	254
3.4.2 对逆变桥可控硅的要求	257
3.4.3 串联逆变和并联逆变电路的比较	258
3.4.4 并联逆变电路	261
3.4.5 串联逆变电路	270
3.4.6 串并联逆变电路	282
3.4.7 倍频式逆变电路	282
3.4.8 时间分割式逆变电路	288
3.5 可控硅中频电源的触发电路	292
3.5.1 整流触发电路	292
3.5.2 逆变触发电路	308
3.5.3 逆变触发线路举例	319
3.6 并联逆变器的起动电路	323
3.6.1 起动过程中存在的问题	323
3.6.2 提高起动性能的措施	324
3.7 可控硅中频电源装置的保护	327
3.7.1 交流进线侧的过电压保护	327
3.7.2 三相桥式整流电路的短路保护	328
3.7.3 逆变桥过流和过压保护	328
3.8 可控硅中频电源装置主要产品简介	330
3.8.1 KGPS100-1和 KGPS100-2.5型并联逆变可控硅 中频电源装置	330
3.8.2 KGPS250-2.5改进型并联逆变可控硅中频电源装置	338
3.8.3 KGPS100-8型倍频式可控硅中频电源装置	340
3.8.4 大功率可控硅中频电源装置	344
3.8.5 KGPF-10/1型集成电路可控硅中频电源装置	348
3.9 可控硅高频电源装置	357
3.10 可控硅中频装置的调试、使用与维修	364

3·10·1 调试前的预备性检查	365
3·10·2 可控硅中频装置的调试及故障分析	370
主要参考文献	381

概 述

一、感应加热技术的发展与应用

自十九世纪末期人们开始在工业中利用感应涡流进行加热以来，迄今无论在感应加热设备（或称为感应加热装置）的研制或是在感应加热设备的实际应用方面，均已取得了显著进展。目前在冶金工业、机械制造工业、轻工化学工业、试验研究以及尖端技术方面，感应加热技术的重要性日益明显。兹分别介绍如下：

1. 感应加热技术的优点

在机械制造、冶金工业中，产品或零件的生产过程一般都需要进行加热。例如，金属和合金的熔化与熔炼，粉末冶金制品的烧结，零件或毛坯的加热、钎焊，零件感应热处理等。因此，对加热技术的研究与改进，意义重大，尤其在节约能源及防止工业污染等方面，更显得重要。八十年代到本世纪末，加热技术的发展应考虑如下几个方面的问题：

- (1) 节约能源、减少消耗、降低成本；
- (2) 尽可能提高加热速度和加热效率以提高劳动生产率；
- (3) 充分保证加热质量；
- (4) 尽量减少和消除公害，发展无公害加热技术；
- (5) 加热过程的机械化、自动化和自动控制；
- (6) 操作、使用、维修方便，安全可靠。

就加热用能源及加热质量与效率相互比较而言，采用感应加热较之煤、石油产品、煤气等有如下述优点。

1) 节约电能，减少能源消耗

例如：工件的感应快速加热表面淬火，局部快速加热或钎焊，钢管焊接等可节约大量的电能；我国锻造车间毛坯的加热，采用煤、石油产品或煤气加热，不仅公害严重，且由于大多数的

工厂，废热未被回收利用，热效率大约为8%~20%。若采用感应加热，则热效率可达40%以上。

2) 加热速度快效率高

一般的炉内加热，均靠三种传热方式来加热零件或毛坯，即靠辐射、对流及传导，皆属于间接加热，加热速度缓慢。而感应加热靠感应涡流直接加热，因而具有加热速度快、加热效率高的显著特点，这是间接加热不可能达到的。

3) 加热质量高

在一般炉内间接加热时，由于加热速度慢，加热时间长，将导致零件或毛坯表面氧化脱碳严重。倘若加热过快，表面和心部温差过大，可能产生严重的热应力，致使零件变形甚至开裂。或者由于加热时间过长，因此晶粒严重长大（指锻造前加热），给随后的热处理带来困难，甚至造成不良后果。上述问题，有些是难以克服的。而感应加热时间甚短，加热过程较易控制，加热质量可得到显著改善。

4) 没有公害

一般炉内加热均不可避免地产生大量烟尘、废气及废热，污染环境和恶化工作条件。而感应加热是属于无公害加热，不产生任何废气。

5) 易于实现机械化和自动化

在一般炉内欲实现机械化和自动化比较困难，而感应加热却易于实现。由于它的加热效率甚高，因此只有实行机械化和自动化才能充分发挥这种加热方式的高效能特点。近年来自动控制技术飞跃发展，自动化仪表不断更新，感应加热过程的电子计算机控制也已出现。

6) 操作、使用简便，安全可靠

采用一般燃料炉加热时，升温 and 降温过程很长，浪费大量热能，尤其一班制生产更为严重。而感应加热起动和停止所需的辅助时间甚短，且操作简单、容易，安全可靠。

但是感应加热也有缺点：如只宜于形状简单规则的零件或毛

坏的大批量生产，而多品种小批量的技术经济效果则相对降低；感应加热装置电气线路比较复杂，需要较高水平的维修。

由以上各点可以看到，感应加热与其它方式相比，具有显著的特点，因而日益受到人们的重视。

2. 感应加热技术在我国的应用

感应加热主要应用于两大方面：金属的熔化和加热。两者的加热过程虽没有本质区别，但前者在加热过程中，只求把金属熔化；而后者则要求加热温度均匀，并且能够控制，因而要求较高。两者所用的感应加热设备则没有区别。

作为感应加热的设备来说，可分为工频设备、中频设备、高频设备，特别是高频设备除用于金属的感应加热外，还可用于非金属电介质的电场加热。后者不在本书介绍范围之内，可参阅专著〔17〕。

感应加热在我国冶金及机械制造业的应用已经相当广泛，兹举例简介如下。

1) 金属的感应熔化或熔炼

金属的感应熔炼除熔化速度快及干净没有公害外，还具有特殊的电磁搅拌作用，使液体金属中的气体易于逸出，合金的成分熔合均匀，且容易调整和控制。熔化设备体积小、操作简便、温度容易控制，特别宜于少量熔炼，因此，使之成为新钢种、新合金研究的主要熔炼设备。近年来尖端技术要求高纯度的钢或合金，因而发展了真空感应熔炼技术，真空感应熔炼炉的容量目前达54吨。为了获得高质量的铸铁，日本、西欧、美国等广泛采用感应炉来熔化铸铁。有芯工频感应炉已达270吨(用于铁水保温)，无芯炉方面日本三菱-BBC公司的工频熔化炉已达40吨、10000千瓦，并发展了装配式(即积木式)无芯感应熔炼设备，大大节约了车间生产面积。该公司中频熔炼设备的技术指标如表1所列。

我国解放前感应熔炼可以说是一个空白，在六十年代以后得到了迅速发展。工频化铁炉已达10吨，中频感应熔炼应用在精密铸造方面已经相当普遍。真空感应熔炼炉的容量也已达5吨。目

表1 日本三菱-BBC公司中频感应熔炼设备的技术规格

炉子额定功率 kW	变压器容量 kVA	炉容量 kg	炉额定频率 Hz	标准熔化能力 (特殊钢1600°C)	
				熔化时间(分)	所需电力 kWh/t
300	400	300	1000	45	680
		500	1000	75	700
500	700	500	500	45	650
		1000	500	85	660
600	800	1000	500	70	640
		1500	500	105	670
900	1200	1500	500	65	610
		2000	500	90	640
1200	1600	2000	500	65	600
		3000	500	105	640
1500	2000	3000	500	80	600
1800	2300	3000	500	65	580
		5000	500	105	600
2400	3200	5000	500	80	590

前正向大容量方面发展。

2) 锻造前毛坯的感应加热

目前用石油制品、煤气或者煤来加热锻造毛坯，存在着加热时间长，加热效率低，氧化脱碳严重，质量不易控制等缺点，若采用感应加热就容易克服这些缺点。在锻造车间采用感应加热，不仅可减少能耗、消除公害、改善劳动条件，而且可更好地保证毛坯的金相组织。统计资料指出：一台汽车的制造过程，仅加热时因氧化脱碳而损失的金属约占全车钢材重量的7%左右。因此，采用感应加热仅从氧化脱碳方面夺取的金属就相当可观。在现在的生产情况下，因有严重的氧化脱碳，不得不增大锻坯尺

寸，以致必须消耗大量的切削工时，造成生产成本高。而且氧化皮还能加速模具的磨损，降低锻件表面光滑程度。

感应加热对少无切削加工工艺的发展，更显示出其优越性，如精锻、高速锤锻等锻坯采用感应加热技术，在锻后只需少量磨削或抛光即可，也就是说有助于锻坯的精密化。

从节能角度和挖掘材料强韧化潜力出发，锻后余热淬火（即高温形变热处理）工艺具有明显的优越性。毛坯采用感应加热，将能更好地保证锻后余热淬火质量。

随着专业化生产的日益发展，高效能锻造机械日益增多，机械化自动化程度日益提高，采用感应加热不仅容易组成生产线和实现机械化自动化，还由于加热效率高、启动、停止操作简便，辅助时间短，有利于最充分地发挥高效能锻造机械的潜力，因此可以说锻造车间的技术改造和现代化的实现，采用感应加热是其中最重要环节之一。

3) 在焊接方面的应用

无缝钢管生产工艺较复杂，成本高，用于要求较高的地方。对于一般自来水管等大都采用低碳钢板焊接而成。把钢板条置于自动卷管机上卷成圆管，通过感应加热和滚压即可焊成有缝钢管。利用这种办法加热焊接，生产效率高，质量稳定可靠，节省能源。而硬质合金刀具的焊接更加普遍。

对于某些局部加热钎焊的零件，采用感应加热钎焊或真空感应加热钎焊，更具有明显的优越性。

4) 真空感应烧结

在粉末冶金烧结过程中，为了避免氧化通常往炉中通入氢气保护。当用量较大时必须增添制氢设备。这不仅增加了能源消耗，而且很不安全。近年来采用真空感应加热炉来烧结粉末冶金制品，取得了良好的效果。

5) 感应热处理

感应加热技术在金属热处理方面的应用是相当广泛的，例如零件的感应表面淬火，有各种大小齿轮（模数从一至几十），有

各种轴类零件（从直径几个毫米的小轴，到直径超过1米的轧辊或水压机上的柱塞），以及各种各样的机器零件或汽车拖拉机零件。统计和预测表明，在当前的表面硬化工艺中，由于感应表面淬火比渗碳或碳氮共渗所用的钢材便宜，工艺过程简单，在一些场合下的使用寿命不相上下，因而出现以感应表面淬火取代渗碳的趋势。热处理技术发展预测指出：到本世纪末工业发达国家化学热处理将由目前占全部热处理比重的15%增加到21%，而一般工业国则由5%增加到21%；感应表面淬火工业发达国家由目前的12%增加到20%，而一般工业国则由4%增加到20%。上列数字说明两种表面硬化方式的重要性基本相当。

除此之外，穿透感应加热在某些形状简单的零件热处理中，也获得了某些应用。例如：轴承环、钢球、汽车板簧、高强度螺栓等等。我国洛阳轴承厂研制成功的308轴承环感应淬火回火生产线，就是成功的一个例子。与原来工艺相比，不仅节电、减少耐热钢消耗，还使轴承寿命平均提高1倍以上。

感应化学热处理也有少许应用，如中频感应渗碳、高频氮化等在生产上实践证明，显著缩短了工艺周期，技术经济效果良好。

6) 其它方面的用途

除上面介绍为人们所熟知的外，在尖端技术方面应用也不乏其例。如纯金属的区域提纯，半导体单晶或多晶的获取等。除此之外，钢铁定碳时用感应加热试件较之一般电炉要方便得多。由上所述，充分利用感应加热的特点和优势，为我国四个现代化服务，尚须进行大量试验研究。由此也说明了感应加热设备的重要性日益突出。

二、我国感应加热设备概况

1. 感应加热设备的分类

建国以来随着社会主义建设事业的发展，我国感应加热设备（也称感应加热装置或称感应电炉）也经历了从无到有，从少到多，从规格品种不齐全到标准化系列化的过程。特别是从七十年

代以来,在我国电子工业急速发展的基础上,感应加热设备的研究和生产取得了大幅度增长,如今在金属材料的生产与研究部门,各类机械制造厂与维修部门的使用已经相当普遍。

感应加热设备的品种规格很多,为了了解其特点和它们之间的异同,可对它们进行分类:

1)按频率范围分

按感应加热设备的频率可分为:工频、中频和高频。在国外文献资料上所指的高频,也包括中频在内。

(1)工频

是指工业频率的交流电(50赫),特点是频率较低,且不需变频设备,因而整个装置比较简单。适用于大功率的熔炼设备,大型零件的表面感应加热淬火,大中型零件或毛坯的感应穿透加热。应用中的有关问题请参阅本书上册。

(2)中频

通常是指500~10000赫兹的变频设备,把50赫兹的工频交流电通过变频设备变到上述频率范围。由于可控硅变频装置的出现,低于500或高于10000赫兹的中频设备业已投入使用。主要用于中等容量以下的金属熔炼,锻造毛坯的感应透热,机器零件的表面淬火或透热淬火。

(3)高频

通常是指100~500千赫范围,不久前10千赫至100千赫之间尚属空白频带,超音频设备的研制成功,已填补了这个频带,这主要是为了解决中模数齿轮、凸轮等沿轮廓淬火的需要而研究成功的。高频频带主要用于少量试验研究熔炼及少量精密铸件的生产,1~2毫米淬硬层的浅层表面硬化淬火。近年来为适应小零件表面淬火或局部区域的脉冲淬火,或化学分析定碳时的试样加热,已生产出频率以兆赫计的小型超高频设备。

2)按变频原理分

前面已指出,除工频外,中频及高频均需变频设备,而中频及高频频带范围与变频设备的原理及结构有密切关系。

(1) 中频感应加热设备

按其原理不同可分为两大类：增频发电机(也叫中频发电机)及可控硅变频装置(也叫可控硅中频逆变器)。离子管式发生装置(0.5~3千赫)在我国没有得到应用。

中频发电机与一般发电机没有本质区别，按发电机原理只要增加发电机磁极数量及转速，就可以使其频率得到提高。目前我国生产的中频发电机的频率范围为500~8000赫。每台发电机只有一个频率，而且是固定不变的。由于结构上的原因，很难将上限提高到10千赫以上。500赫以下的需要特殊定货。我国目前生产的中频发电机功率是50千瓦至600千瓦，已有系列产品。若功率不足时，可将同规格中频发电机两台或多台并联供电。

随着可控硅技术的发展，自1966年瑞士首先研制成功可控硅中频逆变装置以来，七十年代得到了迅速发展。1969年上海沪东造船厂制造出我国第一台60千瓦1000赫的可控硅中频加热装置用于弯曲管子时的加热，引起了人们的兴趣和重视。目前已有相当数量的工厂生产这类产品，供给生产单位使用了。

可控硅中频装置之所以得到迅速发展，首先是由于它的变频效率较中频发电机高出许多(前者为90~95%，后者为70~85%)；其次是零件在加热过程中导磁率 μ 、电阻率 f 改变引起负载变化时，能自动改变频率，使变频器始终工作在谐振状态，即在最佳状态下工作，而不像中频发电机需补加电容来维持最佳工作状态；此外，还有体积小、节约材料、占地面积小、噪音小、安装简便等许多优点，因而有取代中频发电机的趋势。

可控硅中频装置的频率变化范围也较中频发电机更宽。频率越低变频较易，当超过10千赫后则较困难，下限频率200~500赫兹，而上限可达20~50千赫。为了填补10~100千赫这段频率的空白，提供高效率的变频器，各国都在进行研究。1973年法国首先研制出50千赫25kW的可控硅变频器，我国西安电炉研究所不久前亦研制出频率为30~50千赫功率为100~60千瓦的可控硅变频器，为四化作出了贡献。在功率方面为适应客观需要而向大容