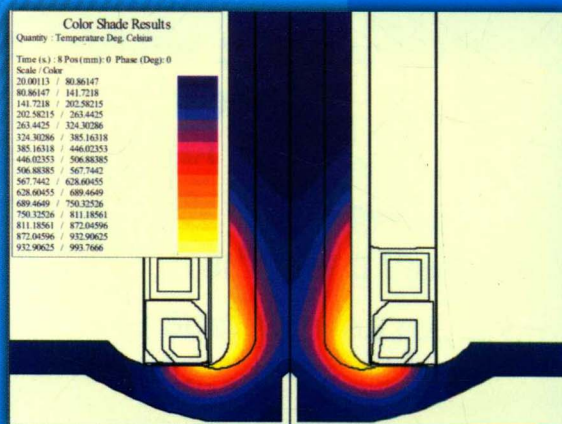


XIANDAI GANYING RECHULI JISHU

# 现代感应热处理技术

第2版

沈庆通 梁文林 编著



- 感应热处理工艺装备
- 先进感应热处理技术
- 感应热处理节能实例
- 感应热处理技术开发



# 现代感应热处理技术

第2版

沈庆通 梁文林 编著



机械工业出版社

本书全面系统地介绍了现代感应热处理技术。其主要内容包括：现代感应加热电源、感应加热电源的选择、感应淬火机床与淬火夹具、感应淬火机床的主要部件与监控仪器、感应加热装置的辅助设备、表面淬火用感应器、感应淬火成套设备的组成与布置、感应热处理工艺、感应热处理技术开发等。本书注重原理阐述，更着眼于应用技术介绍。此次修订删旧增新，增加了近年来的感应热处理新工艺与新装备的内容。本书配有丰富的图表与实例，实用性、针对性强。

本书适合于从事感应热处理工艺、装备设计的技术人员及操作人员阅读，也可供相关专业大专院校师生及研究人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

现代感应热处理技术/沈庆通, 梁文林编著. —2 版.  
—北京: 机械工业出版社, 2015. 6  
ISBN 978 - 7 - 111 - 50060 - 5

I. ①现… II. ①沈…②梁… III. ①感应热处理  
IV. ①TG156. 99

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 084936 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 陈保华 责任编辑: 陈保华

封面设计: 陈 沛 责任校对: 刘秀丽 程俊巧

责任印制: 刘 岚

北京京丰印刷厂印刷

2015 年 7 月第 2 版·第 1 次印刷

169mm × 239mm · 24.5 印张 · 1 插页 · 463 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 50060 - 5

定价: 59.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

010-88379203

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面防伪标均为盗版

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

## 第2版前言

本书第1版是从2004年开始编写的,当时我国感应热处理工艺与装备的水平还处在创新初期,书中内容主要取材于工业发达国家的素材,特别是原苏联、德、美等国家的技术资料较多。10余年来,国内外感应加热装备制造业发展迅猛,例如,IGBT固态电源的核心控制单元从小规模集成电路向数字化(DSP数字信号处理器)、智能化发展;淬火机床向多功能与自动化发展,特别是曲轴淬火装置与工艺,实现了轿车曲轴圆角淬火与感应回火或自回火;感应器向计算机优化、模具化、高效率与延长服役期发展;感应淬火工艺向计算机模拟与节能发展等。本书第1版内容已经不能满足读者的需求。为了与时俱进,适应感应热处理行业的发展和读者需求,决定对本书第1版进行修订,出版第2版。

多年来,笔者从国内外专业技术书籍、会议资料中,获得了许多与感应热处理技术相关的新知识和新技术,在平时的工作、技术咨询中也解决过许多技术问题,做过一些研究。在这些技术积累的基础上,对本书进行了修订。修订的主要内容如下:

1) 增加了感应热处理节能应用的一些实例。

2) 增加了一些工业发达国家的先进感应热处理技术内容,如曲轴淬火机床的多通道变频电源、感应器降级显示,双负载齿轮扫描淬火机床,不需水冷的高、中频感应淬火变压器,旋转加热感应器,带锯齿部超高频淬火设备,可调整长度感应器等新技术。这些内容可为我国感应热处理技术人员创新研发提供参考。

3) 介绍了我国感应加热装备制造业在近期开发的许多新产品,如数字化晶体管电源、工作中淬火变压器能前后进退(Z轴)的双工位通用淬火机床、船用曲轴淬火机床、轿车曲轴感应淬火生产线、导轨感应淬火机床、质量监控系统(QMS)、感应器接地保护模块、双频淬火变压器、轿车曲轴圆角淬火感应器、水冷中频同轴电力电缆等。这些内容标志着我国感应加热技术的进步与发展方向。

4) 删去了一些技术陈旧的内容,如原苏联的一些汽车零件感应淬火工艺参数、旧型感应淬火机床等。

5) 在渗碳淬火与感应淬火技术要求的差别,以及感应淬火件结构与工艺性等方面,增加了一些新技术内容,以便有助于设计人员与工艺人员对零件结构与技术要求认识的统一。

6) 增加了导磁体的镶装技术、铜管材料及有效圈失效原因分析等技术内容, 这是笔者常遇到的咨询问题。修订时对这些内容进行了补充。

在本书修订过程中, 国内外同行给予了极大的支持。洛阳升华感应加热公司、美国 FLUXTRON 公司、SMS-Elotherm (上海) 公司、上海智清感应加热公司、天津天丰中高频感应设备公司、洛阳中壹马机械设备公司、洛阳科诺工业设备公司、长沙恒升电器公司与山东荣泰感应科技公司均提供了新产品技术资料, 冯伟年高级工程师提供了解决直径 4mm 以下弹簧钢丝的感应淬火 (900℃) 这个难题的相关技术资料, 朱会文经理提供了参加 ASM 热处理会议的论文集, 殷毓斌高级工程师也提供一些宝贵资料, 武瑞、高玉军、杨继贤工程师协助整理了部分感应淬火机床的技术资料, 在此一并表示衷心的感谢!

由于我们水平有限, 错误之处在所难免, 敬请广大读者批评指正。

沈庆通

# 第 1 版前言

在 20 世纪 30 年代,出现了感应热处理。最初应用在曲轴颈表面淬火,随后扩大到发动机、汽车底盘、坦克履带等各种零件上,现在已扩大到机床、轴承、石油、铁道、重型机械等各个行业。

由于感应热处理具有节能、高效、劳动环境好、在线生产、便于自动化等一系列优点,因此发展异常迅速,在国内外得到普遍的应用与推广。

我国感应热处理技术的应用起步于 20 世纪 50 年代初,在原苏联的技术援助下,首先应用于机床与纺机制造业,其后,汽车、拖拉机制造厂大量地采用了感应热处理工艺。

我国感应热处理技术的发展经历了几个里程碑:20 世纪 50 年代,原苏联援助阶段;20 世纪 60 年代,独立自主,自力更生阶段;20 世纪 80 年代后,对外开放,技术引进阶段;20 世纪 90 年代到 21 世纪初,发展为技术创新阶段。

感应热处理技术包含了材料、金属热处理、机械、电气、电磁、电子、计算机应用等多门学科。在原苏联,原列宁格勒电工学院曾设置了此专业。我国此专业人才大都来自机械、热处理、材料与机电一体化专业。

20 世纪 50 年代,我国感应热处理所用的装备,首批来自原苏联等国家,其后从仿制到研制。电子管高频及机械式中频发电机、液压及机械传动的通用淬火机床、聚焦型齿轮感应器、开合型曲轴感应器等均是当时的产品。1958 年,在原一机部新技术推广所组织的第一次全国高频电热技术交流会上,已经呈现出装备制造、工艺应用等各方面欣欣向荣的景象了。20 世纪 60 年代后,由于当时国外技术来源断绝,工业上走自力更生道路,以当时第二汽车制造厂建厂所采用的高中频装备为例,绝大部分由国内供应,数十台高、中频感应淬火机床是组织国内设计院、工厂共同设计的。原一机部第六设计院曾将国内自行设计的数十台淬火机床汇编成图册,其中许多机床具有实用性与先进性等特点。当时第二汽车制造厂各分厂感应淬火件的生产水平也具有时代特征,其中相当部分具有独创性。原上海机械厂(现上海热处理厂)在高频感应淬火生产管理上也卓有成效。

改革开放以来,来自德、美、英、法、日、意、西班牙、比利时等工业发达国家的感应热处理设备进入了我国各企业,其中有曲轴、凸轮轴、等速万向节、齿轮等数十种感应淬火成套装置,具有不同的风格与特点,一般具有节能、高效、低劳动强度、自动化程度高等特点。装置的耐用性较高,故障率低,结



构紧凑,占地面积小,外形美观,并且便于调整。在进口国外技术中存在着重硬件、轻软件的偏向,因此,出现了如何将这些进口的先进装备,择其优点、洋为中用的问题。

中国热处理协会工艺装备委员会和中国热处理学会感应加热技术委员会,于1992年5月在无锡市召开了“感应加热进口设备与引进技术消化吸收经验交流会”,旨在促使我国专业人员了解已进口的感应加热装置的技术,以及工业发达国家感应加热技术发展的现状。我国多次举办的感应加热专题研讨会与热处理展览会也均有同一目的,即交流国内外的新技术。

新中国建立以来,我国已出版了多种感应热处理技术图书,例如:梁文林教授编的《感应加热装置》(1981年机械工业出版社);刘志儒教授等编的《金属感应热处理》(1985年机械工业出版社);林信智高工等编的《汽车零部件感应热处理工艺与装备》(1998年北京理工大学出版社);笔者编的《感应热处理问答》(1990年机械工业出版社)等。以上技术图书均在一定时期、一定范围内介绍了当时的感应热处理技术。

国际上经常举办热处理及感应加热技术研讨会,交流各国、各企业、研究所感应加热技术的发展状况,只是我国参加这些会议的人员不多,行业人员收集阅读这些会议资料的也不多。

企业进口感应加热装置时,一般派员去国外企业进行考察及预验收设备,这是了解国外新技术发展的好机会。在20世纪80年代,热处理学会曾组织过两次热处理出国人员考察座谈会,编有内部资料,但看到的人不多。因此,常常有国外企业知道其产品销售给中国哪几个企业,而国内同行反而不知道该项设备已进口多台的情况。同样,对国外哪个企业的设备具有什么优势等也不甚了解。

笔者多年来坚持以下观点:从高起点出发,引进国外一些先进技术,加快我国对该项技术的发展是必要的,但不应多次重复进口同种设备,应该将从多个国家进口的项目,去粗取精,洋为中用,结合中国国情,发展我国自己的技术与装备,即应有独创性。有鉴于此,笔者力促举办1992年的无锡会议,在国内感应热处理专业研讨会上,也力倡对国外先进技术进行消化吸收,制造我国具有独创性的感应加热装置。

回顾20世纪50年代,笔者在第一汽车制造厂从事高频感应热处理工艺工作,随原苏联专家П. А. 兰金博士进行汽车底盘高频感应淬火件工艺调试;20世纪60年代初,随高频电流科学研究院专家П. Б. 沙莫伊洛夫在第一拖拉机厂参与东方红拖拉机高频感应淬火件的工艺与设备调试;改革开放以后,笔者在菲亚特公司下属各厂考察农机热处理零件的工艺与装备,在艾洛瑟默公司预验收半自动旋转曲轴淬火机床等;退休后,在光华感应加热器厂(现升华感应加

热有限公司) 从事感应器设计与制造技术工作, 在此阶段接触了许多国外公司与进口的感应器项目, 了解了很多现代感应器的设计与制造技术。

在年逾古稀之际, 深感到行业中对现代感应热处理技术资料需要的迫切性。为行业中的年轻一代创造一个浏览面更大一些、思路更宽一些的条件, 使行业在该项技术的发展中, 多一些借鉴, 少一些弯路, 这个责任时刻在鞭策着我, 这就是笔者编写此书的缘起与动力。

梁文林教授对电子管高频感应加热装置, 从理论到实践均有很高的造诣, 经笔者约请, 他参与了第2章现代感应加热电源部分的编写。对感应加热新电源 IGBT 与 MOSFET 部分, 梁教授是苦心孤诣、认真负责的, 多次进行修改与补充, 三易其稿, 笔者深深地表示钦佩与感谢。

在本书即将付印之际, 笔者要感谢第一个给我提供资料的 F. H. 莱因格博士。早在 20 世纪 80 年代初, 是他寄给我许多论文, 有曲轴、履带行走部分、一发法淬火等多种资料。Gerd 奥玛工程师 (AEG-Elotherm 公司) 提供了感应加热多种资料。美国达科 (TOCCO) 公司的 George D. 法夫曼先生多次寄给我许多论文资料, 使我对美国该行业的发展情况了解得更多。V. S. 乃姆可夫博士与 K. З. Шепеляковский 博士均将自己的感应加热专著赠予我。还有应达公司周大振先生, G. H. 电热公司北京办事处均为本书提供了资料与图片, 在此一并感谢。

本书的编写得到升华感应加热有限公司张宗杰总经理等的大力支持, 李红莉、毛海群、王峰、刘琳琳等先后为本书的整理给予了极大的帮助, 特别是刘琳琳, 最后协助我完成了全部文稿。

由于笔者学识所限, 本书中肯定会有一些片面或差错之处, 希望读者鉴谅并指正。深深地祝愿广大读者能为我国的感应热处理事业创造辉煌的未来!

沈庆通



# 目 录

## 第2版前言

## 第1版前言

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| 第1章 概述 .....                                | 1  |
| 1.1 感应加热的发展历史 .....                         | 1  |
| 1.2 我国感应热处理技术发展的四个阶段 .....                  | 2  |
| 1.3 感应热处理的优点及其局限性 .....                     | 3  |
| 1.4 感应热处理在工业中的应用 .....                      | 4  |
| 第2章 现代感应加热电源 .....                          | 6  |
| 2.1 概述 .....                                | 6  |
| 2.2 晶闸管(SCR)中频电源 .....                      | 9  |
| 2.2.1 普通型晶闸管 .....                          | 10 |
| 2.2.2 晶闸管的一些派生器件 .....                      | 13 |
| 2.2.3 电力半导体模块 .....                         | 14 |
| 2.2.4 晶闸管(SCR)中频感应加热电源 .....                | 15 |
| 2.2.5 现代中频感应加热电源的整流器 .....                  | 23 |
| 2.3 MOSFET高频电源 .....                        | 28 |
| 2.3.1 MOSFET的特性及参数 .....                    | 28 |
| 2.3.2 MOSFET高频逆变器 .....                     | 30 |
| 2.4 IGBT超音频及高频电源 .....                      | 32 |
| 2.4.1 IGBT的特性及参数 .....                      | 32 |
| 2.4.2 IGBT超音频逆变器 .....                      | 34 |
| 2.4.3 MOSFET与IGBT逆变电源的谐振电容器 .....           | 40 |
| 2.4.4 (全)固态感应加热电源 .....                     | 43 |
| 2.4.5 晶闸管(SCR)、IGBT、MOSFET感应加热电源的调功方法 ..... | 45 |
| 2.5 真空管(电子管)高频感应加热电源 .....                  | 46 |
| 2.5.1 真空管高频感应加热电源的组成 .....                  | 47 |
| 2.5.2 三相交流调压器 .....                         | 48 |
| 2.5.3 高压硅堆三相整流器 .....                       | 50 |
| 2.5.4 真空管高频振荡器 .....                        | 51 |
| 2.5.5 老式真空管高频感应加热装置的技术改造 .....              | 54 |
| 2.5.6 真空管高频感应加热设备的安装、调试与维护 .....            | 54 |
| 2.6 感应加热电源的发展现状与发展趋势 .....                  | 57 |
| 2.6.1 感应加热电源的发展现状 .....                     | 57 |

|                                    |           |
|------------------------------------|-----------|
| 2.6.2 感应加热电源的发展趋势 .....            | 58        |
| <b>第3章 感应加热电源的选择 .....</b>         | <b>60</b> |
| 3.1 电流频率的选择 .....                  | 60        |
| 3.2 加热功率的选择 .....                  | 65        |
| 3.3 感应热处理节能及应用实例 .....             | 69        |
| 3.3.1 我国对感应淬火件的电耗规定值 .....         | 69        |
| 3.3.2 感应热处理节能措施 .....              | 70        |
| 3.3.3 感应热处理节能实例 .....              | 70        |
| <b>第4章 感应淬火机床与淬火夹具 .....</b>       | <b>75</b> |
| 4.1 感应淬火机床的特点 .....                | 75        |
| 4.2 感应淬火机床主要功能的确定 .....            | 75        |
| 4.3 通用型感应淬火机床的发展趋势与典型结构 .....      | 79        |
| 4.3.1 MTV-1000 型通用淬火机床 .....       | 79        |
| 4.3.2 变压器升降的 UM-1000 通用型淬火机床 ..... | 79        |
| 4.3.3 紧凑结构的立式感应淬火装置 .....          | 81        |
| 4.3.4 GCHB 双工位数控通用立式淬火机床 .....     | 82        |
| 4.3.5 GCLH 系列数控通用立式淬火机床 .....      | 83        |
| 4.3.6 变压器升降式立式淬火机床 .....           | 84        |
| 4.3.7 大型立式淬火机床 .....               | 84        |
| 4.4 专用感应淬火机床 .....                 | 85        |
| 4.4.1 曲轴感应淬火机床 .....               | 85        |
| 4.4.2 凸轮轴感应淬火机床 .....              | 94        |
| 4.4.3 半轴感应淬火机床 .....               | 98        |
| 4.4.4 链轨节淬火机床 .....                | 103       |
| 4.4.5 销套淬火机床 .....                 | 106       |
| 4.4.6 驱动轮淬火机床 .....                | 108       |
| 4.4.7 导向轮淬火机床 .....                | 109       |
| 4.4.8 履带销扫描淬火机床 .....              | 109       |
| 4.4.9 齿轮埋油淬火机床 .....               | 111       |
| 4.4.10 油层下感应淬火机床 .....             | 112       |
| 4.4.11 托带轮和支重轮淬火机床 .....           | 113       |
| 4.4.12 缝纫机针杆高频感应淬火机床 .....         | 114       |
| 4.4.13 螺钉头全自动感应淬火机床 .....          | 115       |
| 4.4.14 气门摇臂感应淬火机床 .....            | 115       |
| 4.4.15 气门杆端淬火机床 .....              | 117       |
| 4.4.16 减振器连杆感应淬火回火自动机床 .....       | 118       |
| 4.4.17 锭杆感应淬火机床 .....              | 118       |
| 4.4.18 滚珠丝杠感应淬火机床 .....            | 119       |

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 4.4.19 钟形壳全自动淬火机床 .....           | 121        |
| 4.4.20 导轨及直线导轨感应淬火机床 .....        | 122        |
| 4.4.21 国产曲轴淬火机床及生产线 .....         | 123        |
| 4.4.22 冷轧辊双频感应淬火机床 .....          | 126        |
| 4.4.23 大直径冠齿轮一次加热淬火机床 .....       | 127        |
| 4.4.24 大直径内齿整体加热淬火机床 .....        | 128        |
| 4.4.25 双负载齿轮扫描淬火机床 .....          | 128        |
| 4.5 感应热处理生产线 .....                | 129        |
| 4.5.1 族类零件淬火机床和 CVJ 钟形壳生产线 .....  | 129        |
| 4.5.2 驱动轴感应淬火生产线 .....            | 132        |
| 4.5.3 PC 钢筋热处理生产线 .....           | 133        |
| 4.5.4 双频齿轮感应淬火生产线 .....           | 135        |
| 4.6 感应淬火夹具 .....                  | 137        |
| 4.7 机器人在感应淬火机床上的应用 .....          | 141        |
| <b>第5章 感应淬火机床的主要部件与监控仪器 .....</b> | <b>142</b> |
| 5.1 中频感应淬火变压器 .....               | 142        |
| 5.2 电热电容器 .....                   | 150        |
| 5.3 流量监控仪(流量表与流量开关) .....         | 153        |
| 5.4 能量监控器与质量监控系统 .....            | 154        |
| 5.5 接地故障断流器 .....                 | 157        |
| 5.6 功率分配器 .....                   | 158        |
| 5.7 淬火冷却介质管路的控制器件及连接件 .....       | 158        |
| 5.8 淬火机床常用控制系统 .....              | 161        |
| 5.9 测温仪表 .....                    | 162        |
| 5.10 折光仪 .....                    | 164        |
| 5.11 高精度电感仪 .....                 | 164        |
| <b>第6章 感应加热装置的辅助设备 .....</b>      | <b>165</b> |
| 6.1 感应加热设备冷却水系统 .....             | 165        |
| 6.1.1 感应加热电器部件的冷却水质量标准 .....      | 165        |
| 6.1.2 循环系统监控器件与材料的改进 .....        | 168        |
| 6.1.3 采用换热器降低软水的温度 .....          | 168        |
| 6.1.4 典型的配有换热器的冷却水循环系统 .....      | 168        |
| 6.2 淬火冷却介质循环冷却系统 .....            | 170        |
| 6.3 淬火机床的排油烟系统 .....              | 172        |
| 6.4 用机械手或机器人装卸工件 .....            | 172        |
| 6.5 矫正辊与防弯曲变形装置 .....             | 173        |
| <b>第7章 表面淬火用感应器 .....</b>         | <b>175</b> |
| 7.1 表面淬火感应器的设计概念与要求 .....         | 175        |

|        |                        |     |
|--------|------------------------|-----|
| 7.1.1  | 感应器设计要求                | 176 |
| 7.1.2  | 感应器设计的理论与法则            | 177 |
| 7.1.3  | 感应器的结构设计               | 178 |
| 7.1.4  | 提高感应器效率的途径             | 185 |
| 7.2    | 高频感应淬火感应器的典型结构         | 191 |
| 7.2.1  | 利用电流途径的蜗杆一次加热感应器       | 191 |
| 7.2.2  | 利用邻近效应的凹槽侧加热感应器        | 191 |
| 7.2.3  | 内孔加热感应器                | 191 |
| 7.2.4  | 端面加热感应器                | 192 |
| 7.2.5  | 双端面加热感应器               | 192 |
| 7.2.6  | 法兰端面与圆柱面均能加热淬火的扫描加热感应器 | 193 |
| 7.2.7  | 盘状多匝感应器                | 193 |
| 7.2.8  | 分支返回型感应器               | 193 |
| 7.2.9  | 螺管线圈加热气门端头感应器          | 195 |
| 7.2.10 | 机床导轨等平面扫描淬火感应器         | 195 |
| 7.2.11 | 缸套内孔加热扫描淬火感应器          | 195 |
| 7.2.12 | 斜圈式感应器                 | 196 |
| 7.3    | 中频感应淬火感应器的典型结构         | 197 |
| 7.3.1  | 半环形曲轴感应器               | 197 |
| 7.3.2  | 纵向加热的轴类半环形感应器          | 197 |
| 7.3.3  | 凸轮轴淬火感应器               | 198 |
| 7.3.4  | 缸套内表面淬火感应器             | 199 |
| 7.3.5  | 短圆柱体加热感应器              | 199 |
| 7.3.6  | 钟形壳花键部加热感应器            | 199 |
| 7.3.7  | 钟形壳内球道感应器              | 201 |
| 7.3.8  | 三柱滑套内孔加热感应器            | 202 |
| 7.3.9  | 半轴扫描淬火感应器              | 202 |
| 7.3.10 | 半轴一次加热感应器              | 203 |
| 7.3.11 | 带定位夹具的销子感应器            | 204 |
| 7.3.12 | 多层多匝感应器                | 204 |
| 7.3.13 | 钢管内孔扫描淬火感应器            | 205 |
| 7.3.14 | 纵向电流加热的支重轮感应器          | 206 |
| 7.4    | 集流器与磁通截留器在感应器上的应用      | 207 |
| 7.4.1  | 集流器的主要功能               | 207 |
| 7.4.2  | 典型集流器的结构               | 208 |
| 7.4.3  | 集流器设计中的注意事项            | 212 |
| 7.4.4  | 磁通截留器的结构与作用            | 212 |
| 7.5    | 强力感应器与导磁体              | 213 |
| 7.5.1  | 强力感应器                  | 213 |

|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| 7.5.2 导磁体的应用与发展 .....                | 216        |
| 7.6 感应器快换夹头 .....                    | 220        |
| 7.7 感应器制造用材料 .....                   | 222        |
| 7.7.1 导电部分材料 .....                   | 222        |
| 7.7.2 非导电部分的金属材料 .....               | 224        |
| 7.7.3 感应器用绝缘材料 .....                 | 225        |
| 7.7.4 感应器用特殊材料 .....                 | 227        |
| 7.7.5 感应器用导磁体 .....                  | 227        |
| 7.7.6 感应器用软管 .....                   | 228        |
| 7.8 感应器制造技术 .....                    | 228        |
| 7.8.1 不同坯料制成的高、中频感应器 .....           | 228        |
| 7.8.2 零件制造与组装 .....                  | 229        |
| 7.8.3 制造用的模具 .....                   | 229        |
| 7.8.4 检验夹具 .....                     | 231        |
| 7.8.5 钢丝螺套在感应器组装中的应用 .....           | 232        |
| 7.8.6 感应器的钎焊 .....                   | 232        |
| 7.9 感应器的质量检验 .....                   | 233        |
| 7.10 感应器的使用与维护 .....                 | 234        |
| 7.10.1 感应器的使用寿命 .....                | 235        |
| 7.10.2 半环形曲轴感应器常见加热线圈的损坏形式 .....     | 236        |
| 7.10.3 线圈变形的防止 .....                 | 238        |
| 7.10.4 接触板烧伤与偏接触 .....               | 238        |
| 7.10.5 导电板间短路和线圈匝间短路 .....           | 239        |
| 7.10.6 导磁体的镶装技术与失效分析 .....           | 240        |
| 7.10.7 定位块螺钉松动 .....                 | 242        |
| 7.10.8 内孔感应器的使用与维护 .....             | 243        |
| <b>第8章 感应淬火成套设备的组成与布置 .....</b>      | <b>244</b> |
| 8.1 感应加热电源的布置 .....                  | 244        |
| 8.1.1 电子管式高频电源的布置要求 .....            | 244        |
| 8.1.2 晶闸管与晶体管电源及成套感应淬火设备 .....       | 245        |
| 8.2 高、中频供电电缆与母线 .....                | 250        |
| 8.2.1 中频电缆的布线 .....                  | 250        |
| 8.2.2 中频同轴电缆 .....                   | 250        |
| 8.2.3 高、中频供电母线 .....                 | 253        |
| 8.3 感应加热设备上、下水及水循环系统设计布置时的注意事项 ..... | 253        |
| 8.3.1 工业用水或自来水不同管径的耗水量 .....         | 254        |
| 8.3.2 设备冷却水的水量计算和温度控制 .....          | 254        |
| 8.3.3 冷却水系统换热器的换热量 .....             | 255        |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 8.3.4 对淬火槽和相关管路的要求 .....       | 257        |
| 8.3.5 工业用水的蒸发冷却系统 .....        | 257        |
| 8.3.6 软水循环水系统 .....            | 258        |
| 8.3.7 淬火槽的布置 .....             | 258        |
| 8.4 国内外典型感应淬火设备及选用 .....       | 258        |
| <b>第9章 感应热处理工艺</b> .....       | <b>264</b> |
| 9.1 感应淬火工艺的方式 .....            | 264        |
| 9.2 感应淬火常用的淬火冷却介质 .....        | 267        |
| 9.3 回火 .....                   | 270        |
| 9.4 感应退火或正火 .....              | 273        |
| 9.5 感应热处理件的技术要求 .....          | 274        |
| 9.5.1 感应淬火的目的 .....            | 274        |
| 9.5.2 感应淬火与渗碳淬火技术要求的差别 .....   | 275        |
| 9.5.3 感应淬火件的硬度 .....           | 276        |
| 9.5.4 感应淬火件的淬硬区 .....          | 277        |
| 9.5.5 感应淬火件的硬化层深度 .....        | 277        |
| 9.6 感应淬火件的设计要素与工艺性 .....       | 281        |
| 9.7 感应热处理的工艺调整 .....           | 284        |
| 9.7.1 电规范调整 .....              | 285        |
| 9.7.2 热处理规范调整 .....            | 292        |
| 9.8 感应淬火件的质量检验 .....           | 296        |
| 9.9 感应淬火件常见淬火缺陷及其防止措施 .....    | 302        |
| 9.9.1 表面淬火后硬度不够 .....          | 302        |
| 9.9.2 硬化层剥落、崩落及边棱开裂、掉圈 .....   | 303        |
| 9.9.3 感应淬火件的淬火裂纹 .....         | 304        |
| 9.9.4 感应淬火件的变形与减少变形的措施 .....   | 307        |
| 9.9.5 感应淬火件表面局部烧熔 .....        | 309        |
| 9.10 典型感应淬火件的感应淬火工艺 .....      | 309        |
| 9.10.1 曲轴颈圆角淬火与柔性曲轴淬火机床 .....  | 309        |
| 9.10.2 凸轮轴感应淬火工艺 .....         | 311        |
| 9.10.3 气缸套感应淬火工艺与质量问题 .....    | 313        |
| 9.10.4 飞轮齿圈感应淬火工艺与质量 .....     | 316        |
| 9.10.5 半轴感应淬火工艺 .....          | 319        |
| 9.10.6 等速万向节钟形壳感应淬火工艺与质量 ..... | 321        |
| 9.10.7 大回转支承滚道的淬火 .....        | 323        |
| 9.10.8 转向齿条导电或感应淬火回火 .....     | 324        |
| <b>第10章 感应热处理技术开发</b> .....    | <b>326</b> |
| 10.1 可控淬透性钢的整体加热表面淬火 .....     | 326        |



|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 10.2 曲轴颈感应淬火与回火工艺 .....          | 327 |
| 10.2.1 固定式曲轴颈感应淬火与回火工艺 .....     | 327 |
| 10.2.2 曲轴颈旋转感应淬火新工艺的研发 .....     | 330 |
| 10.3 用旋转感应器进行内孔淬火 .....          | 331 |
| 10.3.1 旋转式的变压器感应器组 .....         | 331 |
| 10.3.2 气缸盖阀座双工位旋转加热变压器感应器组 ..... | 333 |
| 10.3.3 现代旋转感应器 .....             | 333 |
| 10.4 螺旋弹簧感应淬火 .....              | 334 |
| 10.5 大功率脉冲感应淬火 .....             | 335 |
| 10.6 超高频脉冲感应淬火 .....             | 336 |
| 10.7 计算机模拟在感应加热中的应用 .....        | 338 |
| 10.7.1 感应加热计算机模拟的特点及过程 .....     | 338 |
| 10.7.2 感应加热计算机模拟软件 .....         | 339 |
| 10.7.3 计算机模拟实例 .....             | 340 |
| 10.8 齿轮双频感应淬火 .....              | 344 |
| 10.8.1 齿轮双频感应淬火的挑战 .....         | 344 |
| 10.8.2 齿轮双频感应淬火试验与对比 .....       | 345 |
| 10.8.3 现代化的齿轮双频感应淬火法 .....       | 347 |
| 10.8.4 齿轮双频感应淬火的工业应用 .....       | 348 |
| 10.9 中碳钢齿轮感应淬火代渗碳齿轮淬火 .....      | 349 |
| 10.10 感应加热模压淬火 .....             | 350 |
| 10.11 弹簧钢丝感应热处理 .....            | 352 |
| 10.12 数字化 IGBT 感应加热电源 .....      | 354 |
| 10.13 感应器设计与制造新技术 .....          | 355 |
| 附录 .....                         | 358 |
| 附录 A 感应加热的常用术语 .....             | 358 |
| 附录 B 感应淬火用钢铁材料 .....             | 360 |
| 附录 C 常用高频导磁体规格 .....             | 367 |
| 附录 D 可加工导磁体选择准则 .....            | 369 |
| 附录 E 感应加热常用图表 .....              | 370 |
| 参考文献 .....                       | 374 |

# 第 1 章 概 述

## 1.1 感应加热的发展历史

1831 年法拉第 (Michael Faraday) 发现的电磁感应是感应加热的理论基础。

1840 年焦耳 (J. P. Joule) 表达了电热定律, 即导体上每秒通过电流产生的热, 与导体的电阻和电流的平方成正比。

1868 年福考特 (Foucault) 提出了涡流理论。

1916 年美国普林斯顿大学的诺思拉普 (Edwin F. Northup) 研制出火花式逆变器感应炉, 用于熔炼金属。

1930 年, 原苏联的 В. П. ВОЛОГДИН 研制成高频感应炉。

感应加热用于表面淬火的最早的例子, 在原苏联是 1935 年应用于钢轨和曲轴颈表面淬火, 图 1-1 所示为 В. П. ВОЛОГДИН 在进行曲轴颈感应淬火。与此同时, 美国俄亥俄州曲轴工厂为提高曲轴颈的耐磨性, 也研制了曲轴淬火机床。其后, 感应淬火广泛地应用于汽车、铁路、机床、机车、轴承、冶金、石油、宇航等各个行业。由于感应加热具有节能、劳动环境好及便于自动化等优点, 感应加热技术得到迅速发展。

1939 年, В. П. ВОЛОГДИН 出版了首部感应加热专著《感应方法表面淬火》。1947 年, 原苏联建立了高频电流科学研究院 (НИИТВЧ), 其后该研究院以 ВОЛОГДИН 命名, 称为沃罗格金高频电流科学研究院, 即 ВНИИТВЧ。



图 1-1 В. П. ВОЛОГДИН 在进行曲轴颈感应淬火

我国在 20 世纪 50 年代中期, 中国科

学研究院长春光机所已研制出火花式高频电源, 1958 年, 天津广播器材厂与北京广播器材厂相继研制出 200 ~ 300kHz, 30kW、60kW、100kW 的电子管高频电源, 湘潭电机厂与锦州电炉厂则制造出机械式发电机及控制设备, DGF-C-102、108、252, GT40/4 感应透热设备等系列产品, ZG-200 型真空感应电炉也开始供应市场。

其后在工业发达国家感应加热装置的发展有以下几个里程碑:

1964 年, Louis Allis Co 设计并应用晶闸管于逆变器。

1969 年, 第一台 540Hz 全固态电源建成。

1972 年, 第一台 50kHz 电源建成。

1973 年, LED 诊断控制屏用于故障显示。

1974 年, 电源设备的冷却系统改进, 可见的排出水被流量计及压力表所取代, 第一台压力闭路循环冷却系统使用于整个感应加热系统的冷却。

1978 年, 第一台效率为 97% 固态电源由 Pillar Co. 设计并制造。

1980 年, 在工业发达国家实际上淘汰了机式发电机及倍频器。

1986 年, 第 1 台晶体管逆变器在 MOSFET 功率器件上研制成, 频率从几百赫兹到几十万赫兹, 功率从几百瓦到几百千瓦。

1990 年晶体管逆变器在 IGBT 基础上研制成功, 频率从几百赫兹到 150kHz, 功率可达几兆瓦。由于其成本低, 便于并联等, 将取代全部晶闸管电源。

## 1.2 我国感应热处理技术发展的四个阶段

我国感应热处理技术的发展可分为四个阶段, 即改革开放前的全面引进原苏联技术阶段和自力更生阶段, 改革开放后的快速发展阶段和自主创新阶段。

(1) 全面引进原苏联技术阶段 新中国成立初期, 我国的感应热处理技术在工艺装备设计制造、工厂设计及工艺与理论三个方面全面得到了原苏联的援助。

(2) 自力更生阶段 1960 年以后, 我国感应热处理技术的发展进入了自力更生阶段。其标志是新汽车厂建设中的感应加热工段设计、装备及工艺几乎全部自给, 机床厂、热处理厂的感应淬火机床、感应器也全部自给, 呈现百花齐放的兴旺景象。汽车感应热处理零件占全部热处理件的百分比不断增大。开展了一些新工艺如钢轨端头感应淬火、低淬透性钢齿轮淬火等的研发, 感应加热学术交流兴起。

(3) 快速发展阶段 改革开放后, 通过赴工业发达国家考察、学习、参与与交流, 引进了一些先进的感应加热工艺、装备、技术图书与标准, 使我国感应加热的工艺与装备等发生了极大的变化。其代表性的例子有纵向电流加热台阶轴 (应用于半轴一次淬火), 旋转加热曲轴颈 (应用于发动机曲轴), 齿轮仿齿廓淬火, 用硬度法测定淬硬层深 (取代原来金相法测定), PTFE 板、可加工导磁体及无氧铜材用于感应器制造等。在感应加热企业发展上也发生了很大变化, 感应加热电源厂、感应器厂、变压器厂、淬火机床厂相继建立, 成套设备供应起步, 并开始走向国际先进水平。

(4) 自主创新阶段 目前, 我国感应热处理技术处于自主创新阶段。

1) 感应加热装备制造业呈突飞猛进状态。在电源方面, IGBT 晶体管超音