

感应加热工艺与设备的发展状况及趋势

全国热处理学会感应加热技术委员会

感应加热来源于法拉第发现的电磁感应现象,也就是交变的电流会在导体中产生感应电流,从而导致导体发热。1890年瑞典技术人员发明了第一台感应熔炼炉——开槽式有芯炉,1916年美国人发明了闭槽有芯炉,从此感应加热技术逐渐进入实用化阶段。而后,20世纪电力电子器件和技术的飞速发展,极大的促进了感应加热技术的发展。

1957年,美国研制出作为电力电子器件里程碑的晶闸管,标志着现代电力电子技术的开始。同时,也引发了感应加热技术的革命。1966年,瑞士和西德首先利用晶闸管研制感应加热装置,从此感应加热技术开始飞速发展。

80年代后,电力电子器件再次飞速发展,GTO、MOSFET、IGBT、MCT、SIT等器件相继出现。感应加热装置也逐渐摒弃晶闸管,开始采用这些新器件。现在比较常用的是IGBT和MOSFET,IGBT用于较大功率场合,而MOSFET用于较高频率场合。据报道,国外可以采用IGBT将感应加热装置做到功率超过1000kW,频率超过50K。而MOSFET较适用高频场合,通常在几千瓦的中小功率场合,频率可达到500k以上,甚至几M。然而国外也有推出采用MOSFET的大功率的感应加热装置,比如美国研制的2000KW/400KHz的装置。

我国感应热处理技术的真正应用始于1956年,从前苏联引入,主要应用在汽车工业。随着上世纪电源设备的制造,感应淬火工艺装备亦紧随其后得到发展。现在国内感应淬火工艺装备制造制造业亦日益扩大,产品品种多,原来需要进口的装备,逐步被国产产品所取代,在为国家节省外汇的同时,发展了国内的相关企业。目前感应加热制造业的服务对象主要是汽车制造业,今后现代冶金工业将对感应加热有较大需求。

1 感应加热特点

感应加热技术具有快速、清洁、节能、易于实现自动化和在线生产、生产效率高等特点,是内部热源,属非接触加热方式,能提供高的功率密度,在加热表面及深度上有高度灵活的选择性,能在各种载气中工作(空气、保护气、真空),损耗极低,不产生任何物理污染,符合环保和可持续发展方针,是绿色环保型加热工艺之一。它与可控气氛热处理、真空热处理少氧化技术已成为热处理技术发展主流。

其优点是加热周期短生产率高,有较好的金相学结果,便于控制和高度的重现性,表面氧化及脱碳少、变形少,适合于工业环境。一种或几个相近尺寸的工件,高生产率的、局部加热应用,高温过程,占地面积小的,在线过程、高技术过程(附加值)等条件都适用。

其主要应用有:

(1) 冶金:有色金属的冶炼,金属材料的热处理,锻造、挤压、轧制等型材生产的透热;焊管生产的焊缝。

(2) 机械制造:各种机械零件的淬火,以及淬火后的回火、退火和正火等热处理的加热。压力加工前的透热。

(3) 轻工:罐头以及其它包装的封口,比如著名的利乐砖的封口包装。

(4) 电子:电子管真空除气的加热。

(5) 特殊应用(等离子、堆焊等)。

以一汽为例,在生产的中型车、轻型车和轿车上,就有近200种零件需要感应加热淬火处理,从感应加热淬火零件的形状和尺寸来看,可称得上花样繁多且大小均有。随着感应淬火技术的不断发展,感应淬火的零件已上升到占全部热处理零件的50%左右。据有关数据表明,在我国的汽车工业中,感应热处理的

应用正进入世界先进水平的行列。

2 感应加热新工艺

感应加热工艺技术是感应加热技术水平的主要体现,是技术发展的基础,先进的感应加热工艺技术可以有效地发挥感应加热的特点,实现高效、节能的局部热处理。

(1) 纵向感应加热淬火。

半轴纵向感应加热淬火已用于汽车、拖拉机工业,半轴纵向加热是一次淬火。在德、美有半轴一次淬火专用机床,将加热、校正、淬火在一台机床上完成,提高了生产率,一次淬火与连续淬火相同产量的设备占地面积各为 40m^2 与 115m^2 。

(2) 曲轴颈圆角淬火。

曲轴颈圆角淬火后,疲劳强度比正火的提高一倍,我国生产的康明斯与 NH 发动机曲轴均已采用此种工艺。

(3) 低淬透性钢齿轮淬火。

早在 20 世纪 70 年代我国曾进行 55DT、60DT、70DT、钢研究儿童节取得初步成果,以后因钢的淬透性不稳定等原因,低淬钢未继续用于生产,1992 年俄罗斯低淬钢创始人,К.З.ШЕПЕЛЯКОВСКИЙ 博士来中国讲学,并到一钢厂调查冶炼低淬钢的条件,认为该厂完全具备生产低淬钢条件。中国部标 YB2009-1981《低淬透性含钛优质碳素结构钢》中对合金元素的控制与俄罗斯不同,(俄)1054-74、58(55ПД)钢的元素含量对 Mn、Cr、Ni、Cu 四元素之和规定 $<0.5\%$ (质量分数),而 YB2009-8155Ti 钢对 Cr、Ni、Cu 三元素之和规定 $<0.5\%$ (质量分数),这可能是关键所在。

俄罗斯低淬钢及控制淬透性钢已大量应用于汽车、拖拉机后桥齿轮、挖掘机齿轮、传动十字轴、火车车厢用滚动轴承,汽车板簧、铁路螺旋弹簧等,取得极大的经济效益。

(4) 感应电阻淬火。

众所周知,转向齿条的齿部采用感应电阻法,国内已有三台以上的进口机床在生产,英国一个机床将此工艺用于齿轮,基本不变形并随后进入装配工序。

(5) 曲轴轴颈固定加热淬火。

新设备称为 GrankproTM 用二个半环型固定加热感应器取代 8 字半环型旋转加热感应带,此套设备能对曲颈进行淬火和回火与老工艺相比,具有节能、占地面积小,工件变形小,感应器寿命长等优点。

3 感应加热设备

在电源方面晶闸管中频取代机式发电机,在上世纪 90 年代初,国内晶闸管电源厂,曾如雨后天春笋,遍地开花,经过优胜劣汰的竞争,现在生产厂趋向稳定,日前晶闸管电源又在朝 IGBT 晶体管电源发展,而电子管高频则将发展为 MOSFET 晶体管电源,手提晶体管超音频、高频电源市场竞争十分激烈,其未来亦将是谁的质量高,有水平,就能站稳脚跟。

相比之下,淬火机床,感应器,由于非标准的多,需投入技术力量大,竞争烈度不如电源厂激烈。国产淬火机床已有系列产品,数控、全机械传动、多工位与小型感应热处理中心等等,感应器国产化程度则更高一些,如升华公司自行设计的非标感应器已超过 500 种。进口感应器国产化取得辉煌业绩。

3.1 感应加热电源及技术

国产中频电源目前都采用并联谐振型逆变器结构。因此,在研究和开发更大容量的并联逆变中频电源的同时,研制结构简单,易于频繁起动的串联逆变中频电源是国内中频感应加热装置领域有待解决的问题,尤其是在熔炼、铸造应用中,串联逆变电源易实现全工况下恒功率输出(有利于降低电能吨耗)及一机多负载功率分配控制,更值得推广应用。

在超音频(10~00kHz)范围内,由于晶闸管本身开关特性等参数的限制,给研制该频断的电源带来了很大的技术难度,虽然在80年代浙江大学采用晶闸管倍频电路研制了50kW/50kHz超音频电源,采用时间分割电路研制了30kHz的晶闸管超音频电源,但由于倍频电路的双谐振回路耦合使负载呈非线性,时变加热负参数与谐振回路参数匹配调试相当复杂,而时间分割电路控制和主回路结构复杂,逆变管利用率低,因此没有得到很好的推广应用。

70年代和80年代初,现代半导体微集成加工技术与功率半导体技术的结合,相继开发出一大批全控电力电子半导体器件(GTR、MOSFET、SIT、SITH、MCT等),为全固态超音频、高频电源的研制提供了坚实的基础。

在高频(100kHz以上)频段,目前国外正处在从传统的电子管电源向晶体管化全固态电源的过渡阶段,日本某些公司采用SIT,电源水平在80年代末达到了1000KW、200kHz,400KM、400kHz,而在欧、美国家,由于SIT存在高通态损耗(SIT工作于非饱和区)等缺陷,其高频功率器件以MOSFET为主,随着MOSFET功率器件的模块化、大容量化,MOSFET高频感应加热电源的容量得到了飞速发展,西班牙采用MOSFET的电流型感应加热电源制造水平达600KW、400kHz,德国在1989年研制的电流型MOSFET感应加热电源水平达480KW、50~200kHz,比利时Inducto Eiphiac公司生产的电流型MOSFET感应加热电源水平可达1000KW、15~600kHz。浙江大学在90年代研制出20KW、300kHz MOSFET高频电源,已被成功应用于小型刀具的表面热处理和飞机涡轮叶片的热应力考核。

目前,感应加热电源在中频频段主要采用晶闸管,超音频频段主要采用IGBT,而高频频段,由于SIT存在高导通损耗等缺陷,国际上主要发展MOSFET电源。感应加热电源虽采用谐振逆变器,有利于功率器件实现软开关,但是,感应加热电源通常功率较大,对功率器件、无源器件、电缆、布线、接地、屏蔽等均有许多特殊要求。因此,实现感应加热电源高频化仍有许多应用基础技术需进一步探讨,特别是,新型高频大功率器件(如MCT、IGBT及SIT功率器件等)的问世将进一步促进高频感应加热电源的发展。

从电路的角度来考虑感应加热电源的大容量化,可将大容量化技术分为两大类:一类是器件的串、并联,另一类是多桥或多台电源的串、并联。在器件的串、并联方式中,必须认真处理串联器件的均压问题和并联器件的均流问题,由于器件制造工艺和参数的离散性,限制了器件的串、并联数目,且串、并联数越多,装置的可靠性越差。多台电源的串、并联技术是在器件串、并联技术基础上进一步再容量化的有效手段,借助于可靠的电源串、并联技术,在单机容量适当的情况下,可简单地通过串、并联运行方式得到大容量装置,每台单机只是装置的一个单元(或一个模块)。

感应加热电源逆变器主要有并联逆变器和串联逆变器,串联逆变器输出可等效为一低阻抗的电压源,当二电压源并联时,相互间的幅值、相位和频率不同或波动时将导致很大的环流,以至逆变器件的电流产生严重不均,因此,串联逆变器存在并机扩容困难,而对并联逆变器,逆变器输入端的直流大电抗器可充当各并联逆变器之间的电流缓冲环节,使得输入端的AG/DG或DG/DG环节有足够的时间来纠正直流电流的偏差,达到多机并联扩容,晶体管化超音频、高频电流多采用并联逆变器结构,并联逆变器易于模块化、大容量化是其中的一个主要原因。

感应加热电源多应用于工业现场,其运行工况比较复杂,它与钢铁、冶金和金属处理行业具有十分密切联系,它的负载对象各式各样,而电源逆变器与负载是一有机的整体,一般采用匹配变压器连接电源和负载感应器,高频、超音频电源用的匹配变压器从磁性材料到绕组结构正在得到进一步的优化改进,同时,从电路拓扑上可以三无源元件代替二无源元件以取消变压器实现高效、低成本匹配。

国内感应加热电源,晶闸管、晶体管与电子管式均能生产,晶闸管电源已生产应用多年,日前IGBT电源因其优点更多而更为用户所乐用,MOSFET电源电效率高、低压,但价格较高,正在逐步取代电子管高频电源,手提式小型高频电源因价廉、方便,在国内应用广泛,甚至进入国外市场。

超高频电源27.12MHz,过去依赖进口,现在国内至少有两个企业已进行生产,解决了刀片、锯条等特殊工艺要求的需要,表1列出了国内各种感应加热电源的功率与频率范围。当前国内感应加热电源在频段范围与功率等级上与发达国家相比,差距不大,值得注意的是元、器件质量、寿命与无故障时间、出厂的测试标准。

表 1 国产电源频率与功率范围

电源类型 参数	SCR 晶闸管	IGBT 晶体管	MOSFET 晶体管	SIT 晶体管	RF 电子管高频	SHF 电子管超高频
频率 kHz	0.2~10	1~100	50~600	30~200	30~500	1~27.12MHz
功率 kW	加热 30~3000	10~1000	10~400	10~250	3~800	8~100
	熔炼 100~6000					

随着感应热处理生产线自动化控制程度及电源高可靠性要求提高，必须加强加热工艺成套装置的开发，同时感应加热系统正向智能化控制方向发展。具有计算机智能接口、远程控制、故障自动诊断等控制性能的感应加热电源系统正成为下一代发展目标。

3.2 淬火机床

传动系统有速度要求的，已淘汰了液压缸传动，如用 GGJ 代替 GGT 系统，采用变频调速电动机、步进电动机或伺服电动机通过滚珠丝杠传动，移动速度均匀、精确。托架重复定位精度达到 0.03mm 或 0.025mm，主轴定位达到 $\pm 0.01^\circ$ (国内淬火机床工进速度变化量在 $\pm 5\%$ 以内，重复定位精度达到 ± 0.05 mm)。专用淬火机床采用步进链传动、托盘送料、机械手或机器人送取料等。淬火变压器与感应器除 x 轴(上下移动)速度可编程外，Z 轴亦可编程。

控制部分，采用 PLC 与 NG 控制已带有普遍性，如 Allen-Bradly 230 程控器、Siemens 802、805、810、840 计算机等均已应用于一些自动淬火机床，屏蔽显示工况，故障报警与诊断开始普及。

能量控制器用于监控工件加热温度，其重现性达到 $\pm 1\%$ 。前几年 TOGGO 公司发展了感应器监控仪 (Coil monitor)，它直接测量感应器上的输入能量 Kw-S，取代取自设备振荡部件的能量监控。

脉动加热或能量分配器。曲轴淬连杆颈时，上死点与下死点分配给不同能量达到温度均匀的目的，进口曲轴淬火机上均带有此装置。

振荡因素显示 (Oscillating Factor)。AEG-Elotherm 曲轴淬火机有此装置，用以显示感应器阻抗，当此数值变化，能显示。

附带测量及显示仪表：①滚珠丝杆感应淬火时能自动测量伸长量，如果伸长超差能自动降低功率以减少伸长量，并用打印机记录有关数据。曲轴弯曲变形测量仪可直接装在淬火机上。②指针式流量计直接显示淬火液流量能有力地监控淬火件质量；水的电导值指示器可以监控软水的质量，用绿色、琥珀色与红色分别表示水的电导值大小，当出现红色时，必须更换支离子树脂。

油烟吸走。新型淬火机上直接设置有抽风装置，吸走工件加热时产生的油烟。

多轴化。为适应小件提高产量，通用淬火机出现多轴化，如 Welduc-tion 公司紧迫推出 2 轴、4 轴淬火机，同时可处理多种 0.508m(20in)长以内，重 9.08kg(b)以下的工件。

随机回火。在一台淬火机上淬火，随后用较低功率进行回火，二工序在一台淬火机上完成，此种淬火机由于节省装卸、运输工序与占地面积，近年来发展很快。

一机多工位或一个电源带多台机床。磨擦片双工位淬火机是高频自动切换的，摩托车曲轴有三个淬火部位，电气兴业公司的产品是一个电源带三台淬火机床；国内产品是一个超音频电源带一台具有三个淬火变压器的回转工作台淬火机，节省了占地面积及装卸工序。

加工零件族的淬火机与柔性淬火机床。对于轴类零件在一定直径如 $\Phi 30$ mm 以内与长度如在 300~800mm 范围，相似淬火技术要求的，BJ 型轴类淬火机能自动编 14 种程序、自动识别进机零件，德国研制了曲轴柔性淬火机床，法国建有感应加热淬火柔性加工系统，略加调整能处理不同尺寸的相似工件。Robotron. Elotherm 最近推出了双轴主立式淬火机，在一个紧凑的工艺单元内进行工件的淬火与回火，能处理轮轴、三槽套及其他万向节件，转换工件只需 2~5min，用计算机编程，根据工件号在 2min 内调出有关

工艺数据。

等速万向节与双频齿轮淬火生产线，国内已有多条等速万向节生产线，来自德国与日本，双频齿轮淬火生产线可以美国 GM 公司 Powertrain 传动器工厂为例，内齿轮是中频扫描预热随后高频扫描淬火，另一个太阳齿轮则是中频同时方式预热、高频最后加热。中频采用 2 台 100kW 固态电源，高频为 200kW、450kHz 电源，此二条生产线均采用统计过程控制（Statistical Process Control）对工艺参数与淬火质量进行监控，超差工件会自动剔除。

机电一体化的紧凑式淬火装置，以单个电源、淬火机床、附属装置组成成套装置，我国是在 20 世纪 70 年代中期开始的，工业发达国家现在发展的是将电源与淬火机构组合在一起的淬火机床，它具有占地小、生产率高、一次安装调试等优点。Inductoheat GO 公司的轮毂淬火机床 Welduction 的通用淬火机等均属此范畴。曲轴固定加热淬火机床由于采用紧凑式结构，其占地面积为组合式成套装置的 1/4。

冷却水及淬火液循环装置，由于采用换热器降温，设备冷却水及淬火液槽容量普遍减小，冷却水槽容量在 $0.5\sim 1\text{m}^3$ 或更小，淬火液槽亦相似，完善的淬火液槽内有磁性吸铁屑装置及油分离器，对使用聚合物淬火液更为有利。

拉地保护 TOGGO 公司研制出接地保护器，当工件与感应器相碰时，能在 16.6ms 以内动作。

淬火机床测速仪。针对液压传动淬火机床，其工作行程因液温变化等原因引起线速度变化而设计，国产 CS-1 型测速仪能有效的监控 V mm/s。

PC 钢筋生产线。国内钢丝、钢筋热处理生产线，经历了 10 多年的研制，从凹螺纹预应力钢丝生产线开始，发展到不锈钢丝、低松弛钢丝及钢绞线等多个品种，生产线则由单一产品发展为二合一产品共线，电源配置则从晶闸管与超音频电子管电源相组合，发展为晶闸管中频与 IGBT 电源相组合，能耗降低了，进给速度加快了，占地面积减少了，与发达国家同类产品相比具有先进性。

3.3 感应器设计与制造

（1）感应器设计的进展

通过计算机模拟技术确定有效圈主要结构，并且可以计算效率已见于一些文献资料，美国 CIT 公司已使用 ELTA，Quick FieldTM,Flux2D,Flux3D 计算机模拟软件。

ELTA 是 ID 软件。

ID 软件根据已知电源的电流，电压和功率能提供完整的温度和线圈参数，动态和电磁场分布。

2D 可单独研究电磁场或瞬时的温度场或一个感应加热系统的电磁场与温度场的结合特性。

3D 用于复杂形状及最终校改感应器设计。

利用周向导管相结合的组合式有效圈，解决了轴颈圆角淬火、台阶轴淬火等多种复杂淬火件的技术难题。

采用导磁体特别是可加工导磁体以提高感应器效率，不仅可用于内孔、平面加热，而且用于外圈加热。据测试节能 13%~37%，最近美国 Fluxtrol inc，将镶装有可加工导磁体的感应器注册为 FluxtrolTM 并称之为强力感应器（Power Inductor）。

感应器的切换。国内、外均有高、中频切换夹头，水、电连接于 3~15s 一次完成，国内生产的高、中频通用快换夹头，已在多个工厂使用，取得了实效。

感应器喷液防滴阀。是感应器喷液后，管内残液流出会影响下一个工件的质量、阻止管内残液流出的调压阀，国内已有小量生产。

半环锁相感应器 Semicircle Phase Locked inductor. Welduction Inc.近年来开发了此种感应器，线圈根据需要可以仿形，已用于曲轴及凸轮轴工件，具有工件不转动，变形小，感应器寿命长等优点，开始在生产中使用。

（2）感应器制造技术

无氧纯铜已被认为是最合适的感应器有效圈材料。当含氧量小时，在含氢的还原气体中退火，氧化铜与氢结合，形成不溶于铜的水蒸气，出现裂纹与气泡。无氧铜不会产生氢脆，能提高使用寿命。

可加工导磁体提高了使用温度达 250℃，取向硅钢片可制造得更薄，进口的达 0.05mm，但价格昂贵。

氮化硅作为定位块用于曲轴感应器，国内铁氧体软磁材料居里点达到 500℃，非晶态合金已试用作导磁体用于感应器。

4 发展趋势

4.1 感应加热工艺的选用与优化

感应加热工艺的选用，一般针对高生产率的族类零件，并且是高技术工艺（附加值高）。过去这些工艺的设计，以经验设计为主，或通过实验开发新工艺，这些实验工作从选择电源、加热方式和钢材进行感应淬火工艺试验，取得淬火结果报告，需要一系列细致繁重的工作，有些工艺试验需反复多次，费时费力。近年来，由于计算机模拟技术的发展，这些工艺试验已经可以在办公室用计算机模拟软件来进行，它可以选用不同电源频率、功率密度、感应器、各种钢材、各种加热温度、各种淬火剂进行模拟，绘制出硬度、淬硬层深度曲线，打印出实验报告。

工业发达国家的相关大企业，早已应用计算机模拟软件来进行淬火工艺优化，达到提高工件淬火质量与生产率，并降低能耗与生产费用的目的。

感应加热计算机模拟相关过程可用图 2 来说明。

在美国感应技术中心（CIT 公司）应用的计算机控制程序如表 3 所示：

表 3 CIT 公司用计算机控制程序

PC 模拟程序	
类 型	使用软件
1D 耦合	Elta
2D 电磁场	Flux2D
2D 温度场	Flux2D
2D 耦合	Flux2D
3D 电磁场	Flux3D
3D 温度场	Flux3D

4.2 感应加热电源

（1）以晶闸管为主功率器件的中频电源仍然不会退出历史舞台，仍将垄断大功率（几千千瓦以上）的中频电源领域，将是 10 吨、12 吨、20 吨炼钢或保温，用中频电源的主流设备。

（2）小功率晶闸管中频电源（功率容量小于 1000kW）的将随着对效率及炼钢质量的要求不断提高，而逐渐减小使用量，但它们在淬火、弯管等领域仍将使用一段时间。

（3）主功率器件为 IGCT 及 GTO 的感应加热用中频电源将与主功率器件为晶闸管的中频电源展开激烈的竞争并逐渐缩小前者的市场份额。

（4）中高频（频率高于 10kHz~30kHz）领域使用的中频电源将以 IGBT 为主要器件，其单机容量将随着 IGBT 白

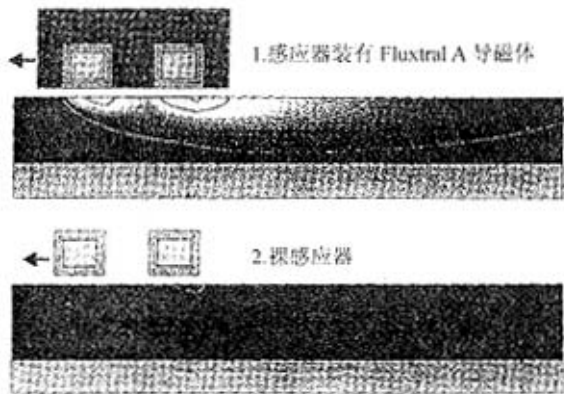


图 1 扫描加热的计算机模拟温度色彩图

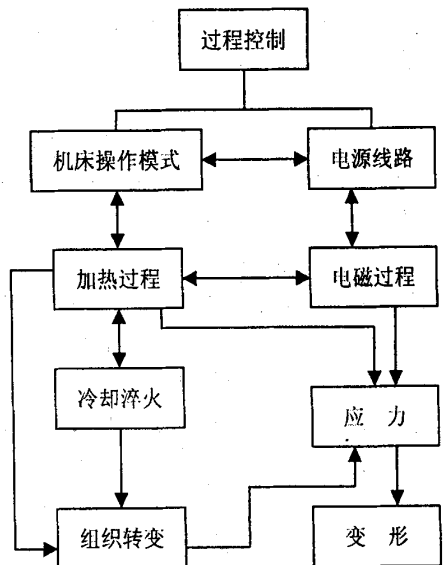


图 2 计算机模拟相关过程

身容量的不断扩大而不断扩大,并获得越来越大的使用范围。

(5) 高频(频率高于 100kHz)领域的感应加热电源将以 MOSFET 为主要器件,伴随着 MOSFET 制造工艺的不断进步和突破以 MOSFET 为主功率器件的高频电源将获得广泛的应用,其容量将不断扩大。

(6) 感应加热用中频电源的冷却技术将获得较大突破,将解决水冷方式对使用者带来的漏水,水质处理等不便问题,但这之间也许要经过很长的时间。

(7) 感应加热用中频电源的配套件将不断进步,更加标准化、更系列化,给高中频电源的制造和维修带来更大的方便。

(8) 感应加热用中频电源的单机功率容量将不断扩大,有望突破 10MW,其工作频率将越来越高。

(9) 与感应加热用中高频电源配套的限制电网干扰,保证电网绿色化的 EMI 抑制技术,功率因数校正技术将获得广泛应用,并进一步改善中高频感应加热电源的输出波形和效率。

(10) SIT 及 SITH 器件将在我国中高频电源领域获得应用并填补我国至今没有自行开发应用这些器件制作的中高频感应加热电源的空白。

(11) 中高频感应加热电源的起动方式,控制技术将再获得突破,并进一步提高这类电源的性能,采用新型控制策略的中频电源将获得大范围应用。

4.3 感应淬火机床

感应淬火机床正朝柔性化、自动化、智能化控制方向发展。具有零件识别,能量控制,工艺参数显示及故障诊断、显示、报警的感应淬火装置在生产中逐步得到应用。

4.4 感应加热技术应用领域的进一步拓宽

薄板及带材的感应加热。国内薄板及带材的感应加热设备全部采用进口,在冶金、机械、铁道、军工等行业广泛应用于薄钢板的感应加热以及铝、铜、奥氏体不锈钢带的在线处理如不完全退火、完全退火、固溶处理、镀锌前预热和镀锌后退火等。从理论分析和已有成熟经验来看,研制开发国产薄板及带材的感应加热技术及设备完全有可能,其必要性自不待言。

半导体材料炼制和提纯,人造宝石的熔炼,钢管涂塑、玻璃溶化、塑料加工等,采用感应加热能获得高的热效率,并能精确地进行控制。开发这方面的感应加热技术和设备将促进行业交叉、学科交叉,迅速成为 21 世纪的经济增长点。

此外将感应加热处理技术与其它热处理技术复合,从而产生新的热处理技术,如离子渗氮或氮碳共渗后的高频或超音频加热淬火,渗硼后高频加热淬火等。

由于感应加热技术的应用日趋广泛,十几年来,感应电源也有了迅猛发展。现在,美、英、日、德、西班牙等工业发达国家生产的 SIT、IGBT、MOSFET 全固态晶体管电源已达几十种,产品规格齐全,体积小,电能转换效率可达 92%,功率频率可以覆盖整个感应加热的领域,机械式中频发电机组已遭淘汰,晶体管中频电源得到广泛应用,电子管式高频电源也逐步被晶体管电源所取代。

参 考 资 料

1. 沈庆通. 感应加热技术的近期发展
2. 孙宁, 吕德隆. 感应加热技术的应用
3. 李宏等. 感应加热用中高频电源技术的新进展