

从汽车工业看感应加热淬火技术的发展

一汽技术中心工艺研究所 (长春 130032) 杨连弟 崔凯 姜波
一汽轿车公司长春齿轮厂 (长春 130032) 徐力

感应热处理具有加热速度快, 节约能源, 生产效率高, 不污染环境, 易于实现机械化和自动化, 并能布置在生产线上与冷加工工序同步生产等优点, 在汽车制造领域得到了越来越广泛的应用。感应加热淬火的目的是从仅仅提高零件的局部耐磨性扩大到提高汽车零件的整体静强度和疲劳强度。

一、我国汽车工业应用感应淬火技术现状

1. 电源

电源是感应加热的关键设备, 随着感应加热技术的发展, 其经历了机械式中频发电机组和真空管式高频电源、晶闸管中频电源及全晶体管中高频电源三个发展阶段。目前国内汽车生产中应用的电源有以下几种类型:

(1) 机械式中频发电机组 该电源是最早用于感应加热的机型之一, 由于受到当时技术水平的限制, 其缺点是存在机械损耗, 电效率低, 只能达到 75% 左右; 频率固定, 适应范围较窄, 只有 8000Hz 和 2500Hz 两档; 单机的额定功率低, 最大只有 500kW; 占地面积和噪声大; 振荡负载匹配困难。因此应用很少, 现主要分布在老企业和基础较差的小型企业。

(2) 真空管式高频及超音频电源 该电源也是最早用于感应加热的另一种机型, 同样由于受到当时技术水平和电子器件的限制存在电效率低, 只能达到 50% 左右, 单机的额定功率低, 最大只有 800kW, 占地面积大, 振荡负载匹配困难。

(3) 晶闸管 (SCR) 中频电源 同机械式中频发电机组相比具有以下优点: 体积小, 重量轻, 材料消耗少; 电效率高, 逆变停止时几乎不消耗电能, 所以晶闸管中频电源效率可达 90% 以上, 而发电机组只有 75% ~ 85%; 无机械运动, 噪声小, 运行可靠, 负载匹配容易, 可以根据负载情况确定

电源的频率, 维修简单; 启动停止方便, 频率能自动跟踪以保持最佳运行状态; 产品设计简单, 制造周期短; 安装容易, 不需要特殊的基础等。

所以在 20 世纪 80 年代后期, 工业发达国家晶闸管中频电源已完全取代了中频发电机组。国内自 90 年代中期已逐步取代中频发电机组。其频率可以做到 2.5 ~ 8kHz, 额定功率可以做到 800kW 左右。

近年来, 国内晶闸管中频电源发展的速度较快, 有的是消化吸收国外先进技术并加以创新, 有的是自行开发。其过程分别是 PLC 或继电器时序逻辑控制。其共同特点是全集成化控制线路数字化程度高于 90%, 启动成功率几乎达到 100%, 除具有常规的水压不足, 快熔熔断, 过流、过压等保护功能外, 还具有限流、限压等保护功能, 功能较齐全的晶闸管电源还配置逆变失败、水温监视、能量控制可选功能。如果在装配工艺上再进一步改进的话, 可以说电源已经接近世界先进水平。

(4) 绝缘门极晶体管 (IGBT) 随着电子器件的发展, 跟踪 80 年代国际感应加热技术水平, 国内于 90 年代中期开发出第一台电效率较高 (95% 左右) 的 50kW/50kHz IGBT 电流型超音频感应加热电源。目前频率能够达到 1 ~ 50kHz, 最大功率可作到 800kW。

(5) 功率场效应晶体管 (MOSFET) 和静电感应晶体管 (SIT) 电源 与 IGBT 应用同期, 国内成功研制出 20kW/300kHz MOSFET 高频电源, 缩小了同国际先进水平的差距。在引进消化吸收国外先进技术方面, 同日本电气兴业株式会社合作生产出 SIT 高频电源, 除满足国内应用外, 并有部分出口。

2. 淬火工艺

近年来, 随着汽车工业的迅速发展, 采用感应淬火的零件的种类和品种不断增加。为了提高汽车



零件的制造水平,国内的各汽车生产厂家,特别是同国外合资的零部件生产厂家先后引进了许多的感应加热淬火设备。例如,曲轴、转向齿条、凸轮轴、动力转向类零件和传动类零件等感应加热淬火设备。通过多年的学习和摸索,国内基本上能够掌握各种汽车零件的感应加热淬火技术。

(1) 加热方式 根据目前所掌握的资料,用于感应加热淬火的加热方式基本分为以下几个方面:横向磁场静止一次加热淬火(销轴类零件、凸轮轴);横向磁场连续加热淬火(减振器杆、变速叉轴、扭杆等);横向磁场多段连续加热淬火(起动机轴、空压机轴等);纵向磁场整体一次加热淬火(半轴等);仿形感应器零件旋转加热淬火(球头销);感应接触加热淬火(转向齿条);内孔的一次及连续加热淬火(输出法兰、钟型壳内腔);阶梯轴类零件的旋转加热淬火(小红旗后轮毂轴、转向节);平面类零件的一次及连续加热淬火(钢板弹簧横向限位板);薄壁类复杂零件一次及连续加热淬火(前轮毂、滑动轴叉);复杂形状零件的一次加热淬火(钟型壳变截面轴);槽口一次淬火(变速叉);复杂回线工件旋转一次加热淬火(曲轴)。

(2) 感应淬火用材料 目前汽车零件感应加热淬火用材料基本包括:45钢、40Cr、55MnVS、40MnB、42CrMo、35钢、ZG310—570、球墨铸铁、合金铸铁等。

(3) 淬火介质 国内采用的感应加热淬火介质包括:水、聚乙烯醇、聚醚水溶性淬火介质、UCON、好富顿251等。

3. 淬火机床

为了适应多品种的批量生产,在汽车生产中感应加热淬火机床的种类由传统的专用设备逐步向柔性化程度较高的通用设备和专用淬火自动生产线发展。近年来相继出现了圆盘专用多工位和多轴淬火机,少则4个,多则12个工位,提高了小件生产率。

(1) 传动系统 主要采用机械传动,液压传动应用的很少。代表现代机械传动技术的滚珠丝杠和直线导轨等先进技术在感应加热淬火机床中得到了广泛的应用。

(2) 速度、位置控制 主驱动采用伺服数控、变频调速,移动速度稳定均匀;拖架定位准确,重复精度高;工件旋转采用变频调速取代固定转速,

能适应多方面工艺要求。

(3) 上下料系统 较先进的专用淬火机床采用步进链传动、托盘送进料、人工送取料。

(4) 自动生产线 在一条生产线中,大功率电源用于淬火,然后用较低功率回火,两个工序在一条生产线上自动完成,此设备由于减少了重复上下工件的工序,降低了劳动强度,提高了生产效率,所以近年来发展很快。

(5) 器件

①气动式和接触器式功率切换器。该器件的开发成功,使一台电源向两台或多台淬火机床供电变成现实,从而大大提高了设备利用率,节省了占地面积,节约了大量动能。

②电热电容器。广泛采用RFM型全膜电热电容器,与早期RYS系列相比容量增加了近3倍,重量减少了30%。

③淬火变压器。大量采用硅钢片铁心淬火变压器,80年代研制成功的铁氧体淬火变压器已在8~30kHz频段与IGBT电源配套使用;超微晶超音频YLB淬火变压器,容量从150~1500kVA、频率从20~50kHz在市场都有销售。

(6) 动作顺序控制及显示 采用PLC和NC控制已带有普遍性,拨码开关代替编程器设置工艺参数方便简捷。微型显示终端(MPT)显示重要的工艺参数、加工零件数量并存储记忆,实时监测设备的运行状态,配置较完善的报警系统,一旦设备出现故障立即报警并停机;根据需要也可采用能量控制器控制工艺过程,这样既节省投资又增加了设备的先进性。

(7) 变压器三维移动快换接头 变压器三维移动自90年代开始用于高中频感应加热淬火机床,可方便工艺调整。

4. 冷却和淬火水循环装置

早期的冷却和淬火装在地上、地下或半地上水箱内,通过水泵在装置与水箱之间循环,除常因水质硬、生水垢而堵塞管路外,还有占地面积大,冷却效果差,安装麻烦,不易维修等缺点,经常导致加热设备损坏;冷却塔、内外循环水系统的应用,使冷却效果相对改善,但设备多,维修难,造价高,管路经常堵塞问题仍不能解决。在消化理解国际感应加热成套设备用水冷却系统最新技术的基础上,我们自行研制成功了适合我国国情的新型、高



效、价廉的风冷软水系统。该系统有如下优点：

- (1) 无需水池，成本低。
- (2) 不锈钢、铜铝制品，纯水闭路循环，不生锈，不堵塞管路。
- (3) 占地小，管路少，安装方便。
- (4) 纯水用量少，只需一次性加入纯水。
- (5) 换热效率高，实用，提高了加热设备的可靠性，大大延长了设备的使用寿命

二、国外感应加热淬火技术发展动态

1. 电源

(1) IGBT 由于与晶闸管电源相比具有效率高，调节性好，自 1985 年第一台超音频 IGBT 感应加热电源问世，就表现出了旺盛的生命力，并有部分取代晶闸管电源的趋势。目前可做到 1200kW、50kHz，50 ~ 100kHz、30 ~ 600kW，300kW、80kHz，并已形成商品化和系列化。

(2) MOSFET 和 SIT 在 100kHz 以上高频频段，国外正处在从传统的电子管电源向全固态晶体管电源的过渡阶段。主要应用的功率器件有 MOSFET 和静电感应晶体管 SIT 两种。功率高达 1000kW，频率 600kHz；SIT 多采用电压型串联谐振电路电源，功率高达 1000kW、频率 200kHz 和 400kW、400kHz。它们都是电子管式高频电源的理想替代产品。当输出功率与电子管电源相同时，节电 35% ~ 40%，节省安装面积 50%，节约冷却水 40% ~ 50%。SIT 开关速度虽然比 MOSFET 快，但它存在着很大的通态损耗。随着科技的进步，在高频感应加热淬火领域 MOSFET 有望取代 SIT。

2. 淬火机床

感应加热淬火机床更加趋向自动化，CNC 控制逐渐增多，自动分检零件与自动识别进机零件功能的机床增多。

(1) 通用淬火机床 通用淬火机床朝柔性化方向发展，一台淬火机床可以对不同性能要求的不同零件进行感应加热淬火。德国研制的曲轴淬火机床、法兰件感应淬火柔性加工系统略加调整就能处理不同尺寸的相似工件；对于轴类零件在一定直径范围内（如 30mm）与 300 ~ 800mm 的长度范围内，相似淬火要求的轴类零件，淬火机床能自动编制 14 种程序，自动识别进机零件；Robotron.Eiotherm

最近推出了双主轴立式淬火机，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，根据工件号可在 2min 内调整好有关工艺数据。

(2) 专用淬火机床 专用淬火机床更加专用化，机械手上下零件、加热、淬火、回火、校直、检查全自动进行。先进的计算机控制技术可以监控并屏幕显示淬火过程和工艺参数，跟踪全部操作过程，如发现故障或工艺参数偏离给定值，便自动修正或自动列出不合格零件，使控制系统暂停工作并报警，同时屏幕上显示故障性质和所要修正的动作。更先进的控制系统还适应材料化学成分波动，并自动调整比功率或加热时间，以保证感应加热淬火零件的质量。例如日本高周波热炼株式会社川崎工厂的卧式半轴淬火机床，上尾厂可同时淬三根半轴，群马厂可同时淬两根半轴，机床实际上是感应热处理生产线，全过程除校直、荧光探伤检查需一名工人外，其余全自动进行。

(3) 机器人的应用 日本高周波热炼株式会社制造的一台立式通用淬火机床配置一台机器人，机器人将一个 2 匝的感应器进行依次平面扫描，使一块塑料板变色，虽然使用电源功率只 3kW，但也可以看出机器人在感应热处理中的应用趋势。

(4) 机电一体化 将电源、淬火机床、冷却系统组成成套装置，具有占地面积小，生产效率高，一次安装调试容易等优点。国外最近问世的曲轴固定加热淬火装置，由于采用这种紧凑式结构，其占地面积仅为组合式成套装置的 1/4。

3. 淬火工艺

(1) 静止式曲轴感应淬火 70 年代，曲轴在旋转中对圆角及轴颈同时加热淬火的应用，可以说是感应加热淬火技术的一大进步。随着科技的进步和几十年的实践，人们也发现了它的许多不足：①由于轴颈与感应器之间间隙小（有时 $\leq 0.5\text{mm}$ ），淬火时难免接触打火，导致感应器寿命低，需经常更换或修复，并且设备的可维护性差。②加热淬火时，由于淬火变压器、水冷线圈、铜排、电缆、感应器等数百公斤部件必须与连杆轴颈一起作相同轨迹的旋转运动。如此笨重系统的圆形轨迹必须保持相当精确，这就需要配备一个特别的跟踪系统。当曲轴旋转时，根据每个被加热曲轴的特征输出不同



的功率,这些要求使淬火设备变得相当复杂,并且灵敏度高,体积庞大,噪声大,制作成本提高。

静止式曲轴感应淬火新技术的开发及第一台和第二台淬火装置在福特公司用于 V-6 和 V8 曲轴淬火和回火,就表现出良好的市场前景。其特点是:①加热时间短,一般仅为 1.5~4s,传统工艺是 7~12s。②电效率高,成本低。③感应器与工件之间允许有较大间隙,调整方便。④操作简单,重复性好,易于维护。⑤占地面积小,仅为原来的 20% 左右。

(2) 低淬透性钢齿轮淬火 现在俄罗斯许多汽车工厂广泛采用低淬透性钢进行整体感应加热表面淬火,已大量应用于汽车及拖拉机后桥齿轮、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,取得了较大的经济效益。

(3) 双频感应加热淬火 国外双频感应加热淬火主要用于齿轮,美国用 10kHz 中频和 150kHz 高频电源,先让齿轮在中频感应器中加热,然后迅速降到高频感应器中加热,最后落入油中淬火。此工艺可以实现齿轮的齿顶和齿根的加热均匀,保证齿轮的淬火质量。

(4) 汽车齿轮渗碳后进行感应加热淬火 为了降低噪声及保证汽车在运行中的平稳性,减小汽车齿轮的淬火变形是解决问题的措施之一。由于感应加热可以实现局部加热。在美国的一些汽车制造厂对渗碳后的齿轮进行感应加热淬火,以减小齿轮的淬火变形。

三、与世界先进技术的差距

近年来,我国感应加热淬火技术得到了迅速发展,但和工业发达国家相比,还有相当大的差距。

1. 电源

MOSFET 高频电源是工业发达国家的首选产品,而我国在高频段仍以晶闸管交流调压、高压硅堆整流、节能型电子管振荡器式电源为主;IGBT 超音频电源有部分取代晶闸管中频电源的趋势,而我国在这方面的应用还不够普及;晶闸管中频电源应用较为普遍,但由于老企业改造步伐的限制,还有部分中频停留在发电机组。

必须指出,虽然我国能够生产 MOSFET、IGBT 和 SIT 感应加热淬火用电源,但品种和规格没有国外那么多、那么细,并且由于关键主要电力

电子器件国内还不能生产,必须进口,所以从性能和技术水平方面和国外产品相比仍有相当大的差距。

2. 能量监控

通过监控向被加热工件输送的能量 ($\text{kW}\cdot\text{s}$),来保证工艺的稳定性及工件的淬火质量。

3. 淬火机床

总体来说,和工业发达国家相比,我国的数控及全自动淬火机床开发尚属起步阶段。

(1) 自动化程度 大部分是人工上下料,机械手或机器人技术应用得非常少,自动化程度较低。

(2) 数控系统的应用 FUNAC、SIMENS 伺服系统有所应用,但多为点位直线运动,属简易型,多轴联动类型的数控系统尚未得到应用。

(3) 计算机控制技术 计算机控制技术在感应加热淬火中应用还远不如国外那样成熟,例如自动识别进机零件,不合格零件自动剔除;工艺参数跟踪及偏离给定值修正等。

4. 感应计算机模拟

美国 CTI 公司已使用 ELTA, Quik FieldTM, flux2D, flux3D 计算机模拟软件技术确定感应器有效圈主要结构,并且可以计算效率。ELTA 是 1D 软件,其中 1D 软件根据已知电源的电流、电压和功率提供完善的温度和线圈参数、动态和电磁场分布。2D 可单独研究电磁场和瞬时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。

5. 其他

在感应器制造技术、感应器快换、导磁体材料与利用、冷却水循环系统、淬火介质研究与应用等方面还有相当大的差距。

四、建议

1. 引进消化政策

根据 1992 年在无锡市召开的感应加热进口设备与引进消化吸收经验交流会的 18 篇论文介绍以及相关渠道了解,我国淬火装置进口品种繁多,几乎世界著名的感应加热公司的产品都有,宏观上说,它推动了我国感应热处理技术的进步,但重复引进现象特别严重,例如半自动、全自动曲轴淬火装置就有十几套,尽管引进的设备门类齐全,但只是用于生产。到目前为止,国内还没有一家能够制

造出全自动曲轴淬火装置,未达到先进技术国产化的目的。现在能否考虑引进技术呢?日本过去的引进政策是只引进一套,第二套就要求国产化。这种政策已证明是成功的,值得我们借鉴。

2. 耗能严重的电源限期淘汰

中频发电机的空载损耗大约在 5%~10%。以中频输出 100kW、8kHz 供电的两班制生产为例,保守推算,每台年浪费电量可达 4~8 万 kW·h 工频电。90 年代以来,在新的感应加热设备应用以及旧设备改造过程中,首选产品是晶闸管中频电源,但目前仍有相当数量的不同年代生产的中频发电机还在使用,致使大量的电能白白浪费掉。为此,晶闸管中频电源取代中频发电机已刻不容缓,势在必行;另外,用于工业生产的电子管式高频电源浪费也相当严重,应随着全晶体管感应加热电源的逐步完善、逐步取代。

3. 短缺部件的开发

IGBT、MOSFET 大功率晶体管、高频电容器、高中频电缆等关键部件至今尚未形成产品。因此,对于迅速将科技成果转化为商品的工作,有关部门应予以重视。

4. 提高淬火机床配套质量

除淬火机床的拖架移动、零件旋转、定位机构由厂家或大型企业精心设计制造外,淬火变压器、电容器、各种阀类器件、控制系统、快换接头等部

件的采购应选用名牌产品,否则装配、调试问题将颇多,甚至带来不应有的麻烦。另外,机床的可操作性、可维修性及外观质量应予注意。

5. 技术交流

组织技术讲座、专业会议,进行技术交流,掌握专业发展动态信息,这将对新技术的应用起到推动作用。

五、结语

感应加热属电加热,它涉及金属材料、机械设计、计算机、高等数学、电工基础、电子技术基础、大功率电力电子器件、电机与电力拖动等相关知识领域,国内尚没设置这个专业。为提高技术水平,专业工作者一方面靠实际经验的积累,另一方面要经常参加一些感应加热学术会议及经验交流会、展览会来不断扩大知识领域;更重要的是,对外开放以来,感应热处理专业人员出国较多,将进修、考察等的心得总结成资料,供专业人员学习,对专业工作者业务素质的提高将是一项新的、有意义的工作。

我国已正式加入 WTO,感应加热和其他行业一样都将受到严峻的挑战,我们每位专业技术人员一定要与时俱进、把握机遇,为使感应加热迅速赶上世界先进水平而努力奋斗。

(20030818)

(上接第 18 页)

在 0.5mm 以上,最深超过 1mm。因而,在齿轮的渗氮技术中出现了“深层渗氮”的概念。而按传统的渗氮工艺,渗氮层深度大多在 0.1~0.3mm,最深也就 0.4~0.6mm。

为了缩短渗氮周期,尽量采用离子渗氮工艺。同时采用预氧化渗氮、脉冲时效渗氮、加压脉冲渗氮等催渗技术可进一步取得良好效果。

(3) 改善表面金相组织 从强度试验表明,对接触疲劳而言,应尽量避免白亮层的产生。采用双程渗氮、真空低压渗氮及氮势门槛值计算机控制渗氮等技术均能获得满意的效果。

(4) 渗氮齿轮应用的模数范围 齿轮模数大小与轮齿的曲率半径相关,而轮齿曲率半径又与接触负荷所产生最大赫兹应力的深度有关,因而根据目前渗氮工艺所能达到的最大深度范围,并综合大量

成功的工业实践经验,国际上比较公认的模数在 10mm 以下。表 7 是英国的应用情况。结合我国的试验应用认为,齿轮模数 10mm 以下,接触应力 1000~1300MPa,相应心部硬度不低于 300HB,渗氮层深度大于 0.6mm。应当指出,由于渗氮试样的 S-N 疲劳曲线比较平缓,过载能力较弱,因而不宜用于冲击负荷大的齿轮。

表 7 英国工业渗氮齿轮的应用范围

参 数	汽轮 机	H/D 压缩机	H/D 碎煤机	H/D 水泥磨	军舰蒸 气透平	燃气 轮机
功率/kW	6570	4588	336	2237	5787	11190
模数/mm	4.4	4.23	8.47	8.47	6.47	6.47
接触应力/MPa	904	905	835	1014	996	1065
最大剪切应力 峰值深度/mm	0.39	0.29	0.39	0.45	0.44	0.61

(20030911)