

# 感应加热工艺与设备的发展状况及趋势 (下)

中国兵器工业新技术推广研究所 (北京 100089) 孙 宁 施建华

## 四、淬火机床和感应器

### 1. 淬火机床

有速度要求的机床传动系统,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。托架重复定位精度可达到 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  $\pm 0.05$  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 轴也可编程。

控制部分普遍采用 PLC 与 NG 控制,如 Allen-Bradly230 程控器, Siemens802、805、810、840 计算机等均已应用于一些自动淬火机床,屏幕显示工况,具有故障报警与诊断功能。

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),可直接测量感应器上的输入能量  $\text{kW} \cdot \text{s}$ ,取代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,以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,当此数值变化时即能显示。

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。

将油烟吸走。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 Welduction 公司推出 2 轴、4 轴淬火机,同时可处理多种 0.508m (20in) 长以内、重 9.08kg 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,两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,节省了占地面积以及装卸工序。

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  $\phi 30\text{mm}$  以内、长度 300 ~ 800mm 范围,有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。法国有感应加热淬火柔性加工系统。它们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,可根据工件号在 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,主要来自德国与日本。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。这两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。

以单个电源、淬火机床和附属装置组成成套装置在我国是从 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型结构, 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 0.5~1m<sup>3</sup> 或更小, 淬火液槽也相似, 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。

接地保护。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 型测速仪能有效地监控  $v$  (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。

## 2. 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, 并且可以计算的效率已见于一些文献资料, 美国 CIT 公司已使用 ELTA、Quick Field<sup>TM</sup>、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, 而且可用于外圈加热。据测试可节能 13%~37%, 最近美国 Fluxtrol inc, 将镶装可加工导磁体的感应器注册为 Fluxtrol<sup>TM</sup> 并称之为强力感应器 (Power Inductor)。

感应器切换。国内外均有高、中频切换夹头, 水、电连接在 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, 并取得了实效。

感应器喷液防滴阀。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, 国内已有小批量生产。

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, 可提高感应器的使用寿命。

可加工导磁体提高了使用温度达 250℃, 取向硅钢片制造得更薄, 进口的可达 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℃, 非晶态合金已被试用作导磁体。

## 五、发展趋势

### 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轴类零件, 并且是高科技工艺 (附加值高)。过去这些工艺的设计, 以经验设计为主, 或通过试验开发新工艺, 这些试验工作从选择电源、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。

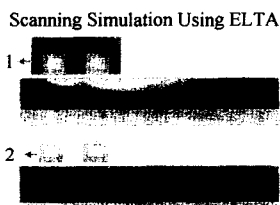


图1 用 ELTA 软件进行扫描淬火模拟

1. 缠有 Fluxtral A 电磁感应器 2. 裸感应器

感应加热计算机模拟相关过程可用图2来说明。

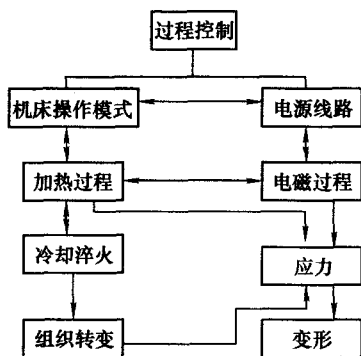


图2 计算机模拟相关过程

## 2. 感应加热电源

(1) 以晶闸管为主功率器件的中频电源不会退出历史舞台，仍将垄断大功率（几千千瓦以上）的中频电源领域，将是 10t、12t、20t 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）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、弯管等领域仍将继续得到应用。

(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，并逐渐挤占前者的市场份额。

(4) 中高频（频率高于 10 ~ 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 自身容量的不断扩大而扩大，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，给中高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) 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。

## 3. 感应淬火机床

感应淬火机床正朝着柔性化、自动化和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将逐步得到应用。

## 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、铁道和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，并迅速成为 21 世纪的经济增长点。

此外将感应热处理技术与其他热处理技术复合，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。**MW**

（全文完）（20081222）