

# 感应热处理技术的进展

陈永勇

(四川成都四川齿轮厂, 四川 610208)

**摘要:** 感应热处理的发展已经由过去机械式中频发电机组向晶体管中频电源发展; 对于集大电流、高耐压和高频特性于一体的固态电路, 晶体管成为很有发展前途的功率电子器件。功率半导体器件在今后将向着大容量化、高频化、驱动简单、低导通压降、模块化和功率集成化方向发展。淬火机床的发展采用变频调速电机, 步进电机或伺服电机, 通过滚珠丝杆传动, 移动速度均匀、精确。使用计算机进行控制的自动淬火机床, 屏幕显示工作状况, 同时可故障报警或故障诊断。能量监控系统, 工件加热温度的监控, 采用 PLC 与 NC 控制已带普遍性。

**关键词:** 感应热处理; 晶体管; 淬火机床; 感应加热工艺

第九次国际电工双年会上, 纵向感应加热淬火被认为是 25 年来感应加热技术的最大进步。当时在我国科技界对此技术还未掌握, 对台阶轴的淬硬层还被允许是不连续的。大直径与小直径之间允许有淬硬层中断过渡区, 也就是允许有一不淬硬区域(软带)。当时使用的感应加热设备, 高频感应加热设备还是电子管高频设备; 中频感应加热设备则是机械式中频变频机组。淬火机床大部分为液压传动机构和少部分机械传动机构。感应加热设备和淬火机床的控制系统则大部分还是继电器控制。进行感应加热的感应器主要为聚焦式, 用周向加热或直线式有效圈加热工件。感应加热设备、淬火机床、感应器等还没有感应加热成套装置生产厂家。配备感应加热成套设备加热电源、机床、附属设备需用户分头选购。感应器由用户自行设计制造, 感应器夹头损耗大、效率低, 与发达国家相比差距较大。近几年, 我国感应加热技术有了较大的发展, 与发达国家的差距已经缩小。

## 1、感应加热电源的发展

感应加热电源的发展很快。长期使用的机械式中频发电机电源由于效率低(70%~85%), 已被逐步淘汰出感应加热范围, 取而代之的是晶闸管中频电源。晶闸管电源频率在 1kHz~8kHz, 同时还有宽频带中频, 适用范围大大扩展。80 年代发展起来的新型感应加热电路 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor 双极晶体管门电路), 由于将 MOSFET 和 GTR 两者优点集于一身, 因此发展很快, 比晶闸管电源更节约能源(10%),

调节性能好，近年有取代部分晶闸管电源的趋势。国内有 200kW、50kHz 的电源设备。美国这种电源设备可达 300kW、80kHz。

电子管高频加热电源效率低、危险性大、控制不稳定。目前发展起来的场效应晶体管电路 MOS-FET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) 是一种电压型高频多数载流子器件。随着 VMOS 技术移植到 MOS 功率器件后开始进入大功率领域，产生了垂直导电型 MOSFET (简称 VMOS)。目前 MOSFET 耐压为 1000V 以上，电流为数百安培，而且 VMOS 管中没有电子存储延时效应，其中的载流子运动又为快速的漂移运动，因而具有良好的高频特性，使 MOSFET 更加有效的应用于工业、商业等各方面。

SIT (Static Induction Transistor) 静电感应晶体管电源，集大电流、高耐压和高频特性于一体，成为很有发展前途的功率电子器件。SIT 大功率 (最大功率可达 400kW) 高频逆变器，将取代电子管振荡型高频电源。SIT 电源国内已生产多年，功率可达到 300kW，频率可达 200kHz-300kHz，耗散功率 3kW。由于有较大的通态压降，又是一种常通器件，所以不适合大部分电力电子技术的应用场合，但是由于其开关频率非常高，很适合于高频感应加热、调幅/调频及超声波发生器。

SITH 是 70 年代提出，80 年代发展起来的功率半导体器件，目前研制出 2000A/4000V 的水平。已用于高频感应加热、高频 DC/DC 变流器和无噪声 PWM 逆变器。

MOSFET 场效应晶体管电路、SIT 静电感应晶体管电源等固态电源电路与电子管振荡式高频电源比较，全固态电源有如下优点：

- (1) 固态电源电路体积小。包括电源和感应器及水冷却系统，整个体积 1000mm×1000mm×1700mm 左右。
- (2) 固态电源电路效率高。若不计输出变压器损失效率，电源本身的效率可达 90% 以上，而电子管振荡式电源效率只能达到 50%~60%。
- (3) 固态电源电路控制方便可靠，启动迅速，负载适应范围宽，工作电压低，操作安全。
- (4) 固态电源电路寿命长。
- (5) 固态电源电路在高频产生过程中电压低，安全性好。

综上所述，IGBT、MOSFET、MCT 是今后最有发展前途的器件。近期内，功率 MOSFET 将继续是低电压、小功率和高频 (100kHz~400kHz) 应用领域中富有生命力的器件。SIT 更适用于大功率 (最大可达 400kW) 高频逆变器，但是由于制造工艺复杂、成本高、价格贵，因而市场容量小。IGBT 输入阻抗高，驱动功率小，容易驱动和通态

压降低，价格便宜，是最新发展的电力电子器件。在 5kHz~50kHz 频段的感应加热电源中将取代其他半导体器件。

今后，在感应加热领域，功率半导体器件将向着大容量化、高频化、驱动简单、低导通压降、模块化和功率集成化方向发展。感应加热电源进入全固态、模块化时代将是其发展的必然趋势。

## 2、淬火机床的发展

感应淬火机床在国内普遍采用液压传动机构，也有的采用机械传动机构。机械传动机构采用普通丝杆和齿轮传动结构进行传动。这些淬火机床传动速度不稳定，传动定位精度低。目前，对感应热处理要求的提高，对淬火机床传动系统的要求也相应提高，液压系统传动的淬火机床已逐步被淘汰，取而代之的淬火机床将采用变频调速电机，步进电机或伺服电机，通过滚珠丝杆传动。这种淬火机床移动速度均匀、精确，托架重复定位精度高，可达 $\pm 0.03\text{mm}$  或  $0.001\text{mm}$ ；转台定位精度高，达到 $\pm 0.01\text{mm}$ 。若再采用步进链传动，托盘送料，机械手或机器人送料及对感应淬火零件装卸料，就成为全自动化的专用机床。淬火变压器与感应器 X 轴向（上下）移动应用微型计算机进行编程，Z 轴向（前后）移动同样也可进行编程，机床运行完全按照计算机程序运行，是高度自动化的感应加热设备。

感应加热淬火机床的控制，现在普遍采用 PLC 与 NC 控制，完全应用继电器进行控制的淬火机床已逐步被淘汰。使用计算机进行控制的自动淬火机床也越来越普遍。淬火机床的工作状态通常被显示在显示屏上，同时能自动进行故障报警或故障诊断。感应加热过程的能量监控系统 and 工件加热温度的监控精度大大提高，其重现性达 $\pm 0.1\%$ 。最近发展了感应器监控仪直接测量感应器上的输入能量 kW-S，以取代设备的能量监控。

在感应加热淬火过程应用脉动加热式能量分配器，进行曲轴连杆颈淬火时，给上死点和下死点分配不同能量达到加热温度均匀的目的。

在感应热处理过程中，感应电源根据振荡因素及时显示感应器阻抗值的变化，根据阻抗值的变化及时调节电源振荡状态，保证零件感应加热在相对理想的状态下进行。淬火机床附带测量及显示仪表，测量显示工件的淬火过程。在对滚珠丝杆感应淬火时淬火机床能自动测量伸长量，如果伸长超差，淬火机床能自动降低功率以减少滚珠丝杆感应淬火的伸长量，并在淬火过程中自动记录相关数据。感应淬火机床能够在曲轴淬火过程中应用安装的曲轴弯曲变形测量仪测定曲轴的淬火弯曲量，并调整其参数对曲轴淬火弯曲情况进行修正。淬火机床附带的液体流量监控仪可直接显示淬火液的流量，能有效地

监控淬火件质量。水电导值指示器可以监控软水的质量。

一种多轴感应淬火机床适用于大批量小零件的感应淬火处理，可同时处理 2 轴、4 轴。目前还可在同一台淬火机床上进行淬火，随后自动降低功率进行回火处理，并做到一机多工位或一个感应加热电源带多台机床等等。摩擦片双工位淬火机床，可在高频淬火时自动切换。摩托车曲轴有三个部位淬火，一个电源带三台淬火机床进行淬火。淬火机床对不同轴类进行自动识别淬火的柔性淬火生产线，能自动对 14 种轴类进行淬火编程，并自动识别这些轴类分别进行淬火处理。还有等速万向节与双频齿轮淬火生产线，可对内齿轮中频扫描预热随后高频扫描淬火。

目前还有机电一体化的组合式淬火机床，将感应加热电源与淬火机床组合在一起，并且和机械加工生产线形成一套完整的机械加工和感应热处理一体化的自动生产线。

### 3、感应器设计与制造的发展

感应加热用感应器的设计制造已经发展到通过计算机模拟感应加热，以确定感应器的有效匝数和主要结构。为合理设计、选用感应器创造了很好的条件，保证了感应加热的质量达到高的水平。

对于形状比较复杂的零件，利用与轴向导管相结合的组合式有效圈，解决轴径圆角淬火、台阶轴淬火等多种复杂件淬火的技术难题。采用导磁体，特别是可加工导磁体提高感应器效率。

设计简单方便的感应器快换结构，能够在 3~15s 内更换高中频感应加热感应器夹头、水、电的连接。

### 4、感应加热工艺的发展

#### 4.1 横向磁场表面淬火

横向磁场表面淬火在矩形感应器有效导体内的电流走向与被淬火零件的轴向是平行的，而在有效导体上形成的磁场则与零件的轴线垂直，称之为横向磁场。一般环形回路的外圆感应器则相反，称为纵向感应器，纵向感应器形成的磁场则是顺轴向。

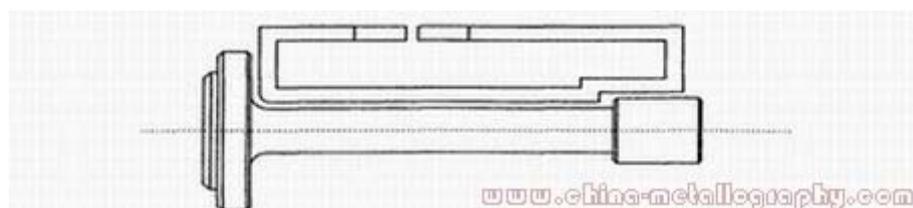


图 1 横向磁场加热“T”形轴示意图



图2 脉冲加热曲线

对于“T”形和变截面轴类零件，过去习惯于使用环形感应器进行连续感应加热表面淬火，此时涡流在轴的表面呈环形流动。当加热到轴的台阶时，由于受磁场偏移的影响，不易得到均匀加热表面，因而淬硬层中断，这样形成了强度上的薄弱部位，易造成零件的早期断裂。而在横向磁场中采用脉冲升温加热，即感应器不动，零件定速旋转，使感应器包围的零件表面依次被循环加热，见图1。图2为脉冲加热曲线，从而可得到均匀的加热表面。能够得到均匀加热表面的原因在于横向磁场内变截面轴仍感生同样大小的电流，所以对应感应器部位产生的磁感应强度  $B$  不变，不受感应器其它部位产生磁场的影响，这样就保证了各部位加热的均匀性。横向磁场加热有以下特点：

- (1) 能够处理“T”形“H”形及直径相差较大的变截面轴，为扩大感应热处理提供了可能。
- (2) 各截面加热均匀，淬火层连续，提高了零件强度和热处理质量。
- (3) 由于要求淬硬的整个表面同时达到预定的淬火温度，可用余热自回火，故减少了工序，节约能源，降低成本。
- (4) 矩形感应器结构简单，易于制造，装卸零件方便，有利于实现自动化。

#### 4.2 整体感应加热淬火

整体感应加热淬火适用于承受弯曲或扭曲疲劳载荷的零件，使零件表层处于压应力分布状态。而感应加热较深的零件在相变过程中表层易形成张应力，从而降低了承受疲劳载荷零件的服役寿命。通过大量试验验证，应力分布理想的淬硬层深为零件有效厚度或直径的10%~20%时，表现出高的疲劳强度。这时淬硬层为马氏体组织，次层为贝氏体、屈氏体、索氏体等组织。为此俄罗斯开发了低淬透性钢，同时还采取了细化晶粒的冶金工艺措施。

### 4.3 感应接触电阻加热淬火

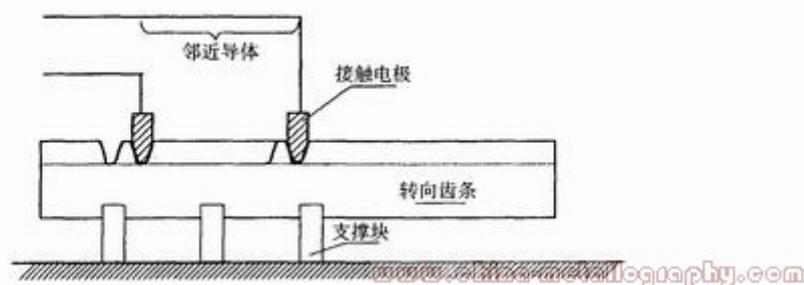


图3 转向齿条感应接触电阻加热淬火示意图

感应接触电阻加热淬火是利用工件淬硬部分作感应器导体回路的一部分。其特点是功率密度高、加热速度快、畸变小、淬硬层浅。图3为转向齿条感应接触电阻加热淬火示意图。感应接触电阻加热淬火的另一个特点是淬硬区形状与邻近导体形状一致。因此可以对内表面和弧形面进行条形淬火。感应接触电阻加热淬火要解决以下工艺方面的问题：

(1) 加热功率的选择 齿条形状复杂，获得仿形的硬化层分布比较困难。根据经验硬化层深度要求  $0.1\text{mm}\sim 0.5\text{mm}$ ，模数  $2\sim 4$  时，通常采用  $200\text{kHz}\sim 250\text{kHz}$  高频电源加热。

(2) 淬火感应器 感应器邻近导体与淬硬部分的间隙应均匀一致，并能够进行调整，以获得良好的加热效果。邻近导体宽度  $b_1$  与齿幅宽度之比  $b_1/b=1.2$  效果最佳。

(3) 防止变形 感应接触电阻加热淬火畸变小，通过接触压力与支撑结构和位子相配合来实现，因此应根据具体零件确定。

### 4.4 感应淬火零件的回火

感应淬火零件的回火采用自回火，是淬火过程提前终止冷却，使零件心部热量由内部向外部淬硬层传递产生自热回火作用。这种回火方式要求掌握好自回火温度，避免回火不足或温度过高造成淬硬层硬度不足。

感应加热回火，是使用感应加热取代炉中回火的一种方式。这种回火方式要求被回火零件处于同等初始条件，这样才能够保证零件回火质量的稳定性。同时回火的温度和工艺参数都需进行调试确定。

### 4.5 感应加热正火

感应加热正火一般是针对正火难度较大，零件尺寸较大以及焊接件的焊缝进行正火处理，以改善材质，提高工艺性。

### 4.6 感应加热气体渗氮及氮碳共渗

感应加热气体渗氮及氮碳共渗是将所需渗氮或氮碳共渗的零件感应加热至 560℃，保温一定时间。在加热过程通入氨气进行渗氮处理。在感应加热渗氮过程中通过改变加热温度、时间和通入的氨气流量得到不同的渗层深度和渗层硬度。固定保温时间 90min，改变加热温度所得到的渗氮层深度渗氮层硬度见表 1。表 2 表示温度固定在 560℃，改变保温时间所得到的渗氮层深度及硬度情况。表 3 表示感应加热温度为 560℃，时间为 90min，不同氨流量时渗氮层深度与硬度，材料为 38CrMoAl 钢。

表 1 不同感应加热温度的渗氮层深度和硬度

Table 1 Thickness and hardness of nitrated layer produced at different induction heating temperatures

序号	加热温度 ℃	表面硬度(HV5)	渗氮层深(mm)	脆性
1	500	776	0.10	1 级
2	525	841	0.12	1 级
3	540	884	0.13	1 级
4	560	882	0.16	1 级
5	580	860	0.17	1 级
6	600	829	0.20	1 级
7	620	749	0.19	1 级
8	640	622	0.20	1 级

表 2 不同感应加热时间的渗氮层深度和硬度

Table 2 Thickness and hardness of nitrated layer produced for different induction heating times

序号	保温时间(min)	表面硬度(HV5)	渗氮层深(mm)	脆性
1	30	783	0.09	1 级
2	60	809	0.11	1 级
3	90	901	0.15	1 级
4	120	851	0.20	1 级
5	180	854	0.25	1 级
6	240	950	0.31	1 级
7	360	930	0.45	1 级
8	900	950	0.47	1 级

表 3 不同氨气流量时渗氮层深度和硬度

Table 3 Thickness and hardness of nitrated layer produced at different ammonia flows

序号	氨气流量(ml/min)	表面硬度(HV5)	渗氮层深(mm)
1	80	904	0.14~0.16
2	120	932	0.14~0.16
3	200	954	0.14~0.17
4	470	868	0.17~0.18
5	880	882	0.15~0.16
6	136	900	0.14~0.16

感应加热气体渗氮有以下特点：

- (1) 与传统对流缓和辐射传热气体渗氮相比，感应加热气体渗氮升温速度快。
- (2) 由于高频的趋肤效应，首先达到渗氮温度的应该是工件表层，而这正是要求渗氮的部位。也就是说，要求渗氮的部位最先到温进行渗氮。
- (3) 整个渗氮罐内的温度在渗氮全过程是不均匀的。工件表面的温度最高，距工件表面越远的部位温度越低。从而导致炉罐内各部位氮分解率也不一致。距离工件表面越近温度越高的部位，氮的分解率越高。距离工件越远，温度越低的部位，则氮的分解率越低。因此，氮的分解率始终比较低。
- (4) 供给工件表面渗氮的活性氮原子十分充足。由上述三个特点可知，整个炉罐内以工件表面的活性氮原子最多，始终有足够的活性氮原子供渗氮之用。
- (5) 有脉冲效果。高频感应加热渗氮一般是间歇性通断电，因此整个渗氮过程的温度和炉压都具有脉冲性，在一定程度上产生了脉冲渗氮的效果。
- (6) 有磁场渗氮的特点。整个渗氮过程是在交变磁场中完成。磁场渗氮能显著促进渗氮过程和消除渗层的脆性。
- (7) 感应加热渗氮结束以后可以采用风冷加快冷却，有利于缩短生产周期，降低渗氮层脆性。

## 5、大功率感应脉冲加热

大功率感应脉冲加热是以高的能量密度（ $8\sim 9\times 10^3\text{w}/\text{cm}^2\sim 10^4\text{w}/\text{cm}^2$ ）、电源频率为  $450\text{kHz}\sim 500\text{kHz}$  的感应脉冲电源对中小零件进行表面淬火的技术。由于大功率感应脉冲加热综合了感应加热与高能量密度加热的某些特点，淬火后具有高硬度、高耐磨性、良好的韧性和疲劳强度、以及微变形等优点。而且设备投资少，维修简单。当硬化层深度要求在  $0.5\text{mm}\sim 1.2\text{mm}$  范围时，该技术可与激光淬火、电子束淬火相竞争。

45 钢在优化脉冲加热规范下经 240ms 加热淬火后，硬度可高达 900HV0.5 以上，GCr15 钢在优化脉冲加热规范下经 240ms 加热淬火后，硬度可高达 1000HV0.5 以上，远远超过普通高频淬火后的最高硬度（高频淬火后最高硬度 700HV $\sim$ 800HV）。对感应脉冲加热淬火的零件与高频感应加热淬火零件进行对比性磨损试验表明，在同等干磨条件下感应脉冲加热零件的磨损量仅为高频淬火零件的 1/3；在有润滑条件下磨损量仅为 1/2。对 45 钢进行感应脉冲加热淬火后疲劳极限试验表明， $\sigma_{-1}$  值比高频淬火提高 1.7 倍。采用不同原始组织进行感应脉冲加热淬火后的疲劳性能显示，调质状态与正火状态相比较，其  $\sigma_{-1}$  值提高 1.3 倍。因此经过调质处理后进行感应脉冲加热淬火的零件的疲劳极限最高。感应脉冲加热淬火后的超常硬化，主要是由于有效的晶粒细化，高密度亚结构及高的残余应力综合作用的结果。