大功率锻造感应加热系统的设计与应用

山东荣泰感应科技有限公司 （潍坊 261206） 牟俊茂 刘光信 张 明

荣泰感应科技有限公司（下称荣泰）是国内著名的集技术研发、工程设计、生产制造于一体的一流的感应加热设备制造商。2011年被评为市级企业技术中心，在国内同行业中率先成立研发中心，拥有一支实力雄厚的设计研发队伍，公司以“感应加热行业领航者”为己任，致力于感应加热行业民族品牌的建设。

荣泰生产的产品主要应用于：热处理领域、锻造领域、铸造领域。

锻造感应加热替代传统燃料加热是节能、节材、消除环境污染，减轻工人劳动强度，特别是提高锻件内在质量的一条有效途径。目前，中小功率的锻造感应加热炉（1000kW以下）由于制造简单，比较成熟，已在我国锻造行业得到了广泛应用。但大功率的（1000kW以上）锻造感应加热炉加热坯料质量大，传输系统复杂，加热温度均匀性、设备安全可靠性及系统的自动化程度要求高，设计制造方面具有一定难度，目前在锻造行业的应用还不多。本文结合我公司15年的感应加热设计制造经验和客户设备应用实践，介绍大功率锻造感应加热系统的设计与应用，期望对大功率感应加热技术的推广和发展有所裨益。

1. 锻造感应加热的特点

感应加热是一项先进的加热技术，利用处在交变磁场中的导体内部自身产生的涡流和磁滞损耗作用于金属本体而引起热效应，在极短的时间内产生大量的热量，以此来对金属进行加热。锻造感应加热与传统的油炉、煤炉和天然气炉加热相比较，其主要优点有：

（1）加热速度快，效率高，容易实现高功率密度。感应加热是从金属内部即从金属的电流透入深度层开始加热，这样在很大程度上节省了热传导的时间，因此加热速度快，效率可达60%~70%。

（2）被加热坯料表面氧化、脱碳非常少。感应加热坯料产生的氧化皮烧损率可控制在0.5%以下；另一方面感应加热可使锻造模具寿命延长，资料表明，感应加热可使锻造模具寿命提高30%以上。感应加热由于氧化皮少，锻件飞边少，可节约原材料5%左右。

（3）感应加热温度由坯料表面向内部传导或渗透，具有精确的加热深度和区域，易于控制。

（4）感应加热采用非接触式加热方式，在加热过程中不易渗入杂质。设备可频繁开启、关停，工作容易，加热均匀，心表温差很小，可降低锻件废品率1.5%。所获得的锻件奥氏体晶粒细小，具有非常好的金相组织。

（5）感应加热节能环保，作业环境好。感应加热设备结构紧凑，减少占地、热辐射、噪声和灰尘，车间温度大幅降低，改善了劳动条件，净化了车间工作环境，非常适合现代企业的环保要求。

（6）感应加热便于同计算机、PLC、测温装置、分选装置及下料、进出料机械等组成一套自动控制系统，可使锻造工厂实现现代化的生产管理。

但在感应器里能加热的毛坯尺寸有限，仅适合坯料形状简单、品种少、产量大的锻件生产。

2. 系统配置

大功率锻造加热系统的加热对象主要是大直径棒料、长棒料或大质量的形状规则坯料（如方钢、六棱钢等）。大功率感应加热要求功率密度大，加

热速度快，加热温度均匀，设备安全可靠。

生产工艺流程描述：加热前的坯料经过剪、切、锯的方法下料后进入储料架，储料架上坯料由自动上料机构送至进料机构处的托辊上，坯料由进料和坯料输送机构驱动托辊穿过感应线圈并被加热到合适的锻造温度，加热过程中坯料输送速度和中频电源功率根据所测坯料温度进行闭环控制，坯料到达感应器出料口后由自动出料智能分选机构进行分选，加热合格的坯料汇流至卸料通道的辊道，由机械手取下坯料送至锻压机使用（见图1）。

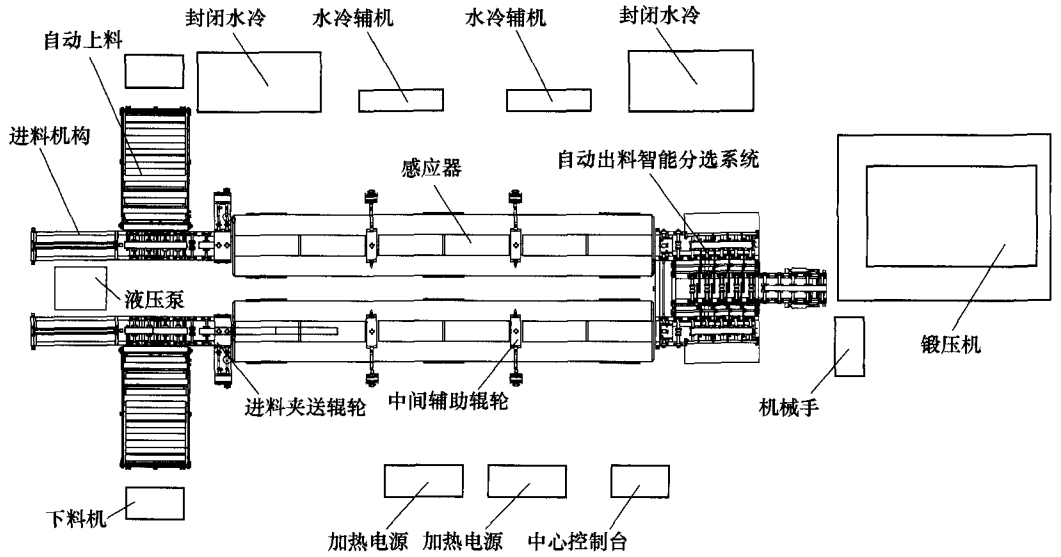

图1　3600kW中频感应加热系统平面

以下结合我公司生产的加热 ϕ 160mm × 1500mm坯料、功率3600kW锻造感应加热系统分析一下设备的配置。

（1）自动上料机构　目前，锻造感应加热系统的自动上料机构主要有斜槽上料（见图2）、振动桶上料、阶梯上料（见图3）及链条刮板上料4种。其中振动桶上料和链条刮板上料适合中小质量和短的坯料，斜槽上料和阶梯上料适合大中质量和长的坯料。公司设计的3600kW锻造加热系统自动上料机构坯料长度达1.5m、重量达到235kg，为便于坯料上料我们选用了阶梯上料机构。

图2　斜槽上料机构

图3　阶梯上料机构

（2）进料和坯料输送机构　目前锻造感应加热系统的进料和坯料输送机构主要有推杆式（气缸或油缸）、夹辊（托辊）式、步进梁式和链条履带式4种。大功率坯料质量大、长度长一般都采用夹辊（托辊）式输送机构。设计的3600kW锻造感应加热系统的进料和坯料输送机构选用的是推杆（气缸）和夹辊（托辊）相结合的连续进料机构。传输装置采用3台西门子公司生产的变频器无级调速，通过数字预置速度，方便地将坯料以均匀的速度输送，运动平稳可靠，对电源无冲击，运行速度控制精确，还能做到每次收工时自动清空炉膛内的坯料，可集中收集氧化皮。

（3）感应器（含电容柜）的设计　为满足锻造工艺需要，通常有两个基本要求：一是坯料加热温度要达到1100~1250℃；二是坯料的心表温差要小，通常要求小于100℃。要满足这两个基本要求，在感应器功率、频率、直径、长度、铜管规格和匝间距、绝缘和保温材料、冷却水量及坯料导轨等选取上要进行优化设计，达到最佳匹配。采用计算机CAD软件和参考同类设备使用经验（已有2000套感应加热器运行数据）相结合的设计方法，对感应器的各个参数进行优化设计，在满足感应器与中频电源的阻抗最佳匹配的情况下，对热能参数也进行优化，通常我们设计的感应器热效率不低于80%。

在3600kW锻造感应加热系统的感应器（含电容柜）设计制造上，由于坯料比较重，功率较大，在加热过程中节拍有比较大的调整，功率的余量调节也比较大。在综合考虑效率和稳定性的前提下，感应器（含电容柜）采用两线组合。在每条线上各节感应器功率按比例设计分配，当坯料能够吸收电功率时，让其尽可能多地吸收电功率，配置高功率，感应器分为快速升温和均温两个阶段，这样设计的感应器长度缩短，占地少，热效率高，对大功率感应加热具有实际意义。

感应器设计了水电快换装置和中心高调整装置，可以大幅减少不同坯料加热生产的切换时间。感应器采用厚壁冷挤压方铜管绕制，多层绝缘材料，消除铜管的匝间短路和对炉衬材料的短路问题。炉衬采用16mm厚进口的刚玉质绝缘材料，强度大，寿命长。感应器内坯料底部安装有1Cr18Ni9Ti奥氏体耐热钢管做成的水冷导轨，导轨表面喷涂高温耐磨合金，大幅提高了使用寿命，一副导轨的使用寿命可达到1000h以上。

（4）自动出料智能分选机构　目前锻造感应加热系统的自动出料智能分选机构主要有直滑式和倾翻式两种。考虑到ϕ160mm×1500mm坯料比较重，直滑式安全性差，我们设计了倾翻式分选机构。采用美国雷泰双色测温仪，测温仪测温范围：400~1400℃，测温仪表精度应为0.5级，控温精度达±5℃。采集温度为闭环反馈信号，经过PLC根据测量值和设定值进行PID运算处理，做出相应调节，实现系统闭环控制。

（5）中频电源　大功率感应加热用中频电源匹配的大型模锻锤压力大，振动大，影响中频电源的寿命，甚至容易损坏中频电源，因此中频电源的技术和元器件质量都要重点考虑。在3600kW中频电源设计上，结合两线感应器设计两台1800kW电源组合，使得中频电源对电网的谐波污染大幅降低，中频电源的安全可靠性更高。中频电源控制板采用具有先进水平的扫频式恒功率耐冲击型大规模可编程序逻辑阵列模块集成线路板。单块板结构，避免多块板接插件长时间使用接触不良而造成设备运行不可靠的问题。数字化控制各种信号运算处理及其相应动作执行都按程序自动进行。具备完善的过电流、过电压、进线缺相、电源欠电压、冷却水压过低和冷却水温过高等各项保护措施。

（6）电气智能控制系统　智能控制台对中频加热设备、测温、水冷却设备和机械装置进行集中控制，置于生产现场，对加热工艺的全过程进行控制。其控制精度高，工作稳定，抗干扰、抗污染、耐振动能力强，操作方便。

系统采用西门子S7－300 PLC集中控制。选用北京昆仑MCGS全中文工控组态软件进行数据采集。具有工艺流程控制、动画显示、趋热曲线跟踪和报警输出、远程网络监控等功能；选用嵌入式低功耗10in高亮度彩色触摸显示屏；过程控制效果的实时检测，在设备运行过程中，实时分析监控诊断设备的随动状态，对各类异常情况及时汉字显示提示，并声光报警，实现设备的多重保护；根据需要可对操作人员实施设置口令密码的验证功能，生产记录查询、打印权限的管理功能。

（7）水冷却系统　目前中频感应加热设备的水冷却系统主要有3种：传统水池、板（或管）式换热器、全封闭水冷设备，优缺点比较如表1所示。

表1　三种水冷却系统有缺点比较

项目	优点	缺点
传统水池	成本低些 冬天防冻措施好做	腐烂并生长青苔草，吸入设备中产生结垢，水路不畅，易堵塞，温降减低导致故障率高 占地面积大，设备搬迁水池很难再使用，循环水损耗大
板（或管）式换热器	成本低，一次性投入资金较少 占地面积小	换热效率低，会导致晶闸管等器件损坏 流道小，易堵塞，不适宜气－气换热或蒸汽冷凝 有温差应力存在，冷却降温能力小，清洗困难
全封闭水冷设备	全封闭式循环冷却，杜绝杂物引起的管路堵塞 采用软水循环冷却，无水垢生成引起的元器件过热损坏 占地面积小，移动方便 散热效率高，运行成本低，耗水量很小，符合节能环保要求	一次性投入资金较大 北方冬天需做防冻措施

大功率感应加热炉功率大、电压高、水温高，为节约水资源，利于整个系统的布局和安全可靠运行，最好采用全封闭水冷设备。

3. 系统的管理应用

大功率感应加热设备的使用在管理上要更加重视，合理安排生产工艺，严格生产管理，尽量使设备靠近额定工作参数生产，规格接近的坯料要集中生产，最大限度地批量生产。

同时要做好设备的日常维护和安全保护，无论设备如何先进，运行期间都必须做好安全保护，大功率感应加热设备工作电压高，坯料质量大，自动化程度高，要求工作起来安全可靠，机械与电气的安全保护都非常关键。特别是电源、电容器、感应线圈的冷却水降温保护，运行期间要有应急水供应，以防运行中突然停电循环水不能正常供给，保护感应线圈不被烧坏，应用案例如表2所示。

表2 2007年青岛锻压客户煤气加热改1800kW中频感应加热炉效果比较

ϕ 150mm×240mm坯料	煤气加热	1800kW中频感应炉加热	对比
加热时间	30~50min	5min	加热时间大幅缩短
锻件质量	表面氧化坑多，锻件表面质量差，废品率2.5%以上，客户时有投诉和退货	温度均匀，氧化皮少，锻件表面质量好，废品率0.5%，无加热原因的投诉和退货	废品率降低2%，客户投诉和退货减少，产品竞争力提高了
能量节约	吨锻件耗能费用500元	吨锻件耗能费用315元（企业自测数据）	年可节约加热能源费185万元
原材料节约	氧化烧损2.5%	氧化烧损0.5%	年节约原材料200t，可节约材料费5000×200=100（万元）
模具费节约	2.2×80=176(万元)	按节约30%计算	年可节约52.8万元
劳动强度	高，用工多，特别夏天工人辞职多，难招工	低，用工减少，夏天工人辞职减少，招工容易了	劳动强度大幅降低，减少了用工数量，解决了招工难题
操作环境	热、脏	整洁、干净	无烟尘，政府鼓励

注：吨锻件耗电420kW·h，电价0.75元/kW·h，年产锻件10 000t。

4. 锻造感应加热的发展方向

（1）电源将更节能环保，趋向高频大容量化　目前，国内锻造感应加热装置多数采用晶闸管并联谐振电源，工业发达国家锻造感应加热装置已采用IGBT串联谐振电源。和晶闸管并联谐振电源相比，IGBT串联谐振电源节能环保效果更有优势。现在国内也有厂家采用IGBT串联谐振电源，但是功率都不很大，效果不明显。IGBT串联谐振电源的整流器不改变直流输出电压，只在故障时关断整流器的工作，整流器晶闸管的延迟触发角始终为0，因此IGBT串联谐振电源可很容易达到最高功率因数，无功损耗低，各次谐波幅值都是最小值，对电网污染小。IGBT串联谐振电源能实现多个模块化加热装置，频率能做得更高，电源更容易实现高频大容量化。

（2）安全保护措施将更完善，体积将更小　锻造感应加热装置具备完善的过电流、过电压、进线缺相、电源欠电压、冷却水压过低和冷却水温过高等各项保护措施，保证设备安全运行；采用数字化计算机控制，触摸屏显示各类信息，根据需要可对操作人员实施设置口令密码的验证功能，加热节拍、温度等工艺参数、耗电量、功率因数及生产记录查询、打印权限的管理功能。现在已有将整流器、逆变器和控制元器件都安装在一个易于维修的柜体内，加热器安装在柜体上部，柜内有风扇和水冷却设施，把元器件充分集中安装的一体化装置，设备体积大大减小；柜门周围安装有密封条，每扇门都配暗锁和安全保护限位开关，当每扇门开启时，自动切断主电源，充分保护操作人员安全。

（3）操作控制趋向机械化、自动化、智能化　一体化、计算机、信息和控制、装备自动化、新材料、新工艺等的快速发展，感应加热设备与锻压主设备及后续热处理设备采用计算机集中控制、集中显示、故障报警、协调运行的能力将会进一步提高。通过计算机将主机(如模锻锤、挤压机)和感应加热设备，当然也包括机组的其他辅助设备，将运行控制在最佳状态，无疑是工业技术发展的重要目标，这样设备的维护操作将越来越简单，产品质量和劳动生产率提高，生产成本降低。

5. 结语

综上所述，随着我国锻压工业的快速发展和政府对节能环保的高度重视，节能环保、安全可靠、高生产率及高自动化的大功率感应加热系统会有更大的发展应用空间，感应加热技术必将朝着更安全、更节能和更具智能化、自动化的方向发展。

MW（20120830）