

500KW/0.5kHz 钛、钽、铌

坯料加热设备技术方案



方案制作：西安德昌机电科技有限公司

地址：西安市沣渭新区水厂路 68 号

电话：029-84527288

项目负责人：张金刚 15091099983

<http://www.dczpl.com>

陕西.西安

1: 设备主要技术要求、技术参数描述.

1.1 总体技术要求

(1) 透热炉线圈形式：立式

(2) 加热坯料直径：

1) 钽合金：

常用规格： $\Phi 160\sim 200\times 320-500$ mm；重量：106~260kg；

最大规格及重量： $\Phi 220\times 600$ mm，379kg；

2) 铌合金：

常用规格： $\Phi 160\sim 240\times 320-500$ mm；重量：55~195kg；

最大规格及重量： $\Phi 290\times 700$ mm，398kg；

带包套最大规格及重量： $\Phi 330\times 700$ mm，515kg；

(3) 最大透热坯直径 $\Phi 330$ mm，工件最大长度 700mm；

(4) 透热炉为双炉膛设计，直径分别为 $\Phi 350$ mm 和 $\Phi 220$ mm

(5) 升降机构（推杆机构）加热工件承载能力要求不小于 600kg；

(6) 炉子最高工作温度：1450℃

1.2 电源功率、频率的确定

1.3.1 频率的确定

频率与加热深度紧密相关，频率越高加热层越浅，反之则越深，但选择过低的频率也会影响加热效率。

频率计算的公式：

实心圆柱体频率计算公式：

最佳频率范围：

$$\frac{3.13 \times 10^{-6} \rho_2}{\mu_r D_2^2} < f < \frac{6.26 \times 10^{-6} \rho_2}{\mu_r D_2^2}$$

⇒ 频率计算为 $F=6 \times 0.465 / (1 \times 0.16 \times 0.16) = 108 \text{Hz}$

根据我们的经验调整系数，中频电源的额定频率选择为 **300Hz**。中频电源在此频率可适应不同规格不同材质坯料的加热要求，提高设备工艺适应性和设备运行稳定性。

1) 当同一台电源加热多种规格坯料时，频率应以最细坯料为准进行选择，这样不会影响到电效率。

2) 当加热频率提高时，加热层较浅，为保证工件均匀透热，周期式加热炉只能通过加长加热时间来保证。

1.3.2 功率的确定

以典型坯料钽及钽合金为准进行功率核算。电源功率按下面经验公式计算。

$$0.24P = \frac{0.144 \times G \times (T_2 - T_1)}{0.42t}$$

式中：

P — 电源功率 (单位：KW)

t — 加热节拍 (单位：秒) 式中 $t=1200$ 秒

G — 加热节拍时加热重量 (单位：Kg) 式中 $G_{\text{Max}}=400 \text{Kg}$

T₂ — 加热温度 (单位：℃) 式中 $T_2=1450 \text{℃}$

T₁ — 初始温度 (单位：℃) 式中 $T_1=20 \text{℃}$

根据上式可计算出加热所需的电源功率

理论计算 $P=0.144 \times 400 \times 1450 / (0.42 \times 1800 \times 0.24) = 458 \text{KW}$ 。考虑钽、铌金属加热的特殊性，同时要兼顾多种规格工件加热，加热材质不同，必要时需牺牲效率来满足加热温度要求，故电源功率选型为 **500KW**。

1.3.3 坯料透热时间计算：

$$T_r = K_r \left[\frac{d - \Delta}{2} \right]^2$$

式中： T_r — 计算加热时间（秒）

K_r — 温差系数（和芯表温差要求有关）

d — 坯料直径（cm）

Δ — 电流渗透深度。

电源频率为 300Hz， $\Delta = 0.0164$

芯表温差取 100°C 时， $T_r = 1.8 \times 10^4 \times (0.32 - 0.0164)^2 = 1659 \text{S}$ 。

即加热 **290** 的工件时，温差 100°C 最短加热时间为 **1700S**。缩短芯表温差范围，加热时间还需加长。带钢包套的工件加热，加热周期会进一步加长。

1.4 方案设计说明

1.4.1 加热方式：工件采用周期式加热，即炉膛内每次仅放置一根工件进行加热。

1.4.2 运动方式：工件放置在加热平台上，立式定位；感应器由电机带动，做提升、下降运动。

1.4.3 工作过程：人工辅助，将工件静置在加热平台后，按下工作按钮，感应器下降至限位开关自动停止，同时给加热中频电源启动信号，按照工艺加

热节拍进行自动加热。加热时间到，感应器自动升起，到位后提示加热完成。

1.4.4 加热温度保证

工件较大，为保证芯表、轴向温差，主要采取以下措施：

◆ 设计合理的电源频率，可保证加热温度的均匀性。电源额定频率设计为200~500Hz，在该范围内，中频电源频率可调。

◆ A、适当加长感应器长度，使工件两端有足够密度的电磁场。

B、线圈两端差异性设计，底部变匝距开放式设计+顶部密封设计。减少热能损失，享用箱式炉的均温特性。

1.4.5 感应器直径、长度及线圈参数的设计对于加热效果起决定性的作用。

我公司根据理论计算及常期的经验总结，针对技术要求中的坯料情况来设计感应器参数，按照贵处要求，配置两套感应器，规格分别如下：

A、GT-220（加热 $\phi 160$ - $\phi 220$ mm 钼合金坯料）

B、GT-330（加热 $\phi 160$ - $\phi 330$ mm 钼合金坯料）

1.4.6 加热坯料长度范围为 320--700mm，当同一台感应器用于加热该长度范围内的多种规格坯料时，感应器按最长坯料（700mm）计算长度。

2. 设备供货范围和报价

18.6 万元

序号	名称	规格型号	数量	报价(万元)
1	中频电源	500KW/0.3kHz	1 套	7.8
2	电容器柜		1 套	1.6
3	控制台	PLC (S7-200)	1 套	1.6
4	感应器	GT-220 (加热 $\phi 160$ - $\phi 220$ mm 钼合金坯料)	1 台	2.5

5	感应器	GT-330 (加热 ϕ 160- ϕ 330mm 钕合金坯料)	1 台	3.6
6	炉架	(含水路、电路、电机等)	1 套	1.0
7	水冷电缆		1 套	0.5
8	随机备件	包括: 主控板 1 块、可控硅 KK、KP 各 2 只	1 套	免费

3. 设备性能参数描述

A. 电气参数:	
中频电源额定功率	500kW
中频电源额定频率	200~500Hz
中频电源整流项数	6 相
中频电源进线电压	380V
感应器电压	750V
启动方式	扫频式零压软启动
中频电源启动成功率	100%
变压器	油浸式整流变压器
变压器容量	600KVA
变压器原边进线电压	10KV \pm 5%
功率因数	\geq 0.92
B. 感应器参数	
感应器规格	GT-220 (加热 ϕ 160- ϕ 220mm 钕合金坯料) GT-330 (加热 ϕ 160- ϕ 330mm 钕合金坯料)
感应器更换方式	带快换接头
铜管材质	T2 纯铜
铜管壁厚	\geq 2.5mm
炉衬耐火度	\geq 1750 $^{\circ}$ C
C. 控制系统参数	
控制方式	由一台 PLC 单独控制
PLC 型号	S7 系列

D. 冷却水系统参数:	
PH 值	7~8.5
电导率	<500 μ s/cm
总硬度	<10 度
进水压力	0.2-0.4 MPa
进水温度	5-35℃
出水温度	\leq 55℃
冷却水流量	30t/h(单套)

4. 成套设备技术方案

4.1 中频电源主要技术指标:

电源型号	输入电压	输出功率 (KW)	输出频率 (KHz)	输出电压 (V)	输入电流 (A)
KGPS-500KW 0.2~0.5KHz	3×380V 50Hz	500	0.2~0.5	750	820

4.2 中频电源主要特点

本公司以提高中频电源的性能，减少中频电源的安装调试工作量为宗旨，设计制造了该中频电源。采用本控制电路板组装的中频电源，不仅性能好，而且无需同步变压器，无需快熔损坏指示器，无需中频电流信号互感器，无需任何中间继电器，连线极少。更由于三相交流输入线不分相序，中频输出线不必区别相位的优点，使用户现场调试更为方便。。本控



制电路曾经使用功率范围 25KW—1500KW，频率 200HZ—8000HZ。本控制电路在结构上做成一块板，有 16K 纸大小（295mm * 210mm）在电路功能上可以分为整流触发电路、逆变电路、调节器电路、操作保护电路四部分，各部分特点如下：

4.2.1 整流触发电路：

采用脉冲一致性好，抗干扰能力强的数字触发电路，无需同步变压器，同步信号直接取自与整流晶闸管相连的主电路（无单独连线），自动实现与电网同步，而且具备相序自动适应能力，三相交流输入线不分相序，从而使其在主电路与触发板的连线上变得异常简单，可靠。免去调相序对同步整流 α 限定的工作，只需把晶闸管的门极线接入在控制板的接线端子上，无需任何整流部分即可投入使用。

整流触发脉冲变压器已包含在控制板上，整流触发脉冲强度：

$I_p=1.5A, dA/dT \geq 0.5uS$, 脉冲宽度约 1Ms, 绝缘耐压 4KV。

4.2.2 逆变电路部分：

逆变采用零压软启动方式，并设有自动重复启动电路，可防止中频电源偶尔启动失败，提高了启动的可靠性，只要负载品质因数 $\theta \geq 2.5$ ，启动成功率便可达 100%。更有特色的是频率跟踪电路仅需采样中频电压信号，而无需槽路电容器的电流信号，免去了外接中频电流互感器，确定取样电流相位的烦恼。因此，在调试和现场中，也不会由于中频输出线或取样电流互感器的相位接反，而产生中频电源不能启动的问题。

逆变电路中还加有逆变 Φ 角调节电路，由逆变 Φ 角调节器控制，可以自动调节负载阻抗的匹配，达到恒功率输出，可以制成‘快速熔炼’的中频电源

(原理参见论文《恒功率输出中频感应熔炼炉》), 达到节电、节时, 提高电网功率因数的目的, 此功能也可被关掉。逆变的脉冲变压器(提供)是外接的, 其脉冲触发强度: $I_p=3A$, 前沿: $dA/dT \geq 2A/\mu S$, 脉冲宽度: $10-50\mu S$, 绝缘耐压 $4KV$ 。如此强的触发, 对提高快速晶闸管的电流扩散能力, 延长快速晶闸管的使用寿命十分有效。

4.2.3 调节器电路部分:

采用中频电压, 直流电流双闭环 PI 调节器, 在启动过程中双闭环也始终参与工作, 系统工作稳定, 而且在系统调试过程中和逆变失败时, 也很难发生过电流跳闸的现象。另外还有一个逆变功率因数 Φ 角调节器, 保证槽路负载阻抗与电源的匹配, 当用作熔炼电源时, 尽管负载变化很大, 仍能保证最大功率输出和高功率因数整流输入。当用于透热电源时, 在中频电压为 $600V-750V$, 可保证整流输入的功率因数 ≥ 0.9 。调节器的参数适应范围宽, 一般的中频电源系统均能适应, 无需再对调节器参数进行调整。

4.2.4 操作保护电路部分:

在控制电路中设有各种操作, 保护电路, 主电路与控制电路的上电掉电先后次序, 及使用人员的误操作等, 均不会对系统产生任何影响。具体的保护功能有:

过电流—系统过电流截止保护, 过流电平无需单独整定, 控制电路自定整定在额定输出电流的 1.5 倍上。

过电压—中频输出过电压保护, 过电压平亦需单独整定, 控制电路自动整定在额定输出中频电压的 1.15 倍。过电压保护动作一方面截止整流桥, 另一方面直通逆变桥, 能有效的防止因输出电缆开路引起

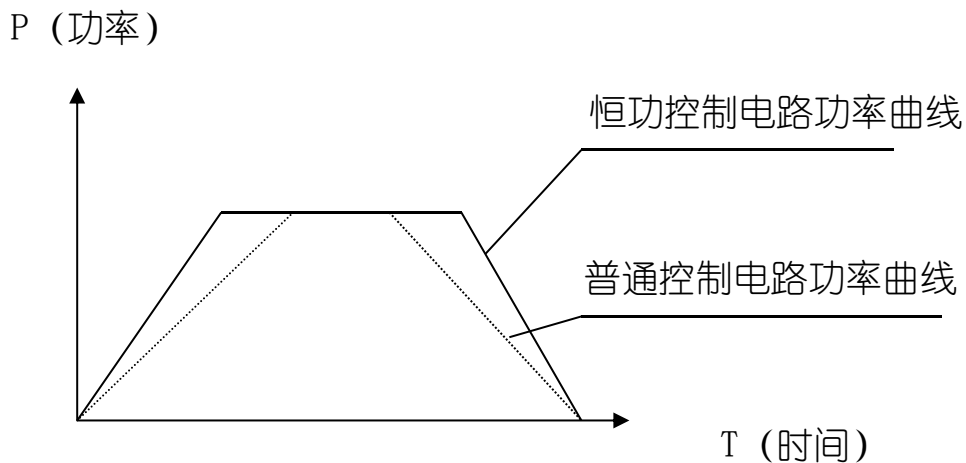
逆变晶闸管的损坏。

水压低—冷却水压力保护，具有 8 秒钟的延时动作，可防止水压瞬时波动引起系统的跳闸。

控制电源欠压—控制电路供电电压偏低保护，可防止控制电路掉电时，对主电路的乱触发。所有的保护具有声光报警功能。

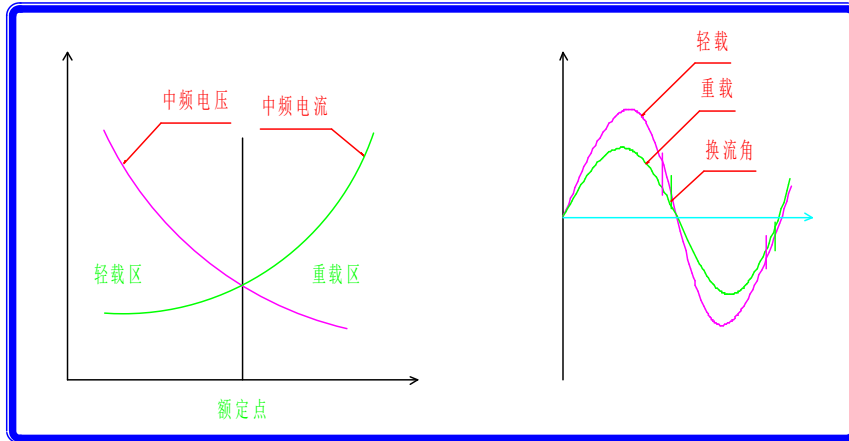
数字化中频电源投入运行多年来，受到广大用户的认可。主要优点为：

- 数字化恒功率控制系统（控制线路高度集成）。
- 各种保护功能（过流、过压、水压、缺相、欠压、过载）。
- 低故障率、维修简单。
- 长期工作无温度漂移，工作点稳定。



- 主电路甩掉繁琐的启动回路和继电器回路，故障率低。
- 选用 GGD 柜体，使得装配合理，实现了中频电源标准化。
- 调节曲线平滑，线性度高，无任何冲击。
- 可根据负载的变化来调整匹配，提高加热速度节省电能（10%）。

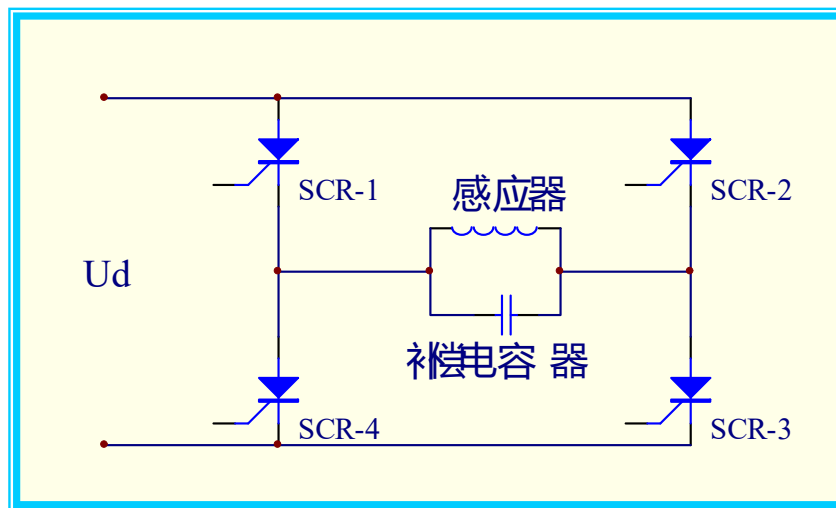
其原理是：（如下图）



重载时，减小换流角，相对提高电压、减少电流，使电源工作接近最佳值（额定值）

轻载时，增大换流角，相对减少电压、提高电流，使电源工作接近最佳值（额定值）

可靠性的启动性（无论空载、满载）。采用零压扫频式启动方式，使启动性能大大提高。启动原理如下：

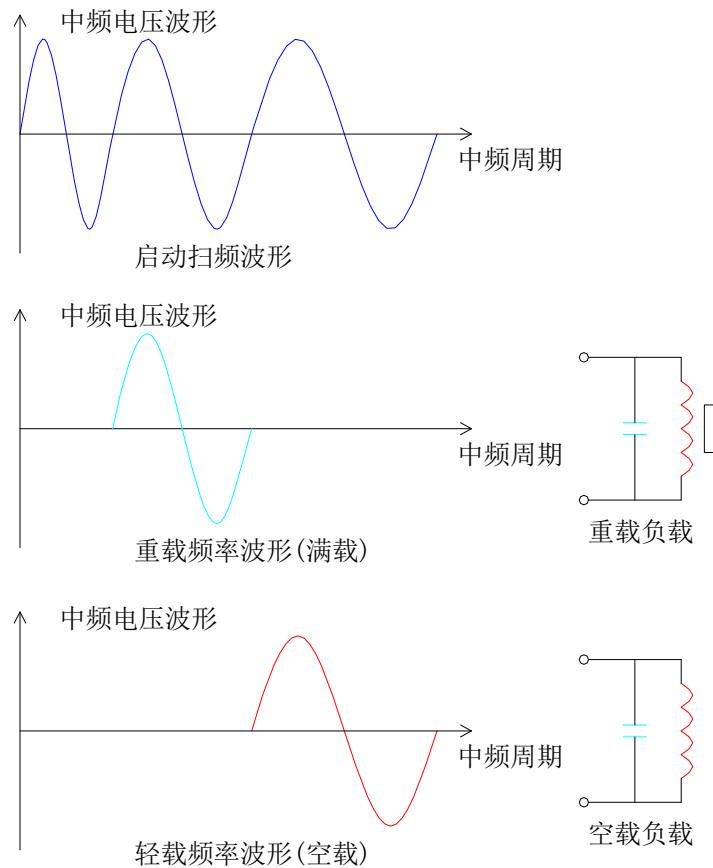


中频电源逆变原理图

负载特性—中频感应加热设备一般都采用并联谐振电炉，在上图所示的并联谐振负载中，当电感 L （感应器）、补偿电容的值确定后，其谐振的

固有频率也就确定，随着负载（感应器）阻抗的变化，固有频率也随着变化，当空炉轻载时频率较低；满炉、冷料重载时频率较高。

启动频率跟踪特性--在启动过程中，当启动频率与负载频率最为接近时，启动的成功率越高。而频率是随着负载的变化而变化的。如图示，在此采用扫频启动方式，即发一组含盖负载频率变化范围内的频率启动设备，就不受负载变化的影响，由此启动的可靠性大大提高。如下图所示。



4.3 感应器

感应器是加热效果的关键。整个感应器采用预制件装配式结构,便于维修及易损件更换。线圈由优质大截面整根矩型铜管绕制而成，管内通冷却水。为保护其绝缘强度，在线圈表面涂防潮绝缘磁漆后固为一整体。整个感应器

制作完成后成一长方体，其抗振性.整体性好。

4.3.1 感应器进水水路用快换接头。

4.3.2 感应器的底、顶端为水冷不锈钢板,以保护感应器和屏蔽磁力线外洩。

4.3.3 感应器铜线圈绕成后，均经水压试验，确保不漏水。

4.3.4 感应器安装基准、水电路连接均具有互换性。

4.3.5 感应器是立式垂直放置，工件进入感应器后，并不和炉衬接触，因此，感应器内不设导轨。

4.3.5 炉衬具有先进水平的打结式炉衬,其耐火度 $\geq 1750^{\circ}\text{C}$ ，使用寿命长。

4.4 控制台

PLC 选用 S7 系列，主要功能有：

- ◆ 中频电源的启、停，功率调节、功率显示。
- ◆ 加热参数的设定。
- ◆ 与升降系统动作指令关联。
- ◆ 紧急停止按钮（电源断开）。

5. 用户自备项目

5.1 冷却水循环系统（总水流量 30t/h）。

5.2 供电：3×380V 50Hz，最小容量为 600kVA 的整流变压器。

5.3 相关项目约定

相目、内容	德昌电炉	用户
电源柜面漆颜色	计算机灰	
电容器柜、控制柜、炉体平台面漆颜色		※
电源柜进线方式: 下进	※	
设备平面布置、基础、地沟图	※	

基础、地沟土建施工		※
设备简易包装	※	
设备运输	※	
设备安装	※	
电力接至开关柜		※
水路接至设备第一接口		※
设备内部电路连接（电源柜至电容器柜、电容器柜至感应器、控制线路）	※	
设备空载、负荷试车	※	
调整至正常生产状态	※	
试生产、验收	※	※

6. 安装、调试和买方人员培训.

6.1 设备在卖方现场预调试,买方派员到卖方进行预验收.

6.2 买方根据卖方提供的基础资料进行土建设计及施工.

6.3 卖方负责设备安装、现场调试，卖方配合。

6.4 买方可派员到卖方进行技术培训.

6.5 卖方在买方现场安装调试时,对买方技术人员进行培训

7. 设备性能测试及验收

7.1 中频电源功率：满功率测试，功率不低于额定功率。

7.2 电源频率：正常温度、速度工作时，频率不超过额定频率的 $\pm 10\%$

7.3 电源启动性能：连续启动 20 次，成功次数不低于 19 次。

7.4 电源保护性能：缺相、过电流、过电压、水压低、控制电源欠压等保护
逐个测试。

7.5 加热节拍控制准确。和上料系统联络准确可靠。

7.6 设备测试应满足 ZBK46001-87 《感应加热用半导体变频器》

GB10067.1~.4-88 《电热设备基本技术条件》

7.7 钢坯的加热温度满足 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 。温控系统运行稳定、正确、可靠。

8. 质保及售后服务承诺

8.1 对甲方实行(1+1)技术售后服务,即:一台设备出厂后有一位专职的工程师进行常年技术跟踪服务。

8.2 验收后整套设备现场技术服务跟踪期 3 天。

8.3 质保期 12 个月。提供终身维修,保养服务。

8.4 质保期内,正常使用中设备因质量问题造成设备损坏及组件损坏,乙方免费进行维修,更换损坏件。如甲方使用操作不当发生故障,乙方免费进行维修且酌收组件成本费。

8.5 发生故障,乙方保证在接到甲方通知后 2 小时内回复。

8.6 定期检查,在质保期内乙方对设备进行一次全面检查和保养,并向甲方提供检查报告。

8.7 根据甲方要求及时优惠提供配零配件,确保乙方所供设备正常工作及服役。

9. 卖方所提供的技术文件.

9.1 设备总图、平面布置图、基础图、水电路图。

9.2 电气原理图及外部接线图

9.3 控制电气原理图、梯形图。

9.4 安装调试大纲、设备使用操作、维护说明书

9.5 主要外购件、零件说明书

9.6 设备总图、感应器总图及部件明细表。

9.7 易损件、更换件明细表及图纸

9.8 设备检验合格证出厂装箱单

10. 主要元器件生产厂家.

元器件名称	生产厂
可控硅	襄樊、杭州元件
电源开关	德力西或正泰
功率表、电压表	衡阳仪表
电容器	无锡特种电容器厂
主控制板	德昌公司自制
电抗器	德昌公司自制
铜管	洛阳铜材厂
红外测温仪	美国“雷泰”
PLC	西门子

西安德昌机电科技有限公司

张金刚 15091099983

2018-6-3