

# 关于中频感应电炉系统效率的探讨

浙江大学电力电子应用技术国家工程研究中心(杭州 310027) 杜锦才

TM924.5

**摘要** 举例说明了中频感应电炉系统的功率匹配、合理的馈电方式和正确及时的控制操作对于提高系统效率具有十分重要的意义。

**关键词** 中频 感应电炉 系统效率

功率匹配. 馈电方式

## 1 前言

中频感应电炉成套装置一般包括配电系统(电力变压器)、变频装置(中频电源)、感应负载(中频电炉)和馈线(包括工频馈线、中频馈线)等几部分,如图1所示。

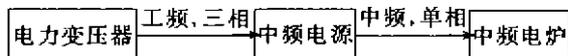


图1 中频感应电炉系统图

所谓“中频电源”是指利用电力电子器件—晶闸管将电网的三相工频(50Hz)电能变为单相中频(通常指400—10000Hz)电能的频率变换装置。它主要用作感应加热电源,适用于精密铸造、熔炼、透热、锻造、淬火、钎焊等工艺。又由于它具有效率高、控制操作方便、维护简单、噪声低、体积小等优点,自70年代初国内第一台中频电源诞生以来,中频感应电炉已在全国的机械、冶金、电力、铁道、交通、纺织以及国防工业等各部门得以广泛应用。随着我国政府对节能和环保越来越重视,中频感应电炉正逐渐取代煤炉、油炉、焦炭炉以及中频发电机组等,它在电力能耗中所占的比重也越来越大。它的单机容量目前国内已达到3000kW,作为大功率动力装置,节能是重要而永恒的主题。下面就中频感应电炉关于系统效率问题作一探讨。

中频感应电炉系统效率除了与中频电源、中频电炉本身的效率特性有关外,中频电源与

中频电炉和电力变压器的功率容量匹配、线路馈电方式以及控制操作等有着极其密切的关系,而且,后者往往起主导和关键性作用。

## 2 系统匹配与效率

### 2.1 中频电源与中频电炉的匹配

就熔炼用中频电炉而言,常规的中频电源功率配置如下:

电炉(kg)	150	250	500	1000	1500	3000
电源(kW)	100	160	250	500	750	1500

目前,国内所使用的感应熔炼炉,多数为500kg的中频电炉。以它为例,通常配用250kW的中频电源,熔炼时间一般为每炉2h,吨耗约为800kWh。尽管中频电源和电炉本身的电效率特性均相当理想,但由于其所配置的电源功率偏低,吨耗仍然偏高。1997年,我们反常规地作了“大马拉小车”试验。在保持中频电源和中频电炉本身有较好的电效率特性前提下,将电源额定功率由原来的250kW改为350kW,甚至400kW。结果熔炼时间大为缩短,大约为每炉1h。由于缩短了加热时间,减少了辐射和传导所引起热量损失,系统总效率提高了约12.5%,吨耗降为约700kWh。这一改进方案的实施,节能效果较为明显,并深得用户的欢迎。当然,这一方案受制于用户现有变压器的容量。

### 2.2 电力变压器与中频电源的匹配

电力变压器的容量较大地超过中频电源的额定容量,固然是一种资源的浪费,但电力变

压器的容量等于甚至小于中频电源本身所具有的额定容量时,其系统效率将受到一定的影响。这时,由于电力变压器容量相对偏小,迫使中频电源的限流值适当下调,系统的电效率和热效率均受损失。假如不改变中频电源的限流值,电力变压器在电炉料较满时,便会发生超负荷运行状态。这时中频电源的进线电压将因压降严重而得不到保证,有些电网电压本身不理想时,甚至会低于360V。而在同样负载情况下,功率与电压平方成正比,即 $P \propto V^2$ 。中频电源则因进线电压太低,而导致输出功率严重不足。不仅降低了电效率,而且严重降低了热效率,系统的总效率也必然严重下降。此外,还将影响电力变压器的使用寿命。

曾经有一家地处浙江山区的小型铸造厂,其250kW的电源配用240kVA的电力变压器。在重炉时,进线电压降为约360V,每炉熔炼时间长达2.5~3h,吨耗约为950kWh,能源损耗严重。比较合理的匹配应该是电力变压器容量略大于中频电源的额定功率,如250kW电源配用315kVA电力变压器当属合理。

### 3 馈线方式与效率

中频感应电炉系统的馈线路包括三相工频输入馈线和单相中频输出馈线。

#### 3.1 三相工频输入馈线

对于三相工频馈线,我们一般以其线路尽可能短、线径足够大,以线路压降尽可能小为原则。一方面,可保证中频电源有足够的进线电压以便使电源和电炉有较高的电效率和热效率;另一方面,也减小其本身的线损以提高系统的总效率。由于进线电流频率为50Hz,频率相对较低,集肤效应不明显,故馈线的结构和位置不作要求。

#### 3.2 单相中频输出馈线

对于单相中频输出馈线,不仅要求线路尽可能短,而且对馈线的结构和位置也有一定的要求,尤其是对于频率较高、功率较大的中频电源。由于电源频率较高,存在明显的“集肤效应”和“邻近效应”,线路的分布电感不容忽

视。为了控制其分布电感,降低线损,提高系统效率,中频电源的输出馈线普遍采用矩形母排,而非采用分布电感较大的普通电力电缆。不仅如此,对其母排的结构和位置也有适当的要求。

根据电磁场理论分析(详细推导从略):对于矩形母排馈线(如图2所示),其线路阻抗为:

$$Z = R + jX = \frac{4L\rho}{hb} \cdot \frac{a}{\Delta_1} \frac{\text{sh}2ka + \sin2ka}{\text{ch}2ka - \cos2ka} + j \left( \frac{4L\rho}{hb} \cdot \frac{a}{\Delta_1} \frac{\text{sh}2ka - \sin2ka}{\text{ch}2ka - \cos2ka} + 7.9 \times 10^{-6} f \frac{dL}{h} \right) (\Omega) \quad (1)$$

式中 L—母线长度(m);  
h—母线高度(m);  
b—母线厚度(m);  
d—母线间距(m);  
 $\rho$ —母线电阻率( $\Omega \cdot \text{m}$ );  
f—电流频率(Hz)。

$$a = \frac{1}{2} b$$

$$\Delta_1 = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega \mu_0 \mu}}, \text{ 为电流透入深度}$$

$$K = \frac{1}{\Delta_1}$$

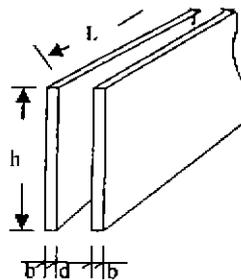


图2 矩形母线结构和位置图

$$\text{一般地可以近似认为 } R \propto \frac{L\rho}{hb} \quad (2)$$

$$X \propto f \frac{dL}{h} \quad (3)$$

由(2)、(3)式表明,为了控制线路压降,也即控制R和X,应尽可能地缩短电炉与电源之

间的距离 $L$ ,缩短母排间距 $d$ ,增加母排宽度 $h$ 。

笔者曾经为二汽改造1台250kW/8000Hz的中频电源,开始为了节约成本采用原中频发电机组沿用的同轴电缆馈电,电炉与电源之间的距离约为10m。由于输出馈线的分布电感太大,不仅线路压降相当严重,约为50V,而且影响到中频电源的正常运行,功率只能限升到160kW左右。后来改用200mm×3mm的矩形铜母排馈电,并且严格控制母排间距。结果在电炉离电源的距离改为30m的恶劣条件下,线路压降反而降至约为20V,而且中频电源运行条件得以改善,电源能顺利升功到250kW,电效率由原来的85%提高到92%,热效率也由原来的60%提高到70%左右,其热、电总效率则由原来的51%提高到64.4%。从而大大提高了该中频感应电炉的电、热效率,而且还改善了中频电源的运行条件,取得了比较满意的效果。

由此可见,采用合理的馈线结构和位置,积极控制线路的分布电感和线路压降,对于像250kW/8000Hz这样频率比较高的中频感应电炉,在提高其系统效率以及改善电源本身运行性能等方面均起到了积极甚至关键的作用。

#### 4 控制操作与效率

感应电炉的等效电路如图3所示。

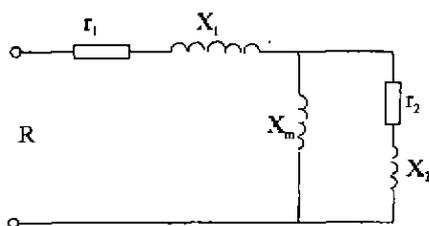


图3 感应电炉的等效电路

金属在感应电炉内的加热过程,是一个其等效电路参数不断发生变化的过程。炉料的多少、炉料的位置和炉料温度等的变化,均会引起电炉等效电路参数的变化,即中频电源其负载电路的等效阻抗 $R$ ,在金属加热过程中随时间在不断地变化。中频电源有其额定功率 $P_N$

和额定负载阻抗 $R_N$ 。其输出功率和系统效率随 $R/R_N$ 的变化趋势,可用图4来表示。当电炉的等效阻抗 $R$ 等于中频电源的额定阻抗 $R_N$ 时,中频电源将输出最大功率,即额定功率 $P_N$ 。这时系统效率将达到最大值 $\eta_{max}$ ;当电炉的等效阻抗 $R < R_N$ 时,中频电源的输出功率 $P < P_N$ ,其系统效率 $\eta < \eta_{max}$ 。从图4可看出,等效阻抗与额定阻抗相差越大,电源的输出功率和系统的效率就越低。为了使系统达到最佳效果,在生产过程中应及时调整中频电源的逆变超前角 $\beta$ ,使电炉的等效阻抗尽可能地接近电源的额定阻抗,以不断提高电源的输出功率,进而提高系统效率。与此同时,应注意加料方法,应先加整料后加碎料,以期电炉长时间运行于较为理想的等效阻抗下。这样,熔炼时间能缩短,系统效率将得以提高,吨耗也将会明显下降。

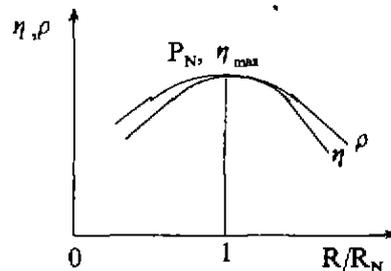


图4  $P, \eta$  随  $R/R_N$  的变化趋势图

温州某铸钢厂有1台250kg的熔炼炉,开始由于工人操作没经验,中频电源的逆变超前角 $\beta$ 从不调整,随意加料,一般每炉的熔化时间约2h,吨耗达900kWh左右。后经指点,注意改进加料方法,并及时调整逆变超前角 $\beta$ ,使电源长时间运行在额定点附近。结果,每炉熔化时间降为1.5h,吨耗也降至800kWh以下,足见其控制操作的必要性。

综上所述,系统的功率匹配,合理的馈电方式和正确及时的控制操作,对于提高中频感应电炉的系统效率具有十分明显的效果和相当重要的意义。

编辑/孟叔林