《工业加热》1997年第1期

感应电热设备的设计(1)

汤景明 机械部西安电炉研究所（西安 710061）

Design of Induction Heating Equipment

Tang Jingming

1 概 论

1.1 感应电热设备发展概况

感应电热设备又通称感应电炉，主要包括感应熔炼设备和感应加热设备两大类。

人们早在19世纪初就发现了电磁感应现象，知道处于交变磁场中的导体内会产生感应电流而引起导体发热。但是，长期以来人们视这种发热为损耗，并为保护电气设备和提高电效率而千方百计地减少此种发热。直到19世纪末期人们才开始开发和利用这种热源进行有目的的加热——熔炼、热处理、压力加工前的透热和其他加热，随之出现了各种形式的感应电热设备。

1890年瑞典人发明了第1台感应熔炼炉——开槽式有心炉。此种炉子，由于受电动力作用液面波动太大，容量受到限制，阻抗变化也大，功率不稳定，所以现在基本上淘汰了。1916年美国人制造出了闭槽式有心炉，用于有色金属的熔炼，打下了今天有心炉结构的基础。1921年无心炉在美国出现，采用火花式中频电源，后出现了中频机组电源以至现在的晶闸管变频电源。工频无心炉的产生已是20世纪30年代了。高频电源，倍频电源等也由于不同工艺要求而相继出现。感应加热装置最早是用于表面热处理，以后普及到焊接领域和各种透热。现在，感应电热技术已广泛应用到国民经济的各个领域，如表1。

感应电炉由于具有一系列的优点，如功率密度高，可大大地提高生产率和得到良好的效率，功率易于控制，氧化烧损少，良好的温度控制和易于实现自动化操作，熔炼炉熔液实现搅拌，熔质均匀、合金化好，加热炉温度易于调控，更好地满足工艺要求以及劳动环境好等，所以近年来得到了迅速的发展。图1示出了日本60～80年代安装功率和销售额的增长情况。

表1 感应电热设备的应用领域

应用部门	主 要 用 途
冶 金	黑色、有色金属的熔炼和保（升）温；金属材料的热处理；冷坩埚熔炼、区域熔炼、悬浮熔炼等制取超纯材料；锻造、挤压、轧制等型材生产时的透热；焊管生产中的缝焊等。
机械制造	黑色和有色金属零件的铸造和精密铸造金属的熔炼；机器零件的淬火，特别是表面淬火以及淬火后的回火、退火和正火等热处理加热；化学热处理的感应加热；压力加工（锻、挤、轧等）前的透热，特别是模锻、精锻等；钎焊；对焊；硬质合金的熔焊；金属涂层及其他场合的加热烘干；热装配等。
轻 工	罐头封口加热、合成纤维生产中间接加热等。
石油、化工	化学反应釜等容器加热，输油管路焊接缝现场退火，输油管路的保温等。
电 子	电子管生产中的真空除气时的加热等。

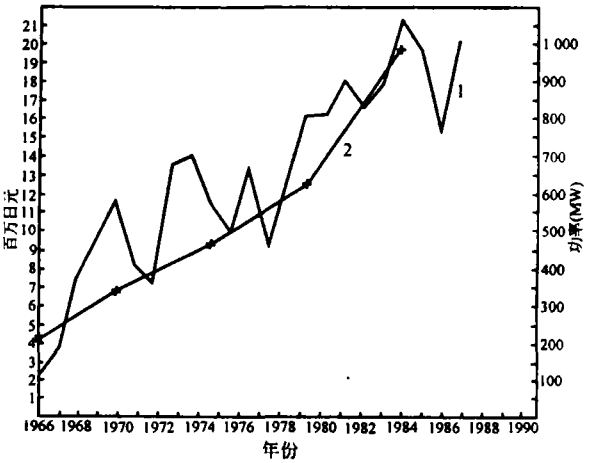


图1 日本感应电炉的增长

1. 销售额变化情况 2. 安装功率增长情况

从当前技术发展看，有如下几种趋向：

（收稿：1996-11-25）

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(1) 感应电炉正向“三高”方向发展，即开发高炉容，高功率、高电压的炉子。这既是为满足生产所需，更是为节约能源。，现在国内外感应电炉最大炉容和功率情况如表 2。

表 2 国内外感应电炉的最大炉容和功率

炉 种	功率 (kW)		炉容 (t)	
	国内	国外	国内	国外
工频无心炉	4 800	30 000	20	100
有 心 炉	1 300	15 000	45	1 500
中频熔炼炉	1 500	9 300	3	12.5
感应透热炉	2 400	210 000		
中频电源(单机)	1 500	3 600		

(2) 炉体结构的改进 随着人们认识的提高和相关技术的进步，结合现代工艺对炉子的新要求，炉体结构也做了许多改进。就无心炉而言，首先是提高了坩埚的 H/D 值，对大型炉，由 1.2 提高到 1.4 左右，小型炉也略有提高，减少了漏磁，改善了炉子电气参数，其次是为了筑拆炉衬方便，改进了磁轭和线圈结构以及紧固方式，炉衬也做了相应的改进。实现了坩埚的整体拆出和机械筑炉的可能等。有心炉主要是成功地实现了感应体热炉更换技术和熔沟（采用不等截面和喷流型）中金属液的单向流动，降低了熔沟和熔池中金属的温差，提高了熔沟寿命，使单台感应体交流功率由 300 kW 提高到 3 000 kW 左右。

(3) 电源、电控的改进 近年来感应加热电源在不断地扩展和更新。如开发了超高频电源并将其用于微型零件和一些靠基体速冷的局部和表面淬火；发展超音频电源用于中轴类和中模数齿轮等的表面淬火；大容量晶闸管中频电源和晶体管式高频电源的研制等。采用晶闸管对工频炉供电和进行调功的技术也正在开发中。为了改进工艺，提高加热效率和生产率，正在研究和开发多种热源的炉子，如等离子感应熔炼炉，双频感应加热设备，燃料炉—感应加热炉炉组，冲天炉—感应炉双联作业等。由于微处理机 PLC 的发展，也使电炉控制从常规的继电式解脱出来，可以实现操作、监控、测量、工艺调整等全面的微机化，既方便操作，也保证了良好的工况。

(4) 操作制度的改进 无心炉习惯上多为一套电源，两台炉体，其中一台工作，另一台备用。由于炉衬寿命的提高和其打结、拆卸的方便，现已提倡一套电源配一台炉子的工作制。最近还实行一套电源二台炉子同时工作，即一台熔炼，另一台保温和浇注。电源功率为熔炼功率和保温功率之和，并可双向分配，即供甲炉熔炼乙炉保温或反之均可，炉子也是可以熔炼、保温两用。有心炉则多配以备用感应体，可不停炉在热态下更换感应体，以实现工作的连续性。

1.2 感应电热设备的分类、用途和选型

(1) 感应电热设备的分类和用途见表 3。

(2) 炉子主要参数估算

估算的目的在于根据工艺和生产率的要求，通过简单而可靠的计算，提供必要的数据，作为炉子选型和可行性分析的参考。

①炉子功率估算 炉料加热和熔化所需的平均功率为：

$$P=\frac{(c_1\theta_1+\theta_r+c_2\theta_2)M}{t\eta}\ \text{kW} \qquad (1)$$

式中：M 为炉料质量，kg；t 为加热时间，s；$t=t_1+t_2+t_3$，而 t_1、t_2、t_3 分别为固态升温、熔化和液态升温时间；c_1 和 c_2 为固态和液态的平均比热容，kJ/(kg·℃)；θ_1 和 θ_2 为固态和液态的温升，℃（其中 $\theta_1=T_r-T_c$，$\theta_2=T_z-T_r$，T_c、T_r、T_z 分别是金属的初温、熔点和浇注温度）；θ_r 为金属的熔解热，kJ/kg；η 为炉子的平均加热效率，$\eta=\eta_d\cdot\eta_r$，η_d 是电效率，η_r 是热效率。各种感应电炉的平均加热效率可参照表4选取。

②电源频率选择 当前我国可供电热设备选用的频率有 50、150～300、400～500、1 000、2 500、4 000、8 000、20 000～70 000、200 000～300 000 Hz 或更高的频率。各种感应电热设备的合理频率范围选取如下。

有心熔炼炉 50 Hz

无心熔炼炉 $$f\geqslant\frac{25\times10^6\rho_2}{D_2^2} \qquad (2)$$

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表3 感应电热设备的分类和用途

类别	炉种		主要用途
感应熔炼（保温）设备类	高频熔炼炉		主要用于熔炼贵重金属和特种合金，也用于小容量的钢、铸铁和有色金属的生产等。
	中频熔炼炉		主要用于钢和铸铁的熔炼，也可用于有色金属熔炼；在相同炉容下，降低功率可作金属液保温炉等。
	工频无心炉	耐材坩埚	用途同于中频熔炼炉，但炉容大；由于炉衬寿命等原因，目前用于大型炼钢炉尚有困难。
		导电坩埚（铁、石墨等）	主要用于非导磁、低电阻、低熔点金属的熔炼和保温，石墨坩埚可用于铜及其合金、铁坩埚多用于铝、镁等。
		短线圈炉	用于各种金属液保温，主要是铸铁保温；必要时可进行少量的熔化和合金化处理等。
	有心熔炼炉		主要用于有色金属（铜、铝、锌等）的熔炼和保温以及铸铁的保温，随着耐火材料的改进，也可用于铸铁和钢的熔化。
	真空熔炼炉		用于耐热合金、磁性材料、电工合金、高强钢等的熔炼和核燃料的制取等。
	区熔、悬浮熔炼炉、冷坩埚炉等		金属或半导体材料等超纯材料的制取。
感应加热设备类	感应透热炉		钢、铝、铜和其他金属材料压力加工（锻、挤、轧等）前的加热； 钢、铸铁等金属材料和一些机器零件整体热处理的加热。
	感应热处理装置		机器零件和一些金属材料的各种热处理加热，主要是表面淬火加热，包括感应加热化学热处理。
	感应烧结炉及其他		粉末冶金零件的烧结和加压成型；其他如涂层烘干、化学反应釜加热、输油管加温，零件热装配等等。
感应焊接	熔焊		焊管生产的直缝焊和螺旋缝焊，各种材料对接焊，散热管散热片的焊接等
	钎焊		各种工具，如刀头的钎焊、自行车车身管材之间的钎焊等。

表4 各种感应电炉的效率 η

金属名称	无心熔炼炉	有心熔炼炉	感应透热炉	表面和局部加热
钢、铸铁	0.65~0.75	0.75~0.95	0.60~0.70	0.50~0.70
铜	0.40~0.50	0.70~0.90	0.30~0.40	
黄铜	0.55~0.65	0.70~0.90	0.40~0.50	
铝	0.45~0.55	0.70~0.90	0.35~0.45	
铝合金	0.50~0.60	0.70~0.90	0.45~0.55	

如为黑色金属可参照以下数据：

炉容 V>750 kg f=50 ~ 1 000 Hz,

炉容 V=150 ~ 750 kg f=150 ~ 2 500 Hz,

炉容 V<150 kg f≥ 400 Hz,

实心圆柱料透热

$$\frac{3\times10^6\rho_2}{\mu D_2^2}<f<\frac{6\times10^6\rho_2}{\mu D_2^2}\quad \text{Hz} \tag{3}$$

空心圆柱料透热

$$\frac{4\times10^5\rho_2}{D_p\cdot d_2\cdot k_2}<f<\frac{10\times10^5\rho_2}{D_p\cdot d_2\cdot k_2}\quad \text{Hz} \tag{4}$$

矩形截面炉料透热

$$\frac{10^6\rho_2}{\mu b_2^2}<f<\frac{6\times10^6\rho_2}{\mu b_2^2}\quad \text{Hz} \tag{5}$$

表面淬火加热

$$\frac{0.015}{x_k^2}<f<\frac{0.25}{x_k^2}\quad \text{Hz} \tag{6}$$

以上公式中：D_2为炉料外径，m；D_p为空心炉料的平均直径，m；d_2为空心圆柱料的壁厚，m；b_2为矩形截面炉料的厚度，m；x_k为淬火层深度，指马氏体含量大于50%的部分，m；ρ_2为炉料的电阻率，Ω·m；μ为炉料的相对导磁率；k_2为相当于炉料外径的薄壁线圈的电感系

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

数，$k_2=f(\frac{D_2}{a_2})$，a_2为炉料长度，m；k_2见图2；

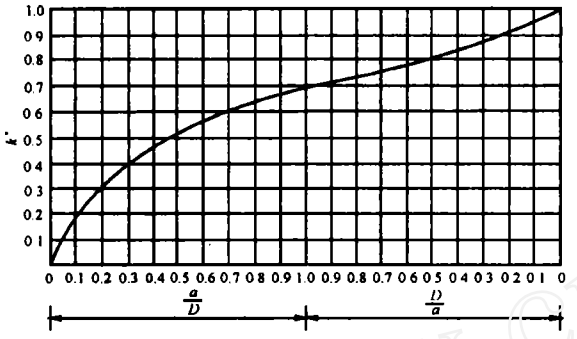


图2 电感系数 k

* k值适用于所有圆柱体的电感系数。a，D与k相对应。

③ 补偿电容器的容量 感应电炉为大电感设备，自然功率因数很低。高、中频炉的功率因数往往低于0.1，但变频电源本身都带有足量的电容，不需另行计算其电容值和另计价格，而工频炉要单独核算其成本，且往往所占比重较大。工频电炉的功率因数值可参考表5。

表5 工频感应电炉的自然功率因数

炉 种	钢、铸铁	铜	黄 铜	铝
有心熔炼炉	0.60~0.70	0.27~0.40	0.30~0.45	0.20~0.40
无心炉和透热炉	0.18~0.40	0.12~0.18	0.15~0.25	0.15~0.20

电容量按下式计算：

$$P_c=P_g tg\varphi(\frac{U_H}{U_g})^2 \quad \text{kvar} \qquad (7)$$

式中：P_g为感应器有功功率，kW；$tg\varphi$为相位角的正切，可由感应器自然功率因数求得；U_H为电容器的额定电压，V；U_g为感应器的工作电压，V。

④相平衡装置的容量 单相工频炉功率较大，影响网路的相平衡，应采用相平衡装置，即在另两相分别接以平衡电容器和平衡电抗器。平衡电容器和平衡电抗器的容量应为：

$$Q_c=Q_L=\frac{P_g}{\sqrt{3}} \quad \text{kvar} \qquad (8)$$

根据以上估算，可预选出电源、补偿电容量和平衡装置等，再考虑炉子本体以及传动和控制等要求，结合用户现场条件，即可确定炉子的初步方案，做出投资概算。

— 待 续 —

WZ972276 中国钢铁生产用耐火材料的开发——《耐火物》 1996, Vol48, No.5, 259~266 (日)

由于丰富的自然资源，近年来中国钢铁生产用耐火材料的开发取得了长足的进步，大大促进了钢铁产业的发展。扼要介绍了中国高炉用SiC耐材、AL_2O_3耐材，高炉出铁槽用AL_2O_3-SiC-C系浇灌料、热风炉用低蠕变性高铝砖、BOF用MgO-C砖、BOF-CB用MgO-C风口砖以及UHP-EAF用碱性耐火材料与高铝质耐材、二次精炼用氧化镁-白云石-碳砖、连铸钢包用AL_2O_3-MgO-C砖、高铝-尖晶石-碳砖和滑动水口板用AL_2O_3-C质耐材、AL_2O_3-ZrO_2-C质耐材等耐火材料的研究开发，并对中国耐火材料的未来发展作了展望。图3幅，表9个，参考文献18种。

[陈留根摘]

WZ972277 不定形耐火材料钢包的均匀干燥加热装置——《工業加熱》 1996, Vol33, No.4, 13~18 (日)

近年来，钢包内衬耐材日趋浇灌料化，这种不定形耐材内衬自然干燥后仍含有6%~7%的水分，为提高其强度必须对其实施强制性干燥处理。概述了传统钢包干燥加热装置的性能与存在问题。着重介绍了新开发的钢包干燥加热装置的性能、烧嘴特性、结构与空气流量控制和燃料流量控制。图9幅，表1个。

[陈留根摘]

WZ972278 电炉炼钢的炉料预热技术现状与动向——《工業加熱》 1996, Vol33, No.4, 19~28 (日)

概述了炉料预热技术的发展与分类。着重对料罐预热式、双炉壳式、竖炉式、MSP+直流电弧炉式、连续加料式以及IHI竖炉连续加料式等各种炉料预热方式的特点、设备结构与预热效果作了介绍。图14幅，表1个，参考文献9种。 [陈留根摘]

WZ972279 150 kVA直流等离子电弧铬铁还原炉的运行经验——《Electric Furnace Conference Proceedings》, 1994, v 52, 327~334 (英)

在14 kVA等离子感应炉对铬铁精矿还原试验后，加拿大多伦多大学的学者们又在一台150 kVA等离子电弧炉中进行深入试验。介绍两台炉子的基本结构及主要参数，给出了炉衬的组成和材料成分。还原后渣中氧化铬的浓度能降到0.5%以下。图6幅，表2个，参考文献12篇。 [朱国强摘]

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net