

高等学校教学用书

特种熔炼

GAODENG

XUEXIAO

JIAOXUE

ONGSHU



冶金工业出版社

高等学校教学用书

特种熔炼

武汉冶金科技大学 丁永昌 徐肇君 编著

冶金工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

特种冶炼/丁永昌,徐增启编著. -北京:冶金工业出版社,
1995
高等学校教学用书
ISBN 7-5024-1694-3

I. 特… II. ①丁… ②徐… III. 钢-冶炼,特种-高等学校-教学参考资料 N. TF7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 06275 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

三河市永和印刷厂印刷;冶金工业出版社出版;各地新华书店发行

1995 年 11 月第 1 版,1995 年 11 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32;7.5 印张;197 千字;232 页;1-2000 册

7.30 元

前 言

本书是根据冶金、有色冶金系统高等院校“八五”教材出版规划和全国 14 所高校钢铁冶金专业第四次教学研讨会商定的“特种熔炼”课程教学大纲编写的。它作为高等院校钢铁冶金专业的教学用书,还可供金属材料及热处理、铸造等专业师生以及有关工程技术人员参考。

特种熔炼是相对于生产批量大的转炉、电炉、平炉等常规熔炼而言的。这类熔炼方法的生产率较低,运行费用较高,对原材料要求很高,适用于生产批量小、质量要求高的钢和合金的熔炼。常用的特种熔炼方法有感应炉熔炼、电渣熔炼、等离子弧熔炼、真空电弧炉熔炼和电子束熔炼等。本书共分五章,分别讨论上述熔炼方法的工作原理、设备结构特点、适用范围、熔炼工艺和冶金质量。

本书是在丁永昌编著《钢与合金的特种熔炼》的基础上扩充改编而成。本课程所涉及的冶金反应的基本理论,在有关先行课程中已有详细论述,在本书中为避免重复,只分析讨论这类冶金反应在特种熔炼的具体条件下所具备的特点。为便于理解这类特种熔炼方法的工艺特点和所提供的熔炼条件,还简要地介绍各种熔炼方法的主要设备和这些设备的结构特点。本书的前三章占据了绝大部分的篇幅,这是因为感应炉熔炼和电渣熔炼是当前特种熔炼的主要方法,在该领域的大多数产品是由这两种熔炼方法生产的,由于等离子弧熔炼的优越性,使它成为很有前途的熔炼方法。我国在电渣重熔领域处于国际先进水平,特别是大吨位的电渣重熔,本书在这方面作了专门的介绍。

本书由武汉冶金科技大学丁永昌教授、徐曾启教授编著。

1994 年 5 月在武汉钢铁学院召开了本书的审稿会。参加审稿的有北京科技大学马廷温教授、东北大学武振廷教授和全国冶金工艺理论学术委员会主任李大经教授。他们审阅了全书,并提出了许多宝贵的修改意见,编者对参加讨论、审查的同志们表示衷心的感谢。

感谢。在本书的编写过程中,作者参考了国内外公开出版的有关文献,谨在此对诸位作者致以深切的谢意。

限于编者水平,书中缺点在所难免,欢迎读者批评指正。

编著者

1994年8月

目 录

1 感应炉熔炼	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 感应炉的工作原理	(4)
1.3 感应炉熔炼用原材料	(17)
1.4 感应炉熔炼工艺	(34)
1.5 感应炉熔炼用坩埚	(55)
1.6 真空感应炉熔炼	(65)
1.7 新技术在感应炉熔炼中的应用	(82)
2 电渣重熔	(90)
2.1 概述	(90)
2.2 电渣重熔的设备和基本原理	(98)
2.3 电渣重熔的原材料	(109)
2.4 电渣重熔过程的冶金特点	(115)
2.5 电渣重熔的质量	(140)
2.6 电渣重熔的应用范围	(150)
2.7 电渣重熔的发展动向	(155)
3 等离子熔炼	(163)
3.1 等离子熔炼及其特点	(163)
3.2 等离子枪的电极材料和等离子工作气体	(177)
3.3 等离子熔炼 的类型	(181)
4 真空电弧炉熔炼	(200)
4.1 概述	(200)
4.2 真空自耗电弧炉的结构简介及分类	(201)
4.3 钢和合金的重熔工艺	(205)
4.4 真空电弧重熔常见的冶金质量问题	(210)
4.5 真空电弧重熔的特点	(212)
4.6 真空电弧凝壳熔炼	(213)
5 电子束重熔	(215)

5.1 概述.....	(215)
5.2 电子束重熔的基本原理.....	(217)
5.3 电子束重熔炉的主要设备.....	(218)
5.4 电子束重熔工艺及其冶金特点.....	(224)
5.5 电子束重熔的效果.....	(227)
参考文献	(230)

第1章 感应炉熔炼

1.1 概述

感应炉熔炼是电炉熔炼领域的一种重要方法。近年来电弧炉熔炼技术不断进步,特别是炉外精炼技术的发展,使电弧炉熔炼的品种范围扩大,产品质量提高,但是它还没有也不可能完全替代其他电炉熔炼方法。基于感应炉熔炼的特点,对于某些质量要求很高,批量小的钢种和合金,仍然是用感应炉来熔炼。

感应加热的原理早就被人们所认识,在此基础上本世纪初就出现了第一座熔化金属的感应炉。感应炉可分为有芯(铁芯)感应炉和无芯感应炉两大类。早期出现的感应炉都是有铁芯的感应炉,初级线圈绕在铁芯上,外套一用耐火材料制成的环形槽,槽内盛放被熔炼的金属。这种耐火材料制成的环形槽寿命很低,不实用,逐渐改进为现代形式的有芯感应炉——熔沟炉,其结构的形式见图1-1。这种结构形式的感应炉,其致命的缺点是存在一个由被熔炼金属形成的单环作为次级绕组的闭合回路。这样,新炉的开炉,冷料的使用,产品品种的更换,单环处耐火材料的寿命等等,都成为难以解决的技术问题。所以最初的有芯感应炉只用于熔化品种单一的有色金属,例如熔炼黄铜。熔炼終了出炉时不能出完,留一部分在炉内,以保证下一炉装料后能顺利启动。随着耐火材料质量的改进,该炉种扩大用于铸铁的熔化。单炉的功率水平已达2000kW。无芯感应炉类似于一台空气芯的变压器,感应圈为初级绕组,感应圈内放置坩埚,以盛放固态或液态的被熔炼金属,该金属材料成为单匝闭合的次级绕组。无芯感应炉的容量,在过去数十年有了很大的增长。从过去的几百千克发展到现在高达60t的大型炉,供电电源由几千伏安增加到20MVA。

按照电源的工作频率,可将感应炉分为工频、中频、高频三类。

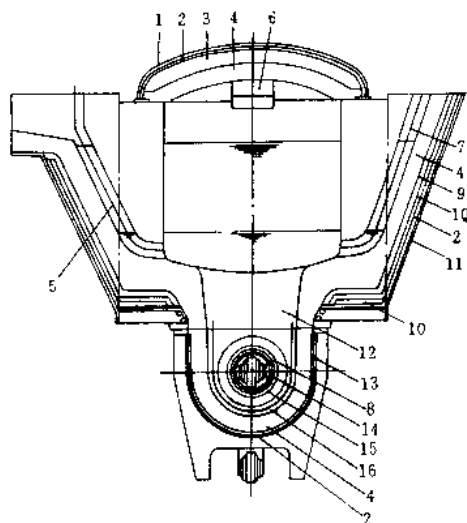


图 1-1 熔沟炉

- 1—炉盖；2—绝热材料；3—绝热耐火材料；4—耐火材料；5—出铁口；
6—炉渣门；7—外浇口；8—线圈槽；9—耐火砖；10—耐火绝热砖；11—炉身；
12—炉喉部；13—感应器壳；14—线圈；15—铁芯；16—二次侧沟（浇注侧）

工频感应炉的电源频率为工业频率(50 或 60Hz)，炉子可以是无芯的，也可以是有芯的。工频感应炉现已发展成一种用途比较广泛的熔炼设备。在黑色冶金领域，主要作为熔化炉，熔化灰口铸铁、可锻铸铁、球墨铸铁和合金铸铁。此外，还可作为保温炉使用。与传统的冲天炉相比，它在熔化各类铸铁时，容易控制铁水成分、温度；铸件中夹杂、气体少；不污染环境；节约能源；劳动条件好。所以工频感应炉有取代冲天炉的趋势。我国最大的工频炉容量为 20t，电源功率为 3.1~4.6MVA。我国电炉制造厂已能生产容量从 0.5t 到 20t 的工频炉系列产品。

电源频率为 10~300kHz 的感应炉称为高频感应炉。由于高频电源容量的限制，高频感应炉的电效率低，安全性差，高频电磁

波对无线电通讯有干扰,所以高频炉的容量一般不超过 100kg。作为科学研究的试验炉,几克至几千克的容量是比较合适的,高频炉至今还广泛应用于实验室。

普遍应用中频感应炉熔炼钢和合金。中频炉电源的频率范围为 150~10000Hz,其常用的工作频率是 150~2500Hz。中频炉的容量可以从几十千克至几十吨。目前世界上最大的中频炉是 20t,我国最大的是 6t。3t 以下的中频炉,我国电炉制造厂已有系列产品供应。

合金钢,包括高合金钢,主要的熔炼工具是电弧炉。感应炉与电弧炉相比,具有一系列特点,一部分钢和合金,特别是活泼元素含量较高,或对合金成分范围要求较窄的品种,必须在感应炉(有时还必须在真空感应炉)内熔炼。与电弧炉相比感应炉的特点是:

1. 电磁感应加热 由于加热方式不同,感应炉没有电弧加热所必须的石墨电极,从而杜绝了电极增碳的可能。感应炉可以熔炼电弧炉很难熔炼的含碳量极低的钢和合金。感应炉也没有电弧下的局部过热区,所以吸气的可能性减小,为获得气体含量低的产品创造了有利条件。

2. 熔池中存在着一一定强度的搅拌 电磁感应所导致的金属搅拌促进成分与温度均匀,钢中夹杂合并、长大和上浮。熔池的搅拌再结合感应炉熔炼过程中合金元素的烧损少(原因是溶池的比表面积小,容易控制气氛,无电弧及电弧下的高温区),所以预测成分较为准确,有利于成分控制和缩短熔炼时间。由于感应炉熔池内不存在局部过热区,并且存在熔池的搅拌,所以有条件加大输入功率,加快熔炼的速率和便于对熔池温度进行较为精确的控制。

3. 熔池的比表面积小 这对减少金属熔池中易氧化元素的损失和减少吸气是有利的,所以感应炉为熔炼高合金钢和合金,特别是含钛、铝或硼等元素的品种,创造了较为良好的条件。但是比表面积小,必然导致渣钢界面积小,再加上熔渣不能被感应加热,渣温低,流动性差,所以不利于一些渣钢界面冶金反应的进行,特别是脱硫、脱磷、脱氧等。为此,感应炉熔炼对原材料的要求较为严

格。

4. 输入功率调节方便 感应炉熔炼过程中,可通过调节整流回路中晶闸管的导通角较精确地调节输入功率。因此可以较精确地控制熔池温度,也可以方便地在炉内保温,还可以分几次出钢,为一炉熔炼几种不同成分的产品创造条件。

5. 同一电源可向几个不同容量的炉座供电(但是不能同时)所以在冶炼的容量方面,感应炉的灵活性较电弧炉大。

6. 热效率高 感应炉的加热方式以及比表面积小,散热少,故感应炉的热效率较电弧炉高。但是,感应炉的电效率较电弧炉低,所以两种电炉的总效率相差不多。

7. 烟尘少,对环境的污染小 感应炉熔炼时,基本上无火焰,也无燃烧产物。每吨钢每小时产生的烟尘量不超过1kg(电弧炉为4~14kg),感应炉一般不设除尘装置。

8. 耐火材料消耗较电弧炉高 坩埚寿命短,对坩埚耐火材料的要求高,所以每吨钢的耐火材料费用也较电弧炉高。

1.2 感应炉的工作原理

1.2.1 感应炉的电路

各类感应炉,无论是有芯感应炉还是无芯感应炉,也不论工频、中频、还是高频,其基本电路都是由变频电源、电容器、感应线圈和坩埚中的金属炉料所组成(图1-2)。

感应炉的工作频率取决于所熔炼或加热的产品的种类和容量。对于工频感应炉的变频电源,当炉座容量不大(小于1t)时,可以直接由动力电源来代替,即无须专门的电源装置。但是,当炉座容量较大时,若直接接动力电源,则供电线路上的有功损耗增大,电效率明显降低。为保证有足够高的电效率,应在炉座的附近设一专用的降压变压器,单独为工频感应炉供电。对于中频感应炉,其电源频率为150~10000Hz,其中常用的频率有150、1000、2500Hz三种。中频感应炉的变频电源可选用中频发电机或可控硅变频器。对于150Hz的变频电源还可选用三倍频变压器。高频感应炉的电

源频率为 $10\sim 300\text{kHz}$ ，所用变频电源为高频电子管振荡器。由于高频电源的功率较小，高频感应炉的效率较低，所以其容量一般不超过 100kg 。主要用于试验室中研究性的熔炼。

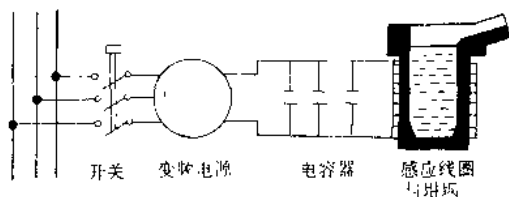


图 1-2 感应电炉的基本电路

图 1-2 的电路中，感应器是一感性负载，所以电路的功率因数很低，一般在 $0.15\sim 0.25$ 范围内。为了提高电路的功率因数，配有一定容量的补偿电容器，补偿电容器组与感应器并联。在感应炉运行过程中，随着炉料温度和物理状态的变化，电路的功率因数也将随之变化，为此要求并联的补偿电容器的电容量可以调节。

对于工频感应炉和中频发电机供电的中频感应炉，在电路中还设置三相功率平衡器，以保持电网的三相平衡。三相功率平衡器由平衡电抗器和平衡电容器组组成，其连接如图 1-3。在熔炼过程中，电路的电参数会发生变化，为保持三相的平衡，应随时调节平衡电抗器和平衡电容器的容量。

感应炉的感应器一般都是用铜管围成线圈状。铜管的截面形状有圆形、椭圆形、矩形、正方形或不对称的偏心管等形状。其壁厚取决于感应炉的工作频率和加于感应器的工作电压的高低。对于工频炉，由于工频电流的渗透深度大，加上电流的集肤效应，因此要求做感应器的铜管在炉料侧的壁厚应足够大，所以工频炉感应器的铜管壁厚要大于同电源容量的中频炉。对于较大容量的工频炉可采用不对称的偏心铜管做感应器。工频感应器的匝数多，匝间

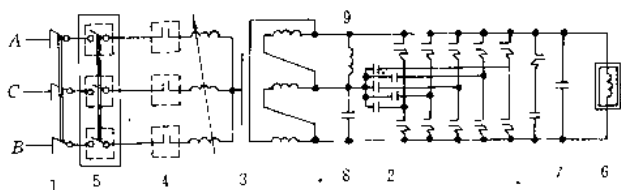


图 1-3 工频感应炉主回路示意图

1—隔离开关;2—可调平衡电容器;3—电源变压器;4—高压真空接触器;

5—真空断路器;6—感应炉本体;7—补偿电容器;8—平衡电容器;9—平衡电抗器

距离小,匝间应用绝缘树脂或其他绝缘材料填实,形成一整体以增加其强度。感应器的内径取决于炉容量,高度取决于金属料熔化后液柱的高度。对于工频炉,为抑制熔池的搅拌,感应器的高度低于液柱高度1至2匝。对于中频炉,则要求比液柱高出1至2匝。

金属炉料也是电路的一个重要组成部分。炉料的电和磁的性能将决定感应炉电路中负载的阻抗,所以金属炉料的品种,装入炉内时的尺寸大小,密实的程度,以及运行过程中的温度和物理状态的变化,都将明显地影响着诸如有功功率、功率因数和电效率等电参数。

1.2.2 感应炉的工作原理

感应加热的原理是依据下述两则电学的基本定律:一是法拉第电磁感应定律,该定律描述导体与磁场中的磁力线发生相对运动时,在导体的两端所感应的电势(E)与磁感应强度(B),相对速度(v)之间的定量关系

$$E = B \cdot L \cdot v \cdot \sin \angle (v \cdot B) \quad (1-1)$$

式中: L ——在磁场中导线的长度;

$(v \cdot B)$ ——磁感应强度的方向与速度方向之间的夹角。

当导线形成一闭合回路时,则在导线中产生感应电流(I),设闭合回路的电阻为 Σr ,由欧姆定律

$$I = E / \Sigma r \quad (1-2)$$

另一条基本定律是焦耳——楞茨定律。该定律描述电流的热效应。当电流在导体内流过时，定向流动的电子要克服各种阻力，这种阻力用导体的电阻来描述，电流克服电阻所消耗的能量，将以热能的形式放出，这就是电流的热效应。焦耳——楞茨定律可写成式(1-3)的形式：

$$Q = 0.24 I^2 \cdot R \cdot t \quad (1-3)$$

式中： Q ——焦耳——楞茨热，cal；

R ——导体的电阻， Ω ；

t ——导体通电的时间，s。

当一座无芯感应炉的感应线圈中通有频率为 f 的交变电流时，则在感应圈所包围的空间和四周产生一个交变磁场。该交变磁场的极性、磁感应强度和交变的频率，随产生该交变磁场的交变电流而变化。若感应线圈内砌有坩埚并装满金属炉料，则交变磁场的一部分磁力线将穿过金属炉料，磁力线的交变就相当于金属炉料与磁力线之间产生的切割磁力线的相对运动。因此，在金属炉料中产生感应电动势(E)，其大小可用下式确定：

$$E = 4.44 \Phi \cdot f \cdot n \quad V \quad (1-4)$$

式中： Φ ——交变磁场的磁通量，Wb；

f ——交变电流的频率，Hz；

n ——炉料所形成回路的匝数，通常 $n=1$ 。

由于金属炉料本身形成一闭合回路，所以在金属炉料中产生的感应电流(I)为

$$I = \frac{4.44 \cdot \Phi \cdot f}{R} \quad A \quad (1-5)$$

式中： R ——金属炉料的有效电阻， Ω 。

按照焦耳——楞茨定律，该电流在炉料中放出热量，使炉料被加热。因此，炉料的加热速率，能否被加热到熔化温度或冶炼温度，将取决于感应电流、炉料的有效电阻以及通电时间。而感应电流又取决于感应电动势的大小，即穿过炉料的磁通量的大小和交变电流的频率。

1.2.3 中频电源

中频感应炉的电源有三种：中频发电机组、可控硅变频器、三倍频变压器。

中频发电机组是应用最早的中频电源。由于不断改进结构，提高单机容量，至今仍为中、小型中频感应炉的主要电源之一。中频发电机组由电动机和中频发电机两部分组成。一般选用鼠笼式异步电动机，由它带动中频发电机而构成中频电源。由中频炉的容量决定中频电源的功率，同时也决定电动机的功率。对于大容量的炉座，电动机选用高压电机，电动机的工作电压为 6kV 或 10kV。对于小容量的中频炉，电动机的工作电压为 380V。中频发电机的定子中设有励磁绕组和中频绕组，转子制成齿轮状，当转子由电动机带动以一定的速度旋转时，由于磁阻的周期性变化使励磁绕组产生的磁场也发生周期性变化，从而在中频绕组中感应出与磁场变化周期相同的感应电势。中频发电机所发电的频率取决于励磁绕组的极对数、转子的结构以及转子的转速。中频发电机组的输出频率不随负载而变化。这种电源过载能力强，运行可靠，安装维修方便。但是，与静止的可控硅变频器相比，它的噪音大，振动大，用料多，体积笨重以及电效率低（一般为 80~85%）。国产的中频发电机组的频率有 1000、2500、4000、8000Hz 等四种，功率从 40kW 至 1000kW。

可控硅变频器是七十年代发展起来的新型中频电源。随着电子工业的发展，它的容量和质量不断提高，目前已部分替代中频发电机组成为一重要的中频电源。可控硅变频器的工作原理如图 1-4。用于感应炉的可控硅变频器大多是并联式逆变器，它将三相交流电经由六个可控硅管组成的三相桥式全波整流线路整流为直流电。该直流电经电抗器滤

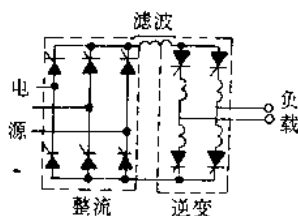


图 1-4 可控硅静止变频器
的工作原理

波后,形成一波形平稳的直流电供给逆变器,逆变器采用单相桥式逆变线路,利用可控硅的轮番导通和关断,使直流电变成频率可调的中频电流。这种中频电源与中频发电机组比较,体积小,重量轻,噪音和振动小,启动停止方便,电效率高(90%以上)。对组成逆变器的电子元件要求高,需要比较高的维修技术。国产的可控硅变频装置有以下几种:频率为400、1000、2500、4000、8000Hz;单机功率为25、50、100、250、500、1000kW。

三倍频变压器是适合大型感应炉的电源。三倍频器是由三个相同的单相铁芯变压器组成,其原边绕组联接成星形,而副边绕组联接成开口三角形(图1-5)。当原边绕组中通有频率为 f 的正弦电流,且铁芯有很大的磁化饱和时,该绕组端极上的电压就含有非常明显的各次奇数谐波。

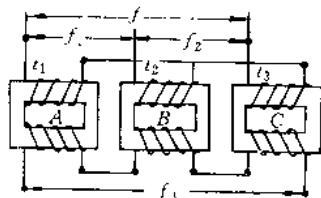


图 1-5 三倍频变压器
的原理示意图

由于原边绕组联接成星形,所以在副边绕组里感应的电动势,除了基波以外,只能有次数为三的整数倍的谐波。按图1-5的联接法,三个副边绕组端极上的电压应等于各副边绕组内感应电动势之和。把这些电动势加起来的时候,其基波因大小相等而彼此相距三分之一周期,所以总和等于零。而三次谐波各相的相位一致,所以副边绕组如图联接的端极电压中,主要是三次谐波,也就是副边绕组端电压的频率是电源频率的三倍。倍频器具有与可控硅变频器相似的优点,如噪音和振动小、电效率高(一般在94%以上)、过载能力大等。同时还具有维护方便、成本低等优点。它的缺点是变压器在饱和状态下运行时功率因数低(一般在0.3左右),材料消耗量大。国产最大的三倍频变压器的功率为900kW,电压1000V。

1.2.4 感应加热的电特性

1. 感应炉电源的频率 感应加热主要是涡流加热,电能靠感应线圈通过电磁感应传递给金属炉料。由焦耳—楞次定律(式1-3)

可知,感应涡流的加热速率取决于感应涡流 I 和金属炉料的有效电阻。而 I 又决定于感应电动势的大小。由式(1-4)可见,为了使炉料中能产生较大的感应电动势,从理论上可采用增加磁通量、频率和炉料圈数的办法来实现。但是,由于感应线圈通电后所产生的磁力线被迫通过空气(指无芯感应炉),而空气有很大的磁阻,所以就使磁通量较小。而炉料的圈数一般来说总等于 1。因此,为了提高感应电动势,常用的办法只有提高频率。

提高了感应电动势 E , 并不一定就能相应提高感应电流。因为感应电流的增大与否,还取决于金属炉料料块的大小、导电性能以及装料的密实程度等。为了保证有足够的加热速率,首先应保证有一定大小的电源频率,所需要的电源最小频率可由下式确定:

$$f_{\min} = \frac{\rho}{d^2} \cdot 10^8 \quad (1-6)$$

式中: $f_{\min}$ — 最小电源频率, Hz;

ρ — 金属炉料的电阻率, $\Omega \cdot \text{cm}$;

d — 炉料料块直径, cm。

熔炼导电性能好的金属,例如铜或铝,可选用较低的频率。此外,当炉座容量大,允许使用块度较大的炉料的条件下,也允许选用较低的频率。当炉料尺寸小时,则要求应用较高的电源频率。对于一般碳钢(取 $\rho = 104 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$),在不同的电源频率下,最佳的料块直径范围列于表 1-1。

有资料对国内广泛应用的 0.5、1、1.5t 三种容量的中频炉所选用的频率进行了比较分析,认为 1t 以上容量的炉座所配中频电源的频率偏高。容量小于 1t 的炉座应配 1000Hz 或更高的频率。资料中还对容量 1t 以上的炉座,当频率为 400Hz 和 1000Hz 时的技术参数、设备结构、制作难度、投资费用等方面进行了比较。由此得出当容量超过 1t 时,经济合理的电源频率应为 400Hz。这结论与国外(瑞典、日本、德国、英国等)同类产品的工作频率的选用是相吻合的。