

熔模精密铸造

(下 册)

《熔模精密铸造》编写组 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是《熔模精密铸造》的下册,共包括四章,即第八章感应炉熔炼;第九章浇注、清理及其它;第十章铸件质量的分析及检验和第十一章真空感应熔炼及铸造。书中对熔模铸造技术中铸钢的熔炼、浇注、清理、铸件常见缺陷及检验方法等问题作了系统和深入的阐述;同时对高温合金铸件的真空感应熔炼及铸造技术也作了详细介绍。

本书可作为高等院校铸造专业师生的技术参考书,也可供铸造专业的科研与生产的技术人员阅读。

熔 模 精 密 铸 造

(下 册)

《熔模精密铸造》编写组 编

责任编辑 唐朝庚

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092 1/16 印张16 000千字

1984年1月第 版 1984年1月第一次印刷 印数: 0.001—4,850册

统一书号: 15034·2573 定价: 1.65元

前 言

本书是《熔模精密铸造》的下册。全书系统地 and 深入地阐述了现代熔模铸造工艺各个方面的问题，反映了七十年代国内外熔模铸造的技术状况，是一本完整的熔模铸造工艺的技术书籍。

本书篇幅较大，分上、下两册出版。上册包括熔模、制壳原材料、水玻璃型壳、硅酸乙酯和硅溶胶型壳、陶瓷型芯、铸件工艺设计、压型设计等七章和附录。下册包括感应炉熔炼、浇注清理及其它、铸件质量分析及检验、真空感应熔炼及铸造等四章。

第八章感应炉熔炼 主要以熔模铸造中常用的各种铸钢为对象，全面讨论了感应炉熔炼过程原理。并对中频熔炼设备及其工作特性、铸钢材料的性质以及熔炼工艺等问题作了较详细介绍。

第九章浇注清理及其它 介绍了离心浇注、低压浇注、真空吸铸、电液压和高压水力清砂等新工艺，以及机械化的现状。对各种合金铸件的热处理工艺也作了介绍。

第十章铸件质量分析及检验 对熔模铸件常见缺陷的特征、识别及防止措施进行了分析。并对常见缺陷的无损检测方法作了比较系统和细致的介绍。

第十一章真空感应熔炼及铸造 着重对真空感应炉及国内外铸造高温合金材料作了介绍，并对真空冶金中的除气、脱氧、蒸发和坍塌反应等与合金质量的关系及真空熔炼工艺参数进行了分析。在真空铸造一节，对真空下铸件凝固的特点、缺陷、表面晶粒细化、定向凝固技术及整体铸造等问题作了详细论述。

本册的编写单位和人员是，第八章及第十一章由北京航空学院王义虎编写；第九章由北京工业大学黄继业编写，其中一部分由贵州工学院周培莉编写；第十章中第一节由浙江大学曾昭昭编写，第二节由上海交通大学王怡之编写，第三节由上海交通大学陈美怡编写。全书由王义虎审校。由于编者水平及能力所限，书中一定存在许多缺点和错误，敬请读者批评指正。

最后，谨向给予本书提供意见、参与讨论和共同审议的单位和同志表示衷心感谢！

《熔模精密铸造》编写组

目 录

| | |
|-----------------------|-----|
| 第八章 感应炉熔炼 | |
| 第一节 感应熔炼的设备 | 1 |
| 一、感应熔化的原理 | 2 |
| 二、熔炼的电制度 | 8 |
| 三、各种感应熔炼设备 | 12 |
| 第二节 铸钢材料 | 13 |
| 一、铸件的性能 | 14 |
| 二、铸钢 | 15 |
| 第三节 熔炼过程原理 | 26 |
| 一、钢水的性质 | 21 |
| 二、钢水中的气体和夹杂物 | 26 |
| 三、炉渣的性质 | 30 |
| 四、钢水化学成分的变化 | 35 |
| 五、钢水的脱氧 | 45 |
| 第四节 感应炉熔炼工艺 | 58 |
| 一、坩埚制备 | 58 |
| 二、炉料选配 | 63 |
| 三、熔炼操作 | 69 |
| 四、熔炼实例 | 72 |
| 五、熔炼质量的控制和检验 | 76 |
| 第九章 浇注、清理及其它 | |
| 第一节 浇注工艺 | 80 |
| 一、概述 | 80 |
| 二、合金的浇注工艺 | 82 |
| 三、型壳的温度 | 83 |
| 四、焙烧、浇注流水线 | 85 |
| 五、提高铸件质量的某些工艺方法 | 88 |
| 第二节 铸件的清理 | 94 |
| 一、脱壳 | 95 |
| 二、铸件表面清理 | 97 |
| 三、电液压和高压水力清砂 | 102 |
| 四、切除浇冒口 | 105 |
| 第三节 铸件的修整 | 109 |
| 一、打磨 | 109 |
| 二、矫正 | 110 |
| 三、补焊 | 110 |
| 第四节 铸件的热处理 | 111 |
| 一、钢铸件热处理的基本类型 | 111 |
| 二、常用的热处理规范 | 114 |
| 第五节 铸件的防锈 | 116 |
| 一、防锈液法 | 117 |
| 二、油封法 | 118 |
| 第十章 铸件质量分析及检验 | |
| 第一节 铸件常见缺陷分析 | 119 |
| 一、表面缺陷 | 119 |
| 二、渣孔、砂眼和气孔 | 125 |
| 三、缩孔、缩陷和缩松 | 128 |
| 四、变形、冷裂、热裂和脆断 | 130 |
| 五、氧化和脱碳 | 135 |
| 六、其它缺陷 | 137 |
| 第二节 铸件质量检验方法 | 140 |
| 一、表面质量检验 | 140 |
| 二、内部质量检查 | 151 |
| 三、金相组织检验 | 174 |
| 四、机械性能 | 177 |
| 第三节 铸件精度的探讨 | 180 |
| 一、铸件尺寸精度及影响因素 | 181 |
| 二、铸件的变形 | 184 |
| 三、铸件表面光洁度 | 189 |
| 第十一章 真空感应熔炼及铸造 | |
| 第一节 真空感应熔炼炉 | 191 |
| 一、真空装置系统 | 192 |
| 二、真空感应熔炼炉 | 194 |
| 第二节 铸造高温合金 | 198 |
| 一、高温性能 | 198 |
| 二、铸造镍基合金 | 199 |
| 第三节 真空感应熔炼冶金原理 | 201 |
| 一、除气作用 | 201 |
| 二、脱氧反应 | 203 |
| 三、坩埚反应 | 206 |
| 四、元素蒸发 | 209 |
| 五、总的效果 | 212 |

| | | | |
|--------------------|-----|---------------------|-----|
| 第四节 真空感应熔炼工艺 | 213 | 一、真空下铸件凝固特点 | 231 |
| 一、坩埚制备 | 213 | 二、表面晶粒细化 | 230 |
| 二、备料及装炉 | 215 | 三、定向凝固技术 | 236 |
| 三、熔炼及浇铸 | 217 | 四、整体铸件铸造技术 | 247 |
| 四、重熔浇铸 | 221 | 主要参考资料 | 250 |
| 第五节 真空铸造工艺 | 223 | | |

第八章 感应炉熔炼

在熔模铸造车间，大多数都用感应电炉来熔炼铸钢及合金以浇注铸型（型壳），所采用的熔炼方法是所谓“重熔法”。

重熔法炼钢比较简单，它要求所用的炉料成分比较严格，即接近钢号的规定，熔炼时只要把炉料重新熔化成钢水，进行必要的处理就可以浇铸。所以它也可称为“不氧化法”炼钢。

感应电炉是利用金属炉料中产生的感应电流加热炉料而熔化的一种装置。炉料在坩埚中熔化，并在其中进行必要的熔炼操作。所熔炼的金属主要有各种牌号的铸钢，也有少量的铝合金、铜合金、磁性合金和高温合金。

感应炉是一种先进的熔炼设备。它的操作简便，所熔炼的钢水质量好。因此，不仅在实验研究中，而且在工业生产中均得到了广泛的应用。

第一节 感应熔炼的设备

感应熔炼电炉从炉子结构上看，分为两种。一种是有铁芯感应电炉；另一种是无铁芯感应电炉。在熔模铸造车间只用无铁芯的。以下所述都是指无铁芯感应电炉。

感应电炉的构造很简单。图 8-1 示出它的工作原理。在耐火材料坩埚的外边绕有空心铜管制成的感应器（感应线圈）。当高频率的交流电输入感应线圈时，线圈内便产生交变磁场。因而使坩埚中的金属炉料产生感应电流并转变为热。利用这些热量使炉料加热并熔化。由于感应热产生于金属炉料本身而直接加热炉料，故热损失较少，所以感应熔炼炉的热效率高，生产率也高。

目前，在熔模铸造车间所用的感应熔炉的供电设备，其频率范围有三类。比较高的是 200~300 千赫，称为高频，用电子管式高频发生器供电。中等的是 500~10000 赫，称为中频，用发电机式变频机组或可控硅静止变频器作电源。低的是 50 赫，属低频，因为这是工业上所用的交流电频率，所以也叫做工频，不需要特殊的变频设备。

熔模铸造车间用得最多的是发电机式变频机组供电的中频感应炉。这种设备的型号为 DGF-R-52、DGF-R-102 和 DGF-R-252 等。其中汉语拼音字母的意义是“电感发-熔”；相应数字如 102 代表功率 100 千瓦和频率 2500 赫。表 8-1 中给出了这几种设备的主要技术数据。

这种设备主要包括变频机组、起动器、控制装置、电容器组及炉体等部分。

电源变频机组是感应熔炼设备的核心部分。由它将工频电流转变为高频率的电流。它的基本原理就是用普通工频的三相交流感应电动机作原动机，带动一种单相高频率发电机，

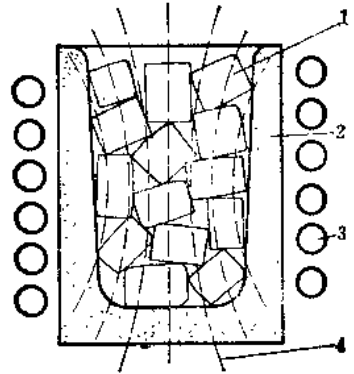


图 8-1 感应炉加热原理图

1—金属炉料；2—耐火坩埚；3—感应线圈；4—磁力线。

表8-1 发电机式中频设备的主要技术数据

| 指 标 | 单 位 | 型 号 | | |
|-------|------|----------|-----------|-----------|
| | | DGF R 52 | DGF-R-102 | DGF-R-252 |
| 电动机功率 | 千瓦 | 65 | 130 | 290 |
| 输出功率 | 千瓦 | 50 | 100 | 250 |
| 输出频率 | 赫 | 2500 | 2500 | 2500 |
| 输出电压 | 伏 | 750/375 | 750/375 | 1500/750 |
| 输出电流 | 安 | 74/148 | 148/296 | 185/370 |
| 电容器容量 | 千乏 | 1000 | 1500 | 6500 |
| 熔钢重量 | 公斤 | 60 | 150 | 430 |
| 熔炼时间 | 分钟 | 60 | 75 | 75 |
| 电能消耗 | 度/吨 | 1000 | 950 | 940 |
| 冷却水量 | 升/小时 | 1000 | 1000 | 5000 |

以输出某种频率的电流。

目前,这种变频机组多制成立式单机形式。电动机在上,发电机在下,或是电动机在内,发电机在外。两机装在同一机壳内,位于同一垂直轴上。整机需要用循环水冷却。发电机的输出工作绕组分成两组,输出频率多为2500赫,安装时可将两组串联或并联,以得到高压或低压的额定输出(如750或375伏)。改变供给发电机励磁电流的大小,就能调节输出电压的高低。

下面以中频熔炼设备为重点,介绍感应加热和熔化的原理及特点,设备操纵和熔炼的电制度等问题。

一、感应熔化的原理

当高频电流输入感应圈时,将产生同样频率的交变磁场。这样,在圈内的金属料中,将会因穿过交变磁通而产生感应电动势。在整块的金属料中,这种感应电动势就能形成感应电流。它是自成闭合回路的环流,而且成为旋涡状,即所谓涡流,如图8-2所示。

如果使用的炉料是铁磁物质(如钢铁等),则因它的导磁系数大,会使磁感应强度增大,加强涡流强度。另外,铁磁物质在交变磁场中被交变磁化,由于磁滞作用而产生磁滞损耗。

在炉料中由于涡流和磁滞作用的结果,产生的热量使炉料的温度升高。当增加输入感应圈的高频电流的功率,则涡流和磁滞产生的热量也增多。最后达到金属料熔化的温度。

1. 金属料中感应涡流的分布

在金属料中涡流的作用比磁滞要大,它所产生的热量占主要部分。

假设金属料是一个整块的圆柱体,它垂直放在感应圈中,那么感应圈工作时,炉料中感应生成的涡流是在水平面内流动。但是在炉料的水平截

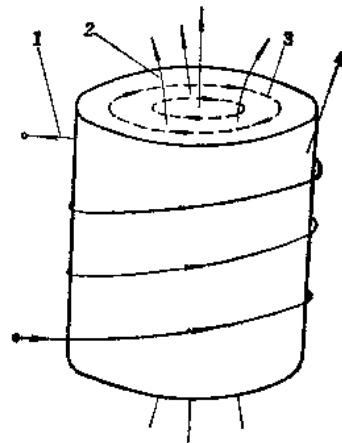


图8-2 金属料中的涡流

1—电流; 2—磁力线; 3—涡流;
4—金属料。

面上, 涡流并不是平均的。如图8-3所示, 因交变磁场的作用, 炉料截面上, 按说各处都应该有小的涡流形成 (a图); 但是由于相邻处方面相反的涡流有相互抵消作用, 所以在整个截面上就形成了大的涡流 (b图)。这样, 感生的涡流实际上就趋向炉料的表面集聚流动, 而渐向中心, 则涡流减弱。这就是所谓的“趋肤效应”或称“表面效应”。

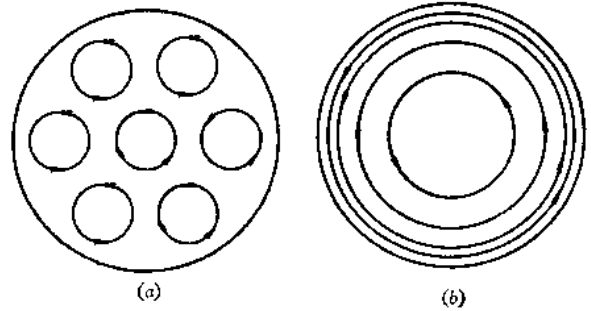


图8-3 金属料截面上的涡流
(a) 小涡流; (b) 大涡流。

感应电流 (涡流) 的密度是从导体 (炉料) 的表面向中心, 以指数规律降低的, 如图8-4所示。为了简化感应加热的有关计算, 通常假设涡流是集中在导体表面一薄层内流动的。并以涡流密度降低到表面最高值的 $1/e$ 处, 作为该厚度的内界限。即

$$I_c = \frac{1}{e} I_0 \approx 0.37 I_0 \quad (8-1)$$

式中 I_0 ——导体表面上的涡流最大值;

e ——自然对数底, 2.718;

I_c ——降到 $1/e$ 处的涡流值。

这个表面薄层的厚度, 一般称为涡流的“条件穿透深度”, 或“渗透深度”。通过计算可知, 在导体表面穿透深度范围内的涡流所产生的热量, 约占涡流总发热量的 90%; 而导体更深处产生的热量只占 10%。

涡流在导体表面的穿透深度 δ 厘米, 可用公式表示

$$\delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \quad (8-2)$$

式中 ρ ——导体的电阻系数, 欧姆·厘米;

μ ——导体的相对导磁系数;

f ——感应电流的频率, 赫。

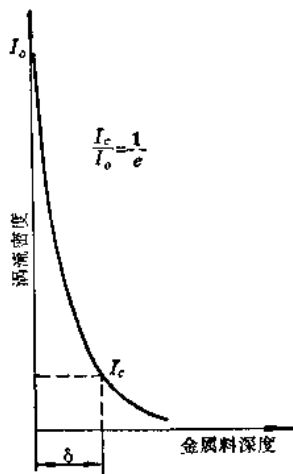


图8-4 涡流在导体中的分布

由公式可知, 电流的穿透深度是与金属料的电阻系数的平方根成正比, 与导磁系数和电流频率的平方根成反比。对于同一种炉料而言, 电流的频率越高, 则穿透深度就越薄; 这样, 在很薄的厚度内集中通过大量电流, 结果使产生的热量可集中使用, 有利于炉料的熔化。

应该注意, 同一种金属料在不同温度下, 电和磁的性质也不相同。随温度的升高, 钢料的电阻系数增大, 而导磁系数减小。以含 0.45% c 的碳钢为例, 在室温条件下的电阻系数为 $\rho = 1.5 \times 10^{-5}$ 欧姆·厘米, 但升温到 800°C 时, 就增加到 1.1×10^{-4} 欧姆·厘米; 而导磁系数由室温下的 $\mu = 300 \sim 400$, 降低到在超过磁性转变温度 (约 750°C) 后的 $\mu \approx 1$ 。图 8-5 表示了这种变化的关系。

铁磁物质在加热到一定温度时, 其磁性起初是降低, 而后完全消失。导磁系数降低到

$\mu \approx 1$ 的温度,称为磁性转变温度 T_c (居里点)。对纯铁,磁性转变温度 $T_c=768^\circ\text{C}$,镍在 360°C 和钴在 1150°C 发生转变。渗碳体(Fe_3C)在 256°C ,共析钢在 721°C 时就变成非磁性的了。

对碳钢这种铁磁物质,从室温到 800°C 的温度范围内,电阻系数和导磁系数的变化是很显著的;而从 800°C 到熔化成钢水的温度范围内,它们的变化是不大的。所以,对同一种频率来说,在冷态的钢料上,感应电流的穿透深度比较小,温度升高时穿透深度就变大。在高温状态要比室温下钢的穿透深度大30倍。表8-2中给出几种金属在不同频率下的穿透深度数据。

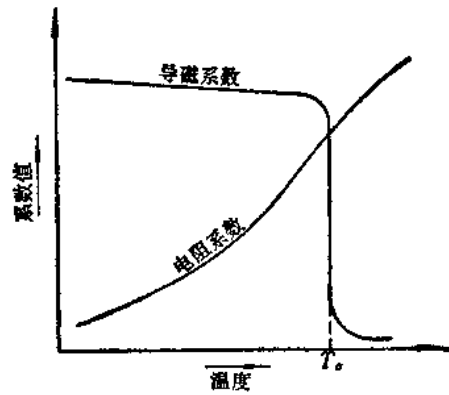


图8-5 钢料的电和磁性质的变化

表8-2 金属的穿透深度,厘米

| 金属 | 状态 | 电流频率,赫 | | | | |
|----|----|--------|------|------|------|-------|
| | | 50 | 500 | 1000 | 2500 | 10000 |
| 钢 | 固态 | 0.23 | 0.07 | 0.05 | 0.03 | 0.015 |
| | 液态 | 7.13 | 2.14 | 1.51 | 0.94 | 0.47 |
| 镍 | 固态 | 2.34 | 0.74 | 0.52 | 0.32 | 0.16 |
| | 液态 | 7.44 | 2.35 | 1.67 | 1.16 | 0.58 |
| 铜 | 固态 | 1.0 | 0.29 | 0.21 | 0.13 | 0.067 |
| | 液态 | 3.34 | 1.1 | 0.75 | 0.46 | 0.23 |
| 铝 | 固态 | 1.2 | 0.38 | 0.27 | 0.17 | 0.085 |
| | 液态 | 3.68 | 1.16 | 0.82 | 0.52 | 0.26 |

应该注意的是,该穿透深度并不受金属料直径的影响,在同一频率同种钢料条件下,不论钢料粗细,其穿透深度都是相同的。

2. 金属料中的感应电动势

如此看来,这种通过感应圈来加热金属料的感应炉,好象是一个变压器。感应圈相当初级绕组,金属料的圆周表层相当次级绕组,它们形成一个感应系统。金属料中感应电动势的大小,可以根据变压器原理求得,

$$E \propto f w \Phi_m \quad (8-3)$$

式中 E ——次级绕组中感应电动势有效值;

w ——次级绕组匝数,此处 $w=1$;

Φ_m ——穿过金属料交变磁通的最大值。

金属料中交变磁通的大小,又取决于感应器的匝数和输入电流(或电压)。

在中频感应炉工作时,操作人员要戴防护手套,以防触电。由于高频感应炉的电源电压很高,其中金属料上产生的感应电动势高达几百伏,甚至上千伏,因此所用的操作工具都一定要带有绝缘柄;身体不能直接接触炉中带电的金属料。

3. 感应炉的效率

为了节约电能，就要提高感应炉的效率。这是一个很重要的问题。

感应炉的效率是指用以加热和熔化炉料所需要的电功率同感应系统（感应圈和炉料）消耗的有功功率的比值。感应系统消耗的有功功率包括感应圈本身耗损的有功功率和炉料所吸收的有功功率两部分。其中，炉料所吸收的有功功率，全部转化为热能，但是，它并没有全部用来加热熔化炉料本身，而是有一部分通过炉壁和炉底散掉，以及由于熔池表面辐射等而损失掉。

那么：

$$\text{感应炉的热效率} \quad \eta_t = \frac{P_r}{P_{2a}} \quad (8-4)$$

$$\text{感应炉的电效率} \quad \eta_e = \frac{P_{2a}}{P_a} = \frac{P_{2a}}{P_a + P_{1a}} \quad (8-5)$$

$$\text{感应炉的效率} \quad \eta_l = \frac{P_r}{P_a} = \frac{P_{2a}}{P_a} \cdot \frac{P_r}{P_{2a}} = \eta_e \cdot \eta_t \quad (8-6)$$

式中 P_a —— 感应系统消耗的有功功率；

P_{1a} —— 感应圈本身耗损的有功功率；

P_{2a} —— 炉料所吸收的有功功率；

P_r —— 加热熔化炉料所需要的电功率。

如果计入变频机组的效率 η_x （变频机输出与输入功率之比值），则整个熔炼设备的总效率为：

$$\eta = \eta_x \cdot \eta_l = \eta_x \cdot \eta_e \cdot \eta_t \quad (8-7)$$

为了提高感应炉的效率，必须同时提高它的电效率和热效率。提高炉子热效率，要从增强坩埚保温性能，改进操作和缩短熔炼时间方面着手，尽量减少熔炼过程的热量损失。为提高它的电效率，需要增加炉料吸收的功率和减少感应圈的耗损功率。将变压器理论用于感应系统，可以得到有关因素对电效率的影响。

综合来看，对炉子效率的影响因素有以下几方面。

(1) 供电频率

根据公式 (8-3)，金属料中感应电动势与频率成正比变化。将电工学基本原理具体应用于金属炉料并进行分析，能够得出，供电频率增高时，感应电流随之增加，产生热量也增多，对炉料的加热和熔化就越快，效率越高。

所以，对一定尺寸的感应坩埚而言，随频率的增高，电效率也增高，如图 8-6 所示，但是当频率超过一定值（图中 K 点）以后，电效率即趋近一极值。这说明，为提高感应炉的效率，不必追求过高的频率。

(2) 金属炉料

根据对感应系统消耗功率的分析可知，电效率同感应圈材料和金属炉料两者电阻系数

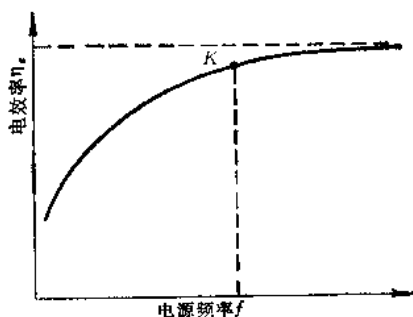


图 8-6 电效率与频率的关系

的比值有关。该比值越小，则电效率越高。因此，熔化钢铁材料比熔化铜或铝时电效率要高。

在确定的频率下，对同一种金属料来说，横截面积越大，其中的感应电流也越大。因此，感应熔炼的重要特点是，在一定的供电电压条件下，金属料的块度越大，则产生的感应电流越大，放出的热量也越多。但也并不是金属料块越大越好。

对每一种频率的感应炉，都有其得到最高效率的合适的料块尺寸。如高频炉，钢料的尺寸为6毫米，中频炉为50毫米和工频炉为320毫米。工频炉的加热效率很低，若料块尺度小于160毫米，就很难把它熔化开。

(3) 坩埚尺寸

电效率还与感应圈及坩埚的几何尺寸有关系。一般，坩埚直径和有效高度要比感应器的相应尺寸小，以便它们中间捣筑足够坚固的耐火材料炉衬。这样，就会形成许多漏磁，降低电效率。如果耐火材料质量好，应适当加大坩埚尺寸，这样可提高感应炉的效率。根据经验，炉衬厚度为坩埚直径的 $1/4 \sim 1/6$ ；坩埚的有效高度为直径的1.5~2倍。

当金属料熔化后，炉料尺寸就是坩埚的尺寸。前面指出，供电频率越高和金属料块越大，则电效率也越高。据此，就能得到频率与坩埚尺寸的关系。坩埚直径与炉料穿透深度的比值 d_2/δ 增大时效率增高。根据经验，要达到比较高的电效率，则应该

$$\frac{d_2}{\delta} \geq 10 \quad (8-8)$$

将公式(8-2)代入，

则

$$d_2 \geq 50300 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}, \text{ 厘米} \quad (8-9)$$

在感应炉供电功率确定的条件下，坩埚容量太大，由于功率不够，使加热效率低；但是，如果坩埚尺寸过小，它的效率同样很低。在固定频率条件下，对不同炉料，电效率较高的最小坩埚尺寸，可以由公式(8-9)求出。

金属料熔化后， $\mu \approx 1$ ，代入公式(8-9)，就得到所需要的最低频率 f_m ：

$$f_m = 25 \cdot 10^8 \cdot \frac{\rho}{d_2^2} \quad (8-10)$$

可以看出，随感应炉坩埚尺寸的增大，最低频率减小。这说明，对大型感应电炉采用较低频率的电源，仍然能高效率地工作；而对小型感应炉，应该采用较高的频率才能达到高的效率。同时，大炉子的散热相对少些，所以大炉子的效率要比小炉子高。

据资料介绍，用中频感应炉熔炼钢的效率，如表8-3所列数据。国内某熔模铸造车间在中频感应炉熔炼碳钢时，用BPS100/2500变频机供电，熔钢量250公斤，测得的感应炉效率 $\eta_l = 0.45$ ，按变频机组效率 $\eta_g = 0.77$ 计，熔炼设备的总效率为 $\eta = 0.35$ 。

表8-3 感应炉的效率

| 效 率 | η | η_g | η_l | η_e | η_r |
|----------|--------|----------|----------|----------|----------|
| 1400公斤炉子 | 0.48 | 0.86 | 0.56 | 0.87 | 0.65 |
| 250公斤炉子 | 0.37 | 0.74 | 0.50 | | |

4. 发挥设备功率

除去感应炉的效率之外，影响它工作的另一个问题是功率因数。

感应圈-炉料感应系统的等效电路，如图 8-7 所示。 L 代表总电感，包括感应圈感抗和炉料折合的感抗两部分； R 代表总电阻，包括感应圈电阻和炉料折合的电阻两部分。

在这种感应系统中，电阻远小于感抗值，是一个感性很大的负载。所以，电路中的电流 I_1 大大落后于总电压 U 的相位，相位差角 φ 很大，有功功率比无功功率小得多。因此，感应炉电路的功率因数 $\cos \varphi$ 很低，一般是 $\cos \varphi$ 在 0.1 以下。

这就是说，电源供给的总功率，并没有被感应炉系统全部吸收，它吸收的还不足十分之一。这样，一个 100 千瓦的变频机电源，只能当 10 千瓦用。设备功率既不能充分利用，输电线路的功率损耗又很大。

为了补偿无功功率，改善设备的功率因数。在感应炉电路中，与感应系统并联上电容器，如图 8-8 所示。

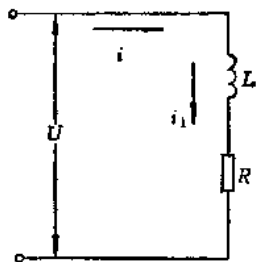


图8-7 感应炉的等效电路

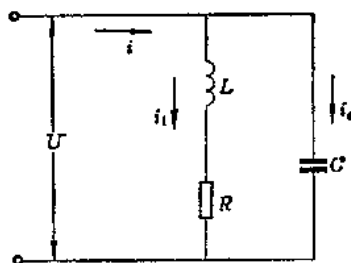


图8-8 增加电容的感应炉电路

电容器是容性负载。电容电路的性质是，通过容抗的电流 I_2 超前于电压 U 的相位 90° 。所以，当电容器并联到感应系统上之后，就使电路总电流 I 的相位比原来的电流 I_1 超前一些， I 落后于电压 U 的相位差角 φ 变小了，即功率因数 $\cos \varphi$ 值变大。继续增加电容器的容量，能使 $\cos \varphi$ 再次增大。这样，就能改善设备的功率因数。

结果，在感应系统状态不变的情况下，只并联电容器，就能使电路负载的感性减小，无功功率减小，从而提高了设备的利用率。

如果增加的容量适当，就能使电源电流 I 的相位与电压 U 相同，即相位差角 $\varphi = 0$ ， $\cos \varphi = 1$ ，功率因数达到最高。这种效应在电工学中称为“并联谐振”。

如果增加的电容器超过并联谐振所需要的容量，也会使电路负载变成容性的。这时，电流超前于电压，功率因数重又变小， $\cos \varphi < 1$ (超前)，效果变坏。再增加容量，效果进一步变坏。

由此可知，恰当选配电容，使电路在发生并联谐振附近工作，就能达到最佳效果。这时，功率因数值高，负载得到一定的有功功率时，取自电源的总功率最小，电源变频机的负担最轻。这就允许提高电源电压，加大输出电流，供给感应炉以更大的有功功率。

变频器供电的中频炉设备，都带有可以调节的电容器组，容量可以按挡分级增添，以达到最佳的匹配。设备的控制盘上有功率因数表 (图 8-9)，能够显示电路的工作状态。在感应炉工作时，如果表上显示出 $\cos \varphi < 1$ (落后)，电流落后于电压时，即表示负载呈感性，此时应该增加容量才能提高 $\cos \varphi$ ；如显示 $\cos \varphi < 1$ (超前)，电流超前于电压

时,表示负载呈容性,在炉子状况不变时,应该减少电容量才能提高功率因数。

但是,由于变频器本身是具有一定电感量的设备,它要求电路应是带容性的负载。所以在使用这种电源的感应炉时,为充分发挥电源效能,加速熔炼过程,应将功率因数控制在0.9(超前)~1之间为宜。要防止功率因数超前过多,以免损坏设备。

为补偿无功功率,改善功率因数采用的电容器,称为电热电容器。设备所需电容器补偿的总功率,按经验公式为

$$Q = \frac{1.25P}{\cos\varphi} \quad (8-11)$$

式中 Q ——电容器补偿的无功功率,千乏;

P ——中频设备的额定功率,千伏安;

$\cos\varphi$ ——感应炉的自然功率因数。

一般配置的电容器容量是中频设备功率的15倍或更多些。

5. 中频熔炼设备电路

中频变频机组供电的感应熔炼设备的电路图,如图8-10所示。其中包括主电路、控制电路、励磁电路和电气测量等部分。

为使感应熔炼炉能正常工作,需加强设备的维护及检修。操作者应熟悉电路图、有关规程和说明书。

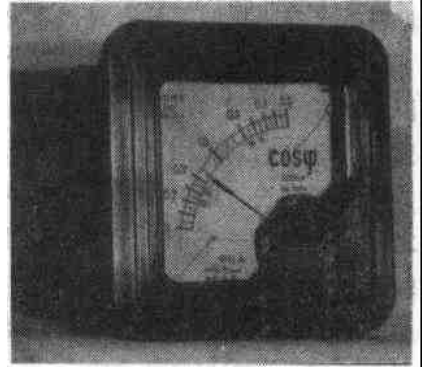


图8-9 功率因数表

二、熔炼的电制度

1. 装料及供电

为感应炉所用的炉料块度应有适当大小,很细碎的料不好,它不但使炉子加热效率低,而且会形成许多炉渣。

由于感应加热的特点,坩埚中温度分布如图8-11所示。由于趋肤效应,使靠近坩埚壁附近部分的温度最高,如Ⅰ区;坩埚中下部的温度也较高,如Ⅱ区;因磁力线分散,感应涡流弱和散热严重,所以坩埚的上部温度较低,如Ⅲ区。因此,当一批炉料中包括不同性质的炉料时,各种料在炉中堆放的情况要考虑好。熔点较高的料要放置在坩埚中温度较高的区域,以利于熔化。

炉料在坩埚中装填得尽可能紧密些,减少空隙。这样,炉料就能吸收更多的电能,加速熔化。为了防止架料(搭桥)现象,装料时以下紧上松为好。

另外,为了提高炉子热效率,应该在坩埚上加炉盖,以减少高温炉料向外辐射的热损失。

在设备及感应炉经检查均完好,以及冷却水供给正常的情况下,装好料就可以供电。开始供电应该功率小,以逐渐加热炉料和炉衬,从而避免炉衬因受热过快被损坏。同时,在开始供电加热时,炉料的搭接处因电流密度大,会被熔合,使通路发生变化,造成电路中电流波动。因此,如果开始供电功率大,电流靠近允许的上限,则电流波动就会超出上

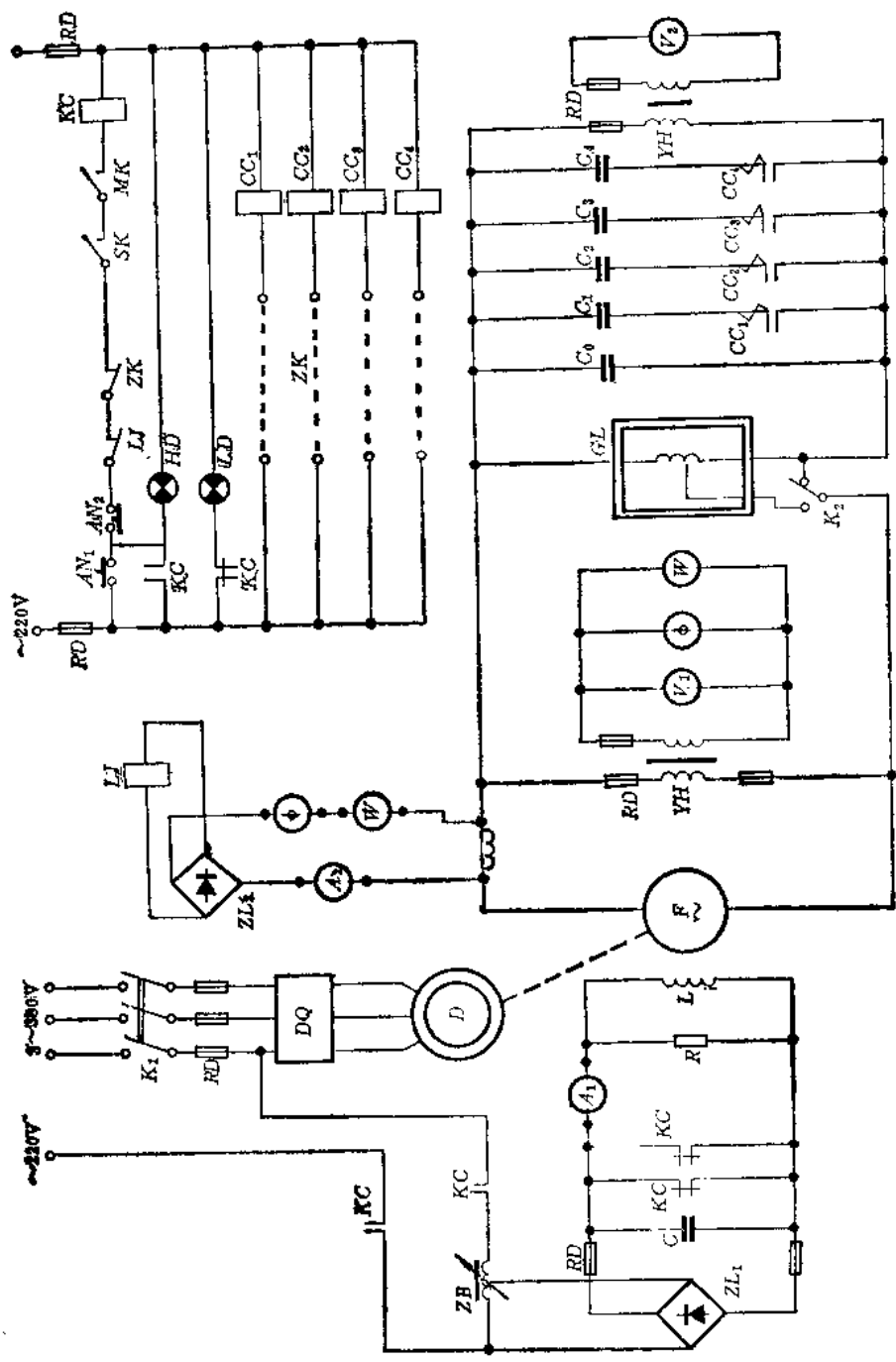


图8 10 中频感应熔炼炉电路图

K₁, K₂—闸刀, RD—熔断器(各种规格), DQ—电机启动器, D—电动机, F—中频发电电机(与电动机为一机组), KC—控制接触器, ZB—自耦变压器, ZL₁—励磁分流器, ZL₂—过流继电器分流器; C—滤波电容器, A₁—励磁电流表, R—励磁电阻, L—励磁绕组, AN₁, AN₂—励磁控制按钮, LJ—过流继电器, ZK—转换开关触点, SK—水压机继电器触点, MK—联锁触点(闸刀门刀), HD, LD—红绿信号灯, CC₁~CC₄—电容接触器, LH—电流互感器, A₂—中频电流表, W—电功率表, Φ—功率因数表, YH—电压互感器, V₁—中频电压表(电源); V₂—中频电压表(炉子); G₁—感应炉; C₀~C₄—电热电容器。

限，发生电路跳闸。

在加热约十分钟后，电流趋于稳定，就可以加大功率，并尽可能以全功率工作。

2. 熔化中

由于感应炉装的钢料是铁磁物质，使其电感系数增加，故开始供电时，其电感值较大。当炉料被逐渐加热，尤其是部分炉料超过磁性转变温度之后，炉于负载的电感值就逐渐降低，如图 8-12 所示。

电感值降低，它的感抗也降低，故使该并联负载电路的感性加强，在功率因数表上显示 $\cos \varphi$ 指针向落后方向移动。这时，应在电路中增加并联的电容量，加强负载的容性以平衡，使指针向超前移动，提高功率因数。因而在整个熔炼过程中，要随电感值的降低，及时增加电容量（图 8-12），以保持高的 $\cos \varphi$ 数值。这是能连续供给感应炉以最大有功功率的必要条件。

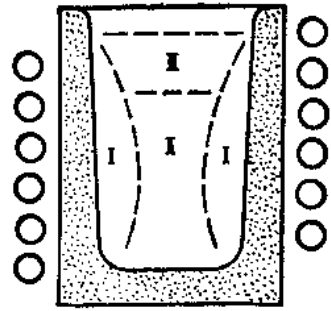


图8-11 感应炉中的温度分布

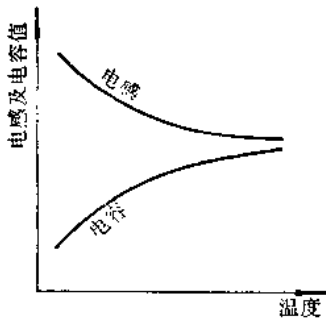


图8-12 电感与电容的变化

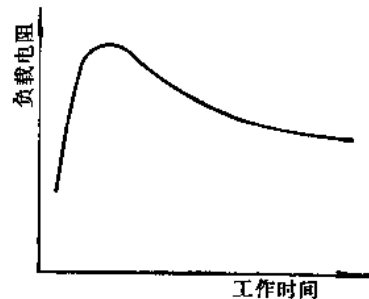


图8-13 感应炉负载电阻的变化

能否给炉子输入最大的功率，还要看负载电阻的情况而定。在感应炉熔炼过程中，负载电阻（感应炉-电容器并联系统的等效电阻）的变化如图 8-13 所示。在前段时间内它逐渐变大，以后又缓慢降低。

负载电阻逐渐变大的原因，可能是由于分散的金属料块，在加热过程中发生熔焊连成大块所造成；当炉料中局部被熔化，坩埚中出现钢水时，也会使负载电阻增大。

从实践中可以看到，在加热过程中会出现供给感应炉的电压不变时，而电流却逐渐降低，输入功率也降低的现象；此时，开始发生电流波动，炉料中出现熔合和熔化。

这时，炉料需要吸收功率，可是负载电阻增大后，变频器虽有能力，但受额定电压的限制，却不能供给炉子以最大功率。

在这种情况下，就需要“倒闸”，即将变频机的输出电压只加到感应圈的一部分匝数上，如图 8-14 所示。例如，将电源的一个输出端 d 接到感应圈的抽头 c 点上。这时的感应圈变成了升压自耦变压器，感应圈上（和电容器上）的电压 U ，高于电源电压 U_g 。两个电压之比等于 ab 与 ac 的匝数比：

$$\frac{U_c}{U_g} = \frac{N_{ab}}{N_{ac}} \quad (8-12)$$

例如，150 公斤中频炉感应圈共 14 匝，在圈的下部第 10、11 和 12 匝处有抽头可供选择。

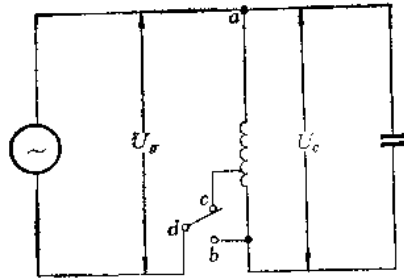


图8-14 感应圈倒闸（抽头）示意图

如倒闸后，使输出的下端接在 11 匝处，若电源输出额定电压 $U_g = 750$ 伏，那么升高的电压是

$$U_c = \frac{N_{cb}}{N_{ca}} \cdot U_g = \frac{14}{11} \cdot 750 \approx 950 \text{ (伏)}$$

倒闸后，使负载电阻变小，在原额定电压条件下，电流变大，因而功率增加，炉料也就吸收更大的功率，加快了熔化速率。

3. 化清后

在熔化后半期，随着炉料的熔化，炉子的电参数也逐渐稳定。电感达到较低值，负载电阻变化不大，输入电流和功率也趋于稳定。炉料全部化清后，参数就基本不变了。此时，能供给钢水的最大功率，取决于坩埚的容量和尺寸。

在钢水被感应加热时会发生搅拌现象，其实质是电磁力作用的结果。如图 8-15 所示，钢水中感应涡流因趋肤作用而集中在表面，涡流方向与感应圈中电流相反；钢水表层又与感应圈相距较近，因而它们之间产生较大的电磁排斥力。感应圈固定不动，故流体的钢水被从表层推向中心，结果使钢水出现了搅拌作用。当作用剧烈时，钢水就不能维持稳定的水平面，而翻腾起来，形成所谓“峰顶”现象。

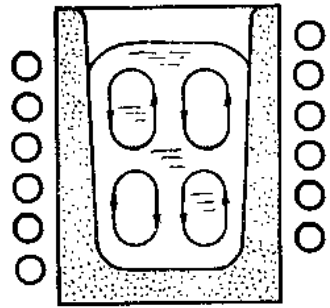


图8-15 钢水搅拌情况

这种搅拌作用使钢水的温度和成分得以均匀，有利于炉渣与钢水之间进行反应和非金属夹杂物的排除。这对钢水的质量是有好处的。但也带来一些缺点，它使炉渣流向四周，钢水暴露于空气中，吸气和氧化的机会增多；钢水及炉渣对炉衬的冲刷和侵蚀增强，减低它的使用寿命。

根据研究，这种对钢水的电磁推力与一些因素有关：

$$F \propto \frac{P_{2a}}{S \cdot \sqrt{\rho} \cdot f} \quad (8-13)$$

式中 F ——对钢水的总推动力；

P_{2a} ——钢水吸收的有功功率；

S ——钢水的侧面积；

ρ ——钢水的电阻系数；

f ——供电频率。

对钢水的推力大，则搅拌剧烈和峰顶高。一般，希望钢水有一定程度的搅拌，但要消除严重的峰顶。

分析关系式 (8-13) 可知：

① 钢水单位侧面积的有功功率越大，峰顶就越高。当钢水升温或保温时，适当减低输入功率，能使峰顶减轻。

② 在功率确定的条件下，频率低则峰顶高。工频炉钢水翻腾猛烈，而中频炉则情况好些。有的较大型的中频炉还附有工频线圈，用来搅拌钢水。

③ 在熔炼电阻系数较低的铜和铝时，金属液要受到比较大的推力。铝的比重小，所以感应炉熔化的铝水总有很大的翻腾和峰顶。

④ 当推力一定时，钢水的液面越高，则静压力越大，能使峰顶受到抑制。如果降低感应圈对钢水的相对高度，使对钢水的推力中心降低，也有助于削弱峰顶。在熔炼后期取消或减低感应圈上部几匝的功率，也可以削弱峰顶。

熔炼最后阶段输入的功率大小，要根据钢水的过热度和浇注温度，以及减轻钢水翻腾来确定。熔炼好的钢水分包出钢时，炉中暂时还保存部分钢水，为保温所供给的功率要小些，以防止钢水翻腾过于激烈。

三、各种感应熔炼设备

在熔模铸造车间还使用的其他感应熔炼装置，简单介绍如下。

1. 可控硅中频电源装置

上述发电机式变频设备，在工业上得到广泛应用。它具有供电稳定、操纵方便和维护简单等优点；但是，它的结构笨重，耗用的钢材和铜较多，工作时噪音大，而且机组的电效率只有 70~85%。

随着可控硅技术的发展，近十余年，一种新型的中频电源——可控硅静止变频器得到了迅速发展。国内外都在研制和生产这种设备，并且已经有了系列产品。与中频发电机组相比，它的电效率高，大于 90%，并且节省材料、制造简单、启动快和噪音小。更重要的是，可控硅变频器能够随感应炉负载的变化自动调频，以保持高的功率因数，而不需要切换电容器。这是中频机组供电设备所不能相比的。

可控硅中频电源的设计方案很多，用于熔炼装置的多采用“并联逆变器电路”。这种变频方式的基本电路如图 8-16 所示。

它的工作原理如下：电源 Z 将电网中的工频电变为单相直流电，再经滤波电感 L 送往感应炉。本装置中的逆变触发电路（图中未表示出）能够周期性地触发可控硅管 $SCR_1 \sim SCR_4$ 。它先使 SCR_1 及 SCR_3 导通，电流由左向右通过感应器 G；再使 SCR_2 和 SCR_4 导通，

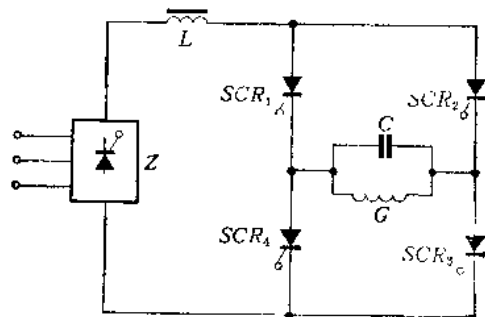


图8-16 可控硅中频装置基本电路图

Z—电源(三相桥式可控整流器)；L—滤波电感；G—感应器；C—补偿电容； $SCR_1 \sim SCR_4$ —可控硅管。

电流又由右向左通过感应器。如此，轮流