

文章编号:1003-8345(2005)02-0056-06

感应电炉的原理、构造和筑炉、修炉方法

金仲信

(三立环保设备工程有限公司, 江苏 常州 213101)

中图分类号: TG232.5

文献标识码: E

Principle, Construction of Induction Furnaces and Their Lining Building and Repairing

JIN Zhong-xin

(Sanli Environment Protection Equipment Engineering Co Ltd., Changzhou 213101, China)

我国的铸铁熔炼历来以冲天炉为主。随着我国加入世贸组织, 国际铸件市场竞争的日益激烈和铸件出口的逐步增长, 顾客对材质稳定性的要求日趋严格; 采用感应电炉单独熔炼或与冲天炉等双联熔炼已是一种必要的生产手段。本文介绍感应电炉的类型和熔炼特性、熔化原理和炉型构造、筑炉和修炉方法。

1 感应电炉的熔炼特点

感应电炉与其它熔炼炉相比, 除了熔炼原理

之外还有如下的特点:

(1) 采用电磁感应将材料直接加热, 热效率高。

(2) 由于熔炼中未使用空气, 元素烧损少, 杂质混入也少。

(3) 操作简单, 成分调整、添加微量元素和温度控制容易。可方便地熔炼成分均匀的高牌号铸铁和合金铸铁。

(4) 熔炼炉周围的热散发小, 烟尘发生量低; 作业环境改善, 有利于环境保护。

(5) 占地面积小。

(6) 电流密度高, 适用于高温熔炼。

(7) 容易实现自动控制, 特别是可利用计算机进行程序控制。

收稿日期: 2004-12-18

作者简介: 金仲信 (1948.8-), 男, 高级工程师, 在有关铸造杂志上发表论文、译文百余篇, 原从事铸造工艺、铸造熔炼工作, 现从事质量管理工作。

其它耐火粉料调制的涂料膏, 晾干后即可下芯。当生产内腔清洁度和光洁度要求很高时, 必须对砂芯采取整体涂料而后表面烘干。但是在水套砂芯顶端的不易脱落的残砂似乎不属于机械粘砂, 因为能被捅下, 表明铁液没有钻入砂芯表层中。产生原因可能有以下几种: ①芯砂中加入氧化铁以防氮针孔, 能够降低砂芯的烧结点。②为了防止气孔缺陷而将浇注温度过分提高。例如砂型浇注温度提高到 1 440 °C 以上。水套顶端的砂芯三面受热, 即使二氧化硅含量较高的福建原砂也会轻度烧结。砂型和砂芯表面烧结形成的粘砂可以称为“热粘砂”。通常铸件外表面的热粘砂不难抛丸清除掉落, 而内表面就需要由人工用专门细柄工具细心清理。

14. 我厂曾经发生煤粉料斗持续冒烟, 不知如

何扑灭。为什么煤粉会自己冒烟呢? 应该如何消除和防止?

这就是煤粉发生“自燃现象”。有些煤粉挥发分较高, 或配煤的成分中含气煤较多, 煤粉在堆积严密, 不能透风散热的条件下, 就有可能产生自燃现象。笔者认为消灭煤粉料斗冒烟, 绝对不可向料斗中吹风, 否则燃烧更加猛烈。更不可浇水灭火, 以免难于清除。也许可以将用于水玻璃砂型硬化的二氧化碳气瓶取来, 自煤粉料斗底部向斗内吹气, 排除斗内氧气, 使煤粉的燃烧熄灭。以后选购煤粉时也应把是否容易自燃做为条件之一。国外资料介绍煤粉口袋在库房中堆放不可过高, 还要注意口袋之间留出通道, 以便散热。还有的造型材料供应公司专门供应一种掺入少量 (10% 左右) 膨润土的煤粉, 制成混合粉, 即可防止自燃。

2 感应电炉的分类及熔炼特性的比较

2.1 感应电炉的分类

熔炼铸铁用感应电炉一般作如下的分类：

工频感应电炉：①工频有芯感应电炉，②工频无芯感应电炉。

中频感应电炉：①并联变频中频感应电炉，②串联变频中频感应电炉。

通常，把电流频率50 HZ的感应电炉称为工频感应电炉，而把电流频率>50 HZ~10 kHz的感应电炉称为中频感应电炉。

除此以外，还有真空感应电炉和与其它加热机构复合的等离子感应电炉，感应电弧炉等特殊构造的电炉，都能用于铸铁熔炼。除了单独熔炼以外，还可用两种炉子以如下方式组成双联熔炼。

(1)工频无芯感应电炉或中频感应电炉与工频有芯感应电炉双联熔炼。

(2)中频感应电炉与工频无芯感应电炉的双联熔炼。

(3)冲天炉、电弧炉等其它熔炼方式的化铁炉与工频有芯、无芯感应电炉的双联熔炼。

2.2 各种感应电炉的特性比较

各种感应电炉的特性比较如表1所示。

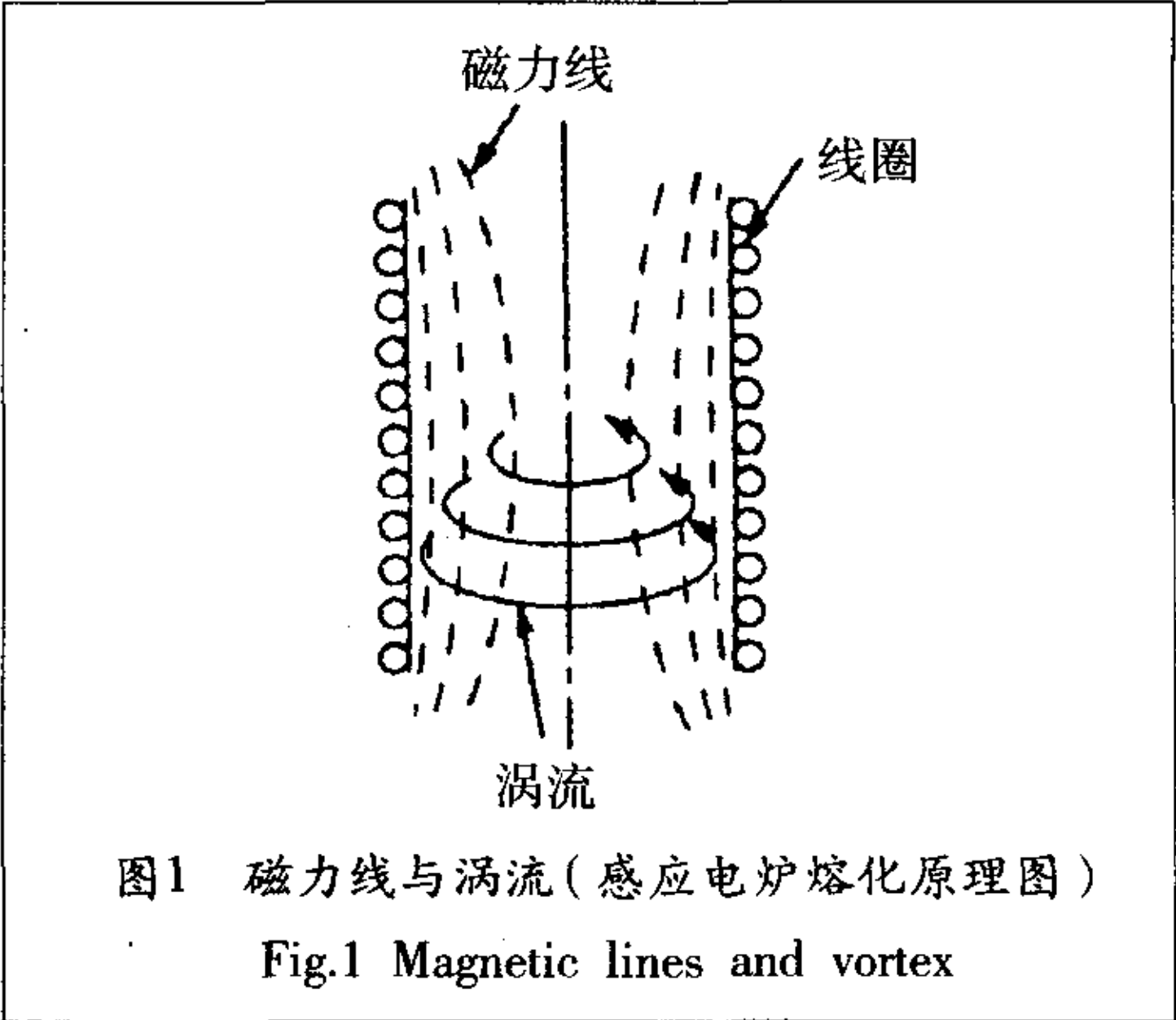
表1 铸铁熔炼用各种感应电炉特性比较表
Tab.1 Characteristics comparison of various induction furnaces for cast iron melting

| 项目 | 工频无芯感应电炉 | 中频感应电炉 | 工频有芯感应电炉 |
|----------|----------|-----------|-----------|
| 用途 | 熔炼·保温·升温 | 熔炼(一部分升温) | 保温·升温 |
| 操作条件 | 间隙或连续 | 间隙或连续 | 连续 |
| 熔炼形式 | 单独或双联 | 单独为主 | 双联 |
| 搅拌力 | 强 | 中 | 弱 |
| 电流密度 | 中 | 高 | 低 |
| 熔炼速度 | 中 | 快 | 慢 |
| 用电效率(%) | 76~80 | 74~78 | 95~97 |
| 综合效率(%) | 65~71 | 67~73 | 75~85 |
| 成分波动 | 中~较大 | 少 | 少 |
| (包括元素烧损) | | | |
| 成分调整 | 容易 | 容易 | 较难 |
| | ·要用起熔块 | ·起动时间短 | ·起动时需要有铁液 |
| 其他 | ·用残留铁液熔炼 | ·不需残留铁液 | ·需要经常残留铁液 |
| | ·空炉可休止熔炼 | ·可以空炉 | ·不能空炉 |
| | | | ·构造较为复杂 |

3 感应电炉的熔化原理

感应电炉的熔化原理如图1所示。当线圈通过

交流电流时，在其内产生交变磁场。当其中放有金属导体时，由于电磁感应作用，金属导体中在与磁力线成直角的圆周方向，产生与线圈电流方向相反的涡流，由涡流产生的焦耳热 I^2R 使导体加热而熔化。



3.1 感应电流的密度

在金属导体(即炉内金属炉料)产生的感应电流密度在线圈内侧的表面最大。越向内，电流密度按指数函数急剧减小。这种现象称为集肤效应。即加热集中在金属块表面，传导到内部较缓慢。

3.2 频率与电流透入深度

电流透入深度随频率而变动，并与频率的平方根成反比。即频率越高，电流透入深度浅，但其间电流密度高。也就是说，频率越高集肤效应越强，加热效率越高。所以，中频感应电炉可以直接用金属炉料熔炼，而工频感应电炉必须用起熔块或残留铁液才能熔炼。

电流透入深度又如图2所示的那样，随炉内金属炉料(铁液)温度的升高而加大，并且中频与工频电炉的差别也扩大。工频感应电炉炉内铁液量与电力的关系如图3所示。由此更可以理解为什么工频感应电炉必须用残留铁液来熔炼的道理。

3.3 铁液的搅拌

盛有铁液的感应电炉通电后便会产生如图4所示的搅拌运动，这是感应电炉熔化的特征。搅拌力可用式(1)计算：

$$P=\frac{0.136W}{\pi dl\sqrt{Pf}} \tag{1}$$

式中：

P——搅拌力， $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$

W——功率，kW

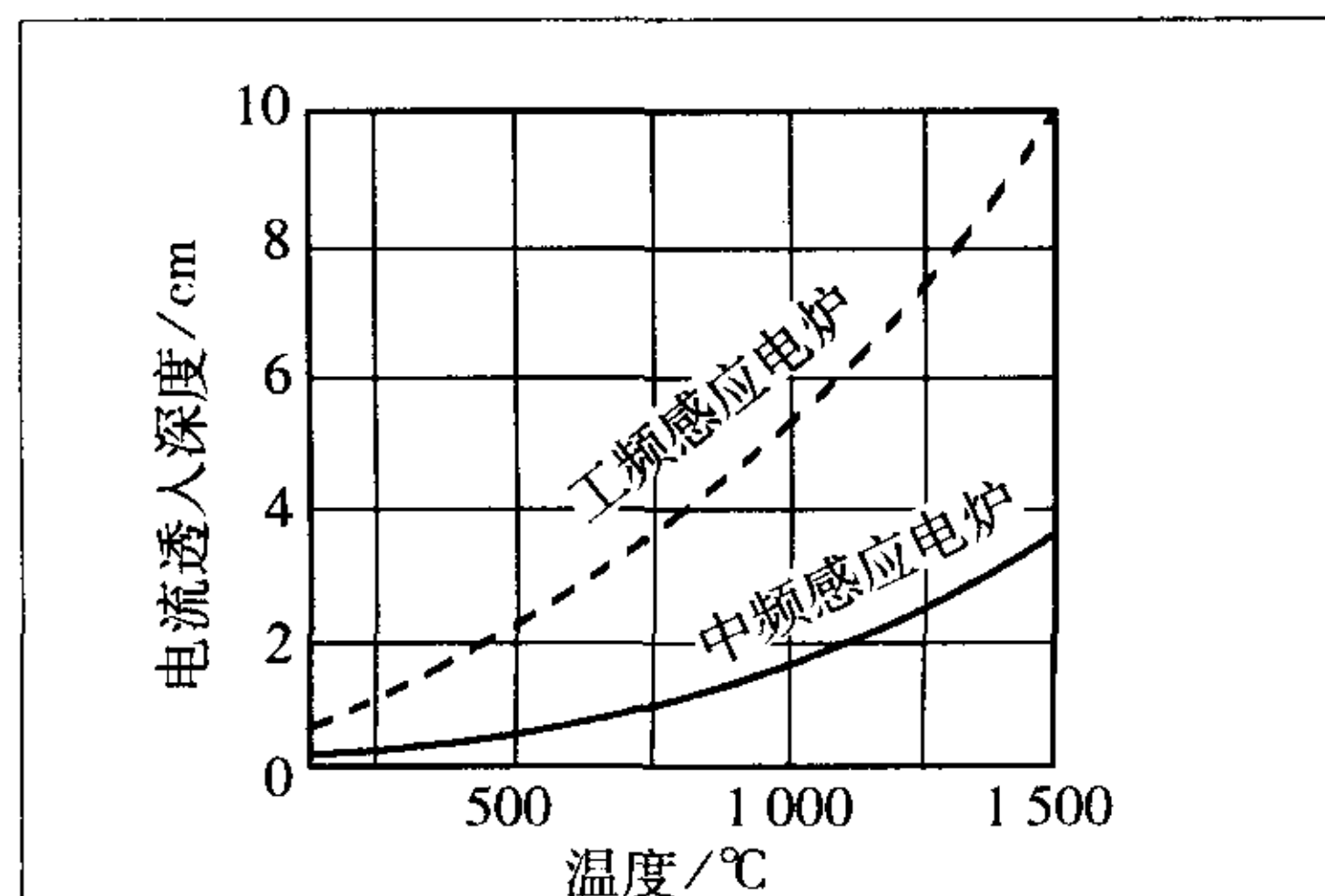


图2 金属炉料温度与电流透入深度关系
Fig.2 Relationship between metal temperature and penetrating depth of current

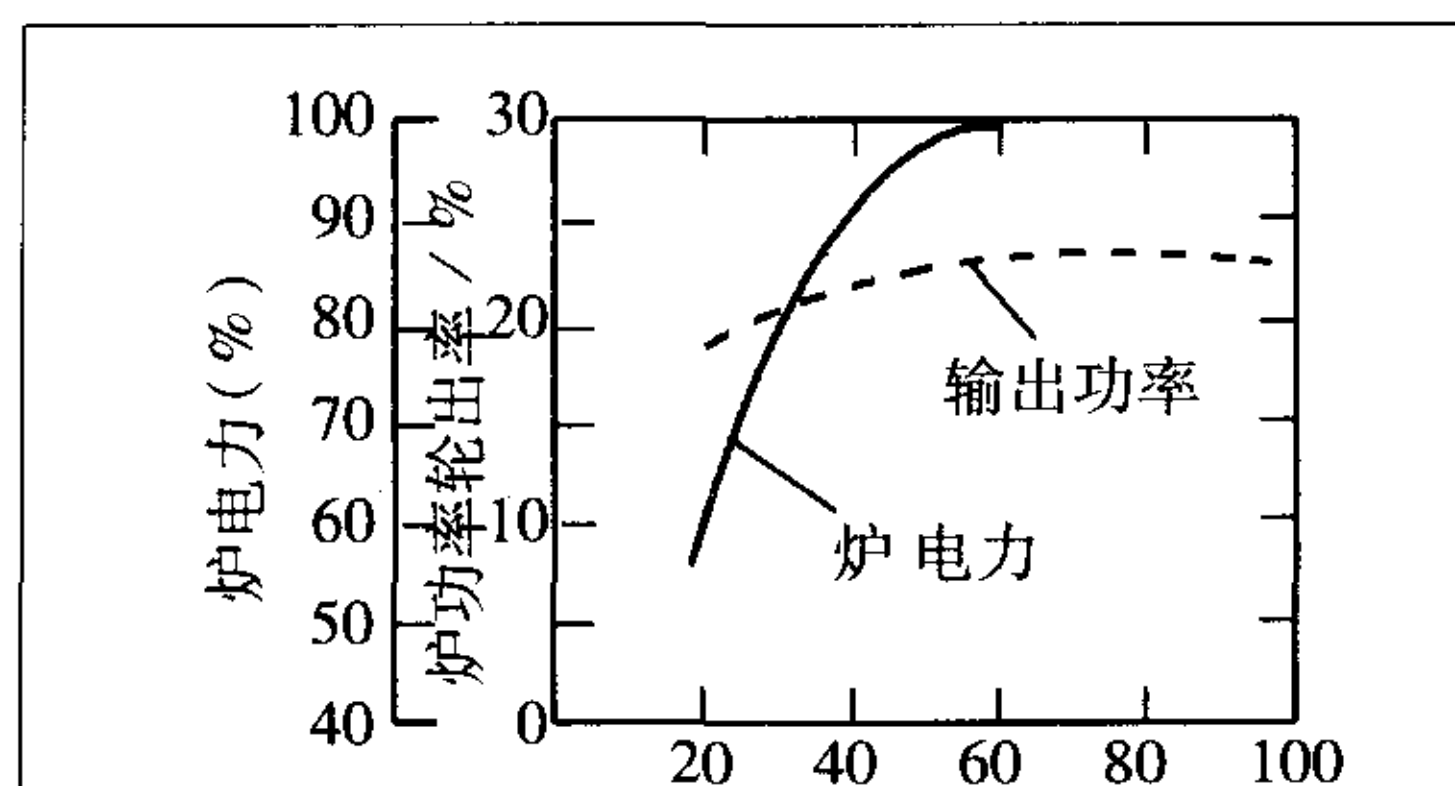


图3 工频无芯感应电炉的负荷特性之例
Fig.3 A example of load characteristics of coreless main frequency induction furnace

d ——炉内径, cm

l ——铁液高度, cm

P ——被加热体的固有电阻, $\Omega \cdot \text{cm}$

f ——频率, Hz

从式(1)中可以看出,搅拌力与功率成正比例,而与频率的平方根、炉内径和炉内铁液高度成反比例。

搅拌力对熔炼操作是十分重要的。搅拌力弱时,增碳剂和合金类熔化不好;对生产率和材质调整不利。相反,搅拌力过度激烈时,不仅炉衬烧损大,对灰铸铁则影响石墨核心的析出和助长白口化倾向。因此,炉内径小时宜采用中频感应电炉,而炉内径大时宜采用工频感应电炉。

4 感应电炉的构造

4.1 工频有芯感应电炉的炉体构造

立式工频有芯感应电炉如图5所示。在铁芯的周边有一次线圈和进入铁液的熔沟部(相当于二次线圈),在熔沟部的铁液产生涡流而加热,熔沟部铁液的自动搅拌作用使其与上部炉室的铁液循环交换,从而使整体铁液升温。

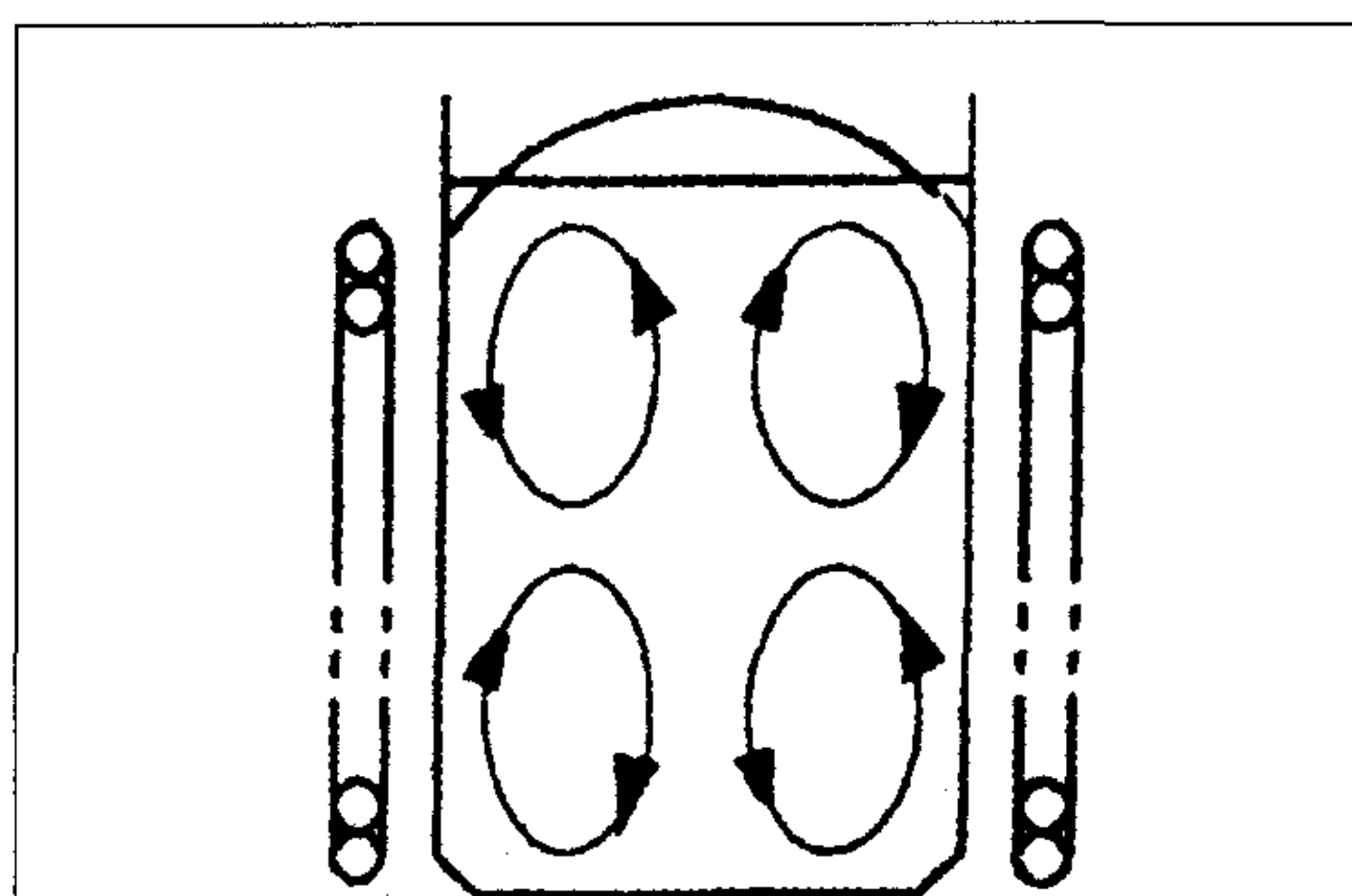


图4 铁液的搅拌运动
Fig.4 Agitation movement of iron melt

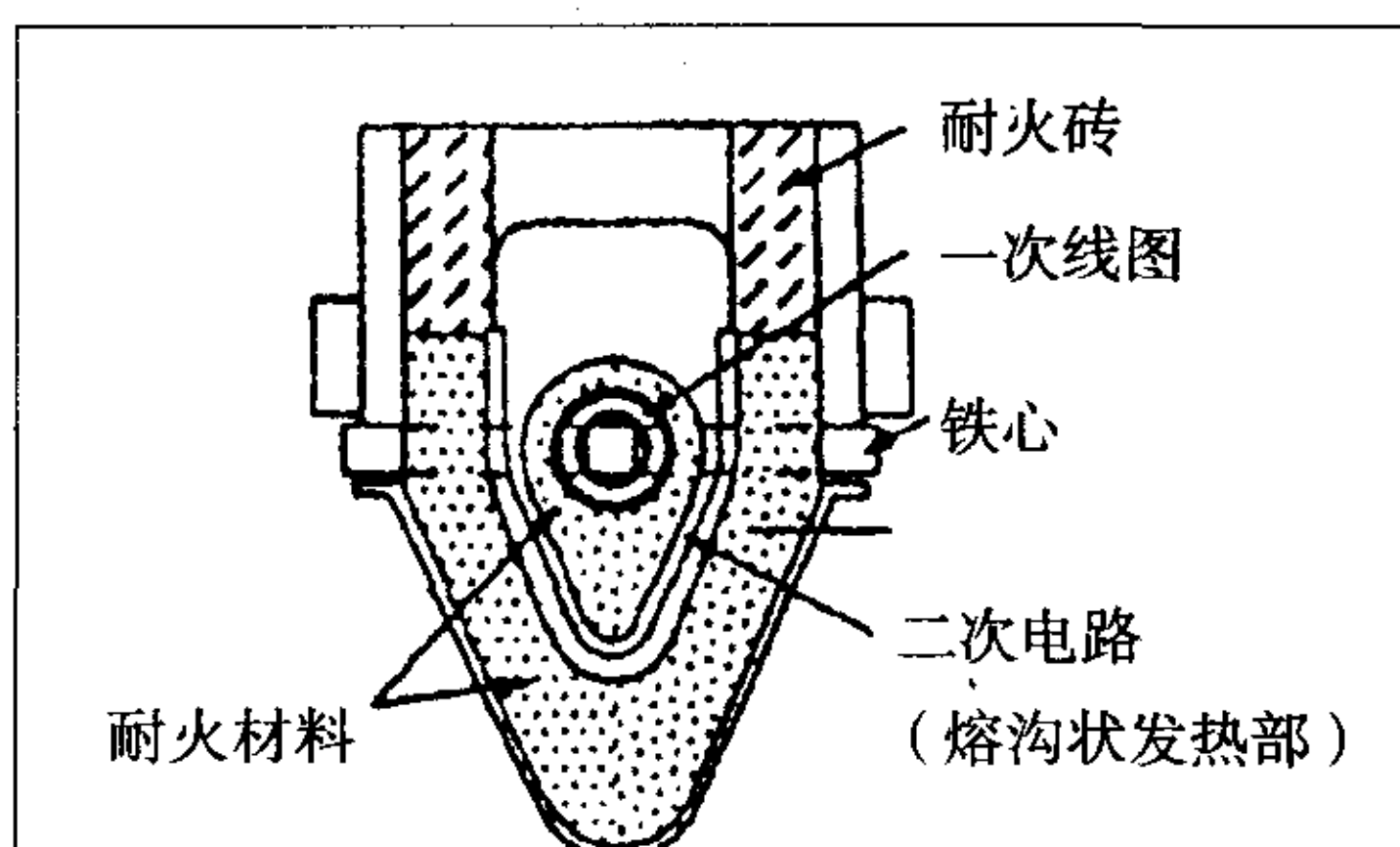


图5 立式工频有芯感应电炉
Fig.5 Vertical main frequency induction furnace with iron core

卧式工频有芯感应电炉如图6,加热铁液的熔沟部接近于水平位置,铁芯倾斜设置,由于拆除容易而便于筑炉和修炉,常用作冲天炉的前炉。

工频有芯感应电炉的主要结构由炉体、倾炉机构、水冷系统和电气配套设备等部分组成。

炉体一般有炉膛、炉盖、导磁体、感应线圈、熔沟等部分。立式炉炉盖的启闭一般由手动操作提升机构来实现。倾炉机构多采用液压装置,用两个

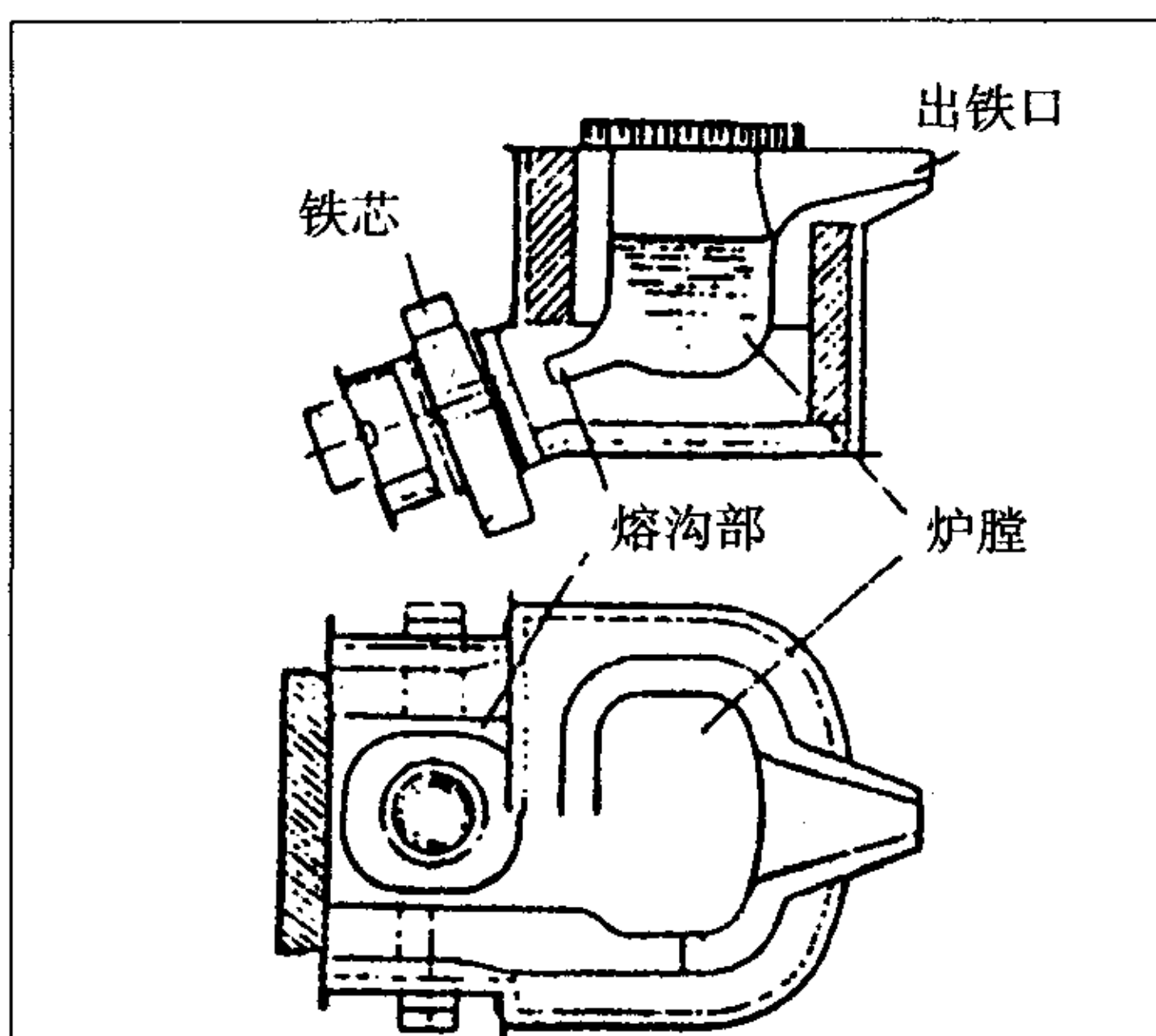


图6 卧式工频有芯感应电炉
Fig.6 Horizontal main frequency induction furnace with iron core

液压柱塞缸倾动。

电气部分包括调压变压器,相平衡装置,补偿电容器组,控制柜等。

工频有芯感应电炉一般作为前炉使用。由于它能提供成分恰当、温度适宜的定量铁液,已是近代大批量铸件生产和高速生产线上必不可少的熔炼设备。

4.2 工频无芯感应电炉的炉体构造

工频无芯感应电炉或称坩埚型工频感应电炉,其典型的炉体构造如图7,是由坩埚(炉衬)、磁轭及紧固装置等部分组成。较大容量(10~20 t)的炉子,其炉体为整体筒壳式结构,在筒壳内装磁轭和感应线圈。5 t以下较小容量的炉子的炉体大都为框架式结构,由感应线圈、磁轭及炉衬配以型钢构成一个整体。炉体安置在由柱塞缸驱动、通过液压操纵台手动阀倾转的倾转架上。

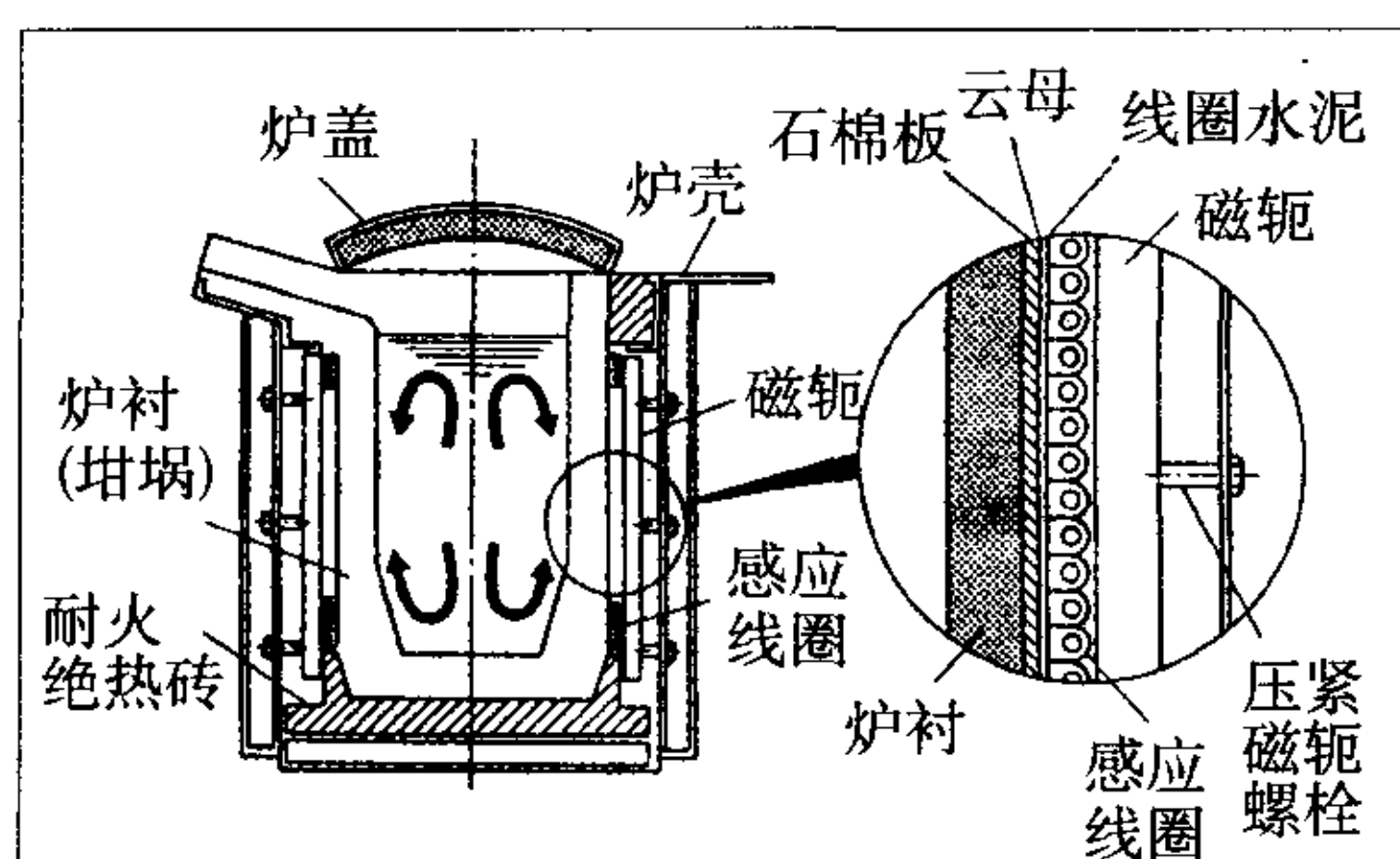


图7 卧式工频有芯感应电炉
Fig.7 Horizontal main frequency induction furnace with iron core

炉体中的感应线圈是用优质铜管绕制的,管内通循环水冷却,外部内磁轭作为磁屏并加固感应器。

水冷电缆经由炉体后的电极板引入感应线圈,水冷电缆冷却水自成循环回路。

电气部分由电源变压器、主接触器屏、电抗器、电控柜、补偿电容器组及接触器架等组成。此外,一般还装有漏铁液报警装置。

4.3 中频感应电炉的炉体构造及电路

中频感应电炉一般由电源及电气控制系统、炉体、传动装置及水冷系统等部分组成。炉体的基本构造与工频无芯感应电炉相同,包括炉盖、感应线圈、坩埚、炉架等。中、小型炉均配置两台炉体,一台生产使用,另一台备用。两台同时使用时,一台用于升温,另一台则用于保温。两炉只需配备1

套电源。

中频感应电路是按如下进行频率变换的:

整流器→平滑器→逆变换器→匹配器

工业用频率的交流电,事先通过整流器和平滑器转换成平滑的直流电,再在逆变换器变换成所需的频率。作为中频感应电炉,这样的频率变换方式有并联谐振和串联谐振两种方式。两者在功能上明显的不同点是输出功率的调整部位。前者是在整流器,而后者则是在逆变换器(变频器)。以前,铸铁熔炼用中频感应电炉大都采用并联谐振方式。而在最近则大都转变为用串联谐振方式。串联谐振方式的电路如图8所示。两种方式的电力图如图9。

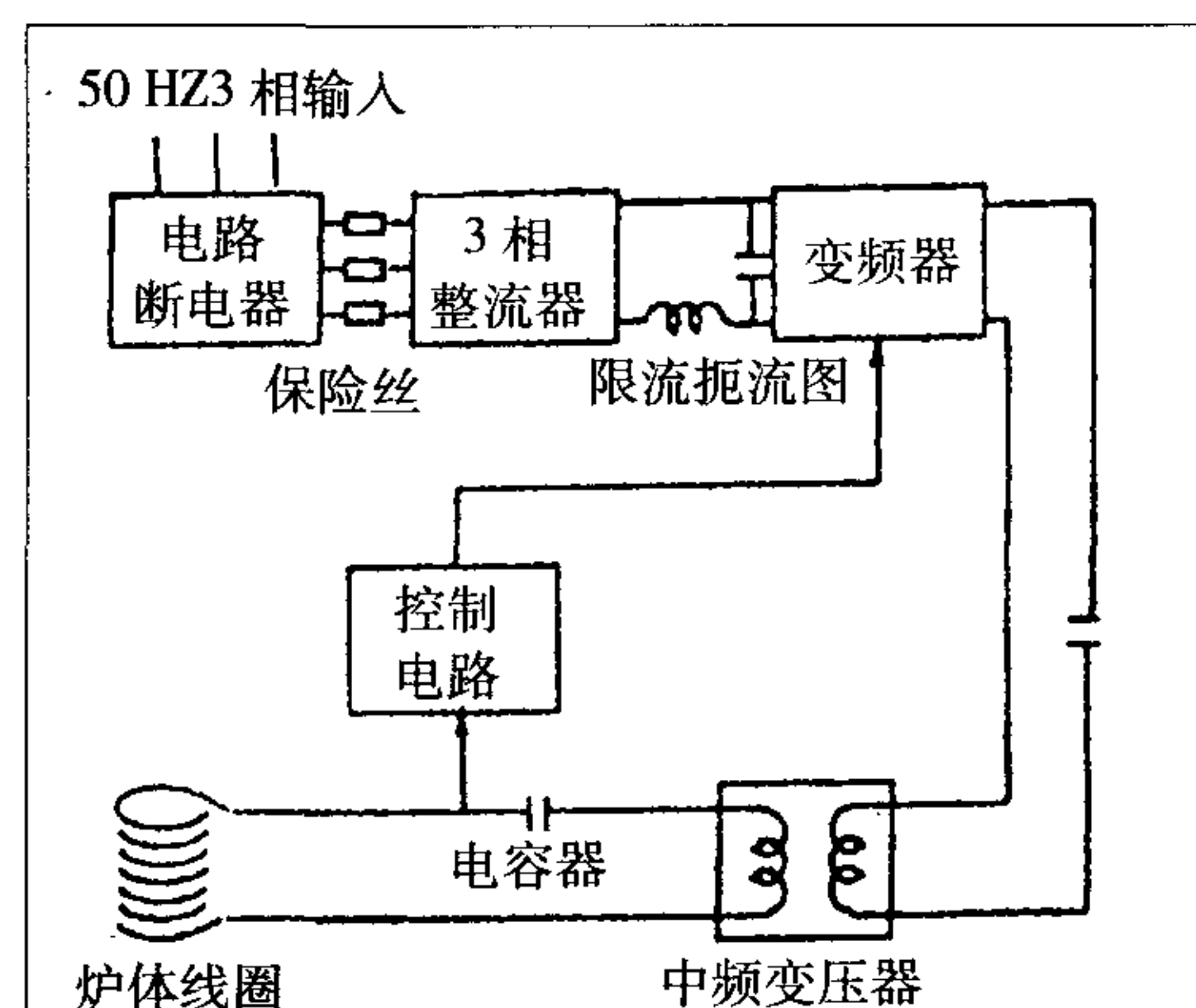


图8 串联谐振电路
Fig.8 Resonant circuit connected in series

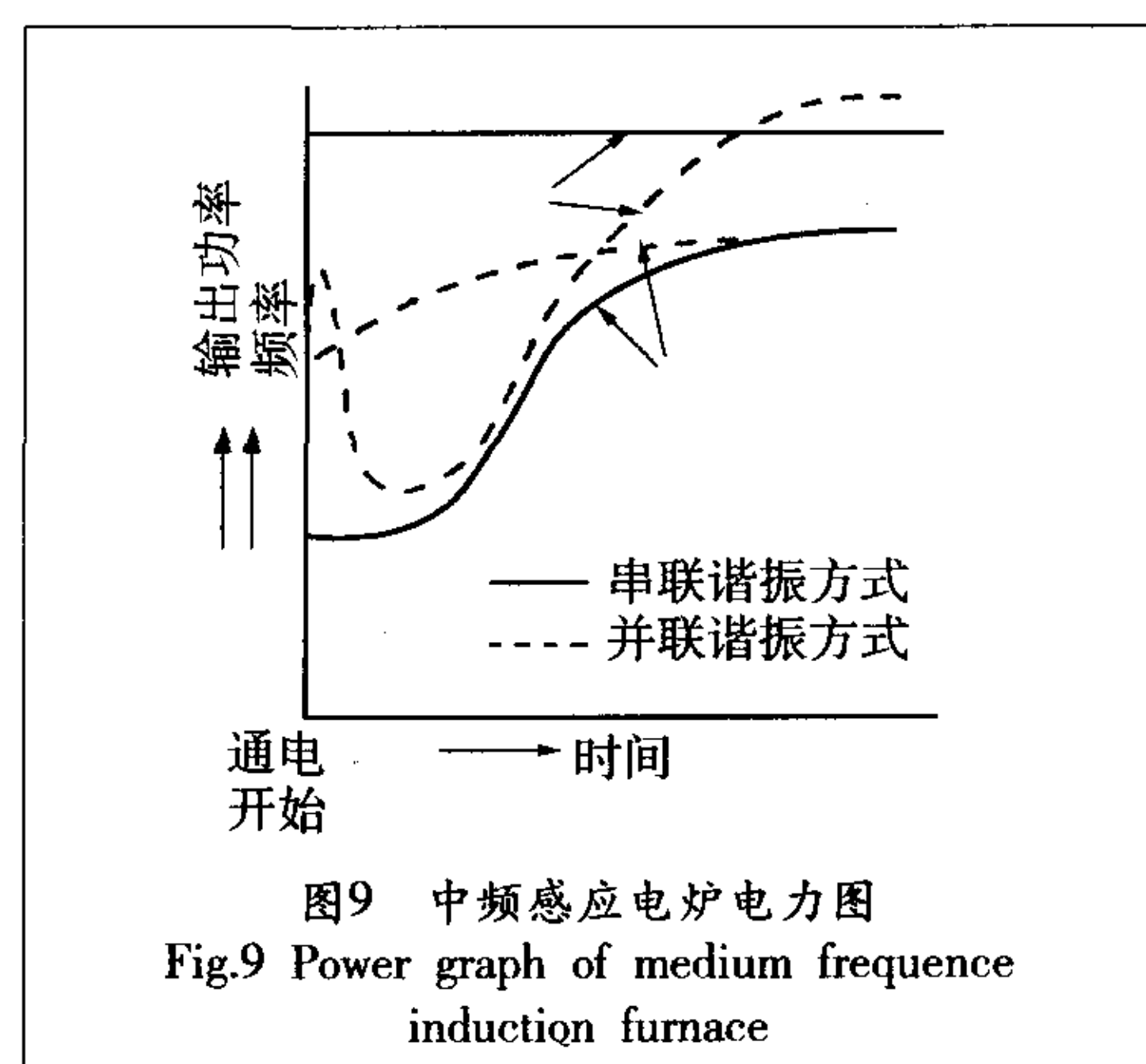


图9 中频感应电炉电力图
Fig.9 Power graph of medium frequency induction furnace

从图9中可以看出伴随通电时间频率与输出功率的负荷匹配特性。虚线为并联形,实线为串联形。正如图中所示的那样,并联谐振方式对炉内负荷变动的追随性不好,在熔炼初期的输出功率如

虚线所示的那样弯曲过度,不可能按额定功率投入。而串联谐振方式则能与炉内负荷变动相适应,振荡频率如图中实线那样,可强制性变换,因此在熔炼作业开始时就可以投入连续的额定功率。应当说明的是,串联式的优点是指理想状态,在实际熔炼作业中必须有效控制才能接近这种状态。

由于目前国内大都使用并联变频中频感应电炉,本文后述的中频感应电炉均指并联变频中频感应电炉。其它的诸如操作注意事项,也是如此。

5 筑炉与修补

5.1 筑炉

(1) 耐火材料

感应电炉因炉型、熔炼金属种类、炉内部位的不同,应选择与其适应的耐火材料。熔炼铸铁时,铁液容易钻入耐火材料,因而不需耐火砖而使用干式施工的粉状耐火材料。

对于无芯感应电炉,由于炉子结构限制了炉衬厚度,炉衬又受到急冷急热及铁液搅拌的影响,因而选用有一定热稳定性和耐火度高的硅质或熔凝硅石质。当有高温熔炼和高耐火度要求时,可使用高铝质或镁质耐火材料。

对于工频有芯感应电炉,因经常存储铁液并必须长时间保证炉衬寿命,在熔化室的耐火材料

表2 铸铁熔炼用感应电炉的耐火材料
Tab.2 Refractories of induction furnace for cast iron melting

| 炉型 | 使用部位 | 种类 | 化学成分(w_B)(%) | | | | | | |
|----------|-------------|----------|------------------|--------------------------------|-----|-----|--------------------------------|------------------|---|
| | | | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | CaO | Fe ₂ O ₃ | ZrO ₂ | C |
| 无芯感应电炉 | 熔化室 | 硅石质 | >98 | <0.2 | | | <0.5 | | |
| | | 酸性 熔凝硅石质 | >99 | | | | <0.5 | | |
| | | 锆质 | 30~70 | | | | | 20~60 | |
| | | 中性 高铝质 | <15 | >85 | | | | | |
| | | 莫来石质 | 20~30 | 70~80 | | | | | |
| | | 碱性 镁质 | | <10 | >85 | | | | |
| | 尖晶石质 | | 20~30 | 70~80 | | | | | |
| 尖晶石——镁质 | | <25 | | >75 | | | | | |
| 线圈保护部分 | 矾土水泥 | <10 | ≥90 | | | | | | |
| | 硅石水泥 | >83 | <10 | | | | | | |
| | 出铁口部分 | 石墨塑胶 | 70~80 | 5~10 | | | | 15~20 | |
| | | 耐火水泥 | <30 | >70 | | <5 | | | |
| 有芯工频感应电炉 | 上部熔化室 | 高铝质 | <15 | >85 | | <5 | | | |
| | | 矾土水泥 | <5 | >95 | | | | | |
| | 下部感应器 | 高铝质 | <5 | >95 | | | | | |
| | | 镁质 | | <10 | >90 | | | | |
| | 镁——尖晶石质 | | 20~30 | 70~80 | | | | | |
| 接铁液出铁液部分 | 与上部熔化室同硅线石系 | 20~30 | 60~70 | | | | | | |

表3 硅质耐火材料的粒度分布之例

Tab.3 An example of grain distribution of silicate refractory

| 粒度/mm | 天然硅石质 (%) | 熔凝硅石质 (%) |
|--------|-----------|-----------|
| 0~0.25 | 42.2 | 41.2 |
| 0.25~1 | 25.9 | 21.3 |
| 1~4 | 31.8 | 37.5 |

以高铝质为主,而感应器部分因承受更高的温度则宜选用高纯度的高铝质、镁质——尖晶石质的耐火材料。

铸铁熔炼用感应电炉的耐火材料可参考表2选用。

耐火材料的粒度分布虽然由提供材料的厂家独自选择,但粒度组成不适当的话,充填性差,也不能得到结实的烧结层。一般应控制 60 μm 以下微细粒子的配比,以尽可能抑制玻璃化的速度。采用硅质耐火材料的粒度分布,表 3 可作为一例。

对于使用高硅质耐火材料的感应电炉,为了提高烧结性能、高温强度及抗侵蚀能力,可根据熔炼温度的要求在耐火材料中添加适量的无水硼酸。其添加量可按图 10 选取。但是,在炉顶附近的耐火材料,由于熔炼时不与铁液接触,加上装入金属炉料时对其撞击而容易损坏。为了增加该处的强度,在耐火材料中可适当增加无水硼酸的加入量。

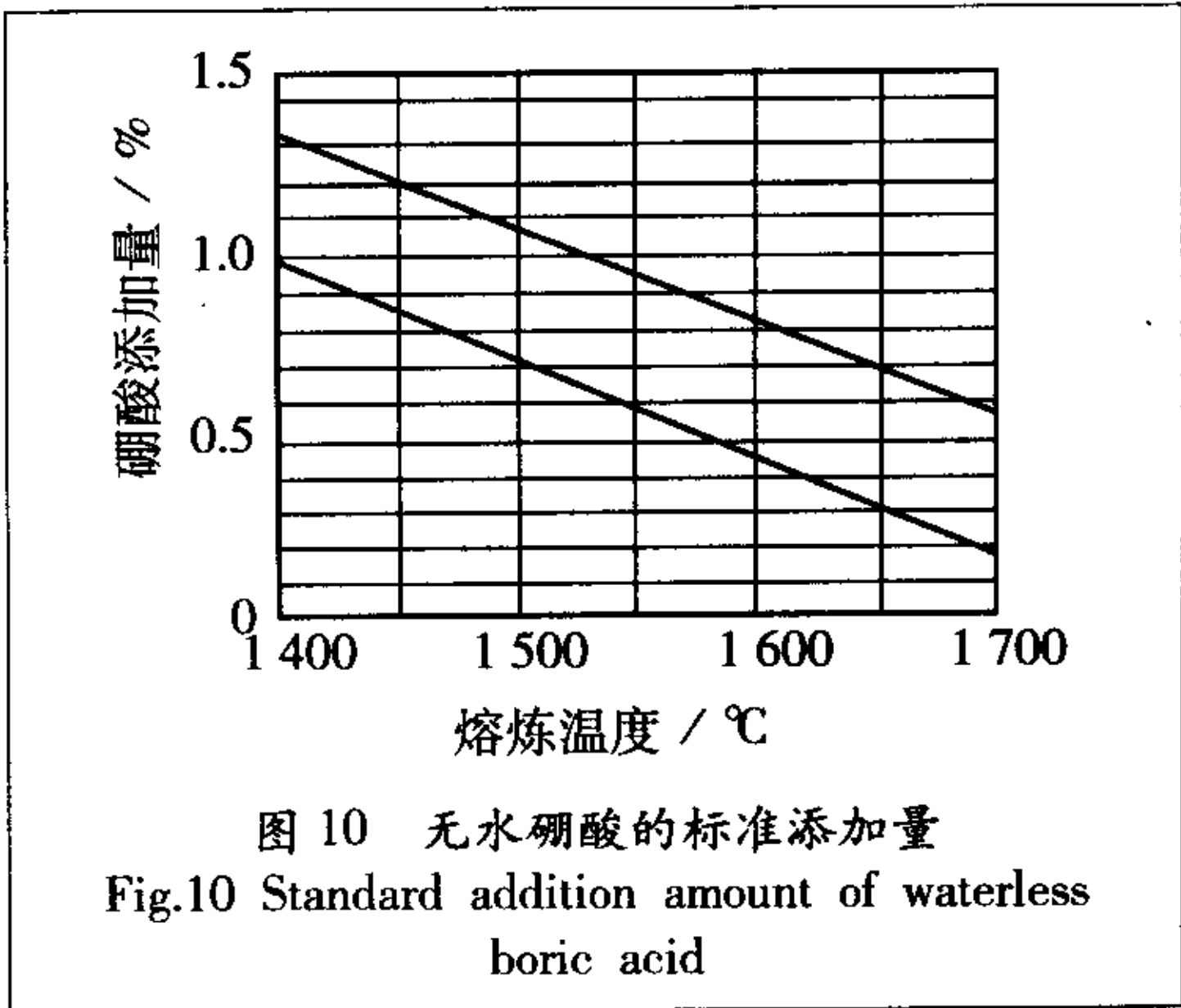


图 10 无水硼酸的标准添加量
Fig.10 Standard addition amount of waterless boric acid

(2) 筑炉施工

筑炉是从炉体解体后开始的。通常根据炉衬及绝缘材料的损坏程度解体至图 7 所示的石棉板或水冷线圈的内侧。若解体至水冷线圈内侧,必须检修线圈水泥。线圈变形和水泥自身的热变形,易使线圈水泥的一部分产生龟裂或脱落。线圈水泥大都使用湿状的铝矾土水泥。

筑炉施工用的型模应是无锈和圆整的。另外

在周围开适量的小孔。这样,烧结时耐火材料中的水分可以从此逸出。

炉周围应打扫干净,以防砂土、草屑等异物混入耐火材料之中。筑炉工的口袋要掏净,连工作鞋都要用耐火粉擦去粘附的泥砂。筑炉工具都要经除锈处理。做好以上的准备工作后才能按如下的程序筑炉。

①筑炉底

筑炉底常用叉形捣固棒捣实。从炉顶测量深度后将过剩的耐火材料刮去,并用水平仪校水平,以使型模垂直放入。

放入型模后,用专用量尺测定型模位置。使型模与线圈水泥之间的间隙均一。然后用塞块塞住。在型模底部,工频感应电炉装入起熔块,而中频感应电炉则装入如生铁那样的表面积少而易于通入感应电流的金属炉料,以防止型模位移。

②筑炉壁

炉壁筑炉施工最易产生分层之处是炉底部位的倾斜部。为此,该处的筑炉应特别小心并以手工捣固为好。捣实前应先将底层的捣结层划毛。

筑炉壁可用手工捣实,也可用振动器捣实。在用人手捣实时,因捣实力因人而异,常以4~6人组成一组,绕着圈交替捣实。每层耐火材料称重后均匀加入,一般厚度为60~70 mm,捣实时间为10~15 min。在采用振动器捣实时,一般先捣型模的一侧。当振动器碰着型模的时候,应由下而上作两次以上的移动,才进行下面的连续移动。不管采用何种筑炉方法,必须牢记如下3点:

- a. 均匀地捣实;
- b. 不让耐火材料的粗粒与细粒分离;
- c. 上下层不产生分层现象。

5.2 烧结

采用酸性耐火材料的工频感应电炉通常由冷料熔炼的方式烧结。中频感应电炉在使用中性而烧结较难的干式耐火材料时,在与金属炉料之间有可能产生电弧而使型模局部熔化、损坏,以至于在未烧结时就滑落。为此,如有几座炉时,最好利用别的炉子的铁液来进行烧结。

酸性耐火材料烧结时,为了防止耐火材料的急剧膨胀,最好至573℃石英变态温度时,以100℃/h以下的慢速升温。在炉料熔化后可以100℃

/h左右的速度升温。当使用熔凝硅石质耐火材料时,可用200℃/h的快速升温。

烧结的保温温度,硅石质耐火材料最低1500℃,一般比通常的熔炼温度高20~30℃。但在使用熔凝硅石质耐火材料时,则以1580~1600℃的温度进行保温。升温至目标温度,保持1~3 h烧结就完成。

为了能使炉壁上部都得到烧结,烧结时的铁液量可比炉容量超出10%。

此外,应当指出,烧结用的金属炉料应使用少锈的,镀锌钢板不能使用。烧结开始时,金属炉料加至线圈高度那样或再多些,在这些炉料熔化后再适时装入金属炉料,以避免仅仅是炉内下部的局部升温。

5.3 炉衬的修补

当炉衬各处有若干的损伤时,必须进行修补,以延长炉衬寿命和防止由于炉衬损伤而造成事故。炉衬的修补部位及方法如下:

(1) 出铁口耐火材料与炉壁接缝处开裂或损伤的修补。

可用不定形耐火材料推打修补,修补范围较大时要用木炭等烘干。

(2) 侧壁开裂的修补

一般,1 mm以下的裂纹不需修补而可以继续使用;1 mm以上,特别是水平方向的裂纹必须修补。可用加入硼酸并混合均匀的筑炉耐火材料经过筛后,用铁丝等工具填补。并在填补后的表面上用加入水玻璃的湿态混合砂抹平。

(3) 侧壁损伤或小范围侵蚀的修补

清除炉渣、残铁后,涂以水玻璃。然后用添加5%~6%水玻璃的混合耐火材料拍打修补,或用 Al_2O_3 不定形耐火材料修补。侵蚀范围稍大时,则放入型模修补。

(4) 底部、侧壁倾斜部的烧损或损伤的修补

炉底部的修补可用加入与新筑炉同量硼酸并混合均匀的耐火材料捣固。

侧壁倾斜部的修补则需装入外径比炉径小50~60 mm、高度比损伤部高出100 mm左右的型模。用振动器捣固,每层捣实厚度为20~30 mm,捣一层划毛后再捣上一层,直至比型模高出10 mm,再将上平面修成一定斜度。