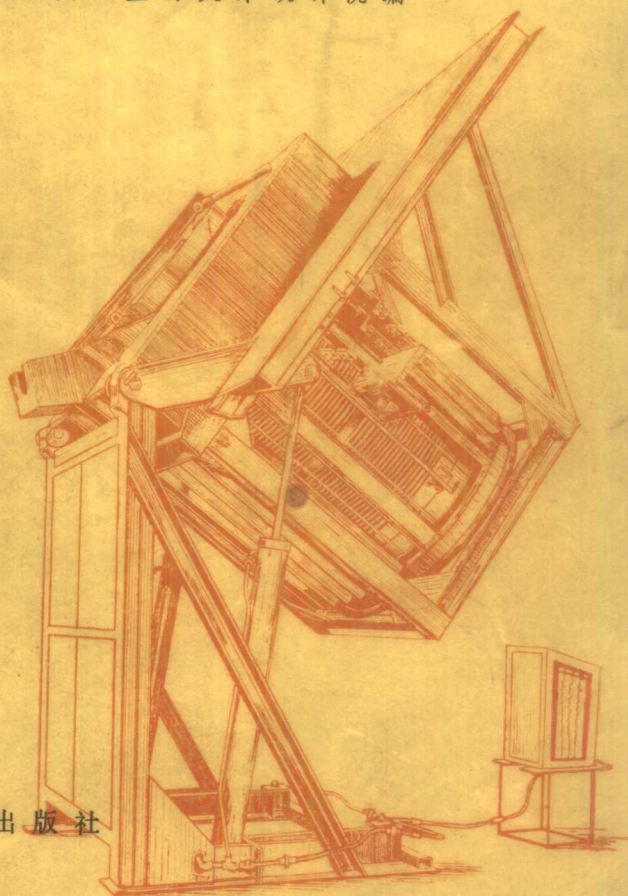


# 无芯工频感应熔化炉

第一机械工业部天津设计院编



机械工业出版社

**无芯工频感应熔化炉**  
**第一机械工业部天津设计院编**

\*

**机械工业出版社出版**（北京阜成门外百万庄南街一号）  
（北京市书刊出版业营业许可証出字第 117 号）

**机械工业出版社印刷厂印刷**

**新华书店北京发行所发行·新华书店经售**

\*

**开本  $787 \times 1092 \frac{1}{32}$  · 印张  $4\frac{4}{16}$  · 插页 1 · 字数 91 千字**

**1973 年 10 月北京第一版 · 1973 年 10 月北京第一次印刷**

**印数 00,001—17,500 · 定价 0.47 元**

\*

**统一书号：15033 · 4199**

# 毛主席语录

客观现实世界的变化运动永远没有完结，人们在实践中对于真理的认识也就永远没有完结。

人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

## 前 言

无芯工频感应熔化炉是一种先进而又用途广泛的熔化设备。我国自1964年7月1日建成第一台工频熔化炉后，几年来这种新型熔化设备在我国社会主义建设事业中，正日益发挥作用和得到进一步的发展。

本书是我们在学习各兄弟单位生产实践和国内、外有关资料的基础上，结合我们的工作实践编写的。附录中列出计算所需的各种理化常数及国外几家公司的工频炉系列产品，供设计计算和确定基本参数时参考。此外，还介绍了国外认为是铸造业中使用无芯感应熔化炉的一个新发展的三倍频率（150赫兹）炉。

本书由我院工业炉组吴德荣同志整理、编写。

我们希望通过这本书，能有助于无芯工频感应熔化炉在我国的推广、使用。由于我们接触无芯工频感应熔化炉的时间很短，又缺少实践知识，文中的错误和不当之处，请予以批评指正。

第一机械工业部

天 津 设 计 院

1973年2月

统一书号：15033·4199·4

定 价：0.47 元

# 目 次

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 第一章 概述 .....                      | 1   |
| 一、什么叫无芯工频感应熔化炉 .....              | 1   |
| 二、感应熔化炉的特点 .....                  | 1   |
| 三、感应加热的基本原理 .....                 | 3   |
| 四、无芯工频感应熔化炉在我国的发展 .....           | 7   |
| 五、国外无芯工频感应熔化炉简介 .....             | 9   |
| 第二章 无芯工频感应熔化炉的构造 .....            | 10  |
| 一、炉体 .....                        | 10  |
| 二、水冷系统 .....                      | 20  |
| 三、炉架及炉子翻转机构 .....                 | 20  |
| 第三章 无芯工频感应熔化炉的计算 .....            | 24  |
| 一、计算所需的原始数据 .....                 | 25  |
| 二、确定感应器和坩埚的几何尺寸 .....             | 26  |
| 三、炉子有功功率 $P_{\sigma_2}$ 的确定 ..... | 29  |
| 四、炉子电气参数计算 .....                  | 32  |
| 五、感应器冷却计算 .....                   | 52  |
| 六、磁轭计算 .....                      | 58  |
| 七、拱顶高度 $K_{拱}$ 的计算 .....          | 61  |
| 八、无芯工频感应熔化炉计算实例 .....             | 62  |
| 九、能量消耗 .....                      | 84  |
| 第四章 无芯工频感应熔化炉的供电 .....            | 88  |
| 一、三相功率的平衡及功率平衡器 .....             | 88  |
| 二、我国无芯工频感应熔化炉的几种常用的供电线路 .....     | 91  |
| 三、“三倍频率”感应熔化炉的介绍 .....            | 99  |
| 附 录 .....                         | 107 |

# 第一章 概述

## 一、什么叫无芯工频感应熔化炉

无芯工频感应熔化炉，是利用电磁感应原理熔化金属的感应炉的一种。感应熔化炉通常根据使用的电流频率分为：高频感应炉，电流频率在 10000 赫兹以上；中频感应炉，电流频率在 10000 赫兹以下而又远高于工业频率，通常生产的中频感应炉频率为 2500 赫兹；工频感应炉，直接使用 50 赫兹的工频电流。有时，也简单地将使用工频以上的频率为电源的感应炉，称为高频感应炉；而将使用工业频率 50 赫兹（国外还有 42、60 赫兹的）的感应炉，称为低频感应炉。

在工频感应熔化炉中，根据炉子结构有无铁芯穿过被熔化金属的熔池，这一显著特点，分为无铁芯工频感应熔化炉及有铁芯工频感应熔化炉。后者因其具有围绕铁芯的液体金属熔沟，又称为沟槽式感应炉。

因此，根据频率高低和有无铁芯的特点，可以很明显地将无芯工频感应熔化炉与其他感应熔化炉加以区别。

## 二、感应熔化炉的特点

用于金属和合金熔化的电热设备，通常是电弧炉和感应炉两种。同电弧炉相比较，感应熔化炉有以下几个显著特点：

1. 在被加热金属本身感应产生强大的感应电流，引起金属的加热和熔化，这就避免了像电弧炉那样的局部高温，因而温度均匀，烧损小。这对于贵重金属及稀有合金十分重要，例如镍、铬、钒、钨在感应炉中的烧损比电弧炉小两倍。

2. 由于电磁力引起金属搅动, 熔化所得的金属成分均匀, 质量高, 非金属夹杂少, 吸收氢气比电弧炉和平炉约减少40%。

3. 炉温易于控制, 温度最高可达1600℃以上, 因而可以广泛应用于黑色及有色金属的熔化, 也可熔炼各种牌号的高级铸铁、合金铸铁、可锻铸铁、球墨铸铁及各种牌号的钢。

4. 熔化升温快, 生产效率高。

5. 设备周围温度低、烟尘少、噪音小, 作业环境较好。

6. 无须预热、放热等装置, 熔化随时都可以开始或停止, 因此也适用于间歇作业。并可与冲天炉进行双联操作, 在冲天炉中进行铁水熔化, 而在无芯工频炉中进行升温、保温。

7. 没有电极消耗, 其他辅助材料消耗量也很少。同冲天炉相比较, 除了上述优点之外, 还有不用焦炭, 因而不受焦炭来源的限制, 特别是工频炉熔化的铁水质量高, 是冲天炉不能比拟的。在生产成本方面, 从上海和沈阳的工厂实践数据看, 工频熔化炉生产每吨合格铸件的成本与冲天炉相近, 在使用切屑废料熔化时的成本, 甚至还要低一些。

感应熔化炉也有缺点, 这就是:

1. 对原材料质量要求较高, 多半是进行金属及合金的返回熔炼, 一般最后成分和原始配料成分相差不多。

2. 炉渣本身不能感应产生电流, 炉渣的升温是熔融金属间接加热的结果。因此, 炉渣的温度比金属温度低。这种比较冷的炉渣, 冶金反应性能差, 使钢液同炉渣之间的精炼反应不易进行。这一缺点决定感应炉最宜于金属熔化。而作为金属及合金的冶炼提纯, 不如电弧炉。

3. 感应炉原始功率因数低, 须要有相当数量的补偿电容

器，以提高功率因数。此外，无芯工频感应炉多为单相负荷，一般需要有三相平衡装置。这些均使感应炉附属设备价格高，一次投资较多。对于中频和高频感应炉，还需要有频率变换装置。

### 三、感应加热的基本原理

无芯工频感应熔化炉的示意图如图 1-1 所示。即在一个耐火材料打结的坩埚外面，围绕一个称为感应器的线圈。当坩埚外之感应线圈通以交变电流时，在装于坩埚内的被熔化金属中感应产生交变磁场，此时感应器线圈相当于变压器之原绕组，炉料金属则为短路连接的副绕组。炉料中的交变磁场产生感应电势，因其短路连接而在炉料中感应产生出强大的电流，此电流使炉料加热和熔

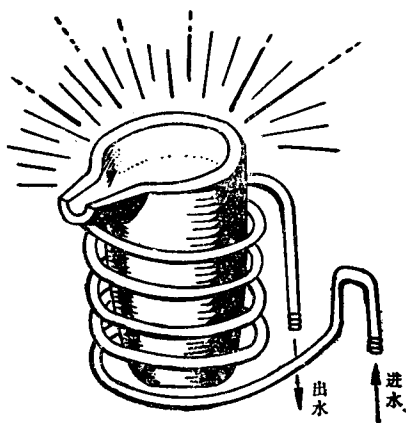


图1-1 无芯感应加热原理图

化。这就是说，无芯感应熔化炉像一个空气芯变压器，将能量从线圈感应传递到炉料中。此时，供给感应器线圈的交流电能转变为电磁能，电磁能在炉料中重新变为电能，然后这电能转变为热能。由于金属熔化是感应电流受电阻作用的结果，因此，金属的电阻愈大，则加热效果愈明显，例如钢的电阻比铜大，则在同样条件下钢的加热速度比铜高。对于非导电材料，感应电势不能形成感应电流，因而不能实现感应

加热。

有铁芯感应炉的工作原理与无芯感应炉是类似的。不过它有一个闭合的铁芯，可以强有力地集中感应磁力线而减少散失，从而大大提高了设备的原始效率。

无芯感应熔化炉中，感应线圈交变电流所产生的磁场，磁力线只有一部分通过炉料。因此，对无芯炉来说，坩埚的壁厚、炉料的磁性、料块的大小和形状等，对熔炼有着更大的影响。

对于铁磁性金属炉料，当温度在居里点以下时（即在740~770℃以下），由于炉料具有很大的磁性，此时它不仅起着副绕组和负载的作用，而且是一个没有闭合的铁芯。这时炉料被加热不仅是由于感应电流，还由于交变磁场的磁滞损失导致发热。在居里点以上，铁磁性物质失去自己的磁性，感应炉的工作变成类似空气变压器的工作，即没有铁芯的变压器。

电流在炉料中分布是不均匀的，炉料中的感应电流绝大部分集中于表面，电流密度从表面向中心近似按一指数函数迅速下降：

$$G_x = G_0 e^{-\frac{x}{\delta}} \quad (1-1)$$

式中  $G_0$ ——表面电流密度；

$x$ ——从表面往中心的距离；

$G_x$ ——距表面为  $x$  处的电流密度；

$\delta$ ——电流渗透深度。

所谓电流渗透深度  $\delta$ ，是指电流密度由表面向中心减少到表面密度的  $1/e$ ，即减少63.2%的距离。在工程计算中常假定全部电流集中于渗透深度  $\delta$  层内，且在  $\delta$  深度内电流是

均匀分布的，以大大简化计算过程，而其计算结果还是相当准确的。

电流渗透深度  $\delta$  按下式计算：

$$\delta = 5030 \sqrt{\rho / f \mu} \text{ (厘米)} \quad (1-2)$$

式中  $\rho$  —— 电阻率 (欧姆·厘米)；

$f$  —— 电流频率 (赫兹)；

$\mu$  —— 相对导磁率。

从式 (1-2) 中可知，对一定的被熔化金属来说， $\rho$ 、 $\mu$  为一定值。频率  $f$  越高，渗透深度  $\delta$  越小。电流密度趋于表面的这种现象，称为趋肤效应。显然频率越高，趋肤效应越明显。 $\delta$  值以厘米为单位。对各种金属在不同频率下的渗透深度值见表1-1。

表1-1 金属或合金在不同频率  $f$  下的  $\delta$  值 (厘米)

| 金属材料 | 频率 (赫兹) |  | 25   |       | 50   |      | 500  |      | 1000 |      | 10000 |      |
|------|---------|--|------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|------|
|      | 物 态     |  | 固 体  |       | 固 体  |      | 固 体  |      | 固 体  |      | 固 体   |      |
|      | 材 料     |  | 固 体  | 液 体   | 固 体  | 液 体  | 固 体  | 液 体  | 固 体  | 液 体  | 固 体   | 液 体  |
| 铜    |         |  | 1.32 | 4.48  | 1.0  | 3.34 | 0.29 | 1.1  | 0.21 | 0.75 | 0.067 | 0.23 |
| 黄铜   |         |  | 2.50 | 6.40  | 1.77 | 4.53 | 0.56 | 1.4  | 0.4  | 1.0  | 0.12  | 0.3  |
| 锌    |         |  | 2.46 | 5.80  | 1.75 | 4.12 | 0.53 | 1.3  | 0.38 | 0.92 | 0.12  | 0.29 |
| 铝    |         |  | 1.7  | 5.2   | 1.2  | 3.68 | 0.38 | 1.16 | 0.27 | 0.82 | 0.085 | 0.26 |
| 镍    |         |  | 3.3  | 10.5  | 2.34 | 7.44 | 0.74 | 2.35 | 0.52 | 1.67 | 0.16  | 0.53 |
| 钢    |         |  | 0.32 | 10.08 | 0.29 | 7.13 | 0.07 | 2.14 | 0.05 | 1.51 | 0.015 | 0.47 |

表 1-1 中的数据说明了电流频率  $f$  对感应电流在金属表面层的渗透深度  $\delta$  的巨大影响，而频率  $f$  和渗透深度  $\delta$  从理论和实践上均证明，对于感应炉的熔化工作有重要的意义。

在国外的感应炉资料和文献中，几乎无一例外地提出，感应坩埚直径  $d$  应当显著地大于炉料的渗透深度  $\delta$ ，才会得到满意的感应电炉工作效率，其根据是当  $d/\delta$  小于 2 时，炉

料吸收的有功功率就急剧下降，同时在理论上也导出炉料吸收的功率可按下式计算：

$$P_{a_2} = K_{形} I_1^2 W_1^2 \sqrt{\mu f \rho} \quad (1-3)$$

式中  $P_{a_2}$ ——炉料吸收的功率；

$I_1$ ——感应器线圈电流；

$W_1$ ——线圈匝数；

$\mu$ ——相对导磁率；

$f$ ——频率；

$\rho$ ——炉料的电阻率；

$K_{形}$ ——根据炉料形状取的条件常数。

由式 (1-3) 可知，在匝数一定时，为了控制线圈不过热，线圈电流  $I_1$  也有一定范围， $\mu$ 、 $\rho$  随被熔化的金属材料而定，则频率越高，炉料吸收功率  $P_{a_2}$  也就越大。因此，如果控制感应线圈电流，频率越高，越能够增大额定功率，即高频炉具有对于一定的熔化量，能够负载更大功率的优点。对于小容量的炉子，为使坩埚直径  $d$  对渗透深度  $\delta$  有较大的比值，得到较好的熔化效率，在  $d$  值不大的情况下，就采取增高频率以减小  $\delta$  的办法。这就是说，炉子容量越小，电流频率应该越高。反之，低频炉容量越大越有利，最好做较大的低频感应炉。由此，进而提出所谓感应熔化炉的最小经济容量问题。即对于每一频率范围，存在着一个炉子尺寸的下限值（合适的最小经济容量），利用工频电流最小的经济容量约为 750 公斤；利用三倍频率（150 赫兹）时，最小经济容量约为 250 公斤；利用中频（1000~10000 赫兹），当为 1000 赫兹时，最小经济容量为 75 公斤；10000 赫兹时，此容量可为 8 公斤。这就是说，工频炉容量以较大为宜，太小不经济，频率越高越能够建更小的而且经济的无芯感应熔化炉。在上述理

论原则指导下,国外的工频感应熔化炉都具有比较大的容量。

我国在发展无芯工频感应熔化炉中,没有受上述理论的束缚,根据自己的需要和条件,成功地建造了一些比所谓“最小经济容量”小得多的工频感应熔化炉,例如各地普遍建造的250公斤工频熔钢炉,还有小到100公斤容量的熔钢炉,都取得了较好的熔炼效果,打破了建1吨以下的工频炉是不合理的,甚至是不可能的说法。根据我国的特点,辩证地处理经济容量和实际需要的关系,从实际出发迅速地发展了自己的工频熔化炉系列。

#### 四、无芯工频感应熔化炉在我国的发展

无芯工频感应熔化炉的迅速发展,在世界上也只有二十几年的历史。我国第一台无芯工频感应熔化炉于1964年建成,容量为1.5吨。为了满足日益发展的精密铸造和其他多种用途的需要,相继制造了250公斤容量的小型工频感应熔化炉,以及150公斤至100公斤容量的炉子。在熔化有色金属方面,无芯工频熔化炉也得到了发展,最小容量为60公斤,效果很好。最近几年还设计、制造了500公斤、700公斤、1.5吨、3吨和10吨等大容量的无芯工频熔化炉。

工频熔化炉这种质量高、用途广、使用维修方便的熔化设备,深受工人欢迎,目前正在迅速地发展。

为什么无芯工频熔化炉在我国发展如此迅速呢?这是因为工频炉同电弧炉相比,具有如前所述一般感应熔化炉的优点,而且一般同容量炉,工频炉的变压器安装容量要小50%以上,如1.5吨电弧炉为1200千伏安,工频炉为560千伏安。同时工频炉同中频炉和高频炉相比,不需要复杂而昂贵的中频、高频发生装置,使成本大为降低,制造容易。现在我国

已有的工频炉，几乎都是各工厂自行制造的。工频炉除一些标准电气设备外，炉体很简单，便于自己制作，这是工频感应熔化炉迅速发展的重要原因。工频炉除了初投资比电弧炉略高之外，产品质量、劳动条件、电力消耗、原材料消耗等指标，都比电弧炉好。而且在进行投资比较时，工频炉现在因无标准产品，各厂制造条件不同，差别很大，有的工厂调配合理就不比电弧炉投资高。如沈阳某厂利用一台弃置的5吨电弧炉的2250千伏安变压器，改装建造三台1.5吨无芯工频熔化炉，投资就很少，使用屑料时熔化成本比冲天炉还低。随着工频熔化炉的定型和系列化、标准化，特别是由于工业需要，促使工业用的单相移相电容器的大量生产，工频感应熔化炉的制造成本必将显著降低。

在实践中还会碰到是选用无芯工频熔化炉还是有芯工频熔化炉的问题。对这个问题要进行具体分析，各地各工厂也有自己的具体条件。有芯工频熔化炉因具有原始功率因数高（ $\cos \varphi$  可达0.5以上），设备投资少（较无芯炉少50%以上）的优点，在有色金属熔化中，特别是铜、铝合金，广泛应用。我国有芯炉在试验成功新型单向流动闭槽式有芯工频熔化炉后，更提高了炉子的电热效率，用于熔化黑色金属（如生铁）也是成功的。一些工厂在较大的有芯工频熔化炉上做成三相供电（即三组铁芯，三只熔沟），比无芯工频熔化炉的单相负荷，更可节省三相平衡器。由于上述原因，有芯工频熔化炉在我国有了相当的发展。但它在适应多品种、间歇生产等方面有很大困难，尤其熔沟的打结和烧结，制造既困难，寿命又较低。目前基本上只用于化铁，用于熔化铸钢，熔沟寿命过短。无芯工频熔化炉则在熔化金属种类和生产的间歇问题上，都具有很大的灵活性。炉衬的打结、维修也易于进行。

因此，尽管无芯工频熔化炉一次投资较高，仍然得到了迅速发展，特别是在日新月异的精密铸造新技术推广中，许多工厂新建的精密铸造车间都采用了无芯工频感应熔化炉。

### 五、国外无芯工频感应熔化炉简介

无芯工频熔化炉开始研究是1916年，第一台无芯工频熔化炉砌筑于1929年，曾用于熔化250公斤黄铜。1931年及1932年对工频炉的理论及计算，有了较系统的论述。用来熔化轻金属及合金的无芯感应熔化炉的蓬勃发展，开始于1950年。用于黑色金属始于1954年，而熔化钢的炉子则在1951年才建成。

由于无芯工频炉的一系列优点，近十几年来在国外得到了迅速发展。许多国家如西德、日本、瑞典、英国、瑞士、比利时、意大利、罗马尼亚、苏联等国，都有专门的生产公司，生产各种容量的成套设备。国外较有名的生产工频炉的公司及其产品系列见附录。

目前最大的无芯工频熔化炉容量为65吨。安装在美国一家汽车厂中，功率为17000千瓦，熔化率为40吨/时，用于熔化生铁和保温。瑞典ASEA公司最大的无芯工频炉为60吨，功率为5000千瓦。日本无芯工频熔化炉发展虽较晚，但速度很快，1964年日本只有无芯工频熔化炉30台，1970年达到190台。此外，三倍频率炉从英国Adjax公司开始生产，目前已在不少国家迅速发展。

## 第二章 无芯工频感应 熔化炉的构造

无芯工频感应熔化炉如图 2-1 所示,其主要部分为炉体、水冷系统、炉子翻转机构及炉子供电系统和电气设备。

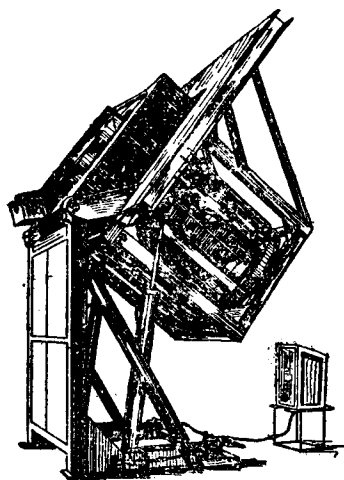


图 2-1

### 一、炉 体

无芯工频熔化炉的本身部分称为炉体,如图 2-2 所示。

炉体由炉架、感应器、坩埚、磁轭及紧固装置等组成。其结构与高频炉和中频炉相似。被熔化的炉料置于耐火材料打结的坩埚之中,坩埚外围绕着一层绝热和绝缘层,在绝缘层外面紧紧地贴放着由多匝线圈绕制成的感应线圈(感应器),在感应线圈的圆周上分布着磁轭(导磁体),磁轭与线圈

绝缘并紧贴着，它坐落在下压圈上并承受着炉顶的重量，把感应器夹持箝紧，好像炉子的几根支柱。

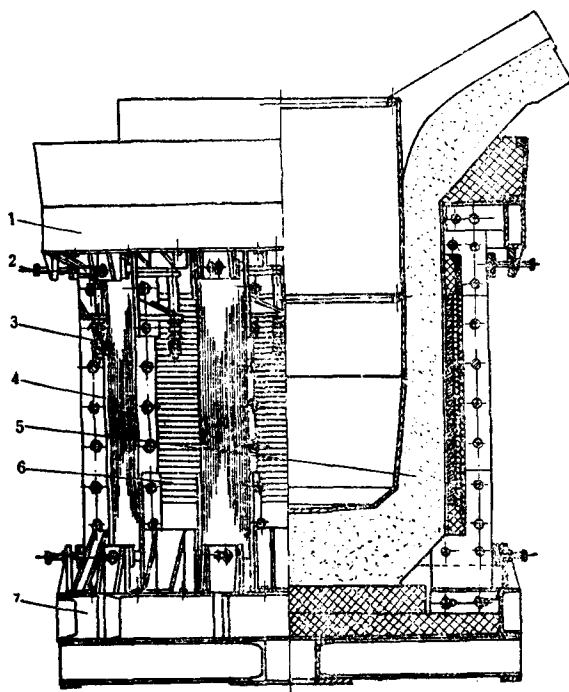


图2-2 炉体结构图

1—上压圈；2—感应圈定位装置；3—感应圈压紧装置；  
4—磁轭；5—炉衬；6—感应线圈；7—下压圈

### 1. 坩埚

坩埚系采用耐火材料打结然后烧结而成。对于低熔点的金属，如铝合金也可使用铸铁坩埚或钢板焊接坩埚。

(1) 坩埚材料 打结坩埚的材料分酸性材料和碱性材料两种。目前国内的工频熔化炉大都使用石英砂等酸性材料