


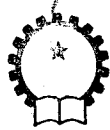
黎克仕 编著  
机械工业出版社



感应炉  
熔炼铸铁

# 感应炉熔炼铸铁

黎克仕 编著



机械工业出版社

---

本书着重介绍感应炉在铸铁生产中的应用，内容主要包括：  
铸铁生产中的感应炉，感应熔炼的冶金特点，铸铁感应熔炼和双  
联熔炼的工艺过程、铸铁质量及其技术经济分析。

本书可供从事铸铁生产的工程技术人员和科研工作者参考，  
并可作为大专院校铸造专业师生的参考书，对从事感应炉研制工  
作的工程技术人员也有一定的参考价值。

## 感应炉熔炼铸铁

黎克仕 编著

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证出字第117号）

香河县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本850×1168 1/32·印张11 1/4·字数 296 千字

1986年8月河北第一版·1986年8月河北第一次印刷

印数 0,001—2,660 定价3.30元

统一书号：15033·5913

## 前 言

国民经济各工业部门广泛使用的机械产品中，铸铁件约占整个机器重量的45~90%，表明铸铁件是机械产品最重要的组成部分。铸铁熔炼是铸铁件生产的首要环节，也是决定铸铁件质量的重要因素之一。

采用感应炉熔炼和双联熔炼铸铁，是改进铸铁熔炼工艺、提高铸铁质量的有效途径之一，是国内外铸铁生产技术发展的方向。在生产铸铁件的主要国家中，感应炉无例外地是主要的熔炼炉和最主要的双联用炉。目前，美国和日本用感应炉熔炼的铸铁件占铸铁件总产量的比例都已达到或超过20%；苏联用感应炉熔炼和双联熔炼的铸铁件，1980年已达到210.8万吨，占铸铁件总产量的11.7%；在欧洲一些电力供应充足的国家里，铸铁的熔炼基本上已用感应炉熔炼和双联熔炼取代了冲天炉熔炼。

感应炉熔炼和双联熔炼铸铁，可以准确地控制铸铁的成分和温度，具有产品质量好、铸件成品率高、劳动强度低、环境污染少等一系列优点，与其它铸铁熔炼炉相比，更能适应和满足现代化铸造生产的要求，从而为减小铸件壁厚和提高机械零件寿命创造了前提，这对机械工业以至整个国民经济都具有重要的意义。

我国采用感应炉熔炼铸铁已有二十年的历史，积累了许多经验。我国已能生产20吨工频无芯感应炉和30吨有芯感应炉，这在我国更加广泛地采用感应炉熔炼和双联熔炼打下了基础。现在，在我国更加广泛地采用感应炉熔炼和双联熔炼打下了基础。现在，我国的汽车、农机、机械、冶金、轻工、机床、交通、化工、国防等工业部门的铸造车间中，采用感应炉熔炼和双联熔炼的日益增多。

但是，由于感应炉的冶金过程与冲天炉有本质上的差别，许多操作者没有经过专门的培训，还不能很好地掌握感应炉熔炼和双联熔炼铸铁的特点，因而感应炉的优越性没有得到充分利用，

#### IV

不同程度上存在着这样或那样的问题，需要普遍提高感应炉操作者的技术水平和操作技能。

本书根据本人的实际经验并参考了国外资料编著而成，力图阐述感应炉熔炼和双联熔炼铸铁的主要问题，在内容上力求理论与实际相结合。

由于编著者理论水平和实际工作经验所限，书中错误和不妥之处在所难免，恳切希望广大读者批评指正。

在本书编写过程中，曾多方面得到许多同志有益的指教和热情的支持，又承蒙第二汽车制造厂李应堂高级工程师和胡耀荣工程师审阅全书并提出宝贵的意见，在此向他们表示诚挚的感谢！

编著者

一九八三年十月

# 目 录

## 前言

第一章 铸铁生产中的感应炉.....	1
一、工频无芯感应炉.....	1
(一) 炉体.....	1
(二) 电气设备.....	9
(三) 水冷系统.....	11
(四) 布置.....	13
(五) 矮线圈工频无芯感应炉.....	16
(六) 卧式工频无芯感应炉.....	22
二、有芯感应炉.....	23
三、感应浇注炉.....	26
(一) 倾转式感应浇注炉.....	26
(二) 气压式感应浇注炉.....	27
(三) 塞杆式感应浇注炉.....	29
(四) 气压塞杆式感应浇注炉.....	30
第二章 感应熔炼的冶金特点.....	31
一、感应炉中相的相互作用.....	31
二、主要的化学反应.....	36
(一) 铁水与炉衬的反应.....	36
(二) 渣与炉衬的反应.....	42
(三) 金属杂质与炉衬的反应.....	46
三、增碳.....	49
(一) 增碳剂.....	49
(二) 增碳效果.....	53
四、脱硫.....	54
(一) 用氰氨化钙脱硫.....	54
(二) 用碳化钙脱硫.....	55
(三) 脱硫渣系的选择.....	58
(四) 炉外脱硫.....	59

## VI

五、烧损与吸收	61
(一)烧损	61
(二)吸收	63
(三)熔炼条件对元素行为的影响	67
(四)炉衬材料对元素行为的影响	71
第三章 铸铁的感应熔炼	78
一、炉料的处理	78
(一)感应炉炉料	78
(二)炉料脱油	79
(三)屑料除锈	81
二、炉料预热	82
(一)炉料预热的优点	82
(二)炉料预热温度	82
(三)炉料预热方法	86
(四)炉料预热装置	87
三、装料和出铁	94
(一)炉料的供应	94
(二)炉料的配料	94
(三)送料方式	96
(四)装料方式	97
(五)铁水的运送	99
四、熔炼	101
(一)熔炼方式	101
(二)熔炼过程	102
(三)温度制度	107
(四)还原熔炼	109
(五)渣的作用	115
(六)熔炼球墨铸铁	117
(七)用海绵铁熔炼铸铁	123
(八)感应炉熔炼铸铁的生态问题	125
五、熔炼过程的电气控制	127
(一)功率因数的补偿	127
(二)三相平衡的调整	131

(三) 功率的调节.....	141
第四章 铸铁的双联熔炼.....	143
一、铸铁熔炼方法的选择.....	143
二、铸铁的双联熔炼.....	149
(一) 双联形式的选择.....	149
(二) 双联熔炼的熔化炉.....	151
(三) 双联熔炼的保温炉或精炼炉.....	152
(四) 常用的双联熔炼形式.....	155
三、球化处理过的铁水在感应炉中保温.....	185
(一) 在中频感应炉中保温.....	185
(二) 在有芯感应炉中保温.....	186
(三) 在密封式有芯感应炉中保温.....	189
(四) 在感应浇注炉中保温.....	200
四、铸铁的三联熔炼.....	203
(一) 三联熔炼的特点.....	206
(二) 三联熔炼球墨铸铁.....	206
(三) 三联熔炼灰铸铁.....	208
第五章 感应炉熔炼和双联熔炼的铸铁质量.....	211
一、化学成分.....	211
(一) 感应炉铸铁的化学成分.....	211
(二) 有芯感应炉双联熔炼的铸铁化学成分.....	213
(三) 无芯感应炉双联熔炼的铸铁化学成分.....	218
二、铸铁质量.....	223
(一) 气体含量.....	223
(二) 结晶特性.....	225
(三) 组织.....	231
(四) 铸造性能.....	236
(五) 机械性能.....	233
三、炉料对感应炉铸铁质量的影响.....	244
(一) 废钢.....	244
(二) 返回料.....	247
(三) 屑料.....	249
(四) 碳化硅.....	253



## VII

四、各因素对铸铁质量的综合影响·····	264
第六章 感应炉熔炼和双联熔炼铸铁的技术经济特点·····	270
一、能量平衡·····	270
(一) 能量平衡的支出项目·····	270
(二) 能量平衡的收入项目·····	273
(三) 材料平衡表·····	273
(四) 能量平衡表·····	287
(五) 双联熔炼铸铁的能量平衡·····	292
(六) 炉料预热对能量平衡的影响·····	294
二、技术经济指标的影响因素·····	296
(一) 容量·····	296
(二) 功率·····	299
(三) 功率因数·····	304
(四) 炉衬厚度·····	305
三、提高技术经济指标的途径·····	308
(一) 配料制度·····	308
(二) 装料制度·····	318
(三) 熔炼制度·····	325
(四) 温度制度·····	327
(五) 工作制度·····	329
(六) 热绝缘制度·····	336
四、感应炉熔炼和双联熔炼铸铁的经济效果·····	341
(一) 感应炉铸铁和冲天炉铸铁费用的比较·····	341
(二) 双联熔炼铸铁费用的比较·····	345
(三) 减少感应炉铸铁费用的途径·····	347
主要参考文献·····	351

# 第一章 铸铁生产中的感应炉

## 一、工频无芯感应炉

### (一) 炉体

工频无芯感应炉一般简称工频炉，主要由炉体、电气设备和水冷系统三部分组成。炉体是炉子的主体部分，主要包括炉架、磁轭、炉盖、倾炉机构、称重装置以及感应器和炉衬。

#### 1. 炉架

国产10吨和20吨工频炉的炉体为整体筒壳式结构，在筒壳内安装磁轭和感应器。5吨以下的炉子，炉体为框架式结构，由感应器、磁轭及炉衬配以型钢构成一个整体。

炉架一般用型钢和钢板焊接而成，其作用是把炉子的部件和零件连接在一起，使之成为一个整体。筒壳式结构的炉架又有活动炉架和固定炉架两部分，用螺钉把固定炉架固定在钢筋混凝土基础上，承受炉体与铁水重量，活动炉架起加固炉体的作用。

#### 2. 磁轭

磁轭的作用是对炉架进行磁屏蔽，引导感应器外侧的磁通比较集中地沿磁阻最小的磁轭通过，减少通过炉架的漏磁通，提高炉子的电效率，同时还可以简化炉架结构，增加炉体结构强度，使感应器在强大电磁力作用下不位移和不变形。采用磁轭后，漏磁通70~90%通过磁轭，只有10~30%通过炉架。

磁轭用优质硅钢片叠制而成，常用的是厚0.35毫米的冷轧硅钢片，用0.5毫米厚的热轧硅钢片时铁损大一些。为了使叠装的硅钢片挺直，两侧应加用压板，整条压板比分块压板的压直效果好。磁轭的穿孔和叠装是一道重要的工序，处理不好，会引起磁轭局部发热。

磁轭一般均匀分布在感应器外围，不同容量的炉子的磁轭数

量不等。磁轭的上、下两端用螺钉分别固定连接在感应器上、下压圈上。松动调整螺钉，沿水平方向调节磁轭位置，便于安装和拆卸感应器，也便于调整感应器中心位置。

磁轭屏蔽的优点是磁轭的铁损小，但磁轭比较重（如1.5吨工频炉的磁轭重0.5吨，10吨工频炉的磁轭重3.5吨），不仅增加炉子的倾动力，而且还要加强炉子结构的稳固性。

### 3. 炉盖

炉盖的作用是减少炉中铁水的辐射热损失和使铁水温度均匀。炉子不盖炉盖，高温铁水辐射既损失大量热量，又使车间环境温度升高，劳动条件恶化，而且熔池表面与熔池内部铁水的温差比盖上炉盖时大，对铁水温度均匀不利。炉盖有三种主要的结构形式。

（1）揭开式炉盖 炉盖用两个支臂和支承在炉子上的轴刚性连接。优点是除了轴座之外，平台上没有其它紧固件或零件，容易保持整洁；炉口两侧没有绊脚的凸缘，比较安全；揭开时炉盖斜放，减少对操作人员的辐射热。缺点是受炉盖转轴限制，往复式给料器或料桶加料时只能从侧面或上面给炉子送料。

（2）移动式炉盖 炉盖利用滑轮和装在轨道下面的链条在轨道上移动。优点是结构高度低，可以从各个方向向炉子加料。缺点是平台上装有轨道和与之连接的结构件，不易保持整洁，料桶不能直接坐到炉口上，对底开门料桶的加料有困难。

（3）提升转动式炉盖 先将炉盖提起一个高度后，再向侧面转动。优点是操作平台不受结构件妨碍，可从后面和侧面进行各种方式的加料，炉盖可以安装在炉子中心线的左方或右方，比较灵活。这种炉盖用得比较多。

### 4. 倾炉机构

对倾炉机构的要求包括：平稳地把炉子向前倾动 $95^{\circ}\sim 100^{\circ}$ ，保证很快地倒出或倒空炉中铁水；出铁时铁水运动方向尽可能保持不变；大容量炉子要能后倾 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ，以方便扒渣。

倾炉机构的转动轴通过出铁嘴时，出铁过程中铁水流方向变

动小，接受铁水的铁水包移动位置也小，甚至可以不移动，但要有较大的倾动力。转动轴通过炉子重心时，倾动力小，但出铁过程中铁水流方向变动较大，要相应调整铁水包的位置。转动轴先绕重心转动一个小角度后再绕出铁嘴转动 $95^{\circ}\sim 100^{\circ}$ 时，倾动力小，出铁过程中铁水流方向变化也小，但结构比较复杂。

倾炉机构的传动方式，小容量炉子一般用结构简单的机电传动，转动轴通常在炉子侧面，出铁时出铁嘴位移比较大。电机运转惯性大，准确控制出铁量比较困难，运行不够平稳。中、大容量炉子一般用液压倾动，动作平稳，可以实现炉子后倾。转动轴在出铁嘴下面，出铁时出铁嘴位移小。但炉子底下要有较大的空间安装液压装置，而且液压系统也比较复杂。

### 5. 称重装置

为了准确控制熔炼进程，称重装置应作为中、大容量炉子的一个组成部分。称重装置用压力传感器为工作元件，装在炉子框架底部，以便承受整个炉子的重量，图1-1示出原理图。

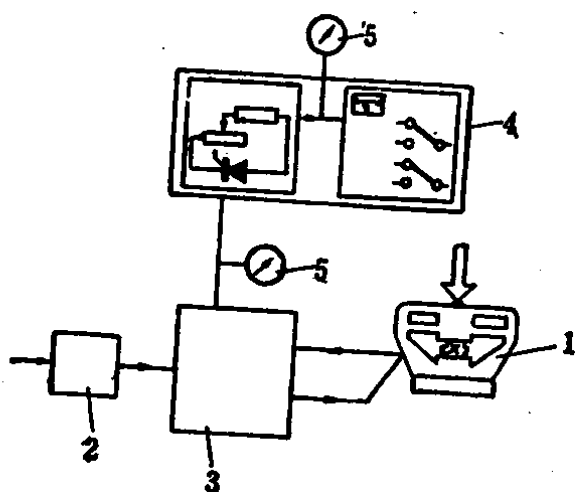


图1-1 称重装置原理图

1—压力传感器的测压计 2—稳压器  
3—供电部分 4—控制仪表 5—指示仪表

感应炉装设称重装置后，可以自动指示添加炉料量、炉中铁水量、出铁量和剩余铁水量，对质量管理和运行管理有很大好处。这种称重装置结构比较简单，安装面积小，可以远距离指示结果。为了防止振动的影响，称重装置还附有减振器。倾炉出铁时，电缆位置及液压缸内油重量变化引起的炉子重量变化，由高灵敏度的测量校正装置补偿。一般，称重装置的测量误差约 $\pm 0.2\%$ 。

称重装置测得的炉子重量变化，可用数字指示的色灯信号盘显示，也可用刻度盘指示，还可由自动记录仪连续记录，或反映

给数据处理装置，用减法方式自动打印出实测重量。为了简化读数，用一个选择开关便随时可以知道各种重量。图1-2示出压力传感器的安装示意图。

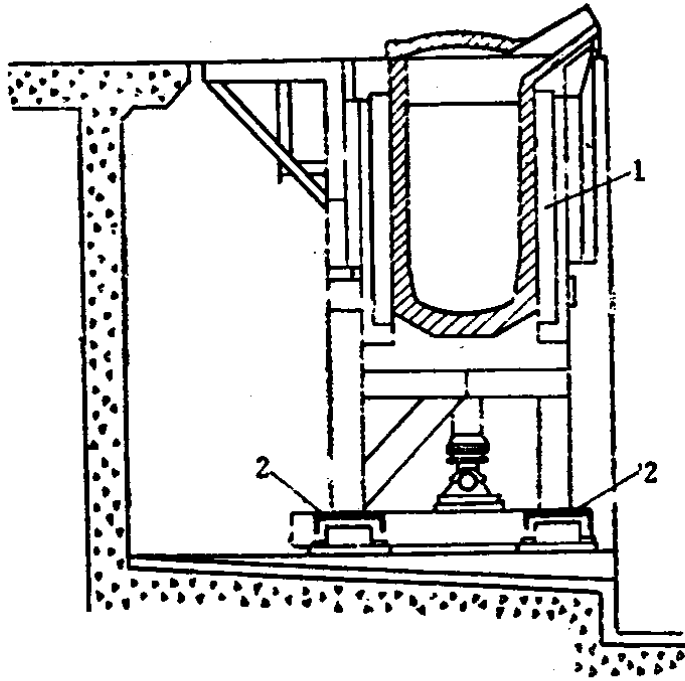


图1-2 感应炉安装在称重装置压力传感器上的示意图

1—感应炉 2—压力传感器

## 6. 感应器

感应器的作用是通入交流电后产生强烈的交变磁场，使处于交变磁场中的金属炉料内部产生感应电流，把炉料加热、熔化和过热。感应器还有固定坩埚炉衬的作用。因此，感应器应能满足电气上的要求和机械强度的要求。石英岩炉衬膨胀的压力达20~40公斤力/厘米<sup>2</sup>。

感应器用挤压成型的空心紫铜管单层螺旋式绕

制加工而成，铜管的空心部分通水冷却，感应器的电流密度可提高到20~40安培/毫米<sup>2</sup>。可供选用的铜管断面形状示于图1-3，所选用的铜管，应保证满足冷却水水量要求，又使感应器电损失尽量小。图1-4示出常用的异形管尺寸。

感应器内壁应当平正，线圈各匝水平面的平行度、匝间间隙和感应器几何尺寸应符合要求，在炉子使用期间都应保持不变。

感应器可以是一个螺旋线圈，也可以用联接板把两个或多个线圈并联联接而成。1.5吨工频炉的感应器用各为18匝的上、下两个线圈并联组成，10吨工频炉由16匝的上段和各为18匝的中、下段共三段线圈组成。一段线圈比两段或多段线圈的刚度好。两段或多段线圈之间，一般用石棉水泥板斜面垫填平。石棉水泥板质脆，斜面加工难以符合要求。斜面垫处容易形成薄弱环节，降低感应器的刚度，影响炉衬使用寿命。

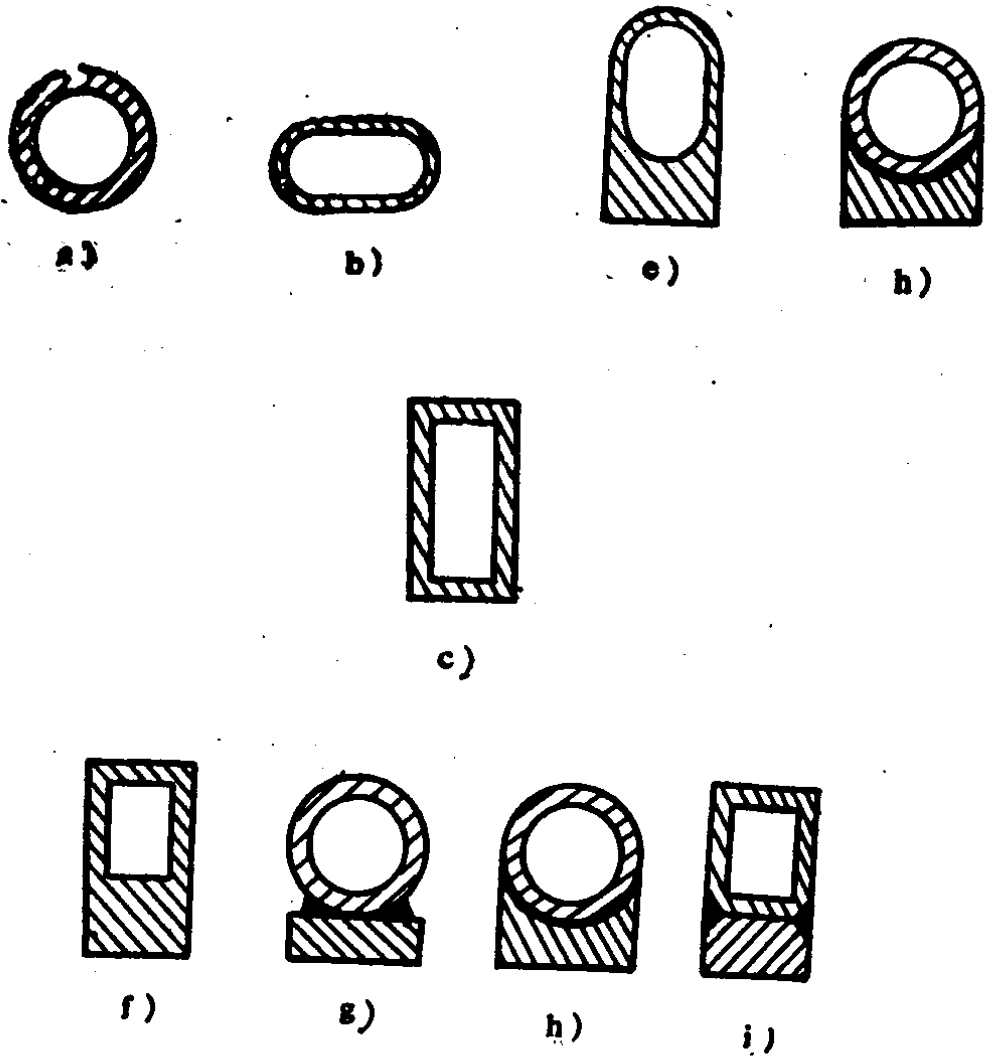


图1-3 感应器铜管断面形状

a)圆管 b)扁圆管 c)矩形管 d)圆孔异形管 e)扁圆孔异形管  
f)长方孔异形管 g)圆管与方铜焊接的异形管 h)圆管与弧状方铜焊接的异形管 i)矩形管与方铜焊接的异形管

感应器端部应有弹性固定装置，以减少通电时感应器的振动。为了保护炉衬，感应器上面和下面最好加用只通水不通电的水冷线圈。

感应器需要经过绝缘处理，电绝缘的作用在于防止铁水与感应器之间和感应器匝间电击穿，对感应器的正常工作和炉子安全可靠运行有十分重要的作用。感应炉的使用特点要求感应器电绝缘在50赫振荡和温度 $220\sim 250^{\circ}\text{C}$ 的条件下，仍然具有高的机械强度和电气性能。因此，要求绝缘材料有高的绝缘强度，保持不小于 $2U_2+1000$ 伏。20吨工频炉的工作电压3000伏，感应器绝缘应

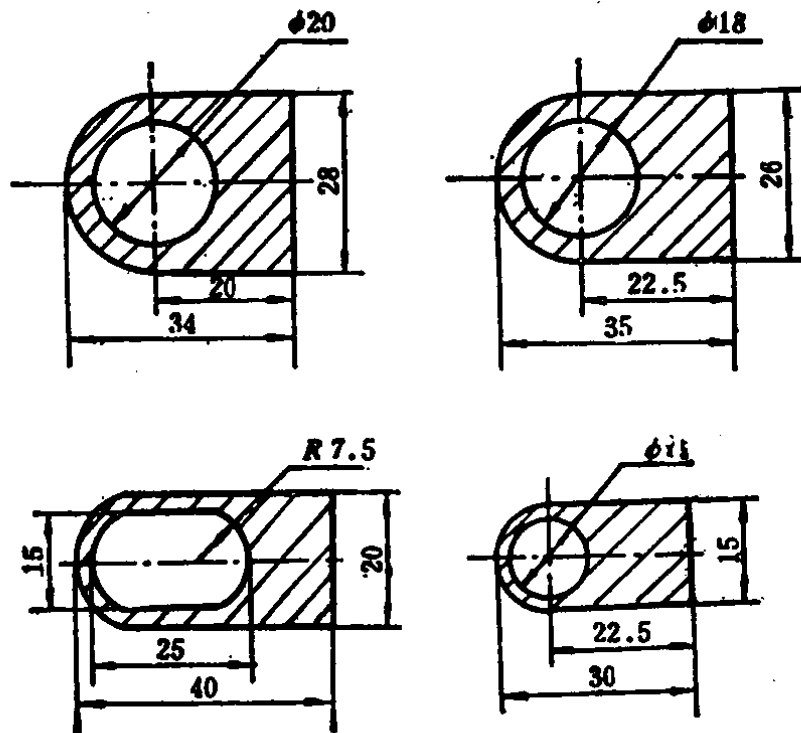


图 1-4 常用的几种异形管尺寸

能承受7000伏的对地耐压试验。

感应器的发展是采用整体绝缘<sup>[1]</sup>。整体绝缘可以用高氧化铝水泥和刚玉充填料配制的混凝土制作，也可以用浇灌绝缘混合剂制作，还可以用聚合物绝缘混合剂制作。用聚合物绝缘混合剂制作的整体绝缘，比较适应感应炉的结构特点和繁重的工作条件。聚合物整体绝缘是复合的多层绝缘，它由外部匝间绝缘和内部耐热层组成。图1-5示出整体绝缘感应器的示意图。

整体绝缘的匝间绝缘是一个整体，与感应器牢固地粘在一起，作为稳定匝间距离的结构衬垫。整体绝缘可以使线圈和炉子

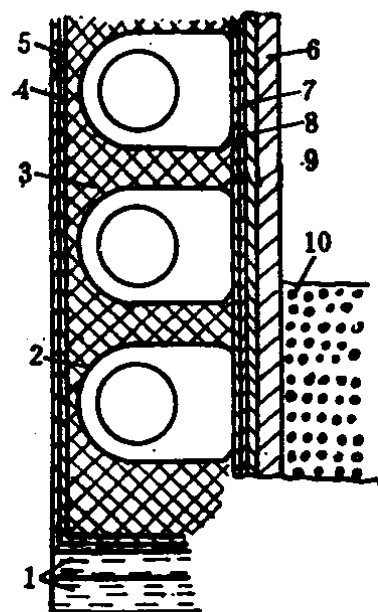


图 1-5 感应器的整体绝缘

- 1—衬垫 2—两层漆（一层底漆，一层装饰漆） 3—匝间绝缘
- 4—清漆粘贴的石棉布 5—用含催化剂的清漆浸渍过的化纤布 6—石棉板
- 7—云母板 8—混合剂浸渍的玻璃布 9—混合剂涂层 10—炉衬

其它构件免受炉衬传来的热作用，可以作为热保护层，使炉子的散热减到最小，还可以使坩埚在垂直热变形时沿感应器安全滑动。整体绝缘的感应器有一定的机械强度和抗震性能，内绝缘层对感应器起保护作用，在事故漏铁水时不与铁水接触。整体绝缘的缺点是绝缘厚度增加，使炉衬缓冲层减小，炉衬烧结时析出的水分没有出口；所用材料有毒，应在装有通风装置的房间内操作。

## 7. 炉衬

炉衬是决定感应炉生产量、熔炼铸铁的质量、工艺过程经济性以及运行安全可靠性的一个重要因素。从使用的角度，最主要的是要求炉衬要适应冶金工艺的需要和寿命长。

影响炉衬寿命的因素是一个非常复杂的函数，既包括炉衬材料的理化性能、粒度组成、烧结剂的选择和用量等材料因素，又包括打结、烘烤、烧结等制作工艺因素；既包括结构形式、炉衬厚薄、热绝缘厚度等设计因素，又包括使用维护、冷修、热补、蚀损、结瘤等综合因素；还包括报警装置、寿命预测等辅助因素。在这些因素中，有人为的因素，还有不确定的因素，问题比较复杂。

炉衬的工作条件很恶劣。首先，炉衬围成的空间用于盛装铁水，内面直接与 $1450\sim 1550^{\circ}\text{C}$ 的高温铁水接触，外面由于感应器冷却水的冷却降到 $400\sim 500^{\circ}\text{C}$ 。表明炉衬内部温度梯度很大。

其次，感应炉的能量通过磁力线传递给熔炼的金属，金属熔体和产生磁场的感应器之间的距离，显著地影响炉子的电气性能，因而炉衬厚度受到一定的限度。

第三，炉中金属液受电磁力作用产生运动，对炉衬产生机械蚀损。周期作业的炉子，炉衬受到开炉停炉反复加热和冷却的热冲击作用。

第四，工艺要求铁水在炉中高温处理，利用氧化的金属废料作为炉料，以及提高炉子的单位功率都加重了炉衬的负荷。

根据工作条件，炉衬应具有如下性能：

(1) 熔炼的铁水温度高达 $1450\sim 1550^{\circ}\text{C}$ ，甚至更高一些，



所以炉衬材料要有高的耐火度和软化温度。

(2) 炉衬应能承受短时间内由较大的急冷急热诱导出来的应力变化,这种应力变化是炉衬热表面层膨胀大于冷表面层所产生的。所以,炉衬材料的热膨胀系数要小,没有异常膨胀,体积稳定性和抗碎裂性好,不易龟裂和剥落。

(3) 炉衬与熔化的金属、渣、精炼剂、气氛以及熔炼时存在的其它物质接触,应不易产生化学反应,对熔炼产物不产生不良影响。所以,炉衬材料应有高的化学稳定性。

(4) 炉衬要承受金属液静压力、搅拌力、加料时的冲击力、并保证炉子倾动时不塌落。所以,炉衬材料应有高的高温机械强度。

(5) 为了减少炉子的热损失,保证炉子安全正常运行,炉衬材料应有好的隔热性和绝缘性。

(6) 炉衬打结、干燥、烧结和修补等工序应没有大的困难,炉衬材料应有良好的工艺性能。

(7) 炉衬材料应资源丰富,价格便宜。

对炉衬材料的要求是多方面的,事实上,目前还没有任何一种材料能够全部符合上述要求,只能从具体熔炼条件出发,经过分析比较,选择基本上满足使用要求的炉衬材料。

目前,制作工频炉炉衬最主要的材料是酸性耐火材料,最常用的是石英岩、天然石英砂和石英粉。用中性耐火材料制作的炉衬用得还比较少,但试验和实践表明,中性炉衬是很有前途的。

制作炉衬的主要方法现在还是手工打结。手工打结炉衬是一项繁重的体力劳动,耗费时间多,粉尘飞扬对人的身体有害,炉衬质量往往受人的主观因素和体力疲劳程度影响,存在一些不稳定因素。为了改善劳动条件,缩短制作炉衬时间,保证炉衬质量,越来越广泛地采用机械打结和振动打结。

打结好的炉衬要烧结之后才能交付正常使用。炉衬烧结时,力求得到沿坩埚圆周和沿坩埚高度都有均匀的烧结层,使炉衬具有均匀的强度性能。烧结过程中形成的任何缺陷,如裂纹、气孔、