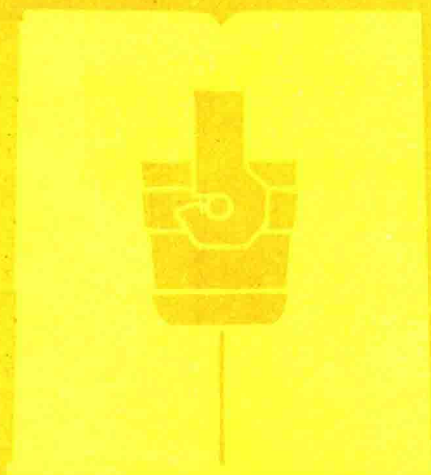
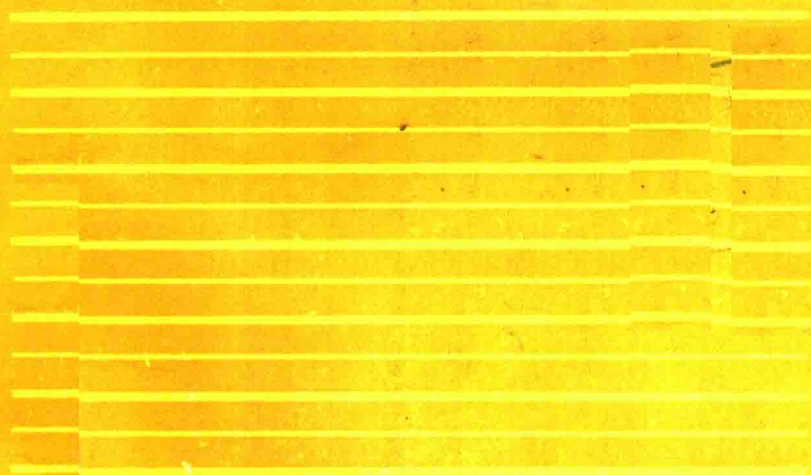


• 高等学校教学用书 •

# 真空电炉

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU



冶金工业出版社

高等学校教学用书

# 真空电炉

东北大学 张继玉 主编

冶金工业出版社

(京)新登字 036 号

高等学校教学用书

**真空电炉**

东北大学 张继玉 主编

\*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号)

新华书店总店科技发行所发行

怀柔县东茶坞印刷厂印刷

\*

787×1092 1/16 印张 12 字数 277 千字

1994 年 6 月第一版 1994 年 6 月第一次印刷

印数 1~1000 册

ISBN 7-5024-1425-8

TF·328 (课) 定价 5.75 元

## 前 言

本书是根据高等学校“真空技术与设备”专业“真空电炉”课程的教学大纲编写的，共4章，讲授48学时。书中系统地介绍各种真空电炉的工作原理、结构设计计算及炉子的使用工艺知识。

本书可作为“真空技术与设备”专业本科生的教材，还可供金属材料热处理专业学生参考，对从事真空设备的工程技术人员也有一定参考价值。

本书第1章由张继玉编写，第2章由孙殿君编写，第3章由郭鸿震编写，第4章由王继常编写，全书由张继玉担任主编。

东北大学杨乃恒教授，锦州四达电热工程设计研究院院长王灿文和机电部沈阳真空技术研究所胡勇高级工程师审查了初稿，提出了许多宝贵意见。在编写过程中还得到东北大学张树林教授的大力支持，在此一并表示谢意。

由于我们的理论水平和实践经验有限，书中难免有不足和错误之处，恳请读者指正。

编 者

1993年8月

# 目 录

## 绪 论

1. 真空电阻炉.....	4
1.1 真空电阻炉的结构与设计 .....	4
1.1.1 真空电阻炉的分类 .....	4
1.1.2 真空电阻炉的结构设计 .....	5
1.1.3 真空电阻炉的设计参数 .....	12
1.2 真空电阻炉的加热功率计算 .....	13
1.2.1 加热工件消耗的有用热流量 $\Phi_2$ 的计算 .....	13
1.2.2 真空电阻炉在稳定状态下损失热流量 $\Phi_3$ 的计算 .....	13
1.2.3 加热室内各构件蓄热流量 $\Phi_4$ 的计算 .....	18
1.2.4 真空电阻炉加热功率的确定 .....	18
1.3 真空电阻炉加热器的设计计算 .....	19
1.3.1 加热体材料及性能 .....	20
1.3.2 加热体的计算 .....	21
1.3.3 加热体的联接型式 .....	23
1.4 真空热处理概述 .....	25
1.4.1 真空热处理的理论基础 .....	25
1.4.2 真空热处理工艺 .....	28
1.5 真空热处理炉的结构设计 .....	32
1.5.1 真空热处理炉的炉型和作业方式 .....	32
1.5.2 真空热处理炉的组成 .....	34
1.5.3 气淬室的设计 .....	35
1.5.4 淬火油槽的设计 .....	39
1.5.5 料筐的传动机构 .....	40
1.6 真空炉冷却水量的计算 .....	42
1.7 电阻炉真空系统的设计计算 .....	43
1.7.1 真空系统的设计参数 .....	43
1.7.2 真空系统设计中应注意的主要问题 .....	44
1.7.3 选泵和配泵 .....	44
1.7.4 电阻炉真空系统的种类 .....	45
1.8 真空电阻炉的电气系统 .....	47
1.9 真空热处理炉的加热功率和加热体的计算例题 .....	51
2. 真空感应炉 .....	51
2.1 真空感应炉概述 .....	51
2.1.1 真空感应炉的工作原理 .....	51
2.1.2 真空感应熔炼工艺 .....	51

2.1.3	真空感应熔炼的特点 .....	53
2.1.4	真空感应炉分类 .....	54
2.1.5	真空感应炉的发展概况 .....	55
2.2	真空感应加热与熔炼的物理基础 .....	56
2.2.1	电磁感应与涡流热 .....	56
2.2.2	集肤效应与透入深度 .....	58
2.2.3	邻近效应与圆环效应 .....	60
2.2.4	综合效应与坩锅中温度分布 .....	62
2.2.5	电动力效应与搅拌原理 .....	62
2.3	真空感应炉的结构设计计算 .....	64
2.3.1	炉体设计 .....	64
2.3.2	坩埚设计 .....	67
2.3.3	感应器设计 .....	71
2.3.4	转轴设计 .....	74
2.4	真空感应炉的参数计算 .....	75
2.4.1	电流频率的计算与选择 .....	75
2.4.2	真空感应炉的功率计算 .....	76
2.4.3	感应器的电气参数计算 .....	78
2.4.4	感应器的水冷计算 .....	83
2.5	真空感应炉的电源 .....	84
2.5.1	几种常见的中频电源 .....	84
2.5.2	真空感应炉电源的选择 .....	87
2.6	真空感应炉设计计算例题 .....	88
2.6.1	计算的已知条件 .....	88
2.6.2	坩埚及感应器的尺寸计算 .....	89
2.6.3	真空感应炉的功率计算 .....	89
2.6.4	感应器的电气参数计算 .....	89
3.	真空电弧炉 .....	91
3.1	真空电弧熔炼概述 .....	91
3.1.1	非自耗电电极电弧炉 .....	91
3.1.2	真空凝壳熔炼的特点 .....	91
3.1.3	真空自耗电电极熔炼的特点 .....	91
3.1.4	真空电弧炉的发展概况 .....	92
3.2	真空中的电弧 .....	92
3.2.1	真空中的电弧及其性质 .....	92
3.2.2	影响电弧的因素 .....	94
3.3	真空自耗炉的结构及其设计计算 .....	94
3.3.1	炉子型式 .....	95
3.3.2	炉体 .....	95
3.3.3	坩埚及其水冷装置 .....	97
3.3.4	电极杆及其传动装置 .....	108
3.3.5	防爆装置 .....	116

3.3.6	观察装置 .....	118
3.3.7	真空系统 .....	119
3.4	真空电弧炉的电源和自耗电电极的控制 .....	120
3.4.1	真空自耗炉的熔炼电流、电压和功率计算 .....	120
3.4.2	电弧电源 .....	124
3.4.3	电源引线 .....	130
3.4.4	电极传动的自动控制 .....	133
3.5	真空自耗炉的电热计算例题 .....	135
3.6	真空凝壳炉 .....	136
3.6.1	真空凝壳炉的结构和参数 .....	137
3.6.2	真空凝壳炉的结构特点 .....	137
4.	电子束炉 .....	142
4.1	概述 .....	142
4.2	电子束加热原理 .....	143
4.2.1	电子通过加速场后的动能 .....	143
4.2.2	束流与物质的基本作用 .....	144
4.3	电子束炉的结构 .....	145
4.3.1	炉体设计与 X 射线屏蔽 .....	145
4.3.2	送料机构 .....	150
4.3.3	结晶器和拖锭机构 .....	151
4.3.4	真空系统 .....	151
4.4	熔炼功率、熔化速度和送料速度 .....	153
4.4.1	熔炼功率 .....	153
4.4.2	加速电压与功率密度 .....	154
4.4.3	熔化速度和送料速度 .....	155
4.4.4	电子束炉的能量平衡和热效率 .....	156
4.5	轴向电子束发生器 .....	158
4.5.1	基本结构和特点 .....	158
4.5.2	阴极的设计 .....	159
4.5.3	电子枪的电极参数和电子束外形 .....	164
4.5.4	电子光路系统设计 .....	166
4.5.5	试验和调整 .....	170
4.6	电子束熔炼炉的主回路 .....	172
4.6.1	主回路的组成 .....	172
4.6.2	电子束功率的稳定 .....	172
4.6.3	对电源的要求 .....	173
4.6.4	高压电源 .....	174
附录	.....	177
参考文献	.....	181

# 绪 论

真空电炉是在最近几十年发展起来的，它与普通电炉的区别是其工作条件不同。前者是在真空条件下（稀薄气体中）工作的，后者是在大气压力下（包括可控气氛中或保护气氛中）工作的，即它们在工作中所处的压力是不同的。应当指出，真空电炉是在普通电炉的基础上增加真空抽气系统而成，故炉体应具有很好的密封性能。

## 1. 真空电炉的分类

根据加热热源的不同，真空电炉可分为如下几种：

(1) 电阻加热炉。这是一种利用电阻热加热工件的炉子。在真空条件下，加热器通电产生的电阻热通过辐射传热将工件（或材料）加热，故称为真空电阻炉。真空热处理炉绝大部分是用电阻加热的，故它是真空电阻炉的主体，应用较广泛，它是本书第1章的内容。

(2) 感应加热炉。将材料或工件放入线圈中，当给线圈中通入交变电流时，将产生交变磁场，在材料或工件表面上产生感应电流，感应电流的流动产生电阻热，而将材料熔化或工件加热。利用这种方法加热的炉子称为感应炉。当炉内处于真空条件下，则称为真空感应炉，这是本书第2章的内容。

(3) 电弧加热炉。它是利用弧光放电所产生的电弧热熔炼材料的。将自耗电极（被熔炼材料）接负极，坩埚接正极，通电时两极间产生弧光放电，由于正离子打在阴极上和电子打在阳极上，于是电能转变成热能，产生高温，将材料熔化。利用这种方法加热的炉子称为电弧炉，在真空条件下工作的电弧炉称为真空电弧炉（真空自耗炉），这是第3章的内容。

(4) 电子束加热炉。该炉是应用电子枪在高压电场的作用下，发射出高速度的电子束打在被熔炼的材料上，将电能转换成热能，使材料熔化，这种通过电子束加热的炉子称为电子束炉，这是第4章的内容。

## 2. 本课程的特点

(1) 本课程一方面讲述真空电炉的结构与设计及计算，又要介绍生产工艺知识，但其重点是设备的设计与计算。因为先进的工艺需要有先进设备来保证，没有先进的设备就没有先进的工艺，因此设备的设计就非常重要了。

(2) 本课程与新型材料和新工艺有密切关系。许多重要材料需要在真空电炉中熔炼和浇注，许多重要工件需要在真空热处理炉中进行热处理，因此要了解被熔炼材料和被加热工件在真空环境中的变化。

(3) 由于真空电炉是在真空条件工作的，因此要掌握真空电炉的抽真空基本知识和真空系统的设计计算

真空电炉是由炉体部分、真空系统、水冷系统和电气系统等组成的，但根据教学大纲



和学时安排，本课程仅介绍炉体部分的结构与设计，其它部分均有专门授课的教材，本书不涉及。

### 3. 本学科在国民经济中的作用与发展

第二次世界大战后，航天、航空、电子技术（包括计算机）及核技术等高科技尖端技术得到飞速的发展，而它们的发展离不开新型材料，新型材料的发展又需要采用新型设备，真空电炉就属于这种新型设备。许多重要有色金属和合金必须在真空电炉中熔炼成材，例如金属钛（包括钛合金）在大气中熔炼会氧化，若在真空炉中熔炼就可以获取不氧化的钛，还可以将钛合金浇注成零件。金属锆同钛一样也是在真空炉中熔炼的。许多高温合金及精密合金也要在真空电炉中制取，如新型强磁性材料钕铁硼合金就是在真空烧结炉中制取的。

宇宙工业中所用的许多零件都要在真空电炉中进行热处理，国外一些著名的飞机制造公司生产的飞机零件都要进行真空热处理方可验收，目的是保证工件的质量。

真空电炉是从 50 年代发展起来的。第一台真空热处理炉是在 1958 年美国伊普森公司制造出来的，并用于工业生产，这是一台周期式气淬炉，用于工具钢和高速钢工件的真空热处理。第一台周期式真空感应炉是美国在 1945 年研制成功的，并用来熔炼特种钢。第一台用于工业生产的真空自耗炉是 1955 年出现的，用于熔炼金属钛，以后又用于熔炼特种钢。第一台电子束炉是在 1954 年研制成功的，并用于工业生产，主要是熔炼特种钢、钼和铌。当前拥有真空电炉的国家较多，其中美国、德国、日本和英国处于先进行列。

我国在真空电炉研制方面发展速度较快，1973 年我国制造出第一台真空热处理炉并用于工业生产，解决了合金钢零件的淬火处理问题。1962 年我国生产出用于工业生产的真空感应炉。1960 年我国研制出真空自耗炉并用于生产，使我国钛材生产有了迅速发展。1964 年我国生产出第一台用于工业生产的电子束炉，这是一台环形电子枪的电子束炉，以后又出现了皮尔斯枪的电子束炉。我国在真空电炉生产方面同国外发达国家比较有一定差距，主要是电炉质量低些，具体表现在电炉的配套系统元件质量差。如真空系统、电气系统、气动系统和液压系统等元件质量差。这些都说明我国的基础工业薄弱。近几年来，我国的真空电炉质量有很大的提高，发展速度也很快，有的已能出口。

最近国内外对真空气淬极为重视，并投入较大的人力和物力进行研制。过去工具钢和高速钢件一般采用盐浴炉淬火，但是，盐浴炉淬火能耗大，成本高，对人体有害。自从真空热处理新工艺出现后，开始应用气淬炉进行淬火，尤其是采用高压气淬较多。用它淬火后的工件质量好，节能，对人体无害，因此受到国内外热处理界的高度重视。有少数国家提出用真空气淬炉（低压气淬和高压气淬）代替盐浴炉淬火，这是金属热处理今后发展一个重要方向。我国的一些工厂和科研部门都在研制和生产高压气淬炉，并取得很好效果。

### 4. 学习本课程的目的要求

- (1) 要掌握真空电炉的工作原理、结构特点、维护和检修。
- (2) 能够对炉子进行结构设计与计算，并了解炉子的机械加工制造过程。
- (3) 对炉子在使用中的工艺知识具有一般了解。

学习本门课程需要具备有机械设计及制造加工方面的知识，具备有真空系统设计计算

的能力，具备有一定的电工学和工业电子学的知识，具备传热计算的能力，具备一定的金属热处理知识。

本课程的理论性及实践性都是很强的，理论与实践相结合是本书的显著特点，读者在学习中可以逐步体会到这一点。

# 1. 真空电阻炉

当具有一定电阻的导体与电源接通时，导体中就有电流流过同时产生电阻热，通过对流、辐射和传导三种方式将此热量传给工件使其加热（或将材料熔化）的装置叫做电阻炉。电阻炉在工业和日常生活中用的很广泛，因为它用起来非常方便。当炉内处于真空状态下，电阻热主要通过辐射传热的方式将工件加热，这种电阻炉叫做真空电阻炉。真空电阻炉是在二次世界大战后发展起来的一种新型炉子，主要用于真空热处理、真空钎焊、真空除气、真空干燥、真空烧结和真空扩散焊等工艺中。由于真空热处理近年发展较快，应用较广，故本章除对真空电阻炉的基本结构与计算进行较详细叙述之外，还要对真空热处理炉作专门介绍。

## 1.1 真空电阻炉的结构与设计

### 1.1.1 真空电阻炉的分类

按照加热体（电热体、加热元件）所处位置的不同，可分为两种：

(1) 外热式（热壁式）炉，又叫马弗炉。其加热体安置在马弗罐外部，在大气中加热罐体。被加热的工件放在炉室内部，并对炉室内部抽真空，由高温罐体热辐射将工件加热，见图 1-1 (a)。这是电阻炉早期发展的炉型，该炉的优点是炉子结构简单，制造容易，加热体不产生放电现象，真空炉内附件少，开孔少，密封面少，抽空容易，设备投资少。其缺点是炉子的工作温度受到限制，因为炉室内部处于真空，外部受一个大气压力的作用，故对罐体材料高温强度要求很高，否则在高温下罐体受压会变形。这种炉型一般都在 1100℃ 以下应用。工件的加热和冷却时间比较长，适用于小型炉子。

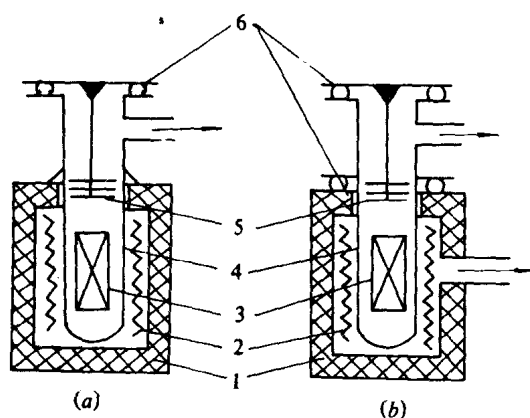


图 1-1 外热式真空电阻炉

1—炉衬；2—加热体；3—工件；4—马弗罐；5—反射屏；6—密封胶圈

为了克服真空炉在高温下罐体变形，又出现了图 1-1 (b) 的炉型。该炉的罐体内部和

外部同时抽空，故可以提高工作温度。但这种马弗炉的真空系统比较复杂，成本也提高很多，操作不当，也会出现罐体因受压力作用变形。

(2) 内热式(冷壁式)炉。这种真空电阻炉把加热体、保温炉衬和炉床等都放在炉室内部。因炉壳采用水冷，故炉室内工件加热温度不受炉壳材料高温强度的限制，可加热到很高的温度，这就克服了外热式炉的缺点。目前所采用的电阻炉绝大部分是内热式真空电阻炉。

按照真空电阻炉加热方式的不同，可分为两种：

(1) 直接加热式真空电阻炉。电流直接通过工件，利用工件本身的电阻热使工件升温，该方法适用于工件截面相同，质地均匀的细长工件。

(2) 间接加热式真空电阻炉。在真空室的内部采用耐高温的电阻材料做电热体，通电之后，以辐射方式将电阻热传给工件，目前绝大部分是间接加热式的真空电阻炉。

按照炉子作业方式的不同，可分为三种：

(1) 周期式真空电阻炉。当炉子每完成一次工作后，炉子停止加热并降温，充入大气，取料和装料，并重新抽空，进行下一次工作循环，这种炉子称为周期式炉。它的辅助时间长，能耗大，但结构简单。

(2) 半连续式真空电阻炉。该炉最少有两个工作室，即一个加热室和一个装料出料室。工件的升温 and 保温均在加热室中进行，而装料与出料在另一个室内进行，在两个室中间用真空闸阀隔开。工作中加热室始终不接触大气，一直保持真空。其辅助时间大为缩短，能耗降低，但炉子结构复杂。

(3) 连续式真空电阻炉。该炉最少有三个工作室，即装料室，加热室和出料室，最少用两个真空闸阀将其隔开。工件由装料室进入加热室中加热，再由出料室出炉。工作中加热室始终不接触大气，其辅助时间更加缩短，能耗降低，但炉子结构更加复杂。

按炉子结构型式不同，可分为两种：

(1) 立式真空电阻炉。该炉体中心线与地面垂直，向空间高度发展，占地面积小。

(2) 卧式真空电阻炉。该炉体中心线与地面平行，向平面发展，占地面积大。

按炉子工作温度的不同，可分为三种：

(1) 低温真空电阻炉。工作温度低于 1150℃ 的炉子叫做低温炉。

(2) 中温真空电阻炉。工作温度在 1150℃ 到 1600℃ 的炉子叫做中温炉。

(3) 高温真空电阻炉。工作温度高于 1600℃ 的炉子叫做高温炉。

另外，还可按炉子的工作真空度和用途进行分类，这里不再介绍。

### 1.1.2 真空电阻炉的结构设计

1.1.2.1 真空电阻炉的组成 真空电阻炉的发展是由简单到复杂，由周期式炉到连续式炉。首先介绍最基本的真空电阻炉，即单室炉。图 1-2 是立式炉，图 1-3 是卧式炉。这两种炉子的基本组成相同，均有加热器、保温炉衬、壳体、观察窗、电极接头、水冷系统、真空系统和电控系统等。对于比较复杂的炉子还应有其它部分。

1.1.2.2 加热器结构设计 将加热体用绝缘材料零件紧固成具有一定形状和较高的高温强度部件，这就是加热器。加热器的结构应能使工件加热时受热均匀，因此加热器的结构应根据炉膛内允许的温度误差大小来设计。加热器一般都制成圆筒形、方形等。由于筒形加热器两端部热损失大，温度低，对炉温均匀性影响较大，因此加热器应比工件要长

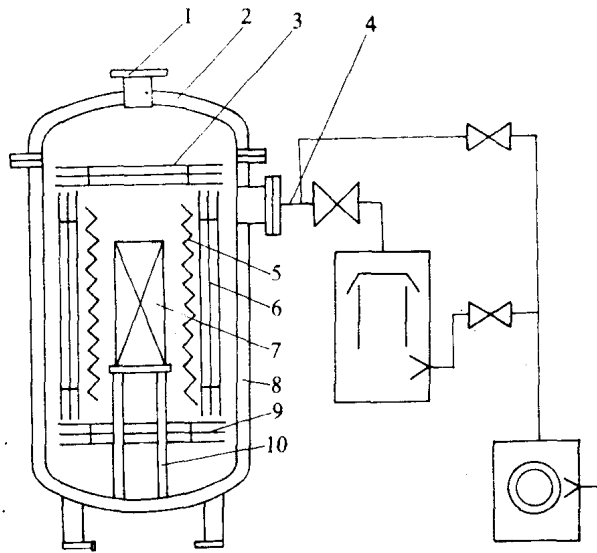


图 1-2 立式真空电阻炉

1—观察窗；2—炉盖；3—上反射屏；4—真空系统；5—加热器；  
6—侧反射屏；7—工件；8—炉壳；9—下反射屏；10—炉床

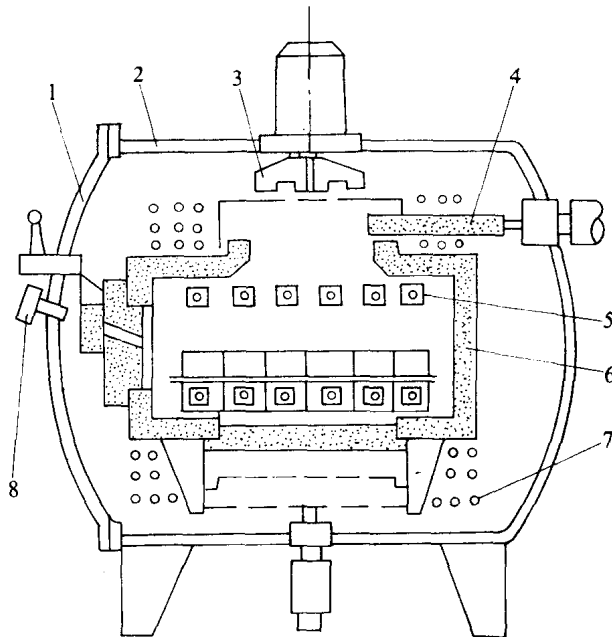


图 1-3 卧式真空电阻炉

1—炉盖；2—炉壳；3—风扇；4—活动保温炉衬；5—加热器；6—保温炉衬；7—热交换器；8—观察窗

出一定余量。对于较长的工件，不能将加热器做得太长，而应分三段加热，即中间段和两

个端部段，每段的加热功率可单独调解，这样可控制炉膛内的温度保持要求范围。加热器上的加热体分布不可以太疏，否则，会影响炉膛内的温度。但加热体也不宜布置太密，否则会在工作中产生放电现象。故加热体的间距应布置适当。

1.1.2.3 保温炉衬结构设计 炉衬是用来保持炉温，节能，并使炉膛内可加热至较高温度。目前炉衬有两种结构型式：

(1) 反射屏（辐射屏）式炉衬。该种炉衬是采用金属或非金属薄片以及其它零件制成。它是利用反射原理保温，即是将加热体辐射到屏片上的热流量再反射回到炉膛均温区内，使炉内的温度不断升高，达到保温的目的。反射屏炉衬一般都采用耐高温材料制造，目前所用材料有钨、钼、钽、不锈钢和石墨制成，如图 1-4 所示。反射屏的材料要具有很好的高温强度，防止在高温下变形。根据屏片高温强度的不同来安排各种材料的位置，不锈钢片一般都放在最外层。反射屏材料在高温下蒸发速率要低，以减少对炉膛和工件的污染。反射屏材料的黑度要小，反射热流量的能力要强，这样可使反射屏炉衬的保温性能更好。黑度与反射能力同反射屏的表面状态有关，粗糙的表面黑度大，反射能力弱；光亮的表面黑度小，反射能力强，故反射屏表面光洁度要高。反射屏层数越多，保温效果越好，但是层数过多，炉膛内体积增大，吸附气体量多，抽空时放气量增大，不但炉壳体积增大，真空系统也要加大，炉子成本增高。试验表明，第一层（靠加热器）反射屏隔热效果为 50%（表示辐射来的热量有一半被反射回炉膛去），第二层屏隔热效果为 17%，第三层屏隔热效果为 8%。可见，当屏数越多，提高隔热效果越不明显，所以反射屏数一般不超过六层。在制造时应注意减少反射屏连接时的热短路损失。由于金属片很薄，重量轻，热容量小，热惯性小，故炉子的加热速度和冷却速度都较快，这就是反射屏炉衬的优点。目前一般中温炉不采用反射屏炉衬，只在高温炉中采用。在低温时，反射屏炉衬的保温效果不好，故不采用。过去中温炉大量采用反射屏式炉衬，随着新保温材料出现，已经被厚壁炉衬代替了。在满足高温强度的条件下，屏片取薄些为好，钨、钼、钽片厚度为 0.2~0.5mm，不锈钢片厚度为 0.5~1mm。中、小型炉选薄些，大型炉选厚些。在温度高于 1600℃ 时采用钨、钼和石墨片。当温度为 1100℃ 到 1600℃ 时采用钼和石墨片。当温度低于 1100℃ 时采用不锈钢片。

(2) 厚壁式炉衬。该种炉衬的隔热原理是依靠保温材料导热系数小，厚壁热阻大而保温的，如图 1-5 所示。加热器和工件全部包围在炉衬中。目前厚壁炉衬有三种型式：

1) 石墨毡厚壁炉衬。它是用石墨毡作为保温材料。石墨毡又叫碳毡，厚壁炉衬是用多层石墨毡放在一起，再用石墨绳捆扎在钢丝网上，也可以固定在不锈钢片上（用不锈钢螺栓或钼螺栓固定）。这种炉衬结构简单，制造容易，隔热效果好。与反射屏炉衬相比，其热损失可减少 30%，便于快速加热和快速冷却。在装配石墨毡时，应注意各层石墨毡的对缝要交错排列，以减少热短路损失。同时每一对石墨毡的对缝要用石墨绳缝起来。石墨毡的纤维很细小柔软，同时又是导体，容易折断飞在空中，造成电极短路。为此在炉衬内壁层（靠近加热器）要放上柔性石墨布或石墨板压紧，以防止抽真空时石墨纤维飞起。石墨毡是一种新型耐火材料，它具有比重小，导热系数小，无吸湿性、耐热冲击性好，容易加工等特点。

2) 陶瓷纤维（陶瓷纤维毡）厚壁炉衬。该种炉衬是用钼片做内壁，不锈钢片做外壁，并将陶瓷纤维填充其中间就制成了陶瓷纤维毡炉衬。该炉衬结构简单，隔热性能好，热惯

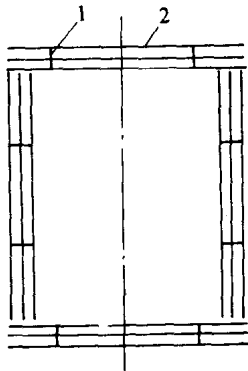


图 1-4 反射屏炉衬

1—联接件；2—反射屏

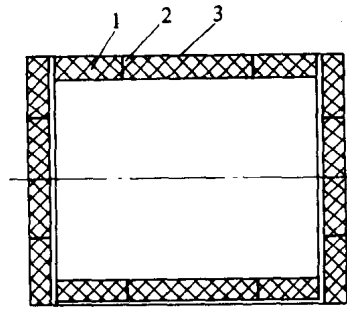


图 1-5 厚壁式炉衬

1—保温材料；2—联接件；3—不锈钢片

性小，可以实现快速加热和快速冷却，对于周期式炉有重要应用价值。但是由于陶瓷纤维吸湿性较大，所以采用这种炉衬的真空炉的真空度不能很高。陶瓷纤维是一种很好的耐火材料，也是一种新型材料。陶瓷纤维分三档：一档是用于炉温低于  $1000^{\circ}\text{C}$  的炉子；另一档是用于炉温为  $1000\sim 1300^{\circ}\text{C}$  的炉子；还有一档是用于炉温高于  $1300^{\circ}\text{C}$  的炉子。陶瓷纤维的主要特性是导热系数小，隔热效果好，重量轻，热容量小，耐急冷急热性能好，它可从  $1000^{\circ}\text{C}$  的高温直接浸入  $20^{\circ}\text{C}$  的冷水中而不开裂，化学稳定性好，绝缘性能好，可做为高温电绝缘材料。陶瓷纤维毡一般是由陶瓷纤维加入有机粘合剂压制而成的。在加热过程中，陶瓷纤维毡中的粘合剂将大量挥发出来，造成炉内和真空系统严重污染，所以在应用陶瓷纤维毡时，一定要选用粘合剂少的或不加粘合剂的纤维毡。

3) 混合毡厚壁炉衬。该种炉衬通常其内层为石墨毡，外层为陶瓷毡，保温效果很好。例如，内层为  $16\text{mm}$  厚的石墨毡，外层为  $20\text{mm}$  厚的陶瓷纤维毡组成的炉衬，当炉温为  $1200^{\circ}\text{C}$  时，石墨毡与陶瓷毡交界面处的温度为  $917^{\circ}\text{C}$ ，陶瓷纤维毡外表面的温度仅为  $265^{\circ}\text{C}$ 。通过试验得知，石墨毡与陶瓷纤维毡复合是理想的炉衬，当炉膛温度低于  $1000^{\circ}\text{C}$  时，采用炉衬厚度为  $30\text{mm}$ （石墨毡厚  $10\text{mm}$ ）。当炉膛温度为  $1000\sim 1320^{\circ}\text{C}$  时，炉衬厚度为  $40\text{mm}$ （各  $20\text{mm}$ ）比较合适。

1.1.2.4 炉床结构设计 炉床也叫托料架，它是在加热室内支承料筐的装置。它的托料端处于炉膛内，而其支柱固定在炉壳冷却壁上，可见两端温差相当大，图 1-6 所示是一个双轨道的托料炉床，它采用石墨等材料制造，用六根支柱支承两条轨道。要避免金属料筐与工件同石墨直接接触，因为在高温下金属件容易与石墨粘在一起，为此，在石墨炉床上放置一条陶瓷件将其隔开。在设计炉床时应注意的是炉床和料筐要具有足够的高温强度，防止在高温下产生热变形，更不许产生断裂现象。炉床的托料导轨应固定在支柱上，防止导轨与料筐粘在一起被带走。炉床材料的热容量应尽量小；以便于快速加热和快速冷却。近年来在真空电阻炉中广泛采用石墨炉床，这是因为石墨在加热和冷却中变形小，不会因为热冲击而断裂。石墨在  $2500^{\circ}\text{C}$  以下随温度的升高其强度增高，因此它是作炉床的极好材料。另外，石墨加工制造容易，价格便宜，除了在特殊条件下采用耐热钢炉床外，一般均采用石墨炉床。

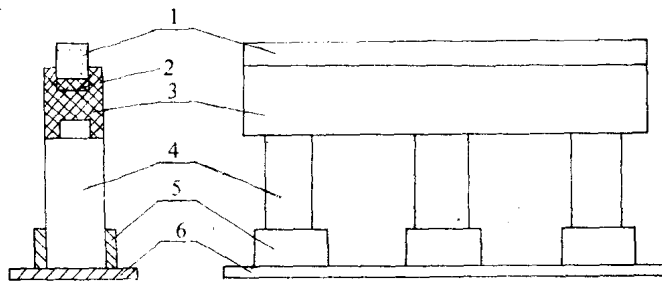


图 1-6 石墨炉床结构

1—陶瓷条；2—石墨毡；3—石墨；4—石墨柱；5—套管；6—底板

1.1.2.5 炉壳结构设计 真空电阻炉的壳体是将工作空间与大气隔绝起来的密闭容器，同时又是炉子各部件安装的基架。真空炉壳一般是属于外压力容器（高压气淬炉除外），在工作中受一个大气压力的作用，因此，炉壳应具有足够的机械强度和稳定性，防止受压后产生变形及破坏。

(1) 炉壳结构设计要点。炉壳应尽量选用圆筒形结构，因为圆筒形壳体受压强度好，稳定性高，焊缝最少，节省材料。在特殊情况下也可以选用方形壳体，方形壳体室内可利用空间大，缺点是焊缝多，受压力作用容易变形。由于炉子的热损失大部分由炉壳传走，同时又考虑到受热会引起炉壳变形，所以炉壳都设有水冷装置。水冷装置一般有两种形式：一种是在炉壳外焊上冷却水管，另一种是在炉壳外焊上冷却水套。水管冷却的优点是进水口和出水口可以互换，水管重量轻，管内不容易因生锈而堵塞。其缺点是冷却效果差，制造困难，又要消耗大量铜管，目前很少在壳体上采用。水套冷却的优点是结构简单，冷却效果好，造价低，制造容易。其缺点是进水口只能设在炉壳最低处，出水口只能设在炉壳最高端，容易产生死水（不流动的水），造成冷却不均匀现象，生成的锈不易被水带走而堵塞水套。炉壳结构设计时，应使炉壳内部零件、部件安装操作维修方便，便于检查每一条焊缝的密封性能。炉壳上一般尽量少开孔或不开孔，以减少漏气的可能。炉盖的结构型式主要取决于炉壳直径大小与形状，当炉壳圆筒直径大于 800mm 时，应选用碟形或椭圆形封头；当直径较小时，可以采用平底平盖。为了保证有足够的强度和刚度，炉壳一般采用厚钢板制造或采用薄钢板在其上焊筋板加强。炉壳材料应选用具有良好焊接性能的钢板，使焊后的壳体密封性能好，漏气率小。

由于碳钢容易生锈，铁锈吸气较多，对抽空有很坏影响，因此对于高真空电阻炉，其加热室壳体多选用不锈钢板制造，但不锈钢价格贵，炉子的造价高。为了节约不锈钢材，可采用如下办法代替不锈钢：第一是采用复合钢板，如用不锈钢板同低碳钢板复合而成的钢板；第二是采用低碳钢板表面镀镍；第三是采用低碳钢表面喷铝；第四是采用低碳钢板表面涂覆防锈层，如涂覆聚四氟乙烯、环氧树脂或者以有机硅耐热漆为主要成分的耐热涂料。目前真空电阻炉选用第四种方法较多。

(2) 炉壳体结构尺寸的确定。真空电阻炉的壳体结构一般是由一个筒体及两个端盖组成。也可以由一个筒体及一个端盖组成，此时筒体的另一端必须焊接一个封头才行。筒体



一般都选用圆形的结构，少数有采用方形（盒形）的、球形的及锥形的。圆形筒体已经标准化了，内径由400~4000mm共有23个系列尺寸，在设计炉壳结构时，按这个标准选用。炉壳端盖也有标准结构，对于圆形盖目前采用有椭圆形封头，碟形封头和球形封头。对于方形筒体采用平盖。关于上述尺寸的确定和计算请看参考文献 [5]。

1.1.2.6 电极接头设计 电极接头也叫水冷电极，其作用是将由变压器送来的低压电流导入加热室内供给加热器加热。电极接头设计应满足下列几点：

(1) 电极接头应与炉壳体绝缘，防止壳体带电。选用绝缘材料如玻璃纤维层压件、聚四氟乙烯等将电极与壳体绝缘。

(2) 炉体具有一定的真空度，故电极通过炉体要很好地密封，一般采用真空橡胶等材料进行密封。

(3) 由于电极接头因导热和自身产生电阻热，会造成电极温度升高，并使密封材料老化或烧坏，造成大量漏气，为此必须采用水冷装置，这也是真空电阻炉的关键部件。

(4) 电极接头的导电棒应选用电阻系数小的材料制造，一般采用紫铜材料。电极截面电流密度一般选用 $10\sim 15\text{A}/\text{mm}^2$ 。

(5) 导电棒与加热体连接处要有足够大的接触面积，以减少产生电阻热，也就是减少能耗。

(6) 真空电阻炉的加热器都采用低电压大电流，导电棒直径较大，由加热体传导来的热量较多，故电极棒水冷要求严格控制，不得有断水现象发生。因此，在出水管道上要设有断水断电保护继电器。

(7) 电极接头应便于安装和修理。

电极接头、结构型式较多，常用的两种电极如图1-7和图1-8所示，它们用在中真空和高真空的电炉中。前者是长度不能调解的电极，该电极不容易短路；后者是可调解长度的电极，该电极容易短路。这两种电极适用低电压大电流的炉子。可调水冷电极，有时由于没有很好压紧，摩擦力不够，这时电极棒会被压进炉内，在设计时应当注意这一点。

1.1.2.7 观察装置 真空电阻炉一般都设置观察窗，用以观察炉内工作情况或者用来安装光学测温仪进行测温。观察装置结构设计应注意如下几点：

(1) 观察窗应能满足观察人员的视野范围要求，即能看到观察物体整个形体，在保证这个前提下，力求结构简单，孔口小些为佳。

(2) 处于高温的观察窗，应设置水冷保护密封胶圈。必要时，在窗口前设置转动隔热屏蔽热，只在观察时打开。

(3) 观察窗的玻璃可以采用单层，亦可选用双层结构。单层透明度高，一般情况下均用单层玻璃。有时为了保护玻璃不被污染，而选用双层，其内层玻璃要能更换。

(4) 观察窗的玻璃一般采用石英玻璃、耐热玻璃和钢化玻璃等。

观察窗的结构型式请见图1-9和图1-10所示。炉子在工作中产生蒸发物较少的条件下选用单层玻璃观察装置。当工作中产生大量蒸发物时，可采用双层玻璃观察装置。

炉室中除了上述各部件外，还有测温热电偶密封及测量真空度的规管座密封等，其结构简单，这里就不介绍了。

1.1.2.8 真空电阻炉的总体设计 电阻炉的设计应从炉膛内均温区向外展开，最后将炉子全部设计出来。