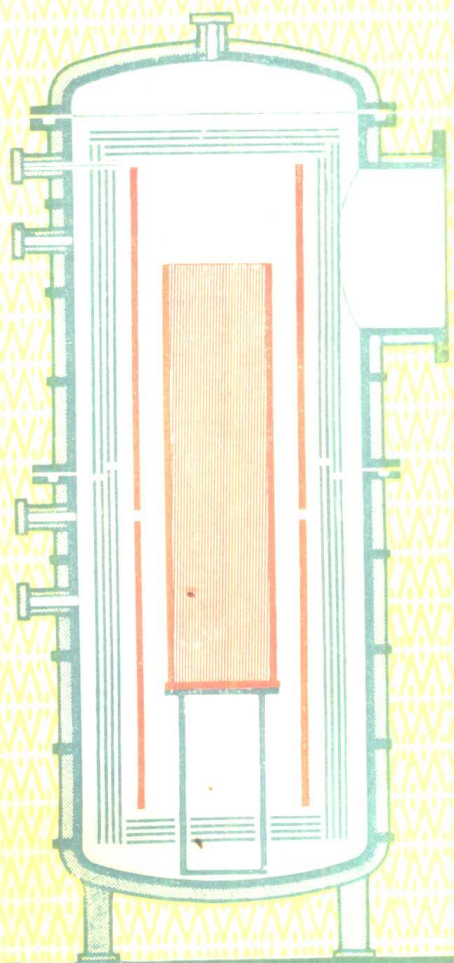




孙士琦 马 元 编
王树理 滕大常

真空电阻炉设计

冶金工业出版社

真空电阻炉设计

孙士琦、马 元 编
王树理、滕大常

冶金工业出版社

内 容 提 要

本书系从事真空电阻炉设计、研制人员的实践经验的总结，书中也适当介绍了国外有关技术资料。全书分为四章，主要介绍了真空电阻炉构造、设计、主要计算（如传热计算、真空系统的设计与计算、加热元件的电计算等）及常用材料等。书中还附有必要的经验数据、图表；是一本供有关真空电阻炉设计、研制、生产、使用等单位的技术人员和工人用的技术书；亦可供有关高、中等专业院校师生参考。

本书署名的四位作者系集体编写该书的主要执笔人。

真空电阻炉设计

孙士琦、马 元 编
王树理、滕大常

冶金工业出版社出版
新华书店北京发行所发行
冶金工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张10⁵/16 插页2 字数278千字

1978年9月第一版 1978年9月第一次印刷

印数00,001~8,950册

统一书号：15062·3359 定价（科三）1.05元

目 录

第一章 真空电阻炉简介	1
第一节 真空电阻炉简介及分类	1
一、真空电阻炉简介（1）二、真空电阻炉的分类（4）	
第二节 真空电阻炉的设计程序	5
一、真空电阻炉设计的原始条件及需考虑的问题（6）二、真空电阻炉设计程序（7）三、真空电阻炉设计的内容和确定炉型及各部分的结构（9）	
第二章 真空电阻炉的构造设计与计算	15
第一节 传热的常用公式	15
一、稳定传导传热（15）二、辐射传热（26）三、对流传热（32）	
第二节 加热体	42
一、难熔金属加热体（43）二、石墨加热体（47）三、二硅化钼加热体（52）四、硅碳棒及硅碳管加热体（56）五、高电阻电热合金加热体（60）	
第三节 炉衬构造	70
一、外热式炉衬结构（70）二、内热式炉衬结构（73）	
第四节 炉壳	82
一、内热式炉壳（82）二、外热式炉壳（95）	
第五节 其它常用结构	100
一、导电接头（100）二、观察孔（107）三、热电偶接入装置（113）四、除爆器（113）五、炉盖开启机构及夹紧装置（117）六、压力真空表及真空计接座（120）七、旋转水封结构（121）	
第六节 功率的确定	124
一、面积负荷法确定炉子功率（124）二、容积负荷法确定炉子功率（124）三、热平衡计算确定炉子功率（127）	
第七节 冷却水的计算	139

- 一、冷却水的换热计算 (139) 二、冷却水的管道设计 (141)
- 三、水的软化和循环水的应用 (143) 四、水冷系统的安全保护 (143)

第八节 加热体的计算144

- 一、加热体的分组方式 (144) 二、加热体尺寸的确定 (146)
- 三、丝状、带状加热体的计算 (147) 四、求加热体长度和直径的图解法 (150)

第九节 加热体的表面负荷和寿命153

- 一、加热体的允许表面负荷 (153) 二、加热体的寿命 (162)
- 三、加热体氧化寿命的计算 (166) 四、加热体挥发寿命的计算 (171)

第十节 炉子计算举例177

- 一、钼丝炉热工计算 (177) 二、 $\phi 2500 \times 8000$ 退火炉计算 (185)
- 三、热压炉的热功计算 (189) 四、外热式退火炉计算 (194)

第三章 真空系统的设计与计算198

第一节 概述198

- 一、真空技术名词简介 (198) 二、真空区域的划分 (198) 三、真空系统的组成 (199)

第二节 真空系统的计算199

- 一、根据炉子的设计要求, 给出计算的依据数据 (199) 二、计算炉子所需要的必要抽速 (200) 三、选择高真空泵和搭配管路 (200) 四、确定前级泵的必要抽速, 选择前级泵 (200)
- 五、绘制真空系统简图 (203) 六、真空泵抽速的验算 (203)
- 七、预抽时间的计算 (210)

第三节 真空系统计算例题210

- 一、根据炉子的设计要求, 给出计算的依据 (210) 二、计算炉子的必要抽速 (211) 三、选择高真空泵 (212) 四、确定前级泵的必要抽速, 选择前级泵 (212) 五、确定真空系统的几何尺寸与绘制配置图 (212) 六、真空泵抽速的验算 (212)

第四节 材料的真空性能216

- 一、真空系统结构材料的选用原则 (216) 二、真空材料的表面放气速率 (217) 三、金属的析气量 (228) 四、某些耐火材料

的放气量和某些有机橡胶材料的放气速率 (233)五、几种常用结构材料放气速率的大致范围 (233)	
第五节 真空系统常用的零部件	235
一、用橡胶密封的焊接钢法兰 (235)二、用橡胶密封圈密封的焊接松套法兰 (238)三、法兰用橡胶密封圈 (239)四、J 型真空橡胶密封圈密封 (239)五、JO 型真空橡胶密封圈密封 (239)六、O 型真空橡胶密封圈密封 (240)七、环形波纹管 (240)八、真空法兰连接的设计 (241)九、超高真空用金属圈密封的焊接不锈钢法兰 (242)十、超高真空橡胶密封法兰 (244)十一、超高真空液体金属密封 (245)	
第六节 真空阀门和冷阱	246
一、真空炉的放气阀及保护气体阀 (247)二、真空炉管路阀门 (251)三、常用冷阱的结构及性能 (255)	
第四章 真空电阻炉材料	259
第一节 概述	259
一、壳体 and 真空管道材料 (259)二、加热体材料 (259)三、炉衬材料 (259)四、工作在真空室内的支撑结构材料 (259)五、电炉机械用材料以及工作在真空室以外的骨架材料 (259)六、真空密封材料 (259)七、导电材料 (260)八、电绝缘材料 (260)	
第二节 金属材料	260
一、铁和碳素钢 (260)二、不锈钢和耐热钢 (262)三、高电阻电热合金 (267)四、有色金属 (272)五、难熔金属 (282)	
第三节 非金属电热体材料	291
一、石墨 (291)二、硅碳制品 (296)三、二硅化钼加热体 (298)	
第四节 耐火材料及隔热材料	303
一、一般耐火材料 (303)二、一般隔热材料 (307)三、高级耐火氧化物 (311)四、高级耐热材料 (316)	
附表 1 各种不同材料在表面法线方向上的辐射黑度	318
附表 2 炉墙厚度及材料的选择表	327

第一章 真空电阻炉简介

第一节 真空电阻炉简介及分类

一、真空电阻炉简介

当电源接在导体上的时候，导体中就有电流通过，并因导体有电阻而发热。一般在电流相同的情况下，导体的电阻愈大，产生的热量就愈多，人们把利用这种热量的一种电热装置叫做电阻炉。这种炉子若加热时炉内被抽成真空，就称为真空电阻炉，它是第二次世界大战以后迅速发展起来的一种重要的电热设备。发展初期，主要用于钛、锆、钽等活泼性金属、难熔金属和某些磁性材料、电工合金等的光亮退火和真空除气；其次用于不锈钢的真空焊接、粉末冶金烧结等等。近年来，由于电阻炉制造技术的发展，已开始用于高速钢和工具钢的光亮淬火、铝材的真空钎焊、不锈钢和碳素钢的真空压接等。

真空电阻炉与保护气体电阻炉相比，除了同样能使工件不氧化，不脱碳，不渗碳以外，还有显著的除气效果；并相应简化操作和改善劳动条件等。但因该炉炉内的传热方式几乎全靠辐射，所以在低温冷却的速度比较缓慢。

真空电阻炉一般分为外热式和内热式两种。

外热式（即加热体放在用耐火砖砌的炉衬内及真空罐的外面）也称为有罐式真空电阻炉。有罐式的优点是电炉热损失小，罐内附件少（只有料和料架等），表面吸附气体少，真空度容易提高。缺点，一是炉罐承受高温和一大气压力的外压，故炉壁要厚，材料要能抗氧化。二是焊缝容易因热应力而裂开造成漏气。有罐式真空电阻炉如图1—1所示。

内热式（现代真空电阻炉大多数做成内热式），即加热体放在金属真空容器内，整个容器内都保持同样的真空度，真空容器外

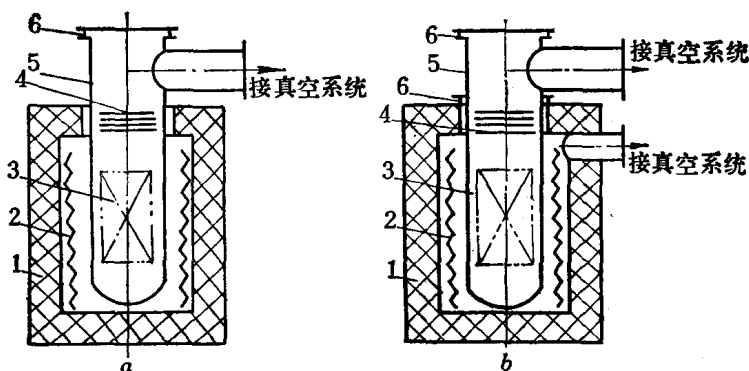


图 1—1 有罐式真空电阻炉示意图

a —仅炉罐内抽成真空； b —炉罐内外都抽成真空

1—炉墙；2—加热体；3—工件；4—隔热屏；5—炉罐管；6—密封圈

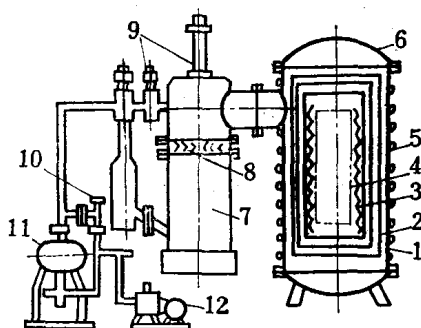


图 1—2 无罐式真空电阻炉及其真空系统示意图

1—炉身；2—隔热屏；3—加热体；4—工件；5—冷却水管；

6—炉盖；7—油扩散泵；8—挡油板；9—真空阀；10—旁路；

11—罗茨泵；12—机械泵

壳一般用橡皮密封并用水冷却，图1—2是这种电炉及其真空系统的总体示意图。内热式真空电阻炉的保温方法有以下几种，第一种是采用隔热屏的办法，常用于高温和高真空炉中，隔热屏的材料在高温处用石墨、钨、钼等，低温处用不锈钢板。隔热屏的优点是所用材料放气量极少，电阻炉内容易达到较高的真空度。缺

点是隔热屏价格贵。第二种是采用保温层，保温层的材料可以用粒度为0.2毫米的石墨颗粒或用高铝纤维材料等。这种办法适用于中真空度的电炉。近年来，已开始采用石墨纤维布和石墨纤维毡作为保温层材料。这种材料具有放气量小，保温效果好，耐高温，节省功率，保温层制造方便等优点，广泛适用中真空度和高真空度工件不怕渗碳的电阻炉。但石墨纤维加热时放出的挥发物较多，需要特殊处理。

用作真空电阻炉加热体的材料有镍铬合金、铁铬铝合金、钨、钼、钽和石墨等。镍铬合金和铁铬铝合金一般只能用在1200°C以下低真空度和中真空度的电炉中。因为温度和真空度再高，铬的挥发就很厉害。钼可以用到1600°C，钽可以用到2200°C，钨和石墨可用到2300°C以上。由于石墨的价格便宜，容易加工，所以石墨加热体近年来得到广泛的应用。除了石墨、石墨棒、石墨管以外，近来已采用石墨纤维制品做加热体。

为了加快真空电阻炉中工件的冷却速度，提高电炉的生产能力，人们采取了许多措施。一种是发展半连续作业式真空电阻炉，即工件的加热和冷却分别在加热室和冷却室中进行。这样可使电阻炉的生产能力提高数倍。这种电阻炉在结构上虽比较复杂，但优点多，所以已应用于工业生产。一般间歇作业式真空电阻炉在冷却期间，如工艺许可，可通入惰性气体在炉内快速循环提高冷却效果。

此外，在真空状态下加热而后进行油淬或气淬的真空电阻炉也应用于工业生产，并在此基础上发展了所谓真空渗碳炉。这种电炉一般具有一个加热室和一个淬火室。淬火室又分上下两部分，工件在上部可由风扇进行气淬，下部为油槽，可进行油淬。

在简化电炉真空系统配套方面，近年来还发展了所谓载气法真空电阻炉，即在真空炉工作过程中连续充入微量的氮或其它惰性气体。在这种情况下，炉内只要低真空就可以得到与高真空同样的效果，从而简化了电炉的真空系统，节省了电力消耗。

为适应国民经济和科学技术迅速发展的需要，在真空电阻炉

技术的发展上还要进行以下几方面的工作。

1. 采用优质的耐火材料和保温材料，以提高电炉的技术经济指标。如过去的中温炉（外热式）耐火层一般都用比重为1.3的轻质砖，如用比重为0.8或比重为0.6的泡沫砖，则保温效果会更好。在一些特殊结构的电炉上，耐火粘土纤维制品、泡沫高铝砖、高岭土纤维和矿渣棉纤维复合砖、石墨纤维制品等应在电阻炉上得到推广。

2. 采用优质加热体材料以提高电阻炉工作温度。更新型的高温加热体材料有待进一步研究发展。

3. 积极作好真空电阻炉的系列化工作，这种炉子种类繁多，用途很广，但品种还不齐全，更没有系列化。应积极作好这方面工作。另外，更高温的真空电阻炉也有待进一步努力。

4. 提高电炉的机械化、自动化程度，以提高电炉的生产能力；提高电炉的自动控制性能，对一些电炉采用电子计算机进行温度、气氛、时间等因素的综合控制。

二、真空电阻炉的分类

真空电阻炉分类法很多，现将一般分类法介绍如下：

1. 按加热方式分

（1）间接加热式，即在炉子内部用特殊的电阻材料做加热体，或用能导电的液体作加热体，通过热的传导、对流、辐射作用而间接的使放在炉内的材料加热。

（2）直接加热式，即电源直接接在被处理的材料上使之加热。

2. 按作业方式分

（1）周期作业式，即炉子生产有周期性，每个周期都有装料、抽空、升温、保温、降温、出炉等过程。

（2）连续作业式或半连续式，不需上述过程，因而生产率较高。

3. 按工作温度分

（1）低温炉，低于700℃以下；

(2) 中温炉, 700~1000°C之间;

(3) 高温炉, 高于1000°C以上。

4. 按真空度分

(1) 低真空炉, 真空度在 1×10^{-3} 托以下;

(2) 高真空炉, 真空度在 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-7}$ 托之间;

(3) 超高真空炉, 真空度在 1×10^{-7} 托以上。

5. 按加热体在真空容器内外分

(1) 外热式炉, 加热体在真空罐外, 又称有罐式;

(2) 内热式炉, 加热体在真空罐内, 又称无罐式。

6. 按炉子的形式分

(1) 立式, 炉子立放, 占地面少, 需较高的厂房。

(2) 卧式, 炉子横放, 占地面多, 不需较高的厂房。

7. 按加热体材料分

(1) 金属加热体, 钨丝炉、钼丝炉、镍铬丝炉等;

(2) 非金属加热体, 硅碳棒炉、二硅化钼炉、石墨碳管炉等。

8. 按用途分

(1) 还原、提纯、精馏用炉;

(2) 退火、淬火、热处理用炉;

(3) 制备半导体材料用炉, 如单晶炉;

(4) 预结炉、烧结炉、热压炉、垂溶炉、粉末冶金用炉;

(5) 真空镀膜加热炉;

(6) 熔炼用炉;

(7) 材料高温物理性能测试炉等。

第二节 真空电阻炉的设计程序

人的正确思想, 只能从社会实践中来, 只能从社会的生产斗争、阶级斗争和科学实验这三项实践中来。一个正确的设计思想也同样来源于实践。所以在设计一台炉子时, 必须做深入细致的调查研究, 向制造和使用方面的工人和工程技术人员学习, 参

加科研生产劳动，掌握第一手资料，将收集的材料加工整理，使感性认识上升为理性认识，经过工人、技术人员、领导干部三结合，和设计、制造、使用人员的三结合，提出正确的设计方案，并审查是否符合多快好省总路线的要求。一经定下方案，设计人员必须以严肃认真的科学态度完成施工图纸，并参加制造、安装和调试等各项工作，从中总结出成功或失败的正反两方面的经验，检查设计思想是否符合客观规律。经过实践、认识，再实践、再认识，使设计水平不断提高，为赶超世界先进水平而努力。真空电阻炉的设计内容和步骤一般应考虑以下几个方面：

一、真空电阻炉设计的原始条件及需考虑的问题

首先根据用户对炉子性能指标的要求，确定炉子的设计方案。

1. 用途，只有知道用途才能确定炉型。如是用于退火、淬火、烧结、热压，还是用于拉单晶、还原、提纯、蒸馏等。

2. 使用温度，知道使用温度（包括常用温度和最高使用温度）后，就可以选择适当的加热体材料和耐火保温材料。

3. 均温区尺寸，包括均温区尺寸和温差范围的要求。

4. 炉内真空度，根据炉子用途由工艺提出真空度的要求来设计真空系统。炉内真空度包括极限真空度和常用工作时的真空度。

5. 炉料放气量，主要指物料在炉内处理过程中放出的气体量，并且要了解整个工艺过程放气数量是否均匀。

6. 装料量及物料的 shape 和比重，了解物料形状、尺寸和重量是为了确定工作室的尺寸。如物料为管材，则工作室细长；物料为颗粒，则应有坩埚等；如物料为带材连续退火，就要考虑有放有收两部卷曲设备。知道装料量及比重，就可以确定炉子的大小和生产能力。

7. 化学反应，物料在处理过程中有无化学反应，是放热或吸热，在热平衡中要考虑这部分热收入或热支出。

8. 保护气氛,除真空外可以采用保护气体,使用气体的成分和种类,是中性、氧化性或还原性的,气体的压力和流量。

9. 机械化、自动化程度。

(1) 手动,调节功率和开关真空阀门等全部手动。

(2) 电动或气动,调节功率和开关阀门,到指定温度后自动控制炉温等。

(3) 全部实现程序控制。

10. 炉子升温时间,炉子升温的快慢和炉子的总功率有关,要使炉子升温快就得有较大的功率。

11. 有关安全防护问题,如炉子周围温度适宜,采暖、通风良好,排除有害气体时应把设备放在排风橱内等,此外还有防爆、电、真空度破坏等警报措施。

12. 炉子生产形式

(1) 周期的;

(2) 半连续的;

(3) 连续的。

13. 其它特殊要求,如有特殊要求,用户须具体提出,以便在设计时加以考虑。

二、真空电阻炉设计程序

一般都把设计分为三个阶段。初步设计、技术设计和施工图设计。现将各设计阶段包含的内容分述如下:

1. 初步设计,确定方案草图:包括炉体方案草图、真空系统草图、水冷系统草图、机械传动系统草图、电气原理图、总体草图和平面配置草图。如果炉子比较简单可只画炉体方案草图。如果炉子较复杂除上述各部草图外,一些主要部件结构以及炉架、地基也要表示清楚。且方案图可以有二种或三种供讨论时比较和选择。方案草图中要写明设计的技术要求和经济指标,确定投资费用等。在定方案时一定要征求各方面的意见。确定了方案,便可进行技术设计。

2. 技术设计,初步方案确定后就可着手绘制较详细的炉体

总图和总装配图。然后按比例绘制各部分部件图。在做技术设计时要作各种计算，主要有炉子功率（热平衡计算）、加热体、真空系统、冷却水消耗量、机械传动系统、炉子钢结构强度的计算和配电设计。画出电气、传动、工艺流程原理图。

3. 施工设计，施工设计阶段主要是绘制二次部件、三次部件及零件图。按比例画出它们的尺寸、几何形状、公差配合、加工符号、热处理及制造要求。图纸要达到能满足制造工艺的要求。

4. 编写设计文件

（1）设计说明书，说明书应对炉子作一简单介绍。列出炉子的原始条件、介绍炉子性能、用途、各组成部分的设计意图、绘出设备示意图。写明操作要求，并把炉子上所用的标准设备清单列出，如调压器、变压器、马达、扩散泵、增压泵、机械泵、真空仪表、热工仪表、电工仪表、流量表、压力表等。并写明规格、型号。

（2）计算书，作技术设计阶段的计算书均应整理完整；如功率（热平衡）、加热体、真空系统、冷却水、机械传动、钢结构、机械零件强度的计算。整理好以后，复制出来，作为技术资料参考，也便于验算。计算书一般不发往施工单位。

（3）图纸目录，为了清点方便，图纸要有目录。目录中包括部件、零件的序号、图号、图纸名称和图纸规格等。

（4）材料表，材料表是供给备料使用的。材料表中要统计各种材料的规格、数量、重量。

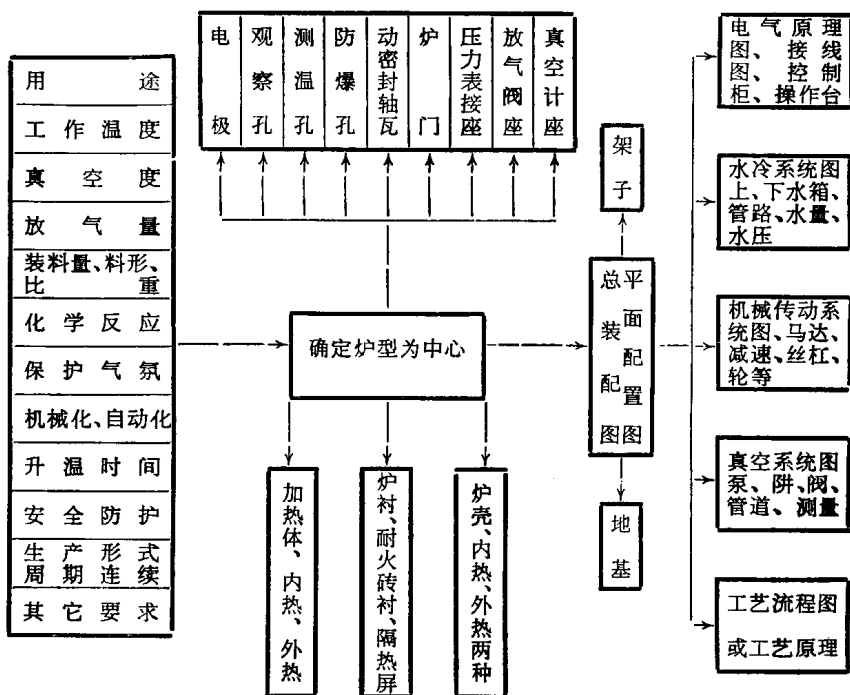
（5）外购件明细表，外购件主要是指国家标准中规定的机械零件，这些零件一般在市场上可以买到。如螺钉、螺帽、垫圈、三角皮带、链子和轴承等。要写明规格、数量及国家标准代号。

5. 试制、调试和总结，设计图纸、计算和设计文件编完后，设计三阶段才告完成。下一步就进入设备制造和调试工作。设计者要和制造、使用两方面紧密配合，共同解决制造和调试过程中的技术问题，以达到正常运转的目的。最后写出试车总结，

找出设备的优缺点，肯定成功之处和不足之处，以便为将来的改进和提高指出方向。

三、真空电阻炉设计的内容和确定炉型及各部分的结构

真空电阻炉一般是由几个部分组成的，各部分间是互相联系的，它们之间的关系见下列示意图。



真空电阻炉各部分间的关系示意图

1. 确定炉型，整个设计首先是以确定炉型为中心开始的。根据原始条件，如要求温度较高在 1200°C 以上时，则应在真空室内加热（因外部加热难以找到耐这样高温的真空罐或加热体）。又如物料为长管材则炉子就很长，可考虑为立式或卧式。立式炉又有上出料、下出料的问题。卧式又有炉体移动或炉门移动问题。确定炉型时还要作好调研工作，了解国内外有关技术进展情况，吸取先进经验，作出符合国情的设计方案。

炉体内部主要由三部分组成：

(1) 加热体部分，对外部加热式真空电阻炉，加热体多固定在砌砖上。而较小的炉子多缠绕在特制的炉管上。管状炉可固定在有螺纹槽的耐火炉管上如图1—3，马弗炉则固定在马弗胆壁的孔道内如图1—4。固定在砌砖上的方式也很多，固定方式要考

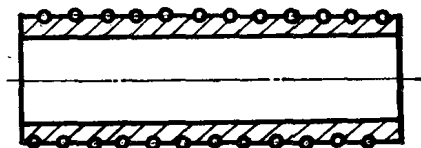


图 1—3 丝状加热体固定在螺纹管上

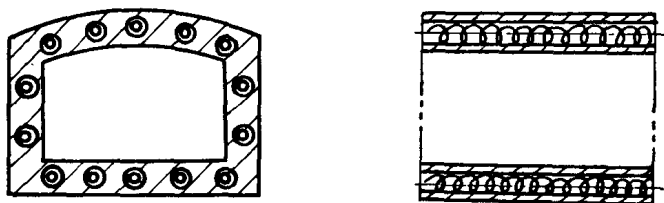


图 1—4 丝状加热体固定在马弗胆上

虑安放拆换方便，对一些较为细长的炉子，则要分段加热。加热体固定在炉墙上时则在侧壁抠槽，槽形如图1—5，槽和水平成 30° 角，将螺旋形加热体放在槽内。在炉顶和炉底的槽形也各不相同，如图1—6、图1—7这种抠槽固定加热体适合于中小型炉

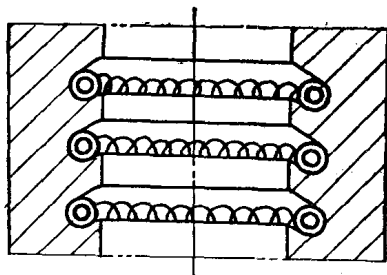


图 1—5 丝状加热体在圆筒形炉壁上放置法

子。较大型炉子则在砌砖上安放异型的托板砖上，如图1—8，一般电炉厂生产的标准电炉都用这种方法。

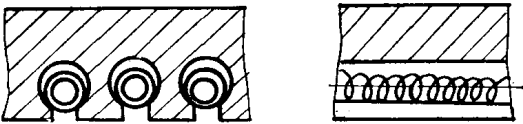


图 1—6 丝状加热体在炉顶放置法

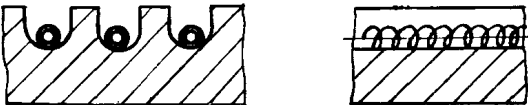


图 1—7 丝状加热体在炉底放置法

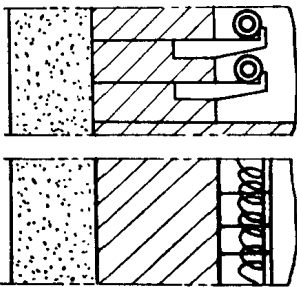


图 1—8 丝状加热体放在炉墙托板砖上

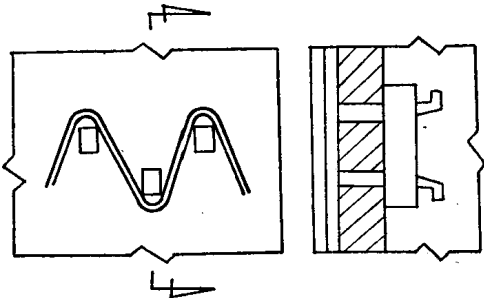


图 1—9 带状加热体在炉墙上竖放法