


应用型本科机电专业规划教材

机械工程材料 综合实验教程

主 编◎陈锐鸿
参 编◎欧阳志芳 陈俊健

JIXIE GONGCHENG
CAILIAO ZONGHE
SHIYAN JIAOCHENG



 中国轻工业出版社 | 全国百佳图书出版单位

应用型本科机电专业规划教材

机械工程材料综合 实验教程



 中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

机械工程材料综合实验教程/陈锐鸿主编. —北京: 中国轻工业出版社, 2017. 7

应用型本科机电专业规划教材

ISBN 978 - 7 - 5184 - 1365 - 2

I. ①机… II. ①陈… III. ①机械制造材料—高等学校—教材
IV. ①TH14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 074436 号

策划编辑: 王 淳

责任编辑: 杨晓洁 责任终审: 孟寿萱 封面设计: 锋尚设计

版式设计: 宋振全 责任校对: 吴大鹏 责任监印: 张 可

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印 刷: 北京君升印刷有限公司

经 销: 各地新华书店

版 次: 2017 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 720 × 1000 1/16 印张: 12.5

字 数: 240 千字

书 号: ISBN 978-7-5184-1365-2 定价: 29.00 元

邮购电话: 010 - 65241695 传真: 65128352

发行电话: 010 - 85119835 85119793 传真: 85113293

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社邮购联系调换

160738J1X101ZBW

前 言

《机械工程材料》是机械类学生必须修读的一门重要的学科基础课程。为加深学生对课本上理论知识的理解和应用,培养学生独立获取知识的自学能力,锻炼解决问题的实践技能,提高综合素质,单独设置了《机械工程材料综合实验教程》课,让学生在自主学习的基础上,自己设计实验方案,独立完成比较复杂的综合实验操作、检测并分析实验结果、撰写实验报告。实验是设计型、综合型的实验,学生在实验过程中,需要综合运用机械制造技术、机械工程材料、工程力学等课程的知识。

本教材建议实验教学为 32 学时,采用分散性、自主式实验的方法,学生可以根据自己的时间,依次完成不同的实验单元,要求学生实验时需要认真操作,记录数据,分析问题,并在实验报告中总结实验中出现的的问题和原因、解决方法、最后的实验成果。

本书共分为七章,其中第一、二章是阐述实验室设备的工作原理及使用方法,第三章为材料力学性能指标及检测设备的工作原理,第四章详细阐述了热处理工艺的知识,第五章介绍金相显微试样的制作及组织分析实验,第六章详细介绍了典型零件的热处理综合实验步骤及检测指标,并介绍一些典型的材料实验案例,第七章是实验任务书及常见金相图片分析。教材内容紧凑实用,可作为本科生在学习金属材料热处理工艺、零件性能检测分析、金相分析、技术报告撰写等实验知识的指导参考用书,也可作为高校开展《机械工程材料实验》的指导用书。本书第七章由欧阳志芳老师负责编写,第六章由陈俊健老师负责编写。

本书是在多年的实验教学基础上,综合借鉴国内高校同类实验教学的经验,根据华南理工大学广州学院的人才培养的特点编写而成,由于编者水平有限,书中仍可能存在错漏与不足之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2016 年 7 月

目 录

绪论	1
第一章 热处理加热设备和测控温仪表	5
第一节 热处理电阻炉	5
第二节 真空热处理炉和离子渗氮炉	8
第三节 热处理炉温度测量及控制仪表	11
第二章 金相显微试样的制备实验	15
第三章 金属材料的力学性能试验	26
第一节 硬度试验	26
第二节 金属的静拉伸试验	32
第三节 金属的其他力学性能	38
第四章 钢的热处理工艺实验	39
第一节 钢在加热时的转变	40
第二节 过冷奥氏体转变产物的组织形态与性能	43
第三节 钢的退火与正火	46
第四节 钢的淬火	51
第五节 钢的回火	59
第六节 钢的淬火、回火缺陷	64
第七节 钢的表面淬火	66
第八节 钢的化学热处理	68
第五章 金相组织分析实验	84
第一节 铁碳合金平衡组织的显微分析实验	84
第二节 钢经热处理后不平衡组织的显微分析实验	88
第六章 机械工程材料综合实验	93
第一节 实验的开展办法	93
第二节 实验报告的撰写	93
第三节 典型实验 1——轴承钢的热处理综合实验	95

第四节	典型实验 2——调质钢的热处理综合实验	102
第五节	典型实验 3——弹簧钢的热处理综合实验	104
第六节	典型实验 4——工具钢的热处理综合实验	106
第七节	典型实验 5——模具钢的热处理及其金相组织	109
第七章	附录	117
第一节	机械工程材料综合实验任务书	117
第二节	实验中常见的金相图及组织分析	159
参考文献	192

绪 论

一、机械工程材料综合实验的重要性

《机械工程材料》是机械类学生必须修读的一门重要的学科基础课程。为加深学生对课本上理论和概念的理解，培养学生独立获取知识的自学能力，解决问题的实践技能和综合素质，单独设置了《机械工程材料综合实验教程》课，让学生在自主学习的基础上，自己设计实验方案，独立完成比较复杂的综合实验过程、写出实验报告。为使学生更好地完成本综合实验，特编写本教材。本教材是该实验课的主要参考书。

二、机械工程材料综合实验的开展方法

机械工业和机械工程历来是国民经济建设的支柱产业和支柱学科之一，而且是基础产业和基础学科之一。随着科学技术的不断发展，对机械学科和机械类专业人才培养也提出了更高的要求。根据应用型人才培养的特点，我校单独设置了《机械工程材料综合实验教程》课程，结合我校和机械及汽车行业密切相连的特点，选择了一些零部件的热处理及分析检测作为实验的学习内容。

（一）实验课的预约

机械工程材料综合实验的上课时间将分散进行，上课时间由学生自主预约。实验预约分为若干步骤，其中学生必须完成第一步骤以后，才能进行预约第二步骤。第一步骤是实验任务的布置，每位学生将领到一份任务书，根据任务书学生必须在第一次上课以后完成实验方案的制订，并及时上网进行预约其他实验的开展时间，直至完成规定的实验课时。

（二）实验课的目的

实验课具体做法是发给每位学生一份常见工模具或机械零件产品的工艺设计任务书，让学生独立自主地选材。设计加工工艺路线并完成整个实验，将抽象的书本理论运用到生产实际相结合的实验内容。学生通过综合实验，学习到了工程实践的操作规范，掌握到了当前工厂工艺的执行办法，提高了自学能力、查阅文

献资料能力、分析和解决问题的能力，进而全面提高了综合素质。

（三）机械工程材料综合实验的教学特点及效果

1. 突出强调以学生为主，独立自主地完成实验

本实验为每位学生制订一份不相同的实验任务书，学生根据任务书的要求，独立选用材料并设计加工工艺路线，独立进行实验操作、灵活安排实验进程，独立对实验结果进行分析评定，最后完成综合实验报告的写作。在教学方式上表现出以学生独立操作为主，教师指导为辅，教师只是在学生经过了反复实验、深入思考后仍存在疑问时才给予必要的指点。同时，实验任务有一定的难度和一定的工作量，需要学生经过自身的不懈努力才可以很好地完成，只有这样，实验课的效果才能很好地体现出来。

2. 改革实验教学内容，强化实验的设计性与实践探索性

设计性：学生根据设计任务书的要求，通过自行查阅相关文献资料，从材料库中选择合适的材料，并制订合理的、详细的加工工艺路线。

实践探索性：学生制订的材料热处理加工工艺路线是否完全可行，如何对实验现象进行合理分析，如何对实验效果进行评定，需要学生自己通过严格的实验来探索、检验、分析和修正。并提出正确的解决方案。这既提高了学生的分析问题和解决问题的能力，又锻炼了学生的实验技能和动手能力。

设计性与实践探索性相结合践行了理论联系实践的教学思想，设计性体现出培养学生运用所学知识的能力，实践探索性体现出通过实践深化对理论知识的理解，既丰富了学生的理论知识，又培养了学生的创新意识和求真务实的科学精神。

3. 培养学生综合运用专业理论知识和专业实验技术的能力

实验要求学生首先根据设计任务书提出的性能要求，通过查阅相关文献资料，选择合适的材料并设计具体详细的材料加工工艺路线，然后通过自己动手实验来探索、检验、分析和修正制订的材料加工工艺路线。这就会涉及众多专业知识，如金属学、金属材料学、金属力学性能、金属热处理原理和工艺、热处理设备和炉温仪表等，也应用到多种实验技术，如金相制备与分析技术、力学性能测试技术、热处理操作技术等，有利于提高学生综合运用理论知识的能力和锻炼学生树立正确操作各种仪器设备的实验技能。同时，学生的任务书都是针对最常见机械零件产品的生产工艺，通过系统实验训练，使学生对机械零件的生产工艺尤其是热处理工艺有了深刻的认识，这对于今后学生从事技术工作是十分有益的。

4. 实验教学方式, 采取了独立自主、分散进行的开放式实验教学

由于实验比较复杂, 学生对实验设备和操作技术比较陌生, 容易在实验过程中出错。本着大胆放手让学生独立进行实验、允许失败、鼓励尝试创新的教学理念, 本实验课还采取了有计划分散进行实验的做法, 除教学计划时间外, 允许每位学生根据自己的学习生活具体情况安排各自的实验, 使每位学生都有充裕的时间进行实验, 而不会因为时间紧迫胡乱对付实验, 实验失败的同学可以安排时间重做实验, 有浓厚兴趣的同学可以安排时间尝试创新, 既充分发挥学生的主观能动性使其能够更好地完成实验, 又充分利用了设备并避免了因实验条件有限对学生实验的影响, 从而保证了实验教学的质量和效果。

三、机械工程材料综合实验课的要求

学生通过本课程的学习和实验实践, 要求掌握下面的基本内容:

(1) 通过综合实验初步掌握金属材料的化学成分、热处理工艺、组织与性能之间的关系, 了解由于选取的材料不同或者同一材料选取的热处理工艺不同, 得到的组织不同, 进而所得到的性能也不同的实际知识和技能。

(2) 了解由于热处理的各种加热设备的用途、特点和选用原则, 以常见组织观察和性能检测设备(如硬度计和金相显微镜)的基本原理和使用方法。

(3) 熟悉金相试样制备的基本过程及学会制备金相试样, 并熟练掌握金相照片的制作过程。

(4) 培养学生查阅文献资料的能力, 用于指导工艺方案的制订、试验过程的检测及结果分析、并对试验结果进行综合分析, 写出报告。

四、机械工程材料综合实验报告撰写大纲

综合实验报告采用统一的格式, 并按如下大纲撰写:

(一) 任务书

(二) 设计具体零件工作条件, 受力分析, 从中提出具体零件的性能和金相组织要求。从多种可供选择的材料中选取一种较合适的材料, 要重点分析各种不同材料中含碳量、各合金元素含量的要求和作用, 其中选材的主要原则是:

(1) 通过热处理, 零件可以达到使用性能的要求。

(2) 材料加工性能比较好(冷、热加工)。

(3) 材料有较好的经济性, 来源广泛。

(三) 对选用材料制订合理工艺路线并实施。

(1) 分析、测定给定原材料的硬度 (HRC、HRA、HB 等)、金相组织 (画出示意图), 估计原材料是经何种热处理。

(2) 选择何种预先热处理, 对为什么要选择该种预先热处理, 进行工艺分析, 测定经预先热处理后的性能 (硬度) 和金相组织 (画示意图)。

(3) 制订淬火、回火工艺 (包括加热方法、温度、保温时间、冷却方式等), 对为什么要选择该种热处理工艺, 进行工艺分析; 选择哪种加热设备, 对为什么要选择这种加热设备, 如何操作; 测定热处理后硬度、金相组织, 写出工艺和操作要点, 对热处理过程中出现的问题 (如氧化、脱碳、变形、开裂、硬度偏高或偏低、均匀程度等) 进行分析, 最后对该设计进行综合分析。

(4) 进行表面处理或化学热处理, 选择哪种加热设备, 分析表面处理或化学热处理的原理, 制订工艺并说明如何实施该工艺; 对试件测定表面硬度 (HV 或 HRC), 测量出硬化层 (或渗层) 厚度、基本硬度、金相组织、分析经表面处理或化学热处理试件的质量。

(5) 叙述金相照片制作过程, 如何得到一张合格的金相照片。

(6) 附上金相照片、标注材料、热处理工艺、渗层金相组织、厚度、基本组织、腐蚀剂、放大倍数等。

(四) 综合实验心得体会

(五) 参考文献、资料

第一章 热处理加热设备和测控温仪表

实验目的

- (1) 了解普通热处理的设备及操作方法；
- (2) 了解不同类型的电阻炉温度及控制仪表；
- (3) 了解当前先进的热处理设备的工作原理。

热处理是通过加热和冷却的方法改变金属材料及制品内部的组织，从而达到所需要性能的工艺过程，要保证热处理工艺的正确执行，取得良好的热处理加工性能，必须要有良好的加热设备和准确的测控温仪表。

热处理加热炉是热处理车间的主要设备，其种类繁多，按加热方式分类，有电阻加热、盐浴加热、离子轰击加热、感应加热、电接触加热和激光加热等；按加热介质分类，有空气加热、盐浴加热、可控气氛加热和真空加热等。而电阻加热炉和盐浴炉中按工作温度又可分为高温加热炉（ $> 1000^{\circ}\text{C}$ ）。中温加热炉（ $650 \sim 1000^{\circ}\text{C}$ ），低温加热炉（ $< 650^{\circ}\text{C}$ ）；电阻炉中按炉膛的形状还可分为箱式电阻炉和井式电阻炉。按生产周期又可分为周期作业炉和连续作业炉，而感应加热设备，激光加热设备和电接触加热设备则是表面淬火热处理的专用设备。

第一节 热处理电阻炉

热处理电阻炉是利用电流通过高电阻元件时发热，把热量通过辐射和对流传到工件上对工件进行加热的。常用的电热元件，高温电阻炉为硅碳棒（最高使用温度为 1350°C ）和高温电阻丝（最高使用温度为 1200°C ），中低温电阻炉为铁铬铝电阻丝（最高使用温度为 950°C ）。

一、箱式电阻炉

箱式电阻炉的结构如图 1-1 所示，由炉壳、耐火层、保温层和炉门组成，炉膛内布置着电热元件，电流通过电热元件发出热量加热工件，热电偶从测温孔伸入炉内测量炉内温度。中温箱式电阻炉和 1200°C 高温箱式电阻炉的电热元

件一般使用铁铬铝电阻丝（中温用 $0Cr27Al7Mo2$ ），布置在炉膛的两侧和炉底板下面，而高温箱式电阻炉的电热元件一般使用碳化硅电热元件（硅碳棒），垂直布置在炉膛的左右两侧。高温电阻炉还必须配上变压器，以调节电炉的输入功率。

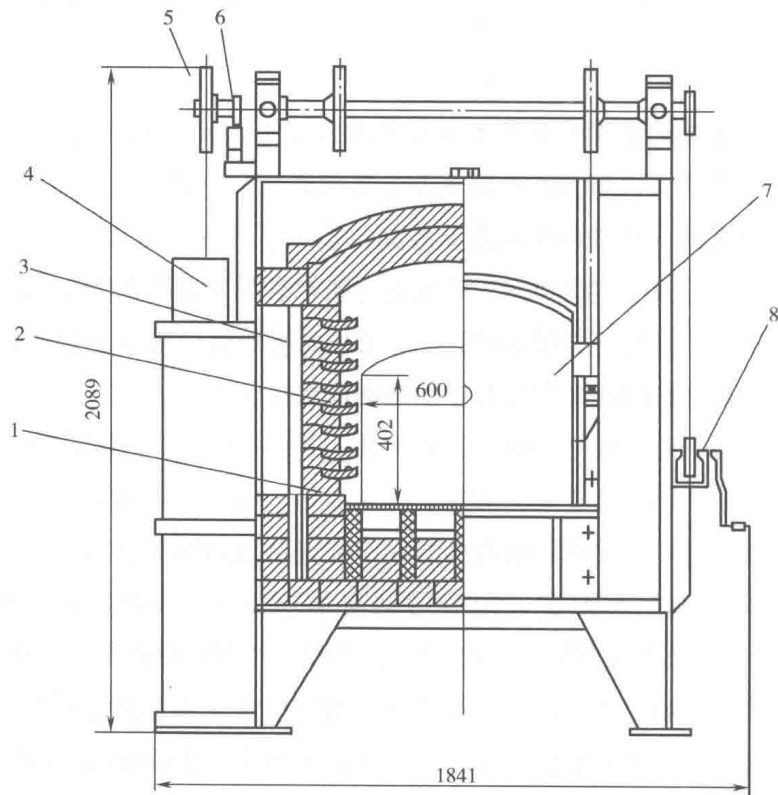


图 1-1 45kW 中温箱式电阻炉

- 1—炉底板 2—电热元件 3—炉衬 4—配重 5—炉门升降机构
6—限位开关 7—炉门 8—链轮

中温箱式电阻炉的最高使用温度为 950°C ，主要用于碳钢和合金钢的退火、正火、淬火和固体渗碳； 1200°C 高温箱式电阻炉的最高使用温度为 1200°C ，硅碳棒高温箱式电阻炉的最高使用温度为 1300°C ，主要用于高速钢刀具、高铬钢模具和高合金钢的淬火加热。

箱式电阻炉使用中存在升温慢，生产效率低，炉膛温度不均匀，温差较大，炉子密封性差，工件氧化脱碳严重和劳动条件差，劳动强度大等缺点。

实验室用的小型箱式电阻炉结构一样，只是炉膛是一整体，电热元件穿进炉壁四面分布；炉门结构简单、紧凑。

二、井式电阻炉

对于长形工件，放在箱式炉中加热时，由于工件自重而会引起弯曲变形，而且操作也不方便，采用井式炉加热可以把工件垂直悬挂起来，垂直方向装卸方便得多。

中温井式电阻炉、低温井式电阻炉和箱式电阻炉一样，它们也都由炉壳、炉衬（耐火层、保温层）和炉盖组成，井式炉的炉口在上方，电热元件分层布置在炉的“内壁”上。同样，中温和低温井式电阻炉的电热元件一般都使用铁铬铝电阻丝，只不过中温炉电热元件的表面功率大温度高，主要靠辐射把热量传给工件，而低温炉电热元件的表面功率较小，温度较低，主要靠对流传热。为使低温炉温度均匀，在炉盖下面装有风扇，强迫炉内空气循环对流。

中温井式电阻炉最高工作温度为 950°C ，主要用于长轴、导轨等长形零件的退火和淬火加热以及高速钢刀具的淬火预热等，而低温井式电阻炉最高工作温度为 650°C ，主要用于各类工件的回火处理和铝合金的固溶时效处理。

高温井式电阻炉结构和中温炉一样，也有使用含 Mo 电阻丝和硅碳棒两种。

井式炉除可以防止细长工件在加热时变形外，还可以直接利用各种起重吊车进行装炉、出炉，大大改善了劳动条件；但中温和高温井式炉也存在炉温不均匀，炉体量少的缺点。

三、气体渗碳炉

气体渗碳炉的构造是在中温井式电阻炉内加上一个密封的渗碳罐构成。炉盖上装有滴入渗剂的滴量器和排出废气的排气管。气体渗碳炉要求炉罐有非常好的密封性能，不使空气进入罐内，也不让炉气外溢，以保持罐内一定活性介质和压力。为保证活性介质与工件有良好的接触和均匀受热，炉内装有风扇，加速活性介质的循环。

气体渗碳炉最高工作温度为 950°C ，除用做渗碳外，也可以用做渗氮、碳氮共渗、硫氮共渗、蒸汽处理及重要零件的淬火、退火处理、应用相当广泛（图1-2）。

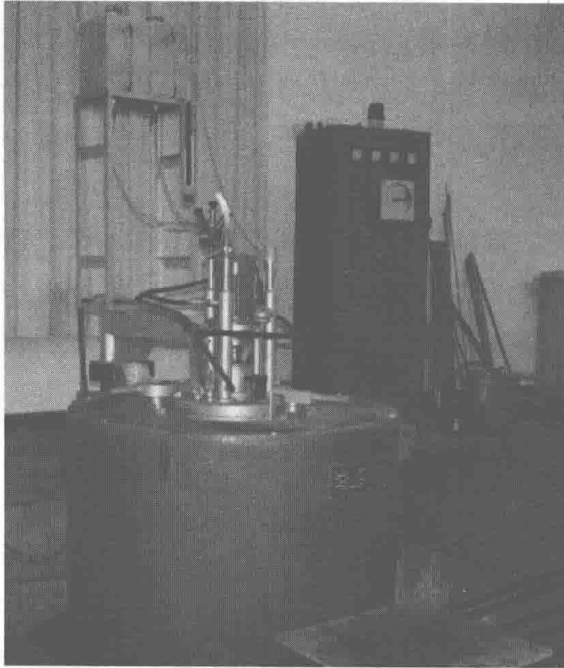


图 1-2 气体渗碳炉

第二节 真空热处理炉和离子渗氮炉

真空热处理炉有真空退火炉、真空淬火炉、真空回火炉、真空渗碳炉、真空钎焊炉及真空烧结炉等。而按结构和加热方式，可分为外热式真空热处理炉和内热式真空热处理炉。

一、外热式真空热处理炉

外热式真空热处理炉是带密封炉罐的炉子，其结构与普通电阻炉类似，只是需要将盛放热处理工件的炉罐抽成真空。

外热式真空热处理炉结构简单，易于制造，真空室容积小，排气量少，容易达到高真空，不存在真空放电和工件与炉衬产生化学反应的问题，但炉子的热传递效率低，加热速度较慢，另外受炉罐的影响，工作温度不能太高，而且难于做到连续作业。

二、内热式真空热处理炉

内热式真空热处理炉的构造比较复杂，制造、安装精度要求高，调试困难，造价较贵，但因为可以实现快速加热、快速冷却，使用温度高，已成为真空热处理的主要用炉（图 1-3）。

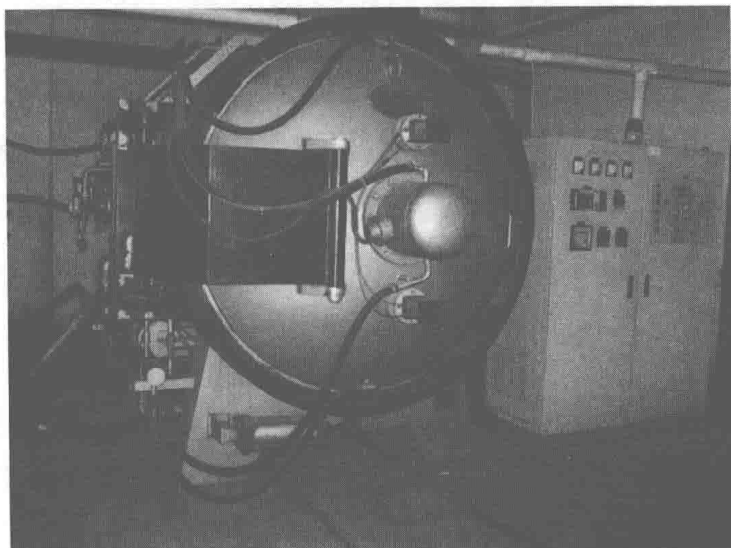


图 1-3 内热式真空油淬炉

真空热处理炉用于淬火的有气淬真空炉、油淬真空炉和多用途真空炉。油淬真空炉是利用真空淬火油作为冷却介质，对工件进行淬火。常见的是双室真空淬火炉。即工件在加热室加热后，转到冷却室中用风扇吹冷、通入气体冷却或沉到淬火油中冷却。这样可保持加热室的温度，提高效率；还可隔开淬火油烟，以免油烟进入加热室造成不良影响。气淬真空炉利用气体作为冷却介质，一般多采用氮作为冷却介质。为了提高冷却速度，扩大处理钢料的范围，还发展了高压气淬真空炉、高流率气淬真空炉和高压高流率气淬真空炉。

三、真空渗碳炉

真空渗碳炉是在真空淬火炉的基础上，结合渗碳工艺的要求发展的炉型。特点是增加了渗碳的供气系统和炭黑处理系统，成套设备中，一般还配备有气体控制装置和碳势控制装置。

真空渗碳炉可代替一般气体渗碳炉供齿轮、轴、销等各类零件渗碳之用，真

空渗碳时间短，渗碳质量好，劳动条件好。

四、离子渗氮炉

离子渗氮炉主要由炉体、真空系统、供气系统和电源等几部分组成。炉体结构示意图如图 1-4。电源是一个可调的大功率直流电源，工作时，工件放在工作台上作为阴极，外加一阳极，抽真空到达一定真空度后，在阴阳极间加上高压直流电，达到一定的电压时，击穿稀薄的气体，使气体电离产生辉光放电，带电的离子以很高的速度轰击工件表面，使工件升温。到达渗氮温度后，通入氨气，氨被电离成 N 离子和 H 离子，N 离子轰击工件表面并渗入工件形成氮化层。

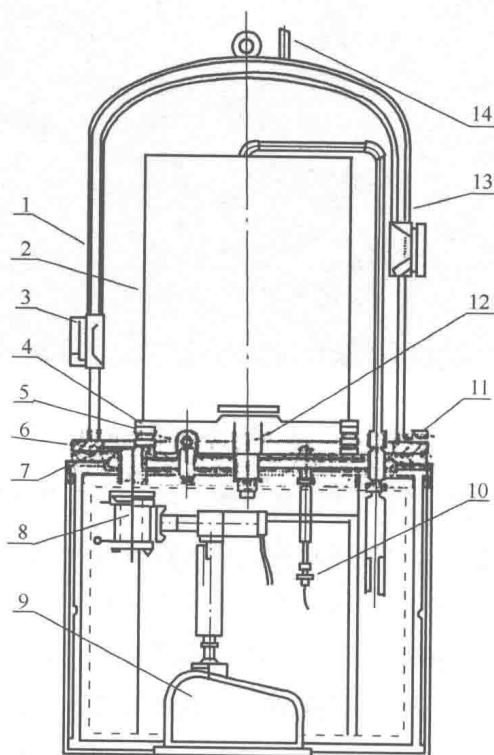


图 1-4 离子渗氮炉

- 1—双层炉体 2—内阳极 3—观察窗 4—瓷绝缘子 5—屏蔽帽 6—阳极接线柱
7—底盘 8—真空泵 9—真空泵 10—电阻真空计规管 11—进水管 12—阴极托盘装置
13—进氮气管 14—排水管

离子渗氮渗速快，渗氮层氮浓度容易控制，渗层脆性小，工件变形小，已在生产中广泛应用。离子渗氮炉还可以进行离子渗碳、离子碳氮共渗、离子渗硫、离子氧氮化共渗等工艺。经过改装还可以进行离子渗金属，这些工艺生产上都已

在应用。

离子渗氮也有一定的局限性，在同一炉中，形状、大小不一的工件难以做到温度均匀一致，甚至同一工件的不同位置都可能出现大的温差，而使渗层不均匀，特别是边角、刃口部分由于温度高，渗层会有较大的脆性。

第三节 热处理炉温度测量及控制仪表

温度、压力、流量、气氛成分等参数对热处理质量起重要的作用，而温度又是其中最重要的参数。要提高热处理产品的质量，正确制订工艺规程是很重要的，但更重要的是这些工艺在生产中能否可靠地准确地得到实现。温度测量和控制仪表就是人们用来实现对温度测量并保持在一定范围变化的仪表。

一、感温元件

感温元件是把温度转变成其他参量（如热电势）通过仪表显示出温度的元件。热处理中常用的感温元件有热电偶、热电阻、光学高温计和辐射高温计等。

1. 热电偶

热电偶是将温度转变成热电势的一种感温元件，它由一端焊在一起的两根不同材料的金属丝构成。当热电偶的冷却端有温度差时，在热电偶的回路便会产生热电势，冷热端的温差越大，热电势也越大。测温仪表就是把这种热电势测量出来，查热电势与热端温度关系的热电偶分度表就可得出热端温度，而多数仪表是直接按温度刻度的。

热电偶具有结构简单、性能稳定、使用方便、测量精度高、测量范围广的优点，在热处理生产中得到广泛的应用，图 1-5 是热电偶结构简图。

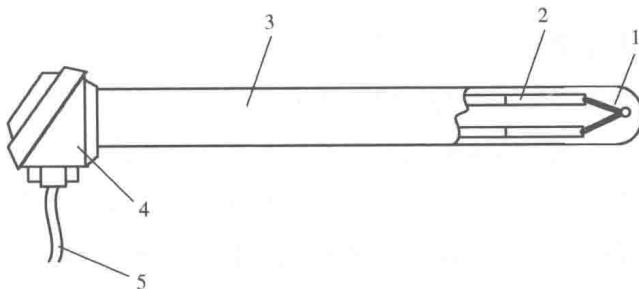


图 1-5 热电偶结构

1—热电极 2—绝缘管 3—保护管 4—接线盒 5—补偿导线