

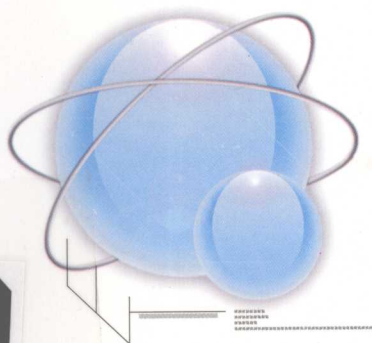
高等学校教材 · 材料科学系列

MATERIAL SCIENCE TEXTBOOKS FOR HIGHER EDUCATION

Material Science

材料加热炉基础

杨君刚 编著



17

4690

西北工业大学出版社

／ 高等学校教材

材料加热炉基础

杨君刚 编著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书主要包括材料加热炉炉内气氛、加热炉传热分析计算以及材料加热炉结构尺寸、功率设计基础。书中分别介绍了炉用保护气氛选用与设计、真空气氛的特点、炉内气体运动状态分析、炉内传热分析计算、炉型选择及炉膛尺寸设计、炉用材料、电阻炉炉体结构及功率设计、电热元件(体)结构及尺寸设计、常用材料加热炉及获得高温的材料先进加热技术和设备。在注重加热炉基础介绍的同时,列举了大量例题、思考题和习题以及设计实例,以便于读者对相关内容的进一步理解,以及对加热炉设计方法的掌握。

本书可以作为材料类专业本科生教材或教学参考书,也可供从事材料研究和开发的生产、科技人员学习与参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料加热炉基础/杨君刚编著. —西安:西北工业大学出版社,2009.12
ISBN 978-7-5612-2712-1

I. ①材… II. ①杨… III. ①加热设备 IV. ①TK17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 242796 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西丰源印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:14.25

字 数:343 千字

版 次:2009 年 12 月第 1 版 2009 年 12 月第 1 次印刷

定 价:25.00 元

前 言

材料的制备、成型及其性能的提升总是离不开受热,比如,金属材料的成型及热处理,无机非金属材料的烧结,大多数高分子材料的成型等,这些都需要各种加热设备作保证。因此,加热装备及其性能和特点成为材料工作者与生产技术人员越来越关注的焦点。

加热炉是实现材料加热工艺过程的主要设备,加热炉性能的优劣对材料的制备、处理工艺过程及组织性能会产生直接影响。为了实现不同的加热过程,不同材料行业采用加热设备的形式和结构有所不同。近年来,不同行业加热炉设计技术相互融合,发展较快,新的加热技术和加热炉层出不穷。

为满足材料科学与工程专业的教学需要和材料研究、开发、生产对加热炉设计和使用的需求,在继承以往相关教材及专著精华的基础上,笔者结合多年来从事加热炉教学和科研工作的体会与经验,吸纳有关加热炉研究的新成果编写了本教材。

本教材融合了各类材料加热炉的设计基础,注重材料加热炉设计的基本思路和方法。其主要内容包括材料加热炉的类型及特点,炉内气氛特性、选用及设计,炉气运动分析与控制,加热炉内传热分析与计算,材料加热炉设计内容及步骤,炉用材料及选择,加热炉炉体结构及设计,加热炉功率的设计计算方法,加热元件材料选用和尺寸设计,材料加热炉技术指标及测试。在最后一章介绍了几种高温加热技术及设备特点。

在介绍加热炉设计基础知识和方法时,给出了若干例题、思考题和习题,借以使学生在更好地掌握基本内容的同时,有利于培养分析和解决实际问题的能力。本书也可作为科研工作者和生产技术人员的参考书籍。

主审谷臣清教授对教材的编写提出了许多宝贵的修改意见,在此表示感谢。

在编写过程中得到西安理工大学材料学院同事的热情关心和支持,在此一并表示致谢。

本教材的部分设计用数据、图片及资料,选自有关书刊,在此谨向各原著者表示谢意。

由于学术水平所限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2009年5月于西安理工大学

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 材料工程装备及分类	1
1.2 材料加热炉类型及其选用	3
1.3 材料加热炉技术的发展趋势	6
思考题	8
第 2 章 材料加热炉内气氛选用及设计基础	9
2.1 材料在加热气氛中的氧化还原反应分析	9
2.2 材料无氧加热气氛的选择与设计基础	14
2.3 材料加热常用保护气氛的种类及选用	19
2.4 真空及真空气氛加热技术特点	21
2.5 材料制备用活性气氛及其控制	25
思考题	26
习题	26
第 3 章 加热炉内炉气的运动状态	28
3.1 静止炉气的能量和能量转换	28
3.2 运动炉气的能量与能量转化	34
3.3 炉内炉气运动的动力和形态	42
思考题	44
习题	44
第 4 章 加热炉内传热过程分析与计算基础	46
4.1 传热的基本概念	46
4.2 加热炉内传导传热分析与计算	48
4.3 加热炉内对流换热分析与计算	58
4.4 加热炉内辐射换热分析与计算	63
4.5 加热炉内综合传热的分析与计算	81
思考题	91
习题	92

第5章 材料加热炉炉型及炉膛尺寸设计	94
5.1 材料加热炉的设计内容与步骤	94
5.2 炉型的确定	96
5.3 炉膛尺寸的设计	97
思考题	103
习题	103
第6章 材料加热炉炉用材料及选用	104
6.1 加热炉用耐火材料	104
6.2 加热炉用保温材料	114
6.3 加热炉耐热构件用金属材料	117
6.4 加热炉用电热材料及其主要性能指标	118
6.5 电热合金	120
6.6 高熔点金属电热材料	127
6.7 非金属电热材料	130
思考题	137
第7章 材料加热炉炉体结构及设计	139
7.1 炉体结构及设计技术要求	139
7.2 热壁式炉体结构及设计	140
7.3 冷壁式炉体结构及设计	146
思考题	152
第8章 材料加热炉功率设计	153
8.1 加热炉的功率确定	153
8.2 加热炉功率的分配	158
8.3 接线方法	160
8.4 加热炉功率的调节	163
思考题	163
习题	164
第9章 材料加热炉电热元件设计	165
9.1 电热材料的表面允许功率负荷确定	165
9.2 电热合金电热元件设计	169
9.3 高熔点金属电热体的设计	180
9.4 非金属电热元件设计与安装	186

思考题.....	197
习题.....	197
第 10 章 实现高温的加热技术简介	199
10.1 氧化物高温电阻炉.....	199
10.2 感应加热及感应加热炉.....	200
10.3 电弧炉与弧像炉.....	205
10.4 电子束炉.....	209
10.5 等离子炉.....	211
10.6 太阳能加热炉.....	212
10.7 微波加热炉.....	215
思考题.....	217
参考文献.....	219

第 1 章 概 述

中国是最早使用加热手段进行材料生产的国家之一,早在半坡文化时期就烧制了各种陶器,2 000 多年前已掌握铜和铁冶炼的加热技术。在陶瓷烧制鼎盛时期,陶瓷器以不同地区不同窑炉命名,如烧制耀州瓷器的窑炉称为耀州窑。到了近代,由于欧洲工业生产的迅猛发展,工业加热技术和加热炉性能得到全面提升。中国从 20 世纪 50 年代以后才开始大力发展自己的工业,加热技术主要来自苏联。20 世纪 80 年后代引进欧、美、日技术,如德国的德固沙技术、奥地利的爱协林技术、美国的易普生技术。20 世纪 90 年代,在引进、消化、吸收国外技术的基础上,国内工业加热技术得到全面发展,其设计制造水平大幅度地提高。进入 21 世纪后,随着传统材料工艺改进和先进材料开发的需要,各类加热炉层出不穷。目前已形成了较为完整的材料工程装备体系。

1.1 材料工程装备及分类

材料装备是所有材料制备及处理用设备的总称,它是为保证材料的成分、改善材料的组织结构、提升材料的性能、实现材料工艺过程而设计的硬件设备。目前,材料装备种类繁多、功能丰富,主要用于新材料研制、开发和生产。

按材料工作的性质,可将材料装备分为材料研究装备、材料开发装备及用于生产的材料工程装备。由于工作的性质和侧重点不同,对材料装备的要求也就不同。材料研究装备主要为了满足研究者弄清材料组织结构与性能的变化规律的需要。材料开发装备主要用于先进材料的研制和生产工艺的中试。材料工程装备主要完成材料生产工艺过程,保证在较高生产效率和较低生产成本要求下的产品质量稳定性。

一般用作材料研制和开发使用的材料装备尺寸较小,但功能要求更齐全,气氛和温度控制要求更严格,工艺适应性要求更强。它除了采用与材料工程装备相类似的装备外,还包括了大量用于材料成分、组织结构和性能的分析与检测,以及工艺过程参数测量与控制的各种设备和装置。

作为材料生产用的材料工程装备,按其在工艺过程中的作用和地位可将其分为主要装备及辅助装备两大类,如表 1.1 所示。

主要装备包括加热炉、加热装置、冷却设备、热工测量控制仪表及计算机。它用于完成材料工艺过程中的主要操作,包括加热及冷却。辅助装备包括清理设备、检验设备、矫正设备、加热冷却介质制备及处理设备等,用于完成材料工艺过程中的辅助操作、各种辅助工序、动力供应及保证生产安全等任务。材料工程装备要求其性能稳定、工艺运行可靠、操作方便和便于维护维修,一般采用技术较成熟的装备。

表 1.1.1 材料工程装备的分类

主要装备			辅助装备						
加热炉	加热装置	冷却设备	清理设备	检验设备	矫正设备	加热冷却介质制备及处理设备	起重运输、装卸设备	动力设备	工装
热处理加热炉，冶金燃料炉，可控气氛炉，真空炉，盐浴炉，离子炉，流态床炉，烧结炉，热压炉，感应炉，电弧炉，工业窑炉	感应加热装置，火焰加热装置，电接触加热装置，电液加热装置，激光加热装置，电子束加热装置，表面加热装置，沉积装置，等离子加热装置，太阳能加热装置，微波加热装置	一般淬火热处理设备，冷却设备，矫正设备，冷却成型设备，深冷处理设备	清洗设备，酸洗设备，喷砂、喷丸、抛丸设备，发蓝、发黑设备，蒸汽处理设备等	硬度检测设备，力学性能检测设备，宏观、微观组织分析设备，探伤设备等	淬火、正火、矫直、压床、工件变形检测设备等	介质的储存及制备设备，淬火热介质的循环冷却系统，可控气氛发生装置等	起重运输机械，运输机械及车辆，装卸操作装置，自动化作业装置	变压器，动力管道，输电线路，冷却水供给装置，通风装置，鼓风机，压缩机，动力设备等	工具、吊具、夹具

1.2 材料加热炉类型及其选用

加热炉是在材料研制、开发及生产中应用最广的设备,且结构和类型最多,如表 1.2 所示。使用的行业不同,炉型的结构和命名不同,如用于陶瓷制品烧制的加热炉称为窑炉,用于材料热处理的加热炉叫热处理炉,用于功能材料烧结的加热炉叫烧结炉。

加热炉按照加热热源、使用的工作温度、使用的加热介质、作业方式、工艺用途的不同,有着不同的命名和分类。目前,加热炉常用的加热热源有燃料加热和电加热两种方式。另外,太阳能加热也是材料研究者加热材料时使用的一种热源。常用电加热方式有电阻加热、感应加热和电弧加热。高能粒子加热和微波加热逐渐成为许多新型材料制备时采用的重要加热手段。按加热炉使用的工作温度不同,可将其分为高温炉、中温炉和低温炉。在不同的行业,温度区间划分不同。对于金属材料热处理,使用温度 $\leq 650^{\circ}\text{C}$ 的加热炉称为低温炉,在 $650\sim 950^{\circ}\text{C}$ 温度区间称为中温炉,使用温度高于 950°C 的加热炉称为高温炉。金属热处理的温度一般小于 $1\,350^{\circ}\text{C}$,陶瓷材料烧结温度主要在 $1\,000\sim 2\,000^{\circ}\text{C}$ 区间。近年来,已有加热炉的使用温度接近甚至超过 $3\,000^{\circ}\text{C}$ 。

表 1.2 材料加热炉的分类

热 源			工作温度	使用介质		作业方式	工艺用途
燃料加热		气炉 油炉 煤炉	高温炉 ($\leq 650^{\circ}\text{C}$) 中温炉 ($650\sim 950^{\circ}\text{C}$) 低温炉 ($>950^{\circ}\text{C}$)	气体	空气 保护气氛 可控气氛 活性反应气氛	间隙式 半连续式 连续式 脉动式 流动式	真空退火炉 渗碳炉 氮化炉 淬火炉 回火炉 时效炉 烧结炉 热压炉 热处理炉 碳化炉
电加热	电阻加热	直接通电加热 电阻间接加热		液体	熔盐炉 油浴炉		
	感应加热	工频感应加热炉 中频感应加热炉 高频感应加热炉		固体	砂浴炉 流动粒子炉		
	电弧加热	电弧加热炉		真空	超高真空炉 高真空炉 中真空炉 低真空炉 预抽真空炉 真空钎焊炉 真空淬火炉 内热式真空炉 外热式真空炉 真空烧结炉		
	高能粒子加热	激光加热炉 电子束加热炉 等离子加热炉					
	微波加热	微波烘干炉 微波烧结炉					
	太阳能加热						

材料可以用气体、液体和固体介质进行加热,采用不同的加热介质相应需要不同结构类型的加热炉,如保护气氛炉、盐浴炉、流动粒子炉、真空炉等。按作业方式可将加热炉分为间歇作业炉、半连续作业炉和连续作业炉。按工艺用途的不同则分类更多,通常依工艺名称命名,如渗碳炉、烧结炉、热压炉、炭化炉、真空淬火炉、钎焊炉等。

燃料炉一般按使用燃料进行分类,使用煤的称为煤炉,使用重油的称为油炉,使用煤气或天然气的称为燃气炉或气炉。工业上最早采用的加热炉多为煤炉,但由于能耗大、污染严重、劳动强度高、炉温可控性差等原因,目前已很少使用。气炉和油炉多用于大型铸锻件的加热,电能紧缺的地区也较多采用。

电阻加热分为直接通电加热和电热元件间接加热两种类型,后者就是通常所称的电阻炉。电阻炉因污染少,温度可控性强,是目前使用最为广泛的炉型。按采用加热元件的材料不同,电阻炉可分为不同的类型,如电热合金加热炉、碳硅棒加热、硅钼棒加热炉、钼丝加热炉、碳管加热炉、钨片加热炉等。

传统的感应加热炉多用于有色金属冶金行业,高熔点金属和陶瓷的高温烧结也用感应加热炉来完成。电弧炉主要用于黑色金属冶炼。高能粒子加热为特殊加热手段,目前激光加热使用较多。微波加热具有均匀透热、加热速率、节能等特点,成为材料制备的新型加热手段,具有较好的应用前景。

若对气氛无特殊要求,可在空气炉或火焰炉中加热,否则必须在特殊气氛中进行加热。如钢铁在合适的可控气氛中加热可以避免氧化脱碳,渗碳和氮化等化学热处理必须在特殊的活性反应气氛中进行加热,陶瓷或粉末冶金制品一般在保护气氛(氮气、氢气、氩气或氨分解气等)中进行烧结加热。有时材料的制备和合成必须有气氛的介入,如钨粉的生产大多采用氢气还原炉。真空炉根据真空度的不同可分为超高真空炉($<10^{-5}$ Pa)、高真空炉($10^{-1} \sim 10^{-5}$ Pa)、中真空炉($10^2 \sim 10^{-1}$ Pa)、低真空炉($10^5 \sim 10^2$ Pa)。预抽真空炉是先抽真空再充入保护气氛。真空炉按其加热结构形式可分为内热式和外热式。真空炉可以实现真空退火和淬回火、真空化学热处理、真空烧结、真空气相沉积镀膜、真空钎焊等工艺。

通常使用的液体介质加热炉有盐浴炉、油浴炉和铅浴炉。常用的固体介质加热炉有沙浴炉和流动粒子炉。盐浴炉主要用于工具钢的热处理,有色金属(如铝、镁等)热处理一般在低温盐浴炉中进行。铅浴炉主要用于工件整体或局部的快速加热。

材料在不同的炉膛介质中加热时加热效果不同,所以在选用加热炉炉型时,首先应根据工艺要求,确定在一定加热温度下可选用的加热介质。不同炉膛介质加热炉的加热特点不同,其结构类型和使用性能特点也不同,如表 1.3 所示。加热介质的选用主要考虑材料的制备工艺效果和使用成本。

选用空气或燃料气氛加热时,可用电阻炉和燃料炉。燃料炉的炉温波动较大($10 \sim 50^\circ\text{C}$),热效率较低,为 $10\% \sim 25\%$,劳动条件较差,设备投资及生产成本较低,一般工艺要求不高时或特殊行业采用。

电阻炉的结构简单,操作维修方便,加热过程容易控制,炉温波动较小($5 \sim 10^\circ\text{C}$),容易实现机械化、自动化,热效率按不同炉型约为 $20\% \sim 60\%$ 。炉内气氛除了可用空气或燃料气外,也可用可控气氛及真空,加热效果好,劳动条件好,但设备投资及生产成本较高。一般在工艺要求较高时选用。

表 1.3 不同炉膛介质加热炉的性能特点

介 质	炉 型	性能特点		
空气或燃料	电阻炉 燃料炉	结构简单 附属设备较少 易操作 设备费用低	易氧化脱碳	热效率较高 生产成本低
可控炉膛气氛	保护气氛炉	结构简单 密封性较好 附属设备较少 易操作 设备费用低	气氛保护加热	热效率较高 材料消耗较少 生产成本较低
	可控制气氛炉 活性气氛炉	结构复杂 附属设备多 操作复杂 设备费用高	可控气氛加热 活性气氛加热	热效较低 材料消耗量大 生产成本高
真空状态	真空炉	结构复杂 制造加工要求高 附属设备多 操作复杂 设备费用高	防止氧化脱碳 工件变形很少	热效率高 生产成本昂贵
液体介质	浴炉	结构简单 操作简单 设备费用低	加热迅速均匀 表面及局部加热	辐射热损失大 辅助材料消耗量大 炉子启动不便

工艺的多样性、产品的批量和生产成本成为选择不同作业制度的加热炉炉型应考虑的主要因素。不同作业方式加热炉的性能特点及主要用途如表 1.4 所示。对于单件、多品种工件的生产一般采用间隙式加热炉,而对于大批量或长工艺周期工件的生产一般采用半连续或连续加热炉。

总之,炉型的选择取决于加热热源、工作温度、使用介质及工艺用途等。根据制品或零件的尺寸、形状、重量、批量、作业方式等因素,可选择加热炉的结构。炉子的结构类型主要取决于炉膛形状、炉底结构及进出料机构。各行各业的各种不同产品零件对材料工艺要求变化很大,因此材料制备设备结构类型繁多。近年来,为了提高产量、保证质量、节省能源、减少环境污染、改善劳动条件,加热炉结构更新很快,使用性能也得到大幅度的提升。特别是计算机应用于加热炉工艺过程控制,为设备的机械化、自动化流水线生产提供了技术条件。加热炉也可与各种辅助设备配套组合成各种综合性的联动机或生产线,这大幅度地提高了生产效率,稳定了产品质量,降低了生产成本,改善了劳动条件,减少了环境污染。

表 1.4 不同作业方式加热炉的性能特点及主要用途

炉 型		性能特点			用 途	
间隙加热炉		工件周期式装料操作过程不相重叠 每批装料量大	结构简单 操作方便 密封性好 热损失少 造价低廉	通用性强 便于调整工艺 生产率高 热效率低	炉温均匀性较差 炉温易波动 工艺不易控制 工件质量稳定性差 不便于流水生产	单件多品种 工件
半连续 加热炉		生产过程有部分重叠 前批工件开始冷却 后批工件即开始加热	与周期式作业炉相似,具有可移动的炉罩、加热箱、炉罐或炉底	不便调整工艺 通用性差 质量稳定 生产率高 生产成本低	炉温均匀性较好 工艺易控制 工件质量较稳定性	大批量生产 和长周期
连续加热炉	脉动式	短时间歇装料 不同批工件装卸料 加热冷却同时进行互相重叠	结构复杂 密封性较差 热损失大 造价高	不便调整工艺 通用性差 质量稳定 生产率高 生产成本低	炉温均匀性较好 工艺易控制 工件质量稳定	大批量生产 和各种作业
	流水式	连续装料、卸料生产过程重叠性更大	与脉动式作业炉相似	不便调整工艺 通用性差 质量稳定 生产率高 生产成本低	炉温均匀性好 工艺易控制 工件质量稳定	大批量生产

1.3 材料加热炉技术的发展趋势

从材料加热炉的应用历史看,其设计、制造和使用大约经历了三个阶段,这三个阶段与材料的加工与应用息息相关。在较早时期,加热炉的设计和制造最为原始,加热炉的设计仅仅是在材料加工过程中不断地仅凭经验修修补补,并经过漫长改进完善的过程形成了与工艺结合极为紧密的材料热加工用加热炉,如中国早期使用的各种用于陶瓷制品的烧制窑炉。

工业革命以后,各学科与工程领域的发展促进了对加热炉设计原理的系统认识,也为加热炉工业化设计和制造提供基础。在这一阶段,加热炉设计的较为系统,出现了用于加热炉制造的各种材料,其制造已形成专业化,加热炉的炉型也形成系列化和标准化。特别是传统的钢铁、有色金属的热加工设备,以及用于硅酸盐材料烧制和传统陶瓷材料烧结的专业设备。在这一阶段,工业加热炉设计的主要特点是注重其可靠性和耐用性,在各个行业形成了各种系列及规格的标准加热炉。在这一阶段,标准化的设计和制造降低了加热炉的加工成本,也为使用者提供了诸多方便。

随着世界范围内资源和能源的紧缺,特别是材料科学与工程的高速发展,专业化标准炉和专用炉已不能满足要求,以材料加热炉为主的材料装备进一步分化,材料的研究、开发和生产

需要开发设计不同性能要求的加热炉。对炉用材料提出更高的要求,节能和减少环境污染成为设计必须重点考虑的问题,材料工艺要求更加精确,且与工艺结合更加紧密。在这一个阶段,新型材料的研究和开发促进了加热炉的设计和制造,各种新的加热技术和高性能炉用材料的开发为加热炉的技术创新和性能提升提供了必要的条件。目前,加热炉设计、制造和使用具有以下特点:

(1)加热炉的节能技术始终是加热炉设计、制造和使用过程关注的焦点问题。加热炉的能耗较高,加热炉常常被称为电老虎。为了降低加热炉的能耗,除优化热加工工艺方面的工作外,目前在加热炉设计和制造上进行了许多有效的工作:①优化炉衬结构,提高炉内温度均匀性减少炉衬散热损失。炉温均匀性问题是加热炉重要的性能指标,加热炉标准按炉温均匀性将加热炉分为5个等级,1级和2级加热炉的温度均匀性分别为 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 5^{\circ}\text{C}$,并规定了专门的测量方法。②强化炉内传热。强化炉内传热可以有效地缩短工件在炉内的升温时间,例如,在燃料炉内采用高速烧嘴和平焰烧嘴,在低温炉和中温安装风扇,流动粒子加热技术的提出,高温辐射涂料的应用,远红外加热技术等,都是着眼于强化炉内传热。③采用节能材料,采用轻质耐火砖和各种陶瓷耐火纤维制作加热炉的炉衬,优化设计加热炉的料框、料盘、马弗及坩埚,通过减轻其重量来减少蓄热损失。

(2)加热炉炉型的多样性和专用性是目前加热炉应用的主要趋势。20世纪50至60年代,国内使用的主要炉型有箱式炉和井式炉,后来出现了台车炉、转筒式炉、罩式炉,且多为标准化结构,只是根据工艺要求进行选用,专用炉很少。20世纪70至80年代,因生产效率和工艺的要求,出现各种结构的专用炉和连续炉,如密封箱式炉、可控气氛炉、等离子加热炉、推杆式炉、振底炉、辊底式炉、步进炉、输送带式炉、转底式炉等。随着新材料的开发,出现了各种新炉型,使传统的加热炉的最高使用温度由 $1\,350^{\circ}\text{C}$ 提高到 $2\,000^{\circ}\text{C}$ 以上,如用于陶瓷结构和功能材料烧结的高温烧结炉。各种保护气氛、活性气氛及真空气氛也被大量采用。到目前为止,各种专用加热炉的使用量占炉子使用量的80%以上。随着计算机控制技术和自动化程度的提高,许多企业将加热炉与各种辅助设备(甚至与冷加工设备)组合成大型自动化连续生产线,如轴承连续生产线、齿轮渗碳热处理生产线,使其生产效率和产品质量得到大幅度提高。

(3)传统加热技术的进一步完善促进了加热炉的更新换代,新加热技术的开发使新型高效加热炉的出现成为可能,如红外加热技术、激光加热技术、放电等离子烧结(SPS)技术、微波加热技术、太阳能加热技术等。

(4)新材料的研制、开发和生产以及传统材料性能进一步提升的需要,使得加热炉与工艺技术的关系更加密切。①在材料研制和开发过程中,要求加热炉的功能多样化;②在材料工艺开发过程中,加热炉结构和功能在工艺技术开发过程中得到不断的改进和完善,形成的成熟材料工艺技术必须用特定结构的加热炉来实现。

(5)炉用新型材料的研制和应用促使了加热炉的性能提升。除上面提到的节能保温材料外,使用耐热温度更高的炉用耐热钢和电热合金、新型高温用电热材料和耐火材料,为高性能和多用途的加热炉开发提供了材料保证。

(6)随着科技进步和工业发展,加热炉设计和加工技术不断得到提高。加热炉的设计由原来的经验设计发展为建立在较为精确的计算分析基础上的优化设计,如加热温度场的计算机精确设计和控制,炉内传热过程的计算分析与炉腔结构的优化设计,炉内气氛的优化设计与精确控制等。这些新的设计方法和手段在新型加热炉的研制及传统加热炉改造工作中已表现出

了无比的优越性,而且,先进的加工技术在加热炉的制造过程中的应用,也对加热炉成本降低和性能提高起到了不可忽视的作用。

思考题

1. 试阐述材料装备在材料研制、开发与生产中的作用和地位。
2. 选择加热炉炉型时应考虑的主要因素有哪些?
3. 常用的材料工程装备有哪几类? 这些装备包括哪些典型设备?
4. 试举例说明不同类型材料加热炉的性能特点及用途。
5. 试阐述加热炉的设计、制造及使用经历了怎样的发展过程。
6. 试分析材料加热炉的发展趋势及特点。

第 2 章 材料加热炉内气氛选用及设计基础

材料的加热一般在空气或特定的气氛中进行。在空气或燃气介质中进行加热时,由于炉气中含有氧气、二氧化碳或水蒸气,绝大多数金属材料会氧化甚至烧损,因此,要求在保护气氛中进行加热。采用保护气氛,可实现金属的无氧加热,改善工件表面的组织结构,提高材料冶金质量,减少工件的加工余量或加工工序,减少材料消耗。保护气氛加热炉的机械化与自动化程度较高,可明显提高劳动生产率和改善劳动条件。

为了制备某种特定的材料,或者进行特殊的热处理,比如材料的气氛合成、钢铁的化学热处理等,需要某种活性气氛参与材料的加热。通常把在保护气氛、可控气氛、活性气氛和真空气氛中加热统称为保护加热。

在进行加热炉设计时,加热气氛或介质是应该首先考虑的问题。对加热气氛特性的认识,以及合理设计和正确选用保护气氛,不仅对满足材料加热工艺十分必要,而且对加热炉炉体结构设计、炉用材料的选用以及加热炉正常使用也是十分必要的。

2.1 材料在加热气氛中的氧化还原反应分析

在较高温度下,材料在含有氧气、二氧化碳或水蒸气中将会发生氧化,因此,选择或设计合适的加热气氛成为加热炉设计的重要任务之一。材料是否被氧化主要取决于被加热材料氧化物的分解压和气氛的氧势,下面以金属为例讨论金属氧化物的分解压。

2.1.1 氧化物的分解压

以金属元素为例,在含氧气氛中可能会发生氧化反应,生成金属氧化物的反应一般可以表示为



假如金属 M 和金属氧化物 M_xO_2 为化学纯的凝聚相,则上述氧化反应的平衡常数可表示为

$$K_p = \frac{1}{p_{O_2}} \quad (2.2)$$

氧化反应达到平衡时,加热介质中氧的分压 p_{O_2} 就被认为是该金属元素氧化物的分解压。该氧化反应的标准自由焓变化就是金属氧化物的标准生成自由焓 $\Delta G_f^\ominus(M_xO_2)$,它与金属氧化物分解压的关系为

$$\Delta G_f^\ominus(M_xO_2) = -RT \ln K_p = RT \ln p_{O_2} \quad (2.3)$$

由此可见,与标准生成自由焓一样,金属氧化物分解压是其对氧亲和力的量度。金属对氧的亲合力愈大,它的 $\Delta G_f^\ominus(M_xO_2)$ 越负,其分解压就越低,金属容易被氧化,其氧化物的稳定性就越高。如图 2.1 所示为几种常见金属氧化物分解压随温度的变化。

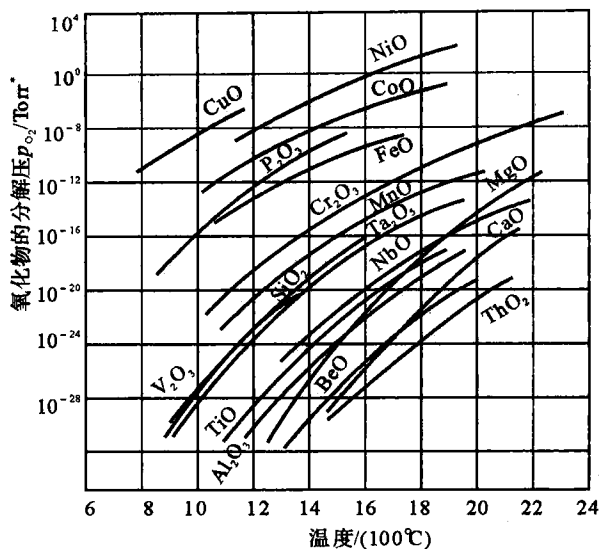


图 2.1 金属氧化物的分解压随温度的变化

通常气氛中氧的化学位称为气氛的氧势,一般用气氛中氧气的分压表示。设气氛中氧的分压为 p'_{O_2} , 当 $p'_{O_2} < p_{O_2}$ 时, 金属氧化物分解为金属和氧气; 当 $p'_{O_2} > p_{O_2}$ 时, 金属被氧化为氧化物; 当 $p_{O_2} = p'_{O_2}$ 时, 金属—金属氧化物—气氛三相达到平衡, 金属既不氧化, 金属氧化物的也不分解。因此, 在设计加热炉时, 氧化物的分解压成为无氧化加热保护气氛的选用根据。

2.1.2 Ellingham 图及应用

在空气中, 氧气的分压约为 $2.13 \times 10^4 \text{ Pa}$ (0.21 个大气压), 而通常加热温度下大多数金属氧化物的分解压远小于 $2.13 \times 10^4 \text{ Pa}$, 因此, 大多数金属在空气中都不能稳定存在, 它们会逐步转变为氧化物, 再与空气中的 CO_2 或 H_2O 结合, 形成金属碳酸盐或氢氧化物, 这就是金属的大气腐蚀。

要在大气中用加热分解氧化物的方法来制备金属, 必须把温度上升到氧化物的分解压大于 $2.13 \times 10^4 \text{ Pa}$ 。除少数贵金属(如铜、汞、银、金等)外, 大部分金属的氧化物达到这个分解压的温度都很高, 实际生产中难以实现。以 FeO 为例, 其分解压可按下式计算:

$$\begin{aligned}
 2\text{Fe} + \text{O}_2 &= 2\text{FeO} \\
 \Delta G^\ominus &= -519\,234 + 125.10T \text{ (J)} \\
 \lg p_{O_2} &= -\frac{27\,118}{T} + 6.53
 \end{aligned}$$

当 $p_{O_2} = 2.13 \times 10^4 \text{ Pa}$ 时, 加热温度必须超过 3 755 K 氧化亚铁才能分解, 这是目前冶金设备无法达到和承受的温度。因此, 大多数金属不能用直接加热的方法来制备。

* Torr 是压强的非法定计量单位, $1 \text{ Torr} \approx 133.322 \text{ Pa}$ 。