

清华大学学术专著

工业电炉

江尧忠 著

清华大学出版社

前 言

随着科学技术的发展,人们对材料的需求日益广泛和迫切。许多工业和科研部门非常需要新型、先进、高效率、节能、微机控制、现代化的电炉,用于研究、制备和开发各种材料和制品,其中有许多特种电炉需要自行设计和制造。电炉工业受到人们的极大关注。本书是为了适应现代科技发展的需要而写的。

本书根据作者长期从事本学科的教学、科研和生产实践的丰富经验和研究成果,全面系统地论述工业电炉的热工理论、结构特征、设计原理、材料选择、计算方法、制造、使用与维修等方面内容。使研究、设计和使用电炉的读者具有设计、研制、分析、解决工业电炉诸问题的能力。

本书阐述的主要工业电炉的一些内容来自作者科研与生产实践,并经受了实践检验,反映了近几年来的新成果。本书紧密结合热工理论与电炉实践,对重要电炉(如硅碳棒炉、二硅化钼棒炉、钼丝炉、屏蔽炉、气氛压力炉、热压炉和感应炉等)都作了深入论述,具有较强的科学性和实用性。

作者在设计研制电炉和写书过程中,曾得到清华大学材料科学与工程系无机非金属材料教研室同事们热情帮助和支持。还得到了南京化工学院、天津大学、华南理工大学、西北工业大学、西安电炉研究所、冶金部钢铁研究总院和一些工厂的帮助。书中有些图表选自有关参考文献。在此一并表示诚挚的谢意。

天津大学宋尚教授审阅了本书,提出了许多宝贵意见,在此深表感谢。

江尧忠

1992年12月于清华大学

目 录

| | |
|-----------------------|-----|
| 绪论 | 1 |
| 第一章 工业电炉类型 | 3 |
| § 1-1 按工作原理分类 | 3 |
| § 1-2 按操作方式分类 | 5 |
| § 1-3 按气氛分类 | 16 |
| 第二章 工业电阻炉设计步骤 | 17 |
| § 2-1 设计电炉考虑因素分析 | 17 |
| § 2-2 电阻炉设计步骤 | 19 |
| 第三章 筑炉耐火及保温材料 | 19 |
| § 3-1 耐火材料 | 27 |
| § 3-2 轻质耐火材料 | 36 |
| § 3-3 不定型耐火材料 | 41 |
| § 3-4 常用保温材料 | 43 |
| § 3-5 其它筑炉材料 | 47 |
| 第四章 炉体结构设计 | 52 |
| § 4-1 炉墙 | 53 |
| § 4-2 炉顶、炉门、炉底、炉架及炉壳 | 55 |
| § 4-3 炉衬的砌筑 | 58 |
| § 4-4 观察孔及防爆器 | 61 |
| 第五章 电炉气体力学基础 | 67 |
| § 5-1 概述 | 67 |
| § 5-2 气体静平衡方程 | 72 |
| § 5-3 气体动力学 | 77 |
| § 5-4 气体在电炉及管道中阻力损失计算 | 100 |

| | |
|--------------------------------|-----|
| § 5-5 烟囱设计计算 | 114 |
| 第六章 电炉传热原理及功率计算 | 120 |
| § 6-1 导热 | 122 |
| § 6-2 对流换热 | 144 |
| § 6-3 辐射换热 | 155 |
| § 6-4 综合传热 | 187 |
| § 6-5 不稳定导热 | 191 |
| § 6-6 电炉功率确定 | 204 |
| 第七章 电热体材料及电热体 | 216 |
| § 7-1 钨 | 217 |
| § 7-2 钨 | 221 |
| § 7-3 铂 | 226 |
| § 7-4 铬镍合金 | 227 |
| § 7-5 铁铬铝合金 | 228 |
| § 7-6 碳化硅电热体 | 231 |
| § 7-7 二硅化钼电热体 | 247 |
| § 7-8 石墨和碳 | 251 |
| § 7-9 铬酸钡电热体 | 256 |
| 第八章 电热体设计计算 | 264 |
| § 8-1 电热体单位表面功率 | 264 |
| § 8-2 电热体尺寸计算 | 268 |
| 第九章 电热体的焊接与安装 | 283 |
| § 9-1 电热合金电热体焊接与安装 | 283 |
| § 9-2 硅碳棒的安装 | 293 |
| § 9-3 二硅化钼棒的安装 | 296 |
| 第十章 电阻炉功率分配、接线与调节 | 301 |
| § 10-1 功率分配 | 301 |
| § 10-2 接线方法 | 303 |
| § 10-3 功率调节 | 307 |

| | |
|---------------------------------------|-----|
| 第十一章 电阻炉性能试验、使用与维修 | 310 |
| § 11-1 性能试验 | 310 |
| § 11-2 电阻炉的使用 | 312 |
| § 11-3 电阻炉的维护与修理 | 313 |
| 第十二章 硅碳棒电阻炉 | 320 |
| § 12-1 箱式硅碳棒电阻炉设计 | 320 |
| § 12-2 推板式电热隧道窑设计 | 330 |
| § 12-3 辊道窑 | 355 |
| 第十三章 二硅化钼棒电炉 | 358 |
| § 13-1 立式二硅化钼棒电炉设计 | 358 |
| § 13-2 活动炉墙型间歇式二硅化钼棒 气氛烧成炉设计 | 361 |
| § 13-3 硅钼棒炉温度场的检测 | 371 |
| 第十四章 氧化锆电炉 | 379 |
| § 14-1 氧化锆性能 | 379 |
| § 14-2 氧化锆电炉结构 | 382 |
| 第十五章 真空电炉 | 386 |
| § 15-1 真空电炉分类与结构 | 386 |
| § 15-2 隔热屏与屏蔽炉设计 | 389 |
| § 15-3 部件设计 | 409 |
| § 15-4 真空系统 | 416 |
| § 15-5 真空电炉的性能检验与使用维护 | 421 |
| 第十六章 钼丝炉 | 423 |
| § 16-1 立式钼丝炉 | 423 |
| § 16-2 箱式钼丝炉 | 461 |
| § 16-3 连续操作卧式钼丝炉 | 469 |
| 第十七章 气氛压力炉 | 479 |
| § 17-1 炉型选择及炉膛尺寸确定 | 480 |
| § 17-2 气氛压力炉结构 | 483 |

| | | |
|-------------|--------------|------------|
| § 17-3 | 炉内气体运动与传热 | 484 |
| § 17-4 | 炉衬设计特点 | 490 |
| § 17-5 | 轴向保温与均温区的扩展 | 493 |
| § 17-6 | 电热器 | 495 |
| § 17-7 | 供电系统 | 503 |
| § 17-8 | 高温高压炉壳 | 507 |
| § 17-9 | 测温系统 | 513 |
| § 17-10 | 气体系统 | 519 |
| § 17-11 | 冷却系统 | 520 |
| § 17-12 | 气氛压力炉性能 | 522 |
| § 17-13 | 气氛压力炉的操作 | 526 |
| 第十八章 | 热压炉 | 528 |
| § 18-1 | 炉膛与模具 | 528 |
| § 18-2 | 电热器与炉衬 | 533 |
| § 18-3 | 压头 | 534 |
| § 18-4 | 电极 | 535 |
| § 18-5 | 炉壳 | 538 |
| § 18-6 | 温度场测试技术 | 541 |
| § 18-7 | 其它热压炉 | 547 |
| 第十九章 | 热等静压炉 | 549 |
| § 19-1 | 热等静压炉的工作原理 | 550 |
| § 19-2 | 高压缸体与框架 | 550 |
| § 19-3 | 高温电炉 | 553 |
| § 19-4 | 气体系统 | 558 |
| § 19-5 | 冷却系统 | 559 |
| § 19-6 | 安全系统 | 561 |
| § 19-7 | 热等静压炉主要技术要求 | 562 |
| § 19-8 | 热等静压炉的应用 | 563 |
| 第二十章 | 感应炉 | 566 |

| | | |
|--------------|-----------------------|------------|
| § 20-1 | 感应加热原理 | 566 |
| § 20-2 | 炉体构造的设计 | 569 |
| § 20-3 | 附属设备的设计 | 578 |
| § 20-4 | 中频感应炉的设计计算 | 579 |
| 第二十一章 | 其它高温设备 | 595 |
| § 21-1 | 电弧炉 | 595 |
| § 21-2 | 真空炉 | 598 |
| § 21-3 | 电子束炉 | 600 |
| § 21-4 | 等离子炉 | 604 |
| § 21-5 | 太阳炉 | 607 |
| 附录 1 | 常用热电偶分度表 | 612 |
| 附录 2 | 常用单位换算表 | 614 |
| | 参考文献 | 615 |

绪 论

随着新兴科学技术的发展,对材料提出了各种高性能的要求,使其能应用于计算机、通讯、激光、航空、航天、核能及国防科学等尖端技术中。新材料应运而生。 Al_2O_3 、 Si_3N_4 、 SiC 和 ZrO_2 等结构陶瓷,具有耐高温、耐磨损、耐腐蚀、高强度等优越性能,已经显示出广阔的发展前景。

研究和生产这些材料和进行性能检测需要在高温下进行,对温度、压力、气氛、温度场及其它工艺条件要求非常严格。新型高效率的热工设备的设计研制和高温发生技术的研究,在很大程度上决定了材料进一步的发展。制造高温材料所用的热源的设计、建造和调试运行,需要与研究和发新型材料付出同样多的劳动和费用。对于众多材料和制品,除了常压、真空烧结外,热压烧结、气氛压力烧结和热等静压技术的应用和不断进步,加速了工业电炉的发展,使新型工业电炉研制的难度更大,水平更高。

与火焰窑炉相比,电炉具有许多优点:

1) 热效率高。电炉不需要燃烧烟气作传热介质,没有排出废气造成的热损失,空间热强度高,能达到很高的温度。

2) 产品质量好。炉内气氛洁净,炉温可以精确控制,温度场均匀稳定,可适应各种烧成制度的要求。

3) 能在各种人工气氛中烧成。如在 N_2 、 Ar 、 H_2 、 O_2 等气氛中烧成制品。

4) 设备简单,占地面积小,节省设备投资。

5) 操作简便,劳动条件好。

但是电炉的附属设备比较复杂,装置费用及电费较高。

工业电炉是一门综合性应用技术。要求设计研究者具有坚实的

传热学、气体力学、机械学、电工学、微电子学及材料科学等学科的理论基础,还应具有丰富的生产实践经验和有关加工制造的专业知识。

现代化的工业电炉,机械化、自动化程度高,进行计算机控制与管理。工业电炉面临全面技术革新,需要改造现有工业电炉,设计研制新型节能、多用途电炉;研究炉子关键部件,不断改善其技术性能,形成专业化生产;消化引进先进技术,提高我国电炉工业的整体设计和制造水平。

第一章 工业电炉类型

电炉是将电能转变为热能,用以加热制品和工件的热工设备。电炉种类很多,通常可按工作原理、操作方式和气氛进行分类。

§ 1-1 按工作原理分类

按电能转变为热能的方式,电炉可以分为电阻炉、感应炉和电弧炉等。

1-1-1 电阻炉

电阻炉是以电能为能源,电流通过电阻体(电热体),将电能转变为热能,借助辐射、对流和传导方式,将热量传给制品的装置。

电流通过电热体的电阻而发出的热量为

$$Q = I^2 R \tau (\text{J}) \quad (1-1-1)$$

式中: I —— 电流, A;

R —— 电阻, Ω ;

τ —— 时间, s。

在电流相同的情况下,电热体的电阻越大,产生的热量也越多。

1-1-2 电弧炉

利用电弧产生的热量加热制品的装置称为电弧炉。它可用来熔炼金属和非金属,生产人造云母单晶及 Al_2O_3 空心球等。

1-1-3 感应炉

感应炉是利用工频、中频或高频电流,在被加热的导体中产生感

应电流,使导体加热的设备。

图 1-1-1 为电阻炉、电弧炉和感应炉工作原理图。

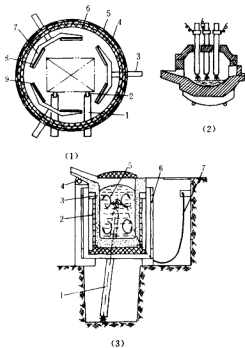


图 1-1-1 电炉按工作原理分类

(1) 电阻炉

1—石架支柱;2—高铝隔条;
3—石架导电杆;4—钢板网;
5—陶瓷毡;6—石架毡;7—
石架支架;8—石架布电热元
件;9—石架压板

(2) 电弧炉

(3) 感应炉

1—倾炉用液压缸;2—感应
圈;3—坩锅;4—转动轴;5—
熔金属的搅拌方向;6—炉
架;7—电源线

§ 1-2 按操作方式分类

按操作方式可将电炉分为间歇式和连续式电炉。

1-2-1 间歇式电炉

间歇式电炉的特点是坯体或工件整批装入炉内,经过升温、恒温及冷却阶段,制品出炉后,另一批坯体再装入炉中。这类电炉,按其工作温度,可分为四类:

超高温炉:一般炉温高于 2000 C;

高温炉:一般炉温为 1350~2000 C

中温炉:一般炉温为 950~1350 C;

低温炉:一般炉温低于 950 C。

这种电炉产量较低,要求升温快,炉墙蓄热量小。常用的炉型有箱式炉和井式炉等。

1. 箱式电阻炉

该炉广泛用于中小型零件的热处理,陶瓷材料的烧成。可分为高温、中温和低温箱式电阻炉。

(1) 高温箱式电阻炉

A. 硅碳棒电阻炉

这类炉采用碳化硅棒为电热元件,最高工作温度为 1350 C。图 1-2-1 所示为硅碳棒炉结构。电热体可垂直分布于炉膛的两侧,也可水平布置于炉顶或炉底。炉墙为耐火材料和保温材料砌成,炉底板用碳化硅或高铝砖。

目前,已定型生产的 RX 系列高温箱式电阻炉的型号及技术规格见表 1-2-1。

B. 硅钼棒电阻炉

二硅化钼棒高温箱式电阻炉如图 1-2-2 所示。

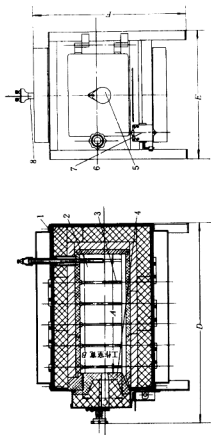


图 1-2-1 硅碳棒电阻炉

1—炉壳；2—工作室；3—硅碳棒；4—炉门；5—观察孔；
6—手柄；7—行程开关；8—热电偶

表 1-2-1 硅碳棒箱式电阻炉型号及技术规格

| 名 称 | 单 位 | 型 号 及 技 术 规 格 | | | |
|----------|-----|---------------|----------|----------|------|
| | | RX-14-13 | RX-25-13 | RX-37-13 | |
| 额定功率 | kW | 14 | 25 | 37 | |
| 电源电压 | V | 380 | 380 | 380 | |
| 工作电压 | V | 130~355 | 185~405 | 200~470 | |
| 额定温度 | ℃ | 1350 | 1350 | 1350 | |
| 相 数 | | 3 | 3 | 3 | |
| 电热元件连接方法 | | Y | Y | YY | |
| 空炉损耗功率 | kW | ≤6 | ≤8.5 | ≤12.5 | |
| 空炉升温时间 | h | ≤3 | ≤3.5 | ≤5 | |
| 炉膛尺寸 | 长 | mm | 520 | 600 | 810 |
| | 宽 | mm | 220 | 280 | 550 |
| | 高 | mm | 220 | 300 | 375 |
| 外形尺寸 | 长 | mm | 1170 | 1500 | 1700 |
| | 宽 | mm | 1200 | 1428 | 2020 |
| | 高 | mm | 1654 | 1839 | 2000 |
| 碳化硅棒数量 | 支 | 12 | 12 | 18 | |
| 最大一次装载量 | kg | 120 | ~240 | ~797 | |
| 质 量 | kg | 840 | 1500 | 3000 | |

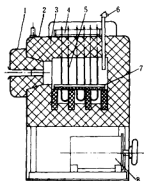


图 1-2-2 二硅化钼棒高温箱式电阻炉

1—炉门；2—炉壳；3—炉衬；4—引出座；5—U形二硅化钼电热体；
6—热电偶；7—炉底板；8—变压器

最高工作温度可达 1600~1700℃, 在空气中长期稳定工作。电热体多做成“U”形, 垂直挂在炉膛的两侧。硅钼棒很脆, 加热后会伸长。

硅钼棒电阻炉的主要技术参数见表 1-2-2。

表 1-2-2 硅钼棒电阻炉的主要技术参数

| 电炉型号 技术参数 | GME-14-16 | GME-16-16 | CGME-16-17 | GME-45-16 |
|---------------------|-------------------------|------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| 额定功率(kW) | 14 | 16 | 16 | 45 |
| 额定电压(V) | 0~90 | 0~80 | 0~60 | 0~123 (七串二并) |
| 相 数 | 380V 单相 | 380V 单相 | 380V 单相 | 380V 单相 |
| 额定温度(℃) | 1600 | 1600 | 1700 | 1600 |
| 空炉升温时间(min) | ≤180 | ≤300 | ≤300 | ≤600 |
| 空炉损耗功率(kW) | 5 | 6.7 | 6.7 | 18.9 |
| 炉膛尺寸(mm) (长×宽×高) | 400×200 ×160 | 440×200 ×175 | 440×200 ×175 | 730×400 ×380 |
| 外形尺寸(mm) (长×宽×高) | 900×900 ×1800 | 1100×940 ×1800 | 1100×940 ×1800 | 1460×1270 ×1790 |
| 质 量(kg) | 350 | 800 | 810 | 1800 |
| 硅钼棒电热元件 规格、数量 | 300×180×6 ×30(mm)12支 | 400×200×6 ×50(mm)8支 | GM-1800型 400×200×9 ×50(mm)8支 | 460×450×6 ×40(mm)14支 |

(2) 中温箱式电阻炉

中温箱式电炉构造如图 1-2-3 所示。常用铁铬铝电阻丝作电热体, 安放在炉膛两侧和炉底的搁丝砖上。也可在炉门、炉顶安置电热体, 使炉温均匀。炉衬可用轻质耐火粘土砖或硅酸铝耐火纤维毡制成。这种轻质结构炉衬, 使炉体尺寸减小, 重量轻, 保温好, 蓄热少, 显著地降低功率消耗。

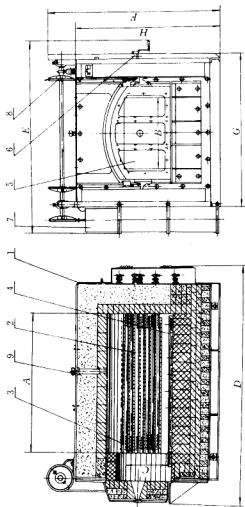


图 1-2-3 中温箱式炉

1—外壳，2—炉膛，3—电热体，4—炉底板，5—炉门，6—行程开关，
7—量筒，8—手扳齿轮，9—热电偶测温孔

(3) 低温箱式电阻炉

低温箱式炉的构造如图 1-2-4 所示,多用于回火等。低温炉主要依靠对流传热。被电热体加热后的热气体,在风机作用下,经导流片进入工作室,加热坯体,然后由炉底孔隙回分离室重新加热。

气淬炉的冷却系统如图 1-2-5 所示,气体在风机作用下进行循环流动。

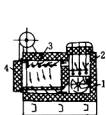


图 1-2-4 低温箱式电阻炉

1—风机; 2—电热体; 3—导流片; 4—炉门

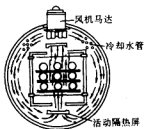


图 1-2-5 气淬炉冷却系统

2. 井式电阻炉

主要用于细长工件热处理或坯体的烧结。坯体垂直悬挂,防止变形。炉口向上,可用起重吊车装卸,占地面积小。该炉多置于地坑中,有的大型井式电炉深度达 30m,在炉膛轴向温差较大,通常采用分区布置电热体。开炉时热气外溢,散热量大。

图 1-2-6 为井式炉结构。炉壳由型钢和钢板焊成,内砌耐火保温砖,电热体放在搁丝砖上,炉盖用液机械启闭。

低温井式炉如图 1-2-7 所示。为了强制气体流动,增加对流换热,在炉盖上安装风机,使炉气沿料筐外侧向下流动,再从底板孔进入装料筐。该炉装出料方便,炉内温度均匀。

高温井式电阻炉用硅碳棒作电热体,最高使用温度为 1350℃。