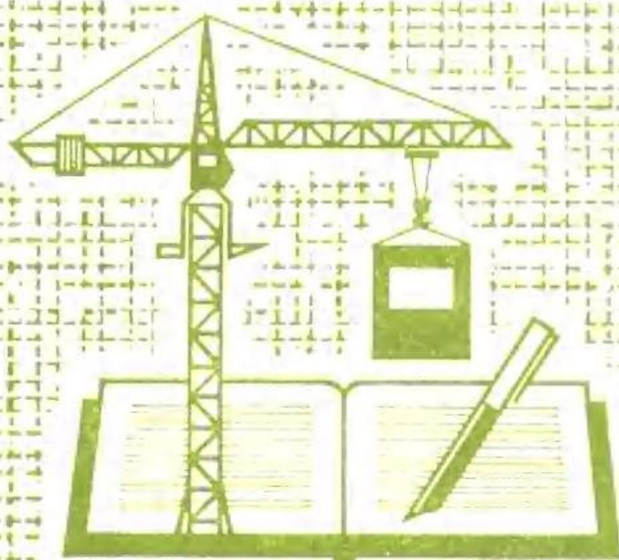


建筑安装技工学校试用教材

筑炉工艺学

河南省工业设备安装工程公司

张哲生 编



中国建筑工业出版社

本书根据建设部《建筑安装技工学校教学计划和教学大纲》编写。全书较详细地叙述了窑炉砌筑常用耐火材料、隔热材料，常用筑炉机具、砌筑的基本操作技术、烘炉的一般常识、冬雨季施工和安全技术，以及各种工业窑炉的结构原理和砌筑等内容，并介绍了国外工业窑炉的发展情况。

本书除作为安装技工学校教材外，还可供筑炉工人技术培训和自学参考。

建筑安装技工学校试用教材

筑 炉 工 艺 学

河南省工业设备安装工程公司

张哲生 编

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

开本：787×1092毫米 1/16 印张：26³/₄ 字数：651 千字

1988年12月第一版 1988年12月第一次印刷

印数：1—2,770册 定价：5.65元

ISBN 7-112-00513-2/G·68

(5617)

前 言

为了满足技工学校教学的需要，我局委托河南省工业设备安装公司技工学校编写了安装技校教材《筑炉工艺学》。本书依据建设部1986年5月南昌会议审定通过的《建筑安装技工学校教学计划和教学大纲》，吸收了国内外在窑炉砌筑施工中的新技术、新材料、新工艺，结合我国建筑安装企业的具体情况，较详细地介绍了窑炉砌筑常用的耐火材料、隔热材料、常用筑炉机具、砌筑的基本操作技术、烘炉一般常识、冬雨季施工和安全技术，以及常用的各种窑炉的结构原理和砌筑。

本书为建筑安装类技工学校筑炉专业教材，也可供在职职工培训和有关技术人员参考。

本书由河南省工业设备安装公司技工学校张哲生同志编写，北京市设备安装工程公司沈志忠、王开第审定，河南省工业设备安装公司技工学校焦宝栋同志参加了审定工作。

由于编写时间仓促和限于编者水平，书中难免有不当之处，希望在教学使用中提出批评指正。

城乡建设环境保护部劳动工资局

1987年12月

目 录

绪论	1
一、窑炉技术发展简史	1
二、我国工业窑炉现状及发展	2
三、本学科的任务、要求、内容及学习方法	2
第一章 常用耐火材料	4
第一节 常用耐火材料的性质及分类	4
第二节 耐火砖	22
第三节 耐火泥	52
第二章 常用隔热材料	58
第一节 常用隔热材料的性质及分类	58
第二节 隔热用砖及隔热材料	59
第三节 隔热泥料	72
第三章 不定型耐火材料	74
第一节 耐火混凝土	74
第二节 隔热混凝土	99
第三节 浇注料	101
第四节 捣打料	102
第四章 常用筑炉机具	110
第一节 常用筑炉工具	110
第二节 搅拌、振捣及提升机械与操作	117
第三节 磨砖机及操作	123
第四节 切砖机及操作	125
第五节 铣砖机及操作	126
第五章 砌筑的基本操作技术	129
第一节 材料的验收、选分、保管及运输	129
第二节 耐火砖的加工	135
第三节 砌筑的一般技术	136
第四节 测绘与放线	141
第五节 预砌筑	142
第六节 墙体砌筑	142
第七节 拱胎支设及拱的砌筑	152
第八节 膨胀缝及空气隔热层的砌筑	166
第九节 勾缝	169
第十节 内衬防腐	170
第十一节 砌体的质量标准及检查方法	170

第六章 设备的保温	173
第一节 保温的一般知识	173
第二节 炉体的保温	179
第三节 其他设备的保温	179
第四节 管道保温	186
第七章 烘炉的一般知识	203
第一节 烘炉的作用	203
第二节 烘炉的程序	203
第三节 烘炉的基本方法	204
第四节 烘炉的验收标准	204
第八章 冬雨季施工	206
第一节 雨季施工	206
第二节 冬季施工	206
第九章 安全技术	208
第一节 施工现场安全知识	208
第二节 高空作业	209
第三节 脚手架的搭设与使用	209
第四节 机电设备使用与安全	210
第十章 工业锅炉	213
第一节 工业锅炉简介	213
第二节 一般工业锅炉的工作原理及构造	214
第三节 余热锅炉	219
第四节 工业锅炉砌筑	221
第五节 除尘器	233
第六节 烘炉	238
第十一章 加热炉	241
第一节 概述	241
第二节 连续式加热炉	241
第三节 均热炉	248
第四节 环形加热炉	253
第十二章 热处理炉	257
第一节 室式热处理炉	257
第二节 车底式热处理炉	258
第三节 辊底式热处理炉	259
第四节 井式热处理炉	259
第五节 热处理炉的砌筑	260
第十三章 干燥炉	262
第一节 概述	262
第二节 室式干燥炉	262
第三节 滚筒式干燥炉	263
第四节 干燥炉的砌筑	263
第十四章 玻璃熔窑	265

第一节	概述	265
第二节	玻璃的熔制过程	266
第三节	玻璃熔窑的构造	269
第四节	熔窑的分部砌筑	272
第五节	锡槽及砌筑	291
第十五章	回转窑	295
第一节	概述	295
第二节	回转窑的原理	295
第三节	回转窑的结构	297
第四节	回转窑的砌筑	299
第十六章	耐火材料工业用窑	304
第一节	竖窑	304
第二节	倒焰窑	311
第三节	隧道窑	316
第十七章	化铁炉（冲天炉）	334
第一节	化铁炉的结构	334
第二节	化铁炉的砌筑	340
第十八章	高炉及热风炉	342
第一节	概述	342
第二节	高炉	345
第三节	热风炉	355
第十九章	混铁炉	360
第一节	混铁炉的结构	360
第二节	混铁炉的砌筑	362
第二十章	炼钢炉	366
第一节	概述	366
第二节	电炉	367
第三节	转炉	370
第四节	平炉	372
第二十一章	炼焦炉	384
第一节	炼焦炉简介	384
第二节	炼焦炉原理及构造	388
第三节	炼焦炉砌筑	403
附表		413

绪 论

一、窑炉技术发展简史

我国素以发明和制造瓷器而闻名于世界，被誉为陶瓷的祖国。从考古发掘出来的殷商陶俑表明，远在三千多年前，我们的祖先就掌握了制造陶器的熔炉技术。而在公元前就会制造瓷器，当时烧制瓷器的窑就是用的一种粘土质耐火材料砌筑的熔炉。可见，在那时已经将窑炉技术和耐火材料首先应用于陶瓷工业了。

商代除了制造陶器以外，青铜冶铸业也有很大进展。丰富的考古材料证明，在商代早期，商人就已能制造出较为精致的武器和容器了。到商代晚期，冶铜术达到了很高的水平，这些铜器，不仅数量品种多，而且制造也更为精美，其中砂器物成为具有高度价值的艺术珍宝。

商代的陶器生产规模较大，陶器为后来瓷器的出现奠定了基础。

西周时带釉硬陶比商代有了进一步的发展，这时的陶器已在向瓷器过渡了。

春秋时期随着商人阶级的出现，金属铸币开始铸造、使用。春秋晚期，周景王嫌钱轻而铸大钱。在山西侯马春秋末晋的遗址中，发现有铸作钱币的作坊。

春秋末和战国初，铁工具开始在生产中广泛使用，当时的农夫必须有铁制的耒、耜、铧，女工必须有针和刀，制车工必须有斤、锯、锥、凿，否则就不能成其事。而且当时耕田也是用的铁器。铁器的使用和生产已经普及于许多地区。出土的工具，种类颇多，有犁头、锄、舌镰、铎之类的农具，也有斧、铍、凿、刀、锤等手工工具。

战国时期铁制农具已经普遍使用，铁器还用于手工业，大大推动了手工业的发展。冶铁业是战国时期重要的手工业部门，各国都出现了冶铁中心。在河南新郑发现了泥质的铸范，范的发现，进一步证实战国时已有热铸技术。通过对实物的化验，知道最初多用块炼法而得到纯铁，后来掌握了热铸法。战国晚期，又学会了将纯铁加热渗炭而制成钢的技术。战国时期的几百年间，由于劳动人民的智慧和才能，冶铁技术获得了很快的发展，这在世界冶金史上也是非常突出的。

以上举出的例子，都与窑炉有关，与窑炉技术有关。尽管从今天的眼光来看，那时的窑炉是很原始的，但它却是今天窑炉技术发展的源头。可以自豪地说，我国是世界上最早具备窑炉技术的国家。当然，也是最早有筑炉工的国家。

然而，由于长期的封建统治，特别是近百年来帝国主义的侵入和反动统治者的腐败无能，我国的工业窑炉与其他工业部门一样，长期处于落后状态中。钢铁厂很少，钢铁产量少得可怜。玻璃工业中，只有秦皇岛、沈阳和大连三座平板池窑，大量的中小型玻璃窑炉则是窑型陈旧，设备简陋，操作繁重，技术指标甚低。解放前，我国甚至连一般锅炉用的耐火材料也靠从外国进口。

解放后工业窑炉同其他部门一样都得到了迅速发展。玻璃工业中，从1958年至1969年底共建了大批窑炉，仅平板大中型池窑全国就有二十多座。十一届三中全会之后，玻璃工业

的发展更为迅速。随着平板玻璃的发展,新型窑逐步建成,如浮法池窑、无槽引上池窑、压延窑。熔窑结构也有很大改进。燃料品种以前只用煤气,现已采用重油和天然气。耐火材料工业中,解放后新建和扩建了许多耐火材料厂,普遍采用了各种机械化生产设备,如球磨机、摩擦压砖机,杠杆压砖机和液压机等。在烧成方面已广泛地应用隧道窑,砖坯干燥也已普遍实行隧道化。由于耐火材料的生产和使用特点,筑炉工也推广使用了振动、投射、机械捣打等新工艺,使工业窑炉的施工速度、质量得到了保证,筑炉工人的劳动强度大大降低。由于耐火材料工业技术的不断发展,现在筑炉技术已进入了航天技术的领域。

二、我国工业窑炉现状及发展

解放后我国的工业窑炉发展较快,同时,由于众所周知的原因,工业窑炉的发展水平没有达到本来应该达到的水平。例如玻璃工业中优质的耐火材料正在推广使用,熔窑的技术经济指标已有较大的提高,熔制新技术新工艺正在研究推广,热工自动控制日益完善,正在向完全自动化方向前进。可是熔窑控制自动化程度较国外先进水平还有较大差距,因而产品的产量、质量与国外同类产品相比水平均较低。玻璃工业中选用优质耐火砖材,改善熔窑结构,采用高速优质生产的浮法窑型,是我国平板玻璃工业的发展方向。

在钢铁工业中,为了提高生铁的产量和降低每吨生铁的建设费用,近年来世界上大型高炉日益增多,最大者达5000立方米,截止到1975年,国外已建成3000立方米以上大型高炉十八座。五十年代平炉是炼钢的主要设备,后来顶吹氧气转炉得到了迅速的发展,1970年顶吹氧气转炉的钢产量已超过平炉,到1973年世界顶吹氧气转炉的生产能力已达 3.65×10^8 吨,成为现代炼钢主要方法,而充分发挥氧气转炉生产潜力的关键在于提高炉衬的使用寿命。

高炉大型化,则炼铁温度及操作压力也就随之提高,炼铁温度和操作压力提高,对耐火材料和筑炉工的要求也就愈来愈严格。在顶吹氧气转炉中,日本用合成镁白云石制造的油浸碱性砖,使氧气顶吹转炉炉龄平均在1500至2000以上;美国用高纯海水镁砂制品,使平均炉龄在1000炉以上。这些炉型结构的改变和新材料的使用,对筑炉工提出了新的课题,要求也更高。

我国工业窑炉的新工艺新技术正在研究推广,窑型结构正朝着更加合理,适应高速发展需要的方向发展,整个窑炉的自动控制日益完善,从部分自动化向着完全自动化方向发展。

三、本学科的任务、要求、内容及学习方法

1.筑炉工艺学的任务

筑炉工艺学是一门培养学生全面掌握中级筑炉工所需要的工艺理论知识的专业课,所以,通过筑炉工艺学的学习,要能够掌握筑炉常用耐火材料的性质、几何尺寸,标、普、异、特砖的区分;能够掌握常用隔热材料的性质、分类和特点;能够配制耐火混凝土和隔热混凝土;能够掌握筑炉工具的种类及其使用方法,掌握筑炉机械的操作技术;熟练掌握砌筑的基本操作技术理论;了解常用窑炉的原理及结构,掌握砌筑方法;了解保温工程的理论知识及操作技术;了解筑炉专业方面的新材料、新设备、新工艺、新技术,使学生达到中级筑炉工的技术水平。

2.筑炉工艺学的要求

通过对筑炉工艺学的系统学习,使学生全面掌握本工种所需要的技术理论和工艺知识,以及常用耐火材料、隔热材料的物理、化学性质;对典型炉体具备基本的砌筑工艺分析

能力和估算材料的能力，会查阅有关技术手册，了解本工种新材料，新设备、新工艺、新技术及其发展概况，熟悉筑炉施工的一般程序和方法，具备现场文明施工和安全生产的能力。

3. 筑炉工艺学的内容

筑炉工艺学的内容包括：常用耐火材料；常用隔热材料；不定型耐火材料；常用筑炉机具；砌筑的基本操作技术；设备的保温；烘炉的一般知识；冬雨季施工；安全技术；工业锅炉；加热炉；热处理炉；干燥炉；玻璃熔窑；回转窑；耐火材料工业用窑；高炉及热风炉；炼钢炉等。同学们通过学习可以对筑炉工艺学有一个系统的了解。应当指出的是，这里并非包括了筑炉工艺的全部内容，例如有色金属的各种冶炼炉、电解槽等在本书就未介绍。另外，随着工业的发展，新材料、新技术、新工艺不断出现，加之现在国外的先进技术也不断引进，所以本教材的内容只是一个基础，初学者以掌握教材为基础，在今后工作实践中不断充实自己，使自己的知识达到更完善的程度。

4. 筑炉工艺学的学习方法

筑炉工艺学是一门实践性较强的课程，所以，在学习这门课程时必须注意理论与实际相结合，注意与实习教学课的配合学习，如果单纯的死记硬背，则会事倍功半，收效甚微，到生产实践中，则感到无从下手。

不提倡死记硬背并不是说连基本概念也不掌握，在学习中应注意基础知识和基本技能的训练，掌握反映事物规律、具有广泛适应性的基础知识，并能灵活运用。

学习筑炉工艺学的目的是要在筑炉施工中运用，所以，同学们在学习的同时，要注重培养自己运用知识的能力，注重运用学过的专业理论知识指导生产实践。

第一章 常用耐火材料

第一节 常用耐火材料的性质及分类

耐火材料广泛应用在国民经济各部门之中，是各种窑炉的主要高温建筑材料和结构材料。

工业窑炉的种类繁多，结构形式相差甚远。如炼钢的平炉和转炉，炼铁用的高炉，生产玻璃的玻璃熔窑，生产水泥的回转窑以及各种加热炉、热处理炉、干燥炉等等。这些炉子的种类不同，对耐火材料的要求也就不同，就一个窑炉来说，它各部分的温度、结构，要求不同，使用的耐火材料也就不同。

在窑炉工作过程中，耐火材料不但受到高温作用，还受着各种各样的物理、化学和机械作用，如在高温下承受窑炉的荷重和在操作过程中所产生的应力作用；由于温度的急变或高速流动的高温火焰、烟尘、液态金属、液态玻璃溶液、炉渣的冲刷和块状物料的撞击作用等等，因此，对耐火材料提出一系列的要求。

同时，耐火材料的质量优劣，决定着窑炉的寿命以及热修、冷修的周期，影响着生产产品的产量、质量、燃料消耗与成本。

一、定义

凡具有抵抗高温以及在高温下所产生的物理化学作用的材料统称耐火材料。

二、耐火材料的分类

耐火材料的分类方法很多，现介绍五种主要的分类方法。

1. 按耐火材料的耐火度分

- (1) 普通耐火材料 耐火度为 $1580\sim 1770^{\circ}\text{C}$ 。
- (2) 高级耐火材料 耐火度为 $1770\sim 2000^{\circ}\text{C}$ 。
- (3) 特级耐火材料 耐火度大于 2000°C 。

2. 根据化学——矿物组成分

- (1) 氧化硅质耐火材料。
- (2) 硅酸铝质耐火材料，该类材料又可分为：
 - A. 半硅质耐火材料；
 - B. 粘土质耐火材料；
 - C. 高铝质耐火材料。
- (3) 氧化镁质耐火材料，该类耐火材料又可分为：
 - A. 镁石质耐火材料；
 - B. 白云石质耐火材料；
 - C. 镁橄榄石质耐火材料；
 - D. 镁铝质耐火材料；

E. 镁铬质耐火材料。

(4) 铬铁制耐火材料。

(5) 碳质耐火材料。

A. 碳砖。碳含量70~90%；

B. 石墨制品。石墨含量30%以上，有粘土结合的石墨粘土制品，有有机物结合烧制的石墨制品等；

C. 碳化硅制品，有再结晶和无机物结合两种。

(6) 特种耐火材料

A. 高温陶瓷材料。有 Al_2O_3 、 MgO 、 BeO 、 CaO 等纯氧化物制品，也有碳化物、氮化物、硼化物等制品；

B. 金属陶瓷材料。是由金属相和陶瓷相构成的材料，亦称复合材料。

3. 根据耐火材料的化学性质分：

(1) 酸性耐火材料。

(2) 碱性耐火材料。

(3) 中性耐火材料。

4. 按照制造工艺可分为：

(1) 天然岩石。

(2) 泥浆浇注。

(3) 可塑成型。

(4) 半干成型。

(5) 捣打（包括机械捣打与人工捣打）。

(6) 熔铸等制品。

5. 按照烧制方法分：

(1) 不烧砖。

(2) 烧制砖。

(3) 耐火混凝土。

(4) 熔铸砖。

三、化学——矿物组成

(一) 化学组成

耐火材料（原料或制品）的化学组成，又称化学成分，一般用化学分析方法进行测定。常用耐火材料通常测定以下氧化物： Al_2O_3 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 TiO_2 、 Na_2O 、 K_2O 等，并测定灼烧减量。不同种类的耐火原料及制品具有不同的化学成分，而每一种耐火材料按各个成分的含量多少，又可以分成两部分。一部分是占绝对数量的基本成分，另一部分是占少量的杂质成分。例如镁质耐火材料中的主要成分是 MgO ，其主要杂质成分为 SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等；粘土质耐火材料的主要成分则为 Al_2O_3 和 SiO_2 ，其主要杂质成分为 Fe_2O_3 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 等；硅砖的主要成分是 SiO_2 ，主要杂质成分是 Al_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 等。

在进行耐火原料分析时，测定灼烧减量（简称灼减）有着特殊意义，其测定结果反映出原料内去掉气体产物和有机物质含量的多少，可用以判断原料在烧成过程中收缩大小，

以及在生产中是否要预先进行煅烧等。由此可见，通过化学分析的测定结果，根据耐火材料所含成分的种类和数量，可以初步判断原料的纯度和制品的性能，还可用比色法和光谱分析法进行分析。

（二）矿物组成

单纯地从化学组成的分析来考虑分析问题还不够全面，应进一步分析观察耐火材料原料及制品中所形成的矿物相的种类、数量、结晶大小和分布情况等，从而全面地分析原料及制品的特性。耐火材料原料及制品中所含矿物相种类和数量，统称为矿物组成。对具有相同化学成分的耐火材料，其矿物组成不一定也相同，而耐火材料的一系列性质指标又主要决定于矿物组成。例如粘土原料和由它制成的粘土质制品，它们之间的化学成分可以很接近，但矿物组成却完全不同。粘土原料主要有高岭石及其他杂质矿物组成，而粘土质制品则以莫来石和硅酸盐玻璃组成。又如 SiO_2 含量相同的硅砖，其物理、高温性质可能有很大差异，原因在于硅砖中的 SiO_2 是形成鳞石英还是形成方石英，因为这两种矿物虽然有相同的化学成分，但其结构、性质完全不同，从而使硅砖的性质也不同。这就表明了化学组成和矿物组成是两个不同的概念，是有区别的。但是，化学成分和矿物成分之间又有着内在的联系，在一般情况下，制品中的主要化学成分量越多，则形成的主要矿物量也越多，这是因为制品的矿物组成，取决于制品的化学成分和形成制品时的外界因素（工艺条件）。

目前，鉴定耐火材料的矿物组成和显微结构的方法，一般是通过显微镜观察，以及X射线分析，差热分析和衍射鉴定等。

耐火材料的化学——矿物组成是分析原料及制品特性的一个主要方面，所以要改变制品特性，提高制品质量，一般都采用调整制品化学——矿物组成的方法。

四、耐火材料的物理性能

耐火材料的常温物理性质，包括真密度、真比重、气孔率、吸水率、体积密度和耐压强度等，不但与制品的某些高温使用性质（如抗渣性、热稳定性和荷重软化温度等）有着直接联系，而且对于同一原料（按规定的工艺过程和工艺条件生产出的制品）它们的上述性质应该是相对恒定的。因此，这些性质的测定经常被用来判断制品的烧结程度，原料质量等。

（一）真体积

真体积是材料的总体积与其中孔隙所占的体积之差。

即
$$V_{\text{真}} = V_{\text{总}} - V_{\text{孔}}$$

式中 $V_{\text{真}}$ ——材料的真体积（米³）；

$V_{\text{总}}$ ——材料的总体积（米³）；

$V_{\text{孔}}$ ——材料孔隙所占的体积（米³）。

（二）真密度

真密度是材料的干燥重量与其真体积的比值，单位为千克/米³。

即：
$$\text{真密度} = \frac{W}{V_{\text{真}}} \quad (1-1)$$

式中 W ——材料的干燥重量（千克）；

$V_{\text{真}}$ ——材料的真体积（米³）。

(三) 真比重

真比重是耐火材料单位体积(不包括气孔体积)所具有的重量,或者说是耐火材料真体积所具有的重量,单位为千克/米³。

$$\text{真比重} = \frac{W}{V - (V_1 + V_2 + V_3)} \quad (1-2)$$

式中 W ——材料重量(克);

V ——材料的总体积(米³);

V_1 ——开口气孔的体积(米³);

V_2 ——闭口气孔的体积(米³);

V_3 ——连通气孔的体积(米³)。

耐火材料中不同矿物相的真密度和真比重的大小是不同的(见表1-1),因此,真比重和真密度的测定结果,经常作为鉴定耐火原料的纯度和耐火原料及制品烧结程度的依据,并能借助它判断制品中存在何种矿物相。

几种矿物的真比重

表 1-1

矿物名称	莫来石	方镁石	石英	方石英	鳞石英
真比重	3050	3600	2650	2330	2270

耐火材料的真比重大小与其致密度、气孔率无关,而和耐火材料的化学——矿物组成有关。大多数耐火材料的真比重与生产工艺制度的波动关系不大,只有硅砖例外。由于硅砖在烧制过程中,石英转化为比重较小的鳞石英和方石英,所以硅砖的真比重大小能够说明硅砖内石英转化为鳞石英和方石英的程度,也就是能够说明硅砖质量好坏。一般硅砖的真比重2380千克/米³,优质硅砖的真比重为2340~2360千克/米³。

(四) 假比重

假比重是包括闭口气孔在内的耐火材料单位体积的重量,单位为千克/米³。

$$\text{假比重} = \frac{W}{V - (V_1 + V_3)} \quad (1-3)$$

式中 W ——材料的重量(千克);

V ——材料的总体积(米³);

V_1 ——开口气孔的体积(米³);

V_3 ——连通气孔的体积(米³)。

(五) 致密程度

耐火制品实质上是由固体物质和气孔两部分组成。制品越致密,其气孔量就越少。反过来,耐火制品的气孔量越多,致密程度也就越低。耐火材料的致密程度,通常是以测定气孔率、吸水率和体积密度等指标来表示的。

耐火材料组织结构的致密程度直接关系到使用时耐火材料的强度,抗侵蚀性能等,所以,在选用耐火材料时应注意其气孔率、容重等指标。

(六) 气孔率

气孔率是指材料中的气孔体积占材料总体积(包括真体积和全部气孔的体积)的百分

率。

耐火材料中的气孔，按其存在形式的不同可以分成三种类型，如图1-1-1所示。

闭口气孔——密封在材料之中，不与大气相通的气孔；

开口气孔——材料中与大气相通，能为流体充填的气孔；

连通气孔——它不仅与大气相通，而且贯通制品的两面，能使流体通过的气孔。

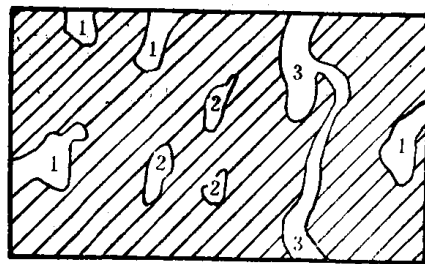


图 1-1-1 耐火制品的气孔类型
1—开口气孔；2—闭口气孔；3—连通气孔

为了简便起见，通常将这三类气孔合并为二类，即闭口气孔和开口气孔（包括连通气孔）。

由于开口气孔在制品使用过程中能直接与外物（如熔渣等）相接触，因此，它对制品的影响较闭口气孔严重。同时，在测定材料气孔时，闭口气孔的体积不能直接测定，只能测得与外界相通的气孔体积，因此，耐火材料的气孔率通常都用显气孔率表示，而不用闭口气孔率或总气孔率表示。它们的物理意义及一般表示式为：

显气孔率——材料中开口气孔的体积占材料总体积的百分率，也称开口气孔率。

$$\text{显气孔率} = \frac{V_1 + V_3}{V} \times 100\% \quad (1-4)$$

总气孔率——材料中全部气孔的体积（包括开口的和闭口的气孔体积）占材料总体积的百分率，也称真气孔率。

$$\text{总气孔率} = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{V} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中 V_1 ——材料中的开口气孔的体积（米³）；

V_2 ——材料中的闭口气孔的体积（米³）；

V_3 ——材料中的连通气孔的体积（米³）；

V ——材料的总体积（米³）。

同一化学矿物组成的耐火材料，其气孔率愈小，则容重愈大，随着气孔率的减小，耐火材料的容量愈趋近于真比重的数值。

温度在一定的限度之内，对一定范围的气孔而言，气孔率愈大，则耐火材料的导热率愈小。

气孔率愈小，耐火材料的耐侵蚀性及结构强度愈高。在采用电熔莫来石砖和锆钢玉砖砌筑玻璃熔窑的池壁时，筑炉工人挑选重量大的砖块（体积相同）砌筑上层池壁就是这个道理。

气孔率愈高，特别是互不连通的气孔愈多，材料的导热率则愈低。轻质粘土砖，轻质高铝砖等保温材料均用增加气孔率的方法来降低其导热率。

（七）吸水率

吸水率是材料中气孔部分所吸收水的重量占材料干燥重量的百分率，称为吸水率。其表示式为：

$$\text{吸水率} = \frac{w}{W} \times 100\%$$

式中 w ——材料中气孔部分所吸收水的重量(克);

W ——材料的干燥重量(克)。

(八) 透气性

耐火制品透气性的大小可用透气系数(透气率)来表示,即在10帕斯卡的压力差下,1小时内通过厚度为1米,面积为1平方米耐火制品的空气量。

$$\text{透气系数} = \frac{V \cdot \delta}{F \cdot T \cdot P} \quad (1-6)$$

式中 V ——通过试样的空气体积(米³);

δ ——试样厚度(米);

F ——试样的断面积(米²);

T ——空气通过的时间(小时);

P ——试验时两面的压力差(帕斯卡)。

耐火制品透气性的大小与下列因素有关:

气孔的特性与大小;制品结构的均匀性;气体的压力差等。此外,透气性还随着气体温度的升高而降低。

透气系数通常用来表征耐火材料透气性能的指标,对于一般耐火材料来说,制品的透气性愈小愈好。制品的透气性与开口气孔和连通气孔有关,是鉴定耐火材料制品致密程度的方法之一。

(九) 体积密度(容重)

材料的干燥重量与材料总体积之比,称为体积密度。单位用克/厘米³或千克/米³表示。其表示式为:

$$\text{体积密度} = \frac{W}{V} \quad (1-7)$$

式中 W ——材料的干燥重量(克);

V ——材料的总体积(厘米³)。

掌握体积密度这一概念,要注意以下几点:

1.真比重和体积密度的差别主要在于:前者不包括气孔体积,后者则包括气孔的体积。真比重不能表示出制品的客观组织结构特性,真比重的大小可以反映出原料的纯度,原料的烧结程度及制品的性能。

2.真密度和体积密度的差别主要在于:前者不包括材料中气孔的体积,也就是说,真密度值大小与材料中存在的气孔体积无关。而后者则包括材料中的气孔体积。

3.制品的体积密度是随制品的气孔率和真密度的变化而改变的。真密度的大小取决于制品矿物相的类别,因此,体积密度是制品气孔体积数量和矿物种类的一个综合概念。例如,对粘土制品来说,体积密度越大越好,因为体积密度大时,表示制品的气孔率低和真密度大,这就意味着粘土制品内莫来石含量多。但对硅质制品来说却不然,它要求制品的气孔率低和真密度小,因为真密度小,表示硅质制品中鳞石英含量多。气孔率低要求制品的体积密度高,而真密度低则要求制品的体积密度也低。所以,在运用体积密度作为制品的质量指标时,应透彻理解上述道理。

4.耐火材料的显气孔率,吸水率和体积密度三者之间的关系如下:

$$\text{显气孔率} = \text{吸水率} \times \text{体积密度} \quad (1-8)$$

(十) 常温耐压强度

耐火制品在室温下,单位面积上所能承受的最大压力,称为制品的常温耐压强度。其单位为帕斯卡,表示式为:

$$\text{常温耐压强度} = \frac{P}{F} \quad (1-9)$$

式中 P ——压碎制品的总压力(牛顿);

F ——制品受压面积(米²)。

常温耐压强度是评定耐火材料质量的重要指标之一。耐火制品应该具有较高的强度,是因为耐火制品不仅要经受砌体结构的静荷重作用,还要承受撞击,磨损,冲刷等机械作用。制品的强度反映了制品内部结构的牢固性,表征着制品的加工质量。

强度分为常温下强度和高温下强度两类。目前,对耐火制品的测定,一般以测定制品在常温下的耐压强度为主,所以,这里我们也只讲述常温耐压强度。

一般耐火制品的耐压强度要求 $\leq 10 \sim 15$ 兆帕,但实际上大多数耐火材料的耐压强度都在15兆帕以上。对耐火材料常温耐压强度的要求,一般比使用时的实际负荷要高得多。

常温强度通常用下列指标表示:

1. 耐压强度:耐火制品的常温耐压强度,取决于制品中各个颗粒本身的强度,颗粒间相互连接的牢固性,气孔的数量和存在的形式,以及加入结合剂所起的结合能力的大小等。因此,它受工艺条件影响很大。耐火材料在使用过程中,虽然很少发生由于在常温下受静荷重而招致破坏的现象,但因测定常温耐压强度的方法简便,故可以及时了解工艺情况,如配料比,颗粒组成,混料混炼,成型致密度以及烧成温度等。

常温耐压强度比较低的制品,其破裂断面上一一般保持有完整的颗粒,这说明制品破裂主要发生在颗粒之间和气孔中,制品的结合牢固性差;反之,在破裂断面上的颗粒也随着劈开,则说明制品的结合强度大,结构致密。

2. 其他指标:耐火制品的其他指标有抗拉、弯曲、耐撞击性、耐磨性、耐冲刷性等。

(十一) 热膨胀

耐火制品和一般物体一样,受热或冷却都会产生热胀冷缩的现象,称为热膨胀。

耐火制品的热膨胀直接影响到制品本身的热震稳定性,热膨胀越大,热震稳定性越差。热膨胀值的大小也决定炉体砌筑时必须留有一定的膨胀缝,否则就会使炉体在烘烤时因砌体膨胀而开裂或崩塌。

热膨胀主要取决于制品的化学——矿物组织。制品内部存在的各种矿物有其各自的成分和结构。其热膨胀值大小不等,这就使耐火材料制品的热膨胀性与单一矿物组成体的热膨胀性不同。

耐火制品的热膨胀与纯物质(或单一矿物组成体)的热膨胀不同。一般说来,纯物质的热膨胀值随温度上升均匀的成比例增大;而耐火制品的热膨胀值随温度升高呈不均匀增大。这是由于制品为多矿物组成不均质体,各矿物都有各自的成分和结构,其热膨胀值不同。并且有些矿物在温度变化中还会产生晶相结构的变化(即可逆的多晶转变现象),伴有不均等的热膨胀,如图1-1-2所示。

由多矿物组成的耐火制品,在受热过程中,不同温度范围产生不均等的热膨胀。因

此,在制品内部也常出现不均等的热膨胀,产生膨胀应力,这是造成耐火制品开裂甚至损坏的重要原因。

对于热膨胀值大的以及有多晶转变现象的制品,无论在烧成或者使用时都要加以注意。

粘土砖、高铝砖、镁砖等的热膨胀随着温度升高变化较均匀,而硅砖的热膨胀则随温度升高而变化不均匀(因有多晶转变发生)。

制品的热膨胀性通常用平均热膨胀系数,真热膨胀系数,热膨胀百分率来表示。

1.平均热膨胀系数:在某一温度范围内,每升高或降低 1°C (或者以单位温度间隔表示)时的平均单位长度变化值,用下式表示:

$$\alpha_{\text{平}} = \frac{L_t - L_{t_0}}{L(t - t_0)} \quad (1-10)$$

式中 L_{t_0} —— 0°C 或室温时制品的长度(厘米);

L_t ——测定温度时的长度(厘米);

t, t_0 ——分别为测定温度(0°C 或室温)。

2.真热膨胀系数:在极限温度变化条件下的长度变化值,它在不同温度范围内是不相等的。其表示式为:

$$\alpha_{\text{真}} = \frac{1}{L} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta t} \quad (1-11)$$

式中 $\frac{\Delta L}{\Delta t}$ ——热膨胀增量(厘米/ $^{\circ}\text{C}$);

L ——制品在某温度时的长度(厘米)。

3.热膨胀百分率:在测定温度范围内制品长度变化值占原长的百分数。其表示式:

$$P = \frac{L_t - L_{t_0}}{L_{t_0}} \times 100\% \quad (1-12)$$

式中 L_{t_0} —— 0°C 或室温时制品的长度(厘米);

L_t ——测定温度时的长度(厘米)。

常用的耐火材料的平均热膨胀系数大致波动范围如下:

粘土砖 $4.5 \sim 6.0 \times 10^{-6}$

高铝砖 $5.5 \sim 5.8 \times 10^{-6}$

刚玉砖($99\% \text{Al}_2\text{O}_3$) $8.0 \sim 8.5 \times 10^{-6}$

硅砖 $11.5 \sim 13.0 \times 10^{-6}$

镁砖 $14.0 \sim 15.0 \times 10^{-6}$

体积膨胀系数约为线膨胀系数的三倍。

热膨胀系数不仅是砌筑工业窑炉时留设膨胀缝尺寸及数量的依据,而且在工业窑炉的

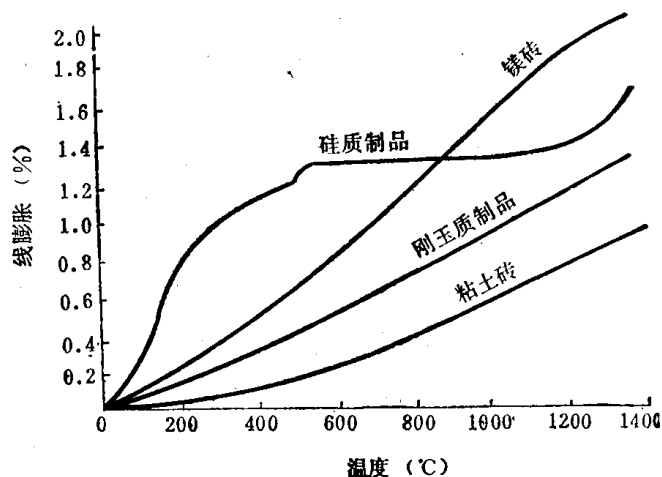


图 1-1-2 部分耐火制品线膨胀(%)曲线