

宋希文 主编 侯 谨 副主编 安胜利 主审

NAIHUO CAILIAO GONGYIXUE

耐火材料工艺学



化学工业出版社

NAIHUO CAILIAO GONGYIXUE

耐火材料工艺学

宋希文 主编 侯 谨 副主编 安胜利 主审



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书全面介绍了耐火材料的生产工艺,反映了耐火材料领域的全貌,又兼顾了近几年来国内外该领域最新的研究进展。全书较详细地介绍了耐火材料所用原材料、生产工艺过程的基本原理及设备、耐火材料种类及性能,同时还介绍了特种耐火材料与可再生利用耐火材料等产品。

本书适合耐火材料的生产技术人员阅读,也可用作无机非金属材料工程专业的本科教材。

图书在版编目(CIP)数据

耐火材料工艺学/宋希文主编. —北京:化学工业出版社,
2008.1

ISBN 978-7-122-01585-3

I. 耐… II. 宋… III. 耐火材料-工艺学 IV. TQ175.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第182122号

责任编辑:丁尚林

文字编辑:咎景岩

责任校对:李林

装帧设计:韩飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京市振南印刷有限责任公司

装订:三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张25 字数641千字 2008年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:48.00元

版权所有 违者必究

前 言

本教材是在“厚基础、宽专业面”的人才培养原则下编写而成的，以适应无机非金属材料工程专业的教学要求，力求在内容上做到“全、精、深、新”，既吸收了本领域一些优秀教材的相关内容，又兼顾了近几年来国内外耐火材料领域最新的研究进展，同时考虑了本专业多年来的发展现状。

近几年来，冶金工业技术的进步，对耐火材料提出了越来越高的要求，这对我国耐火材料提出了挑战，同时也为耐火材料的发展提供了机遇。如高炉的长寿、铁水预处理、转炉复吹、炉外精炼及连续铸钢等一系列工艺技术的广泛应用和不断发展，均是以各种新型耐火材料为前提的。为了适应冶金工业的要求，既需要对传统耐火材料进行改进，又需要研发具有特定性能的特种耐火材料。因此，耐火材料的品种日益丰富，质量不断提高，出现了众多新型耐火材料。本书在编写过程中，注重吸收该领域这些新的技术和知识，尽量使本书能反映耐火材料领域的全貌，以使初学者能够在较短的时间内了解更多本领域的知识和信息。

本书共8章，主要包括耐火材料的结构与性能、耐火原料、成型及设备、干燥与烧成、热工过程及设备、耐火制品、不定形耐火材料、特种耐火材料等内容，较详细地介绍了耐火材料所用原材料、生产工艺过程的基本原理及设备、耐火材料种类和性能，同时还包含了特种耐火材料与可再生利用耐火材料等内容。

全书由内蒙古科技大学宋希文博士担任主编，包头钢铁（集团）有限责任公司耐火材料厂侯谨高级工程师担任副主编，内蒙古科技大学安胜利教授担任主审。参加各章节编写的人员分别是：第1、2、4章，宋希文；第3章，内蒙古科技大学赵文广教授；第5章，内蒙古科技大学王波博士；第6章，包头钢铁（集团）有限责任公司耐火材料厂赵亮高级工程师、王振祥高级工程师、魏鹏程高级工程师、贺文贵高级工程师、刘芳高级工程师、康伟高级工程师；第7章，侯谨、王云高级工程师；第8章，首钢集团总公司环保产业事业部设计技术中心赛音巴特尔博士。全书由宋希文统稿。在统稿过程中，内蒙古科技大学郭巍、周芬参与了大量的编辑、整理和校对工作。

本书编写时间比较紧迫，加之作者水平所限，书中难免存在不当之处，恳请专家和读者给予批评和指正！

编 者

2008年1月

目 录

第 1 章 耐火材料的组成、结构与性能	1
1.1 耐火材料的化学、矿物组成	1
1.1.1 化学成分	1
1.1.2 矿物组成	2
1.2 耐火材料的结构性能	3
1.2.1 气孔率	3
1.2.2 吸水率	4
1.2.3 体积密度	4
1.2.4 真密度	4
1.2.5 透气度	5
1.3 耐火材料的力学性质	5
1.3.1 耐压强度	5
1.3.2 抗折强度	6
1.3.3 耐磨性	6
1.3.4 高温蠕变性	7
1.4 耐火材料的热学性质	7
1.4.1 热容	7
1.4.2 热膨胀性	8
1.4.3 热导率	9
1.4.4 温度传导性	9
1.5 耐火原料的工艺性质	10
1.5.1 粒度与颗粒尺寸分布	10
1.5.2 细度与比表面积	10
1.5.3 可塑性与结合性	10
1.5.4 干燥收缩与烧成收缩	11
1.5.5 烧结温度与烧结范围	11
1.6 耐火材料的使用性能	11
1.6.1 耐火度	11
1.6.2 荷重软化温度	12
1.6.3 高温体积稳定性	12
1.6.4 抗热震性	12
1.6.5 抗渣性	13
1.6.6 抗氧化性	13
1.6.7 抗水化能力	13
第 2 章 耐火原料	15
2.1 概述	15
2.2 $Al_2O_3-SiO_2$ 系耐火原料	15
2.2.1 硅质和半硅质耐火原料	15
2.2.2 黏土质耐火原料	19
2.2.3 高铝质耐火原料	21
2.2.4 氧化铝质耐火原料	30
2.3 碱性耐火原料	35
2.3.1 镁质耐火原料	35
2.3.2 白云石质耐火原料	39
2.3.3 钙质耐火原料	40
2.3.4 镁硅质耐火原料	41
2.3.5 尖晶石质耐火原料	43
2.4 锆基耐火原料	45
2.4.1 锆英石	45
2.4.2 斜锆石	45
2.4.3 氧化锆	45
2.5 非氧化物耐火原料	47
2.5.1 碳化物	47

2.5.2 氮化物	51	2.6.1 石墨	54
2.6 碳质耐火原料	54	2.6.2 焦炭和无烟煤	55
第3章 配合料的准备、成型及设备	57		
3.1 耐火材料的加工	57	3.4.1 颚式破碎机	68
3.1.1 选矿	57	3.4.2 对辊破碎机	69
3.1.2 原料煅烧	59	3.4.3 圆锥破碎机	71
3.2 配合料的制备	59	3.4.4 管磨机	72
3.2.1 配料的基本原则	59	3.4.5 悬辊磨	73
3.2.2 混炼	60	3.4.6 振动磨	75
3.2.3 困料	60	3.4.7 气流磨	76
3.3 成型	60	3.5 混合设备	77
3.3.1 机压成型法	61	3.5.1 预混合设备	77
3.3.2 可塑成型法	62	3.5.2 湿碾机	80
3.3.3 注浆成型法	62	3.5.3 行星式强制混合机	81
3.3.4 热压铸成型	63	3.5.4 高速混合机	82
3.3.5 挤压成型法	63	3.5.5 强力逆流混合机	83
3.3.6 等静压成型	64	3.5.6 新型不定形混合设备	85
3.3.7 振动成型法	65	3.6 成型设备	87
3.3.8 捣打成型法	66	3.6.1 高压压球机	87
3.3.9 热压成型法	66	3.6.2 摩擦压砖机	88
3.3.10 熔铸成型法	67	3.6.3 液压压砖机	90
3.4 破粉碎设备	67	3.6.4 等静压机	92
第4章 耐火材料的干燥与烧成	95		
4.1 砖坯的干燥	95	物质传递	97
4.1.1 干燥过程	95	4.2.3 固相烧结动力学	99
4.1.2 干燥方法	95	4.2.4 液相烧结动力学	101
4.1.3 干燥制度	96	4.2.5 再结晶与晶粒生长	102
4.2 耐火材料的烧成	96	4.2.6 影响烧结的因素	104
4.2.1 概论	96	4.2.7 烧成工艺过程	106
4.2.2 烧结的驱动力与烧结过程的		4.2.8 烧成制度	106
第5章 热工过程与设备	108		
5.1 流体力学与传热	108	5.2.6 隧道干燥器	149
5.1.1 气体力学	108	5.2.7 链式干燥器	150
5.1.2 传热	128	5.3 燃烧设备	150
5.2 干燥设备	145	5.3.1 气体燃料燃烧设备	150
5.2.1 转筒干燥器	145	5.3.2 液体燃料燃烧设备	153
5.2.2 气流干燥器	146	5.3.3 固体燃料燃烧设备	157
5.2.3 流化床干燥器	147	5.3.4 煤粉的燃烧设备	159
5.2.4 喷雾干燥器	147	5.3.5 固体燃料气化及煤气发	
5.2.5 室式干燥器	148	生炉	160

5.4 竖窑	161	5.5.5 回转窑内的热交换	176
5.4.1 竖窑类型	161	5.5.6 回转窑的操作控制	177
5.4.2 竖窑的构造	161	5.6 隧道窑	178
5.4.3 竖窑内气体的运动	164	5.6.1 隧道窑概述	178
5.4.4 竖窑中燃料的燃烧	166	5.6.2 隧道窑的结构	179
5.4.5 竖窑中的热交换	167	5.6.3 几种常见的隧道窑	184
5.4.6 竖窑的操作制度	167	5.7 间歇式窑	187
5.5 回转窑	168	5.7.1 倒焰窑	187
5.5.1 回转窑概述	168	5.7.2 梭式窑	188
5.5.2 回转窑的构造	169	5.7.3 钟罩窑	189
5.5.3 回转窑内的物料运动	173	5.7.4 蒸笼窑	190
5.5.4 回转窑内燃料的燃烧	174		
第6章 耐火制品	191		
6.1 硅质耐火材料	191	6.4.3 镁质耐火材料	235
6.1.1 概述	191	6.4.4 白云石质耐火材料	240
6.1.2 原料及其性质	191	6.4.5 镁橄榄石质耐火材料	243
6.1.3 硅砖的生产工艺要点	193	6.4.6 镁尖晶石质耐火材料	243
6.1.4 特种硅砖	196	6.5 含锆耐火材料	246
6.1.5 熔融石英陶瓷制品	199	6.5.1 概述	246
6.2 硅酸铝质耐火材料	201	6.5.2 含锆耐火材料理论基础	246
6.2.1 概述	201	6.5.3 锆英石质耐火材料	247
6.2.2 硅酸铝质耐火材料基础 理论	201	6.5.4 氧化锆制品	249
6.2.3 黏土质耐火材料	205	6.5.5 铝硅锆质耐火制品	250
6.2.4 蜡石质耐火材料	211	6.6 含碳耐火材料	250
6.2.5 高铝质耐火材料	213	6.6.1 概述	250
6.2.6 以硅线石族矿物为主原料的 高铝质耐火制品	218	6.6.2 黏土石墨制品	251
6.2.7 莫来石质耐火材料	220	6.6.3 碳质耐火材料	251
6.3 刚玉质耐火材料	223	6.6.4 碳化硅质制品	255
6.3.1 概述	223	6.6.5 碳复合耐火材料	261
6.3.2 刚玉质耐火材料生产 工艺	223	6.7 隔热耐火材料	273
6.3.3 锆刚玉制品和铬刚玉 制品	227	6.7.1 概述	273
6.3.4 其他刚玉制品	228	6.7.2 隔热耐火材料的组织结构 特点	273
6.4 碱性耐火材料	228	6.7.3 隔热耐火材料的性能	274
6.4.1 概述	228	6.7.4 粉粒状保温隔热耐火 材料	279
6.4.2 碱性耐火材料理论基础	229	6.7.5 定形保温隔热耐火材料	283
		6.7.6 纤维状隔热材料	284
		6.7.7 复合隔热保温材料	286
第7章 不定形耐火材料	290		
7.1 概论	290	7.2 不定形耐火材料工程原理	291

7.2.1 浇注料拌和物的内部结构	291	7.8 黏土结合耐火浇注料	329
7.2.2 浇注料拌和物的流变特性	293	7.8.1 黏土的胶结原理	329
7.2.3 浇注料的内部结构	297	7.8.2 黏土结合浇注料	330
7.3 原材料及其要求	298	7.8.3 影响性能的因素	330
7.3.1 结合剂	298	7.9 镁质耐火浇注料	331
7.3.2 耐火骨料和粉料	301	7.9.1 胶结原理	331
7.3.3 外加剂	302	7.9.2 镁质耐火浇注料	333
7.4 水泥结合耐火浇注料	303	7.10 轻质耐火浇注料	334
7.4.1 耐火水泥的物理化学性能及胶结原理	304	7.10.1 轻骨料耐火浇注料	334
7.4.2 铝酸盐水泥结合浇注料	307	7.10.2 影响轻骨料耐火浇注料性能的因素	335
7.4.3 影响性能的因素	309	7.10.3 泡沫轻质耐火浇注料	335
7.5 水玻璃结合耐火浇注料	311	7.10.4 加气轻质耐火浇注料	336
7.5.1 水玻璃的胶结原理	311	7.11 其他耐火浇注料	336
7.5.2 水玻璃结合浇注料	312	7.11.1 纤维增强耐火浇注料	336
7.5.3 影响性能的因素	313	7.11.2 自流浇注料	337
7.6 磷酸和磷酸盐结合耐火浇注料	314	7.12 其他不定形耐火材料	339
7.6.1 磷酸和磷酸盐的胶结原理	314	7.12.1 可塑料	339
7.6.2 磷酸和磷酸盐结合浇注料	319	7.12.2 捣打料	339
7.6.3 影响性能的因素	319	7.12.3 干式振动料	340
7.7 低水泥系列耐火浇注料	322	7.12.4 喷补料	341
7.7.1 低水泥耐火浇注料	322	7.12.5 投射料	342
7.7.2 超细粉结合耐火浇注料	326	7.12.6 涂抹料	342
7.7.3 ρ - Al_2O_3 结合耐火浇注料	327	7.12.7 压入料	343
		7.12.8 耐火泥浆	343
		7.13 不定形耐火材料的生产工艺	345
		7.13.1 生产	345
		7.13.2 施工	346
		7.13.3 烘烤及使用要求	347

第8章 特种耐火材料和用后可再生利用耐火材料

8.1 氧化物制品	349	8.3.1 赛隆材料	366
8.1.1 氧化铝制品	349	8.3.2 阿隆材料	370
8.1.2 氧化镁制品	353	8.3.3 镁阿隆材料	372
8.1.3 氧化钙制品	355	8.4 硼化物与硅化物制品	373
8.1.4 氧化锆制品	357	8.4.1 硼化物	373
8.1.5 氧化铬制品	360	8.4.2 硅化物制品	374
8.2 氮化物制品	361	8.5 金属陶瓷制品	376
8.2.1 氮化硅制品	361	8.5.1 金属陶瓷及其分类	376
8.2.2 氮化硼制品	363	8.5.2 金属陶瓷用原料	376
8.2.3 氮化铝制品	364	8.5.3 金属陶瓷制品的生产工艺	376
8.2.4 氮化钛制品	366	8.5.4 金属陶瓷制品的性能及	
8.3 氮氧化物材料	366		

应用	377	方法	381
8.6 用后可再生利用耐火材料	380	8.6.3 用后耐火材料再生产品的	
8.6.1 用后耐火材料的回收	380	制备方法	383
8.6.2 用后耐火材料的处理			

参考文献	388
------------	-----

第 1 章 耐火材料的组成、结构与性能

一般来说，耐火材料是指耐火度不低于 1580℃ 的无机非金属材料。耐火材料在使用过程中，会受到多种作用的破坏，如：高温下承受炉体及物料的荷重，操作过程中的外界应力，由于温度的急剧变化、受热不均而出现的极大温差以及由此而产生的热应力，各种高温流体及炉渣、烟气的冲刷，液体金属、炉渣及杂质的侵蚀，环境气氛的转变及作用等等。这些作用导致了耐火材料的熔融软化、熔蚀磨损和崩裂损坏。为保证热工设备的正常运行，必须要求耐火材料具备抵抗高温条件下发生物理、化学、机械等作用的能力，要求耐火材料具有能适应各种操作条件的性质，也就是要求耐火材料具有良好的耐高温性能、一定的高温力学性能、良好的体积稳定性和抗各种气体及熔渣侵蚀的性能等。

1.1 耐火材料的化学、矿物组成

耐火材料一般是由多种不同的化学成分和矿物组成构成的非均质体。它的各种性质不仅取决于它的化学成分，而且更依赖于其中的物相组成、分布及各相的特性，即取决于制品的化学、矿物组成。因此，首先需要对耐火材料的化学成分和矿物组成进行描述。

1.1.1 化学成分

化学成分即化学组成，是耐火材料最基本的特征之一。耐火材料的主要功能是抵抗高温作用，因此它主要由熔点较高的化合物组成，实际应用较多的为硼、碳、氮、氧的化合物，据此可把耐火材料分为氧化物耐火材料和非氧化物耐火材料两大类。常见的氧化物与复合氧化物及其熔点示于图 1-1 和表 1-1 中。常见的非氧化物及其熔点见图 1-2 和表 1-2。

表 1-1 常见氧化物与复合氧化物的熔点

名 称	化学成分	熔点/℃	名 称	化学成分	熔点/℃
氧化铝	Al_2O_3	2050	莫来石	$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	1810
氧化硅	SiO_2	1725	镁铝尖晶石	$\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	2135
氧化镁	MgO	2800	镁铬尖晶石	$\text{MgO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$	2180
氧化钙	CaO	2570	锆英石	$\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$	2500
氧化锆	ZrO_2	2690	正硅酸钙	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	2130
氧化铬	Cr_2O_3	2435	镁橄榄石	$2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$	1890

表 1-2 常见非氧化物的熔点

名 称	化学成分	熔点/℃	名 称	化学成分	熔点/℃
氮化硼	BN	3000	氮化硅	Si_3N_4	2170
碳化硼	B_4C	2350	石墨	C	3700
碳化硅	SiC	2700			

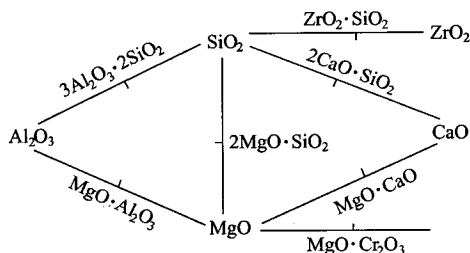


图 1-1 常见氧化物及其复合氧化物示意图

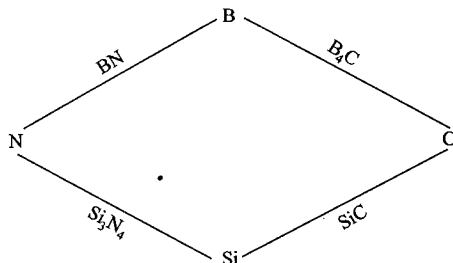


图 1-2 常见非氧化物组合示意图

耐火材料往往是非均质体，有主副成分之分。通常将其基本成分称为主成分，而其他部分称为副成分。副成分又分为添加成分和杂质成分，添加成分是有意识添加以提高制品某方面性能的成分，而杂质成分则是无意或不得已带入的无益或有害成分。

主成分通常是高熔点耐火氧化物及其复合氧化物或非氧化物的一种或几种。它是耐火制品的主体，是直接决定耐火制品性能的基础条件。它的性质和数量对耐火材料的性能起决定作用。

添加成分则往往是为弥补主成分在使用性能、生产性能或作业性能等某方面的不足而使用的，通常有结合剂、矿化剂、稳定剂、烧结剂、减水剂、抗水化剂、抗氧化剂、促凝剂和膨胀剂等。它们可能为氧化物，也可能是非氧化物；可能是有机物，也可能是无机物。总之，其品种繁多，是当前耐火材料研究的重点之一。它们的特点是：加入量很少，甚至是极微；能明显改善耐火制品的某种功能或特性；对该制品的主性能无严重影响。

杂质成分则是指由于原料纯度有限而被带入或生产过程中混入的对耐火制品性能具有不良影响的部分。一般说来， K_2O 、 Na_2O 及 FeO 、 Fe_2O_3 都是有害杂质。另外，酸性耐火材料中的碱性成分及碱性耐火材料中的酸性成分均是有害杂质。它们在高温下具有强烈的熔剂作用，使得共熔液相的生成温度降低，生成量增多，而且随着温度的升高，液相生成量的增加速度加快，从而严重影响耐火制品的高温性能。

1.1.2 矿物组成

耐火材料在化学成分固定的前提条件下，由于成分分布的均匀性和加工工艺的不同，使制品中的矿物种类、数量、晶粒大小和结合状态不同，这种微观结构的不同，造成制品性能的差异。例如， SiO_2 含量相同的硅质制品，因 SiO_2 在不同工艺条件下可形成结构和性质不同的两种矿物——鳞石英和方石英，使其制品的某些性能会有差异。即使制品的矿物组成一定，随晶粒大小、形状和分布情况的不同，亦会对制品的性能有着显著影响。因此，耐火材料的矿物组成也是决定其性质的主要因素。

耐火材料的矿物组成一般分为主晶相和基质两大类。主晶相是指构成制品结构的主体且熔点较高的晶相，主晶相的性质、数量和结合状态直接决定着材料的性能。除要选择熔点较高的化合物或单质外，还希望它们的晶体发育充分、完好，真正发挥主晶相的耐火性能。基质是在耐火制品主晶相之间填充的结晶矿物或玻璃相，其数量不大，但成分、结构复杂，作用明显，往往对制品的某些性能有着决定性的影响。在使用的过程中，基质往往首先破坏，调整和改变基质可以改善材料的使用性能。

硅酸铝系耐火材料中基质多以玻璃相的形式胶结主晶相的晶体颗粒，碱性耐火材料的基质多以细微晶体的形式连接主晶相晶体。最近发展起来的直接结合砖，其基质已经不再作为

高温结合相，它们存在于互相连接的主晶相的小孔隙中，只是在烧结前发挥它们的熔剂作用。

1.2 耐火材料的结构性能

耐火材料的组织结构分为宏观组织结构和微观组织结构。耐火材料的宏观组织结构是指气孔的性质、大小和分布及其与矿物相之间的关系。微观组织结构是指各相的含量、颗粒大小、形状和分布等。气孔是影响耐火制品常温与高温性能的重要因素，特别是在高温条件下，它会使制品对外界侵蚀的抵抗能力大大降低。气孔的形成原因为：制品成型时物料中的空气未完全排除；物料水分排除后留下的空间；原料煅烧不充分，有些应分解的盐类未完全分解，应灼烧的成分未完全灼烧；物料成分不均匀，高温烧成时收缩不均匀等。但在有些轻质隔热制品中，还需特意引入一些分布较均匀的气孔。

本书只表述耐火材料的宏观结构性能，它包括气孔率、吸水率、体积密度和透气度等，是影响耐火材料使用性能的重要因素。这些性能之间是相互关联的，耐火材料中的气孔直接决定它的气孔率、吸水率、体积密度和透气度等性能指标。

1.2.1 气孔率

耐火材料中的气孔大致分为3类（见图1-3）：①闭口气孔，封闭在制品中不与外界相通；②开口气孔，一端封闭，另一端与外界相通，能被流体填充；③贯通气孔，贯通制品的两面，流体能通过。

由于开口气孔和贯通气孔占总气孔体积的绝大部分，而且对制品的使用性能影响最大，又较易测定，因此在耐火制品的检测标准中，以显气孔率 P_a ，即开口气孔和贯通气孔的体积之和占制品总体积的百分率来表示气孔率指标。

气孔率是耐火材料的基本技术指标，它几乎影响耐火制品的所有性能，尤其是强度、热导率、抗侵蚀性、抗热震性等。一般来说，气孔率增加，强度降低，热导率降低，抗侵蚀性降低。但气孔率对抗热震性的影响比较复杂。

耐火材料的气孔率受所用原料、工艺条件等多种因素的影响。一般来说，选用致密的原料，按照最紧密堆积原理来采用合理的颗粒级配，选用合适的结合剂，物料经充分混炼，高压成型，提高烧成温度和延长保温时间均有利于降低材料的气孔率。

显气孔率的测定方法为：使用 $50\sim 200\text{cm}^3$ 的立方体或圆柱体试样，先称干燥试样的质量，然后让试样在容器中抽真空，再加入液体充分饱和试样，称量饱和试样在空气中的质量和饱和试样的表观质量（饱和试样完全淹没在液体中，饱和试样的质量减去完全被排出液体的质量）。显气孔率的计算公式为：

$$P_a = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 P_a ——耐火制品的显气孔率，%；

m_1 ——干燥试样的质量，g；



图1-3 耐火材料中的气孔类型
1—闭口气孔；2—开口气孔；3—贯通气孔

m_2 ——饱和试样的表观质量, g;

m_3 ——饱和试样在空气中的质量, g。

1.2.2 吸水率

吸水率是制品中全部开口气孔所吸收的水的质量与其干燥试样的质量之比。它实质上反映了材料中开口气孔的数量。吸水率测定方法简便, 在耐火材料生产实际中常常用来鉴定原料煅烧的质量。原料煅烧得越好, 吸水率越低。

吸水率的测定方法与显气孔率的测定方法相同, 计算公式为:

$$W_a = \frac{m_3 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中 W_a ——吸水率, %;

m_1 ——干燥试样的质量, g;

m_3 ——饱和试样在空气中的质量, g。

1.2.3 体积密度

体积密度是指耐火材料的干燥质量与其总体积之比, 单位为 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。体积密度直观地反映了制品的致密程度, 它是耐火原料、致密耐火制品质量水平的重要衡量指标。但在轻质隔热制品的生产中, 为降低热容和热导率, 常采用各种手段降低制品的体积密度。

材料的体积密度对其他许多性质都有显著的影响, 如气孔率、强度、抗侵蚀性、荷重软化温度、耐磨性和抗热震性等。对于轻质隔热材料, 如隔热砖、轻质浇注料等, 体积密度与其导热性和热容量也有密切的关系。一般来说, 体积密度越高, 对材料的强度、抗侵蚀性、耐磨性、荷重软化温度越有利。

材料的体积密度受所用原料、生产工艺等因素的影响, 控制所用原料的体积密度、压制砖坯的压力和合理的烧成制度, 均能有效地控制最终制品的体积密度。

对于致密定形耐火制品来说, 体积密度和显气孔率是同时测定的, 计算公式为:

$$\rho_b = \frac{m_1 \rho_L}{m_3 - m_2} \quad (1-3)$$

式中 ρ_b ——材料的体积密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$;

ρ_L ——在试验温度下, 浸渍液体的密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$;

m_1 ——干燥试样的质量, g;

m_2 ——饱和试样的表观质量, g;

m_3 ——饱和试样在空气中的质量, g。

对于定形隔热耐火制品来说, 直接测量试样的质量和尺寸, 体积密度按下式计算:

$$\rho_b = \frac{m}{V_b} \quad (1-4)$$

式中 ρ_b ——材料的体积密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$;

m ——干燥试样的质量, g;

V_b ——试样的总体积, cm^3 。

1.2.4 真密度

真密度是指多孔体材料的质量与其真体积之比。真体积是指多孔体中固体材料的体积。它可以反映材质成分的纯度以及晶型转变的程度、比例等, 由此可以推知在使用中可能发生的变化。

真密度的测定方法为: 将试样磨细到尽可能无封闭气孔存在的粉末试样, 称量比重瓶的

质量和装有试样的比重瓶的质量,两者之差即为干燥试样的质量。选用蒸馏水或已知密度的液体装满装有试样的比重瓶,称量其质量。选用同一液体装满已倒空试样和洗净的同一比重瓶,称量质量。真密度的计算公式为:

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 + m_3 - m_2} \times \rho_L \quad (1-5)$$

式中 ρ ——试样真密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$;

ρ_L ——所选用液体在试验温度下的密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$;

m_1 ——干燥试样的质量, g;

m_2 ——装有试样和比重瓶的质量, g;

m_3 ——装有选用液体的比重瓶的质量, g。

1.2.5 透气度

透气度是指耐火制品允许气体在压差下通过的性能。透气度与贯通气孔的数量、大小、结构和状态有关,并随着制品成型时的加压方向而异。

制品的透气度高,提高了具有侵蚀性流体的通过能力,极大地加快了砌体的侵蚀速率,缩短了砌体的使用寿命。另外,透气度高也使热工窑炉的热损失增大,为此在一般情况下,希望制品的透气度越小越好。

耐火材料的透气度直接受生产工艺的影响,通过控制颗粒级配、成型压力和烧成制度可控制材料的透气度。

对于致密定形耐火制品的透气度的测定方法为:检测在三个不同的压差下,干燥空气或氮气流过规定尺寸试样两端面的流量,计算公式为:

$$K = 2.16 \times 10^9 \eta \frac{h}{d^2} \times \frac{Q}{\Delta p} \times \frac{2p_1}{p_1 + p_2} \quad (1-6)$$

式中 K ——试样的透气度, $\text{mm}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$;

η ——试验温度下气体的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

h ——试样的高度, mm;

d ——试样的直径, mm;

Q ——气体的体积流量, $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$;

Δp ——试样两端气体的压差, Pa, $\Delta p = p_1 - p_2$;

p_1, p_2 ——分别为气体进入试样端和逸出试样端的绝对压力, Pa。

1.3 耐火材料的力学性质

耐火材料的力学性质是指制品在多种条件作用下的强度等力学性能指标,该指标表征制品抵抗因外力作用而产生的各种应力变形而不被破坏的能力。无论是在常温或是在使用条件下,耐火材料都会因受到各种外界作用力如压缩力、拉伸力、弯曲力、剪切力、摩擦力或冲击力的作用而变形乃至破坏,因此检验不同温度条件下耐火材料的力学性质,对于了解它抵抗破坏的能力,探讨它的损坏机理,寻求提高制品质量的途径、办法具有极其重要的意义。

1.3.1 耐压强度

耐压强度是指耐火材料在一定的温度下单位面积所能承受而不被破坏的极限载荷。耐火材料的耐压强度分为常温耐压强度和高温耐压强度。它是衡量耐火材料质量的重要性能指标

之一，间接地反映出制品的组织结构，如致密度、均匀性和烧结性等。

耐火材料的常温耐压强度是指在室温下，耐火制品试样单位面积上所能承受而不被破坏时的极限载荷。耐火材料的常温耐压强度对于该制品的生产、运输、使用性能均有极大的影响，而且在多数情况下，也直接影响到使用寿命，由此我们希望制品达到较高的耐压强度值。

耐火材料的高温耐压强度是指耐火材料在指定的高温条件下，规定尺寸的立方体试样单位面积上所能承受而不被破坏的极限载荷。耐火材料的高温耐压强度决定了该制品的使用范围，它是耐火材料选择的重要依据之一。对于不烧耐火制品和不定形耐火材料来说，由于在材料中加入了一定数量的结合剂或外加剂，其常温的结合方式和强度会随着温度的升高而产生变化，因此其高温耐压强度具有更为重要的意义。

在室温下测得的耐压强度为材料的常温耐压强度。将试样按规定的速率升温到指定的温度，保温一定时间后测定的耐压强度为该温度下的高温耐压强度。耐压强度的计算公式为：

$$S = \frac{P}{A} \quad (1-7)$$

式中 S ——耐火制品试样的耐压强度，MPa；

P ——试样破碎时的最大载荷，N；

A ——试样面积， mm^2 。

1.3.2 抗折强度

抗折强度是指具有一定尺寸的耐火材料条形试样，在三点弯曲装置上所能承受的最大弯曲应力，又称抗弯强度。耐火材料的抗折强度亦分为常温抗折强度和高温抗折强度。常温抗折强度是指在室温下，规定尺寸的长方体试样在三点弯曲装置上受弯时所能承受的最大应力。一般说来，常温耐压强度较高的样品其常温抗折强度也较好。其计算公式为：

$$R_r = \frac{3}{2} \times \frac{FL}{bh^2} \quad (1-8)$$

式中 R_r ——耐火材料的常温抗折强度，MPa；

F ——试样断裂时的最大载荷，N；

L ——下刀口间的距离，mm；

b ——试样中部的宽度，mm；

h ——试样中部的高度，mm。

耐火材料高温抗折强度是指耐火制品在规定的高温条件下，规定尺寸的长方体试样在三点弯曲装置上受弯时所能承受的最大应力。计算公式为：

$$R_e = \frac{3}{2} \times \frac{FL}{bh^2} \quad (1-9)$$

式中 R_e ——耐火材料的高温抗折强度，MPa；

F ——试样断裂时的最大载荷，N；

L ——下刀口间的距离，mm；

b ——试样中部的宽度，mm；

h ——试样中部的高度，mm。

高温抗折强度高的制品，在使用的高温条件下，对于物料的冲击、磨损、液态渣的冲刷等，均具有较好的抵抗能力。

1.3.3 耐磨性

耐磨性是指耐火材料抵抗坚硬的物体或气流的摩擦、磨损、冲刷的能力。耐火材料的耐

磨性取决于其矿物组成、组织结构和颗粒结合的牢固性以及材料本身的密度、强度等。

常温耐磨性用磨损体积来表示,其测试方法为:将磨损介质垂直喷吹到试样表面上,测量试样的磨损体积。按下式计算磨损量:

$$A = \frac{m_1 - m_2}{\rho_b} \quad (1-10)$$

式中 A ——磨损量, cm^3 ;

ρ_b ——试样的体积密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$;

m_1, m_2 ——分别为试验前后试样的质量, g 。

1.3.4 高温蠕变性

当耐火材料在高温下承受小于其极限强度的某一定荷重时,产生塑性变形,变形量会随时间的延长而逐渐增加,甚至会使耐火材料破坏,这种现象叫蠕变。在设计高温窑炉时,根据耐火材料的荷重软化试验和残存收缩率,在一定程度上可以推测耐火材料的高温体积稳定性。耐火材料的高温蠕变性是指制品在恒定的高温条件下受应力作用随着时间的变化而发生的等温形变。

高温蠕变的检测方法为:恒压下,以一定速率升温,到达指定温度后长时间保温,记录随时间的变化试样在高度方向的变形量,计算蠕变率。计算公式为:

$$P = \frac{L_n - L_0}{L_i} \times 100\% \quad (1-11)$$

式中 P ——耐火制品试样的高温压缩蠕变率, %;

L_n ——试样恒温 $n\text{h}$ 后的高度, mm ;

L_0 ——试样恒温开始时的高度, mm ;

L_i ——试样原始高度, mm 。

耐火材料在高温、荷重条件的变形量及时间-形变曲线,是随着材质、升温速率、恒温温度、荷载大小等诸多因素的变化而变化的,而且差异极大。因此,对于不同材质的制品,应根据其使用条件单独规定高温蠕变试验温度等条件。

1.4 耐火材料的热学性质

由于耐火材料经常在加热情况下使用,因此耐火材料的热学性质也是其性质的重要方面。耐火材料的热学性质主要包括热容、热膨胀性和导热性。

1.4.1 热容

热容是指温度升高 1K 时材料所吸收的热量,比热容是单位质量的材料温度升高 1K 所吸收的热量。在不同的温度下,材料的热容是不同的,在温度 T 时材料的恒压热容可以表示为:

$$C_p = \left(\frac{\partial Q}{\partial T} \right)_T \quad (1-12)$$

工程上通常使用平均热容,它是指将材料从 T_0 温度加热到 T_1 温度所吸收热量的平均值:

$$\overline{C_p} = \frac{Q}{m(t_1 - t_0)} \quad (1-13)$$

式中 C_p ——耐火材料的恒压热容, $\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;

δQ ——材料温度升高 1K 所吸收的热量;

Q ——加热试样所吸收的热量, J;

m ——试样的质量, g;

t_0, t_1 ——试样加热前后的温度, K。

材料的热容指标, 在设计和控制炉体升温、冷却, 特别是蓄热能力计算中具有重要意义。

1.4.2 热膨胀性

耐火材料的热膨胀性是指制品在加热过程中长度或体积随温度的升高而增大的现象。耐火材料在使用的过程中常伴有巨大的温度变化, 随之而来的长度和体积的变化, 会严重影响热工设备砌体的尺寸, 甚至导致砌体破坏。此外, 耐火材料的热膨胀情况还能反映出受热后的热应力分布和大小, 晶型转变及相变, 微裂纹的产生及抗热震稳定性等。

热膨胀的表示方法有线膨胀率和线膨胀系数两种, 也可以用体积膨胀率和体积膨胀系数来表示。线膨胀率 ρ 是指由室温到试验温度之间试样长度的相对变化率 (%)。线膨胀系数 α 是指由室温到试验温度之间, 每升高 1°C , 试样长度的相对变化率, 单位为 $1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。相应地, 体积膨胀用体积膨胀率 ($\Delta V/V_0$) 和体积膨胀系数 β 来表示, $\beta = \Delta V/(V_0 \Delta T)$ 。若线膨胀系数很小, 则体积膨胀系数约等于线膨胀系数的 3 倍, 即 $\beta = 3\alpha$ 。

热膨胀系数实际上并不是一个恒定值, 它随着温度的变化而变化, 通常所说的都是指在一定的温度范围内的平均值。

耐火材料热膨胀性的测试方法有两种, 顶杆法和望远镜法。其基本原理是以规定的升温速度将试样加热到指定试验温度, 测量随温度的升高试样温度的变化值, 计算出随温度升高试样的线膨胀率和指定温度范围内的平均线膨胀系数。

(1) 顶杆法

试样由室温至试验温度各温度间隔的线膨胀率按下式计算:

$$\rho = \frac{(L_t - L_0) + A_k}{L_0} \times 100\% \quad (1-14)$$

式中 L_0 ——试样在室温时的长度, mm;

L_t ——试样在试验温度 t 时的长度, mm;

A_k ——在 t 时刻仪器的校正值, mm。

试样由室温至试验温度线膨胀系数的计算公式为:

$$\alpha = \frac{\rho}{(T - T_0) \times 100} \quad (1-15)$$

式中 ρ ——试样的线膨胀率;

T_0 ——室温;

T ——试验温度。

(2) 望远镜法

望远镜直读法是用望远镜直接观察炉内高温下试样的膨胀值。试样由室温至试验温度的线膨胀率按下式计算:

$$\rho = \frac{L_t - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1-16)$$

$$L_t - L_0 = \Delta L_1 + \Delta L_2$$