

工业岩石学

翁润生 编著

中国地质大学出版社

工 业 岩 石 学

俞润生 编著

中国地质大学出版社

工业宝石学

翁润生 编 著
责任编辑 刘士东
责任校对 杨 霖

中国地质大学出版社出版
(武汉市喻家山)

石首市第二印刷厂印刷 湖北省新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 10.625 插页1 字数 265千字
1990年10月第1版 1990年10月第1次印刷
印数1—1000册

ISBN 7-5625-0429-6/P·135

定价：2.30元

前 言

工业岩石学是岩石学的一个分支，是岩石学与材料科学的交叉学科，同时，也是一门应用性很强的学科。随着我国科学技术的飞速发展，国内急需这样一本教材和参考书。为了满足国内有关专业的大学生、研究生及科技人员的需要，作者在查阅了大量国内外专著和文献的基础上，结合多年的教学和科研实践编写了本书。

本书分13章，第1—12章主要叙述耐火材料、传统陶瓷、精密陶瓷及水泥的矿物原料、矿石性质及其分类，简单的生产工艺过程以及制品的化学成分、矿物成分、显微结构和制品性能及其与工艺生产的关系，为从微观上判断制品质量的优劣，采用最优的配方、最优的工艺条件、生产最优的工业制品提供了理论依据。第13章为工业矿物鉴定表，用表格形式简明地列出了300多个常见的人造矿物和天然矿物的光性特征、产状、熔点、密度、差热分析数据以及X光衍射数据等。工业矿物鉴定表是按均质矿物、一轴晶矿物、二轴晶矿物顺序排列的；同轴晶矿物鉴定表中的矿物均是按折光率(N 、 N_o 或 N_m)从小到大的顺序进行排列的。表中产状不具成因含义，而是反映该矿物在硅酸制品中出现的状况。

为了便于读者查阅，本书附有纯耐火物质及部分常见矿物熔点参考表、常见矿物密度参考表、矿物鉴定表详细目录以及中、英文矿物名称索引。

本书在编写过程中，曾多次得到苏良赫教授的指导和帮助，并得到池际尚教授的关怀和支持。邵洁涟教授、周珣若教授在百忙中抽时间详细地审阅了本书的初稿，并提出了许多宝贵意见，在此，对这些老师表示衷心地感谢。

由于工作条件和水平有限，加之时间紧迫，书中难免有不当之处甚至错误，欢迎读者批评指正。

作者 翁润生

1988.12.

目 录

第一章 绪 论	(1)
一、工业岩石及工业岩石学概念.....	(1)
二、工业岩石的分类.....	(1)
三、工业岩石和天然岩石的比较.....	(2)
第二章 耐火材料的基础知识	(3)
一、耐火材料的概念.....	(3)
二、耐火材料的物质组成.....	(3)
三、耐火材料的宏观结构.....	(4)
四、耐火材料的热学性质和导电性.....	(6)
五、耐火材料的力学性质.....	(7)
六、耐火材料的高温使用性质.....	(9)
第三章 耐火材料的分类	(13)
第四章 常用的耐火材料和陶瓷原料	(15)
一、耐火粘土.....	(15)
二、高铝粘土（包括复州粘土）.....	(16)
三、白云石.....	(17)
四、菱镁矿.....	(19)
五、硅灰石.....	(21)
六、石墨.....	(22)
七、长石和霞石正长岩.....	(23)
第五章 各种烧结耐火材料的类型和特征	(25)
一、硅质耐火材料.....	(25)
二、粘土质耐火材料.....	(32)
三、高铝质耐火材料.....	(34)
四、镁质耐火材料.....	(36)
五、蜡石质、硅线石质、蓝晶石质耐火材料.....	(38)
六、常见耐火材料的性质.....	(46)
第六章 电熔耐火材料	(47)
一、概述.....	(47)
二、电熔耐火材料的主要特性.....	(48)
三、电熔耐火材料的分类.....	(48)
四、电熔锆刚玉耐火材料.....	(49)
五、部分国外电熔耐火材料的品种、性能及主要用途.....	(52)
第七章 耐火材料的损坏原因及预防措施	(55)
第八章 耐火材料的显微镜观察	(58)

一、原始耐火材料显微镜观察内容.....	(58)
二、残砖耐火材料(蚀损耐火材料)的显微镜观察内容.....	(59)
第九章 传统陶瓷	(60)
一、概述.....	(60)
二、传统陶瓷原料.....	(61)
三、陶瓷制品的形成工艺过程.....	(66)
四、陶瓷坯体的结构.....	(66)
五、陶瓷的物理技术性质.....	(68)
六、传统陶瓷的性能、岩相组成和显微结构的关系.....	(71)
第十章 精密陶瓷	(72)
一、概述.....	(72)
二、几种精密陶瓷简述.....	(72)
三、精密陶瓷的发展方向.....	(78)
第十一章 釉	(80)
一、概述.....	(80)
二、分类.....	(80)
三、釉的原料.....	(80)
四、釉的性质.....	(81)
五、釉的成分表示方法.....	(81)
六、釉的化学成分计算.....	(82)
七、釉的制备和施釉方法.....	(83)
八、色料.....	(83)
九、釉面缺陷和矫治方法.....	(83)
第十二章 水泥	(85)
一、概述.....	(85)
二、几种常用水泥简介.....	(85)
三、水泥的原料.....	(87)
四、硅酸盐水泥的成分、性质和应用.....	(87)
五、硅酸盐水泥熟料的形成和石膏混合材料在水泥中的作用.....	(93)
六、硅酸盐水泥熟料的侵蚀和侵蚀条件.....	(94)
七、水泥熟料岩相观察在水泥生产控制和水泥产量质量方面的应用实例.....	(95)
第十三章 工业矿物鉴定表	(97)
一、工业矿物鉴定表使用说明.....	(97)
二、工业矿物鉴定表详细目录.....	(98)
表13-1 均质矿物.....	(101)
表13-2 一轴晶矿物.....	(109)
表13-3 二轴晶矿物.....	(122)
附表 1 纯耐火物质及部分常见矿物的熔点	(150)
附表 2 常见矿物相对密度	(153)
附表 3 中英文矿物名称索引	(155)

主要参考文献.....	(159)
图版说明.....	(161)
图版.....	(163)

第一章 绪 论

一、工业岩石及工业岩石学概念

工业岩石没有一个严格的定义,一般认为工业岩石是指硅酸盐和铝硅酸盐的工业制品和工业副产品。工业制品,主要包括玻璃、水泥、陶瓷、铸石、耐火材料、烧结矿和球团矿等。工业副产品包括各种冶金炉渣、粉煤灰、尾矿等。

工业岩石学是研究工业岩石的科学,它是以结晶矿物学、岩石学以及多种工业科学的理论和技术为手段,是研究以天然岩石或矿物为原料、经过加工或热处理而制成的工业品和工业副产品的物相组成、结构构造的变化与其工艺生产条件、工业产品性能之间关系的科学。工业岩石学的名称是从苏联沿用下来的,英文为Industrial petrology,西方国家叫应用岩石学(Applied petrology)。

二、工业岩石的分类^①

1. 硅酸盐工业分类

耐火材料 (Refractory)

玻 璃 (Glass)

陶 瓷 (Ceramics)

水 泥 (Cement)

宝石制品 (Gemstone或Gem)

铸 石 (Cast stone)

玻璃结石 (Stone of glass)

冶金炉渣 (Metallurgical slag)

烧 结 矿 (Sinter) 和球团矿 (Pellet)

2. 根据工业岩石的形成条件分类

(1) 熔融型 (Melting type)

熔融型是指原料在高温下熔融成为液相后又经冷凝、固结而形成的岩石。如铸石、玻璃、熔铸耐火材料 (Fused cast refractory) 及电熔水泥 (Electric melting cement) 等。

(2) 烧结型 (Sintering type)

凡是经过配制的固体物料,在固态条件下加热煅烧,使其矿物组成、结构构造和化学成分均发生变化的硅酸盐材料和中间产物,都属烧结型。如陶瓷、耐火材料、水泥熟料 (Ce-

^① 引用郭竞雄, 1983, 试论人造岩石的分类, 中国科学院地质研究所。

ment clinker) 烧结矿和球团矿。这里要指出的是, 在煅烧过程中可以出现部分的液相, 如烧结矿中的粘结相。

(3)水硬型 (The type of water hardening)

凡是由于水化反应胶结的人造岩石都称为水硬型。这一类型包括所有的水硬型胶凝材料, 如水泥混凝土 (Cement concret)、水泥浆 (Cement) 等。

(4)复合型 (Composite type)

凡是无机与有机或金属复合制成的材料, 均称为复合型, 是介于上述三大类材料之间的材料, 如金属陶瓷 (Cermet)、树脂砂轮、铸石复合砂泵等。

三、工业岩石和天然岩石的比较(表1-1)

表1-1 工业岩石与天然岩石的比较

	工 业 岩 石	天 然 岩 石
类 型	熔融型工业岩石, 如铸石、熔铸耐火材料	岩浆岩
	烧结型工业岩石, 如陶瓷、烧结耐火材料	变质岩
	水硬型工业岩石, 如水泥、水泥混凝土	沉积岩
	耐火材料使用后的蚀变产物, 如霞石	接触变质矿物
	冶金炉和玻璃窑炉炉壁上新生的产物	气水热液变质岩
	玻璃中的结石	包裹体
冷却速度	快	慢
冷却时间	短	长
温度、压力	低	高
熔剂成分	简单, 少	复杂, 多
化学成分	简单	复杂
矿物成分	简单	复杂
种 属	少。但某些工业岩石是天然岩石中所没有的, 如水泥、烧结矿、球团矿、炉渣等	多
结构构造	简单, 人工可以控制	复杂
包 体	少	多
鉴定难易程度	较困难, 因为部分工业岩石颗粒太小, 偏光显微镜无法鉴定。如陶瓷, 要靠其他测试方法	比较容易鉴定, 因为大部分岩石, 除粘土岩、喷出岩之外, 都可以用偏光显微镜鉴定
用 途	可制成各种工业品或工业原料, 作为商品出售	只有部分为工业品的原料, 可以作为商品出售, 大部分岩石正在开发利用之中

第二章 耐火材料的基础知识

一、耐火材料的概念

耐火材料到目前为止还没有一个严格的定义,但是,人们一般认为耐火材料应具备以下特点和性能:①高耐火度;②较高的荷重软化温度;③耐急冷急热;④较好的抗渣性;⑤较小的气孔率和较大的体积密度。

二、耐火材料的物质组成

耐火材料的性能主要决定于制品的化学成分、矿物成分和显微结构。对于既定的原料,即化学组成一定时,可以采取适当的工艺方法使其获得某种特性,如晶形、晶粒大小、分布状态、形成固溶体和玻璃相以及某种显微结构(包括致密程度、物料的颗粒大小和分布等)。其目的是,在一定限度内,提高制品的质量,扩大制品的使用范围。

1. 化学成分

通常将耐火材料的化学成分划分为两部分,即主成分和副成分。

主成分:是耐火材料的主要成分,它的性质和数量决定着制品的性质。主成分可以是元素,也可以是化合物。耐火材料按其主成分的化学性质可分为三类,见表2-1。

表2-1 耐火材料的化学分类

类 别	高温耐侵蚀性能	主 成 分	所属耐火材料
酸性耐火材料	对酸性物质侵蚀抵抗性强	SiO_2 、 ZrO_2 等四价氧化物	硅质耐火材料、粘土质耐火材料
中性耐火材料	对于酸性、碱性物质有相近的抗侵蚀性	Al_2O_3 、 Cr_2O_3 等三价氧化物(R_2O_3)及 SiC 、 C 等原子键的结晶矿物	高铝质耐火材料、铬质耐火材料、炭质耐火材料
碱性耐火材料	对碱性物质侵蚀抵抗性强	MgO 、 CaO 等二价氧化物	镁质、白云质耐火材料

副成分:即杂质成分,是指原料中伴随的夹杂成分或工艺过程中特别加入的添加成分。如镁质耐火材料化学成分中的氧化镁是主成分,其他氧化物均属杂质成分。对耐火材料中的杂质成分曾有两种看法:①杂质成分通过化学反应生成低熔性物相;②虽不形成低熔物相,但在相同温度下生成液相较多。按添加的目的和添加成分所起的作用不同,可将添加成分分为矿化剂、稳定剂和烧结剂等。除可以烧掉的成分外,它们都包含在制品的化学组成中。

2. 矿物成分

耐火制品是由矿物晶体(包括玻璃)组成的。制品的性质是矿物成分和显微结构的综合反映。因此,在分析制品的矿物组成对其性质的影响时,单纯从化学成分出发分析考察是不

够全面的，应进一步观察矿物成分。制品的矿物成分取决于制品的化学成分和工艺条件。化学成分相同的制品，由于工艺条件的不同，则所形成的矿物种类、数量、颗粒大小和结合情况等都将产生差异，致使产品的性能可能有较大差别。例如二氧化硅含量相同的硅质制品，因二氧化硅在不同工艺条件下，可形成晶体内部结构和性质不同的两种矿物——鳞石英和方石英，致使制品的某些性质会有差异。即使制品的矿物成分一定，随着矿物晶体 的大小、形状、分布情况的不同，亦会对制品的性质有显著的影响。在使用过程中，耐火制品受到高温作用和熔渣侵蚀，其矿物成分和化学成分会发生变化。

研究耐火材料的矿物成分，必须从原料加热过程中的相变化、制造过程中配料间相互反应产生的相变化以及在使用过程中的相变化等三个方面来考虑。其结果可作为确定耐火制品的生产工艺、制品质量的鉴定以及判断是否适用于使用条件等方面的重要依据。

耐火材料主要是由矿物晶体（晶相）和玻璃相组成的。

主晶相：是指构成制品结构主体的熔点高、含量较多的晶相。耐火制品中的主晶相的性质、数量及结合情况决定着制品的性质。

基质：是指填充在主晶相间的结晶矿物和玻璃相，也称结合相。在耐火材料的相组成中，基质虽然含量并不多，但对制品的性质（如高温特性和耐侵蚀性）起着决定性的影响。制品在使用过程中，首先从基质开始损坏，因而在耐火制品生产工艺中，为了改变制品的性质，采用调整和改变基质成分是有有效的工艺措施。绝大部分耐火制品按其主晶相和基质成分可分为两类：

一类是含有晶相和玻璃相组成的耐火制品，它的基质为玻璃相。如粘土砖、硅砖等都属于此类。

另一类是仅有晶相组成的耐火制品，其基质为微细的矿物晶体。如镁砖、铬镁砖等碱性耐火材料均属这一类。这些制品在高温烧成时，产生一定的液相，其数量和形成速度取决于原料种类。但是，液相在冷却时并不形成玻璃，而是形成矿物晶相基质。其结果是，主晶相为次生晶相基质所胶结，基质晶相的成分不同于主晶相。

耐火制品的基质有两种类型：一种是由一定量的硅酸盐晶体或玻璃相基质胶结主晶相，构成基底式胶结；另一种是基质很少，主晶相直接结合，构成接触式胶结。由于后者制品的高温性能比前者优越得多，因此，国内外都在研制直接结合砖，即采用高纯原料，减少砖中低熔硅酸盐结合物，并在高温下让少量液相移向颗粒间隙中，使固体颗粒构成连续的结晶网，从而显著地提高制品的高温性能指标，延长其使用寿命。

鉴定并研究耐火材料的原料、制品以及使用后砖块的矿物组成和显微结构，有非常重要的意义；特别是对硅砖中鳞石英和方石英的转变，高铝砖中莫来石晶粒的发育，镁砖中方镁石晶粒的大小、形状、分布特征，以及使用过程中受熔渣侵蚀的砖块，进行显微镜鉴定，能更好地提供改进质量的方向。

三、耐火材料的宏观结构

耐火材料是由固相（晶相和玻璃相）和气相两部分构成的非均质体。固相和气孔的大小、形状、分布以及它们之间的关系构成了耐火材料的宏观结构。制品的宏观结构特征是影响其高温使用性质的重要因素。例如，制品的致密程度对提高耐火制品对外来介质的侵蚀抗性，具有特别重要的意义。表示耐火材料宏观结构的致密程度，有如下一系列指标：

1. 气孔

耐火材料的气孔是由原料中的气孔和成型后的颗粒间的气孔组成的。气孔的容积、形状以及大小、分布，对耐火材料的性质有很大的影响，而与原料的种类无关。

耐火材料中的气孔，大致可分为闭口气孔、开口气孔、贯通气孔等三类。闭口气孔封闭在制品中，不与外界相通。开口气孔，一端封闭，另一端与外界相通，能为流体填充。贯通气孔，与外界相通，贯通制品的两面，能使流体通过。

气孔，按其分布状态可分为三类，即骨料（粗颗粒）中的气孔、粗颗粒和基质间的气孔以及基质中的气孔。

研究气孔对耐火制品在使用过程中被外界介质（如液体、熔渣、气体等物质）侵入而加速损坏的影响时，通常认为贯通气孔起着主要作用；开口气孔虽也为介质侵入，但其中的气体被压缩，会对流体的侵入起着抑制作用；闭口气孔则影响较小。若以气孔的分布情况而论，主要是基质中的气孔和颗粒与基质间的气孔。

为简便起见，通常将上述三类气孔合并为两类，即开口气孔（包括贯通气孔）和闭口气孔。在一般耐火制品中（除熔铸制品和轻质隔热制品外），开口气孔体积占总气孔体积的绝对多数，闭口气孔体积则很小。另外，闭口气孔的体积难于直接测定，因此，制品的气孔率指标常用开口气孔率（亦称显气孔率）表示。

$$\text{真气孔率（总气孔率）} A = \frac{V_1 + V_2}{V_0} \times 100\%$$

$$\text{开口气孔率（显气孔率）} B = \frac{V_1}{V_0} \times 100\%$$

式中， V_0 ——气孔总体积（ cm^3 ）； V_1 ——开口气孔体积（ cm^3 ）； V_2 ——闭口气孔体积（ cm^3 ）。

生产工艺对气孔率的影响最大，耐火制品的气孔率在0—80%之间。用窑业法生产的一般致密制品的气孔率在10—28%范围内。闭口气孔率和坯体特征有关，也与坯体在烧成时的液相数量有关。硅砖、镁砖、镁铬砖的闭口气孔率接近于零，但粘土砖的波动较大，波动于0.7—4.0之间。

2. 吸水率

它是制品中全部开口气孔吸满水的质量和其干质量之比，以百分率表示。实质上，它是反映开口气孔量的一个技术指标。

$$W = \frac{G_1}{G} \times 100\%$$

其中， G ——干燥试样的质量； G_1 ——试样开口气孔中吸满水时的质量。

3. 体积密度（亦称容积质量）

表示制品干质量和其总体积之比，即制品单位体积的质量，单位为 g/cm^3 。

$$d_{\text{体}} = \frac{G}{V_0}$$

其中， G ——干燥试样的质量； V_0 ——试样的总体积。

体积密度也是衡量制品致密程度的重要指标。密度较高时，可减少外部介质（液相或气相）对耐火材料作用的总面积，增大制品在使用过程中在工作层内耐火材料质量与被吸收的侵蚀介质质量之比，从而提高其使用寿命。所以，致密化是提高耐火材料质量的重要途径。近年来，鉴定耐火材料使用条件的变化，高纯度、高密度耐火材料的生产，是制造耐侵蚀耐

火制品的工艺方向。

为了提高耐火制品的体积密度，通常在生产中控制砖坯（半成品）的体积密度、制品的烧结程度和原料煅烧后的体积密度或吸水率等。

4. 真密度

是指不包括气孔在内的单位体积耐火材料的质量，可用下式表示：

$$d_{\text{真}} = \frac{G}{v_0 - (v_1 + v_2)}$$

其中， $d_{\text{真}}$ ——真密度 (g/cm^3)； G ——干试样质量 (g)； v_0 ——干试样总体积 (cm^3)； v_1 ——试样开口气孔体积 (cm^3)； v_2 ——试样闭口气孔体积 (cm^3)。

5. 密度

是耐火材料的单位体积质量与4℃水的单位体积质量之比，即耐火材料的真密度(g/cm^3)与4℃水的密度(g/cm^3)之比。

假密度亦称视密度，指包括闭口气孔体积在内的单位体积耐火材料的质量与4℃水的单位体积质量之比。

部分耐火材料的体积密度和显气孔率值见表2-2。

表2-2 部分耐火材料的体积密度和显气孔率

制 品 名 称	体积密度(g/cm^3)	显气孔率(%)
普通粘土砖	1.8—2.00	30—24
致密粘土砖	2.05—2.20	20.0—16.0
高致密粘土砖	2.25—2.30	15.0—10.00
硅 砖	1.8—1.95	22.00—19.00
镁 砖	2.6—2.70	24.00—22.00

6. 透气度

透气度是表示气体通过耐火制品难易程度的特征值。它与气孔的构造和状态有关，并随着耐火制品成型时的加压方向而异。通常认为，耐火制品的透气度是越低越好。但随着技术的发展，为满足特殊的使用条件，有时也要求制品有良好的透气性。例如，近年来为了提高钢的质量，用氧气通过透气砖对钢进行净化处理。

四、耐火材料的热学性质和导电性

1. 热膨胀

耐火材料的热膨胀是指其体积或长度随温度升高而增大的物理性质。热膨胀不仅是重要的使用性能，而且也是工业窑炉和高温设备进行结构设计的重要参数。耐火材料热膨胀的重要性，还表现在直接影响其抗热性和受热后的应力分布及大小等。此外，材料的热膨胀系数随温度变化的特点，还与研究材料的相变和有关微裂纹有关。

耐火材料的热膨胀可以用线膨胀系数(α)或体积膨胀系数表示，也可以用线膨胀百分率或体积膨胀百分率表示。

材料的热膨胀与其晶体结构和键强度密切相关，键强度高的材料（如SiC）具有低的热膨胀系数。对于组成相同的材料，由于结构不同，热膨胀系数也不同。通常结构紧密的晶

体，热膨胀系数较大，而类似无定型的玻璃，则往往有较小的热膨胀系数。例如多晶石英的热膨胀系数为 $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，而石英玻璃只有 $0.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。对于氧离子紧密堆积结构的氧化物，一般线膨胀系数较大，例如 MgO 、 Al_2O_3 等。这是由于紧密接触的氧离子相互振动，使导热膨胀系数增大之故。

耐火制品的热膨胀系数取决于它的化学成分和矿物成分。通常，碱性耐火制品的热膨胀系数大于酸性耐火制品，而高铝耐火制品介于两者之间。耐火制品的热膨胀系数愈大，受热后内部因温度梯度所产生的热应力也愈大，当温度急剧改变时，制品易产生破损，所以，耐火材料的热膨胀对其热震稳定性有直接影响。此外，对于热膨胀大的以及有晶形转变的制品，无论在烧成时或使用中，均应加以注意。

常用的耐火制品的平均热膨胀系数见表2-3。

表2-3 耐火制品热膨胀系数

名 称	粘土砖	莫来石砖	莫来石刚玉砖	刚玉砖	半硅砖	硅 砖	镁 砖
平均热膨胀系数 ($\times 10^{-6}$) (20—1000 $^{\circ}\text{C}$)	4.5—6	5.5—5.8	7.0—7.5	8.0—8.5	7.9—9.0	11.5—13.0	14.0—15.0

2. 导热率

耐火材料的导热率对于高温热工设备的设计是不可缺少的重要数据；对于那些要求绝热性能良好的轻质耐火材料和导热性良好的隔焰加热炉结构材料，检验其导热率具有更重要的意义。耐火材料导热率的大小不仅与其用途有关，而且也是直接影响制品热震稳定性的重要因素。

3. 热容

工程上通常用常压下加热1kg物质，使之升温1 $^{\circ}\text{C}$ 所需要的热（千卡，1千卡 = 4186.8J）称为比热容（也称热容）。耐火材料的热容除影响炉体加热、冷却速度外，在蓄热砖中也具有重要意义。耐火材料的热容取决于它的化学成分和矿物成分以及所处的温度。

4. 温度传导性

温度传导性表示物体加热时的温度传递速度。它决定耐火材料急冷急热时的内部温度梯度的大小。耐火材料的热容量一般差别不大，它们的温度传导性主要取决于制品的导热性和体积密度。

5. 导电性

通常耐火材料在常温下是电的不良导体，但随着温度的升高和电阻的减小，导电性会增强。如将其加热至熔融状态时，则会出现很大的导电能力。

耐火材料中的杂质，对其高温下的电阻率有显著影响。因此，制备优良电绝缘性耐火制品的基本途径之一，是尽可能采用较纯的原料。

五、耐火材料的力学性质

耐火材料的力学性质是指材料在不同温度下的强度、弹性和塑性性质。这类性质表示材料在不同温度下抵抗因外力作用产生的各种变形和应力而不破坏的能力。无论是在常温或在使用条件下，耐火制品都会因受到各种应力如压缩应力、拉应力、弯曲应力、剪应力、磨擦力或撞击力的作用而变形或损坏。因此，检验不同温度下工作的耐火材料的力学性质，

对于探讨它的损坏机理、寻求提高制品质量的途径,有重要的意义。通常是通过检验耐压强度、抗折强度、扭转强度、耐磨性、弹性模量和高温蠕变等指标来判断耐火材料的力学性质。

1. 常温下力学性质

(1) 耐压强度

它是指常温下耐火材料在单位面积上能承受的最大压力,如超过此值,材料就会被压坏。其单位是 N/cm^2 。

(2) 抗拉强度、抗折强度和扭转强度

耐火材料的抗拉强度和抗折强度的主要影响因素是材料的结构。细粒结构有利于这些指标的提高。

(3) 耐磨性

是指耐火材料抵抗坚硬物料或气体磨损作用(研磨、磨擦、冲击)的能力。在许多情况下,它也决定着材料的使用寿命。

耐火材料的耐磨性不仅取决于制品的密度,而且也取决于制品的矿物成分和结构构造。在生产中,除注意骨料本身的硬度以外,还要注意胶结物的粒度、组成、性质、制品的气孔率等。常温下,耐压强度高、气孔率低、结构致密的、烧结良好的制品,总是具有良好的耐磨性。

2. 高温下力学性质

(1) 高温耐压强度

是指材料在高温下单位截面所能承受的极限压力,其单位是 N/cm^2 。

(2) 高温抗折强度

是指材料在高温下单位截面积所能承受的极限弯曲应力,单位是 N/cm^2 ,它表示材料在高温下抗弯曲的能力。

(3) 高温扭转强度

砌筑窑炉的耐火制品,在加热或冷却时,承受着复杂的剪应力,因而,制品的高温扭转强度是一个重要的性质。它表示材料在高温下抵抗剪应力的能力。

(4) 高温蠕变性

当材料在高温下承受小于其极限的某一恒定荷重时,产生塑性变形,变形量随着时间的增长而逐步增加,甚至会使材料破坏。这种现象叫蠕变。

耐火材料的高温蠕变性,是指材料在恒定的高温和一定荷重作用下产生的变形和时间的关系。根据施加的荷重不同,可分为高温压缩蠕变、高温抗折蠕变和高温扭转蠕变等。其中,压缩蠕变和抗折蠕变容易测定,故应用比较普遍。

高温蠕变的表示方法一般为变形量(%)和时间(h)的关系曲线,常称为蠕变曲线。

一般认为,影响高温蠕变的因素有两个:一是使用条件,如温度、荷重、时间和气氛性质(是氧化性还是还原性)等;二是材质,如化学成分和矿物成分,显微结构,气孔率,晶粒大小、形状和分布状态等。

例如,热风炉格子砖在高温长时间的作用下,砖体逐步软化产生可塑变形,强度显著下降甚至破坏。格子砖的这种蠕变现象是炉子损坏的主要原因。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。但对制品在长期高温负荷条件下工作体积稳定性的认识还是不充分的。因此,检验其高温蠕变

性,了解它在长时间高温负荷下的变形,是十分重要的。

(5)弹性模量

材料在其弹性限度内受外力作用产生变形,当外力除去后,仍恢复到原来的形状,此时,应力和应变的比例称为弹性模量,它表示材料抵抗变形的能力。其关系可以表示为:

$$E = \frac{\sigma \cdot L}{\Delta L}$$

式中, E ——弹性模量; σ ——材料所受应力; $\frac{L}{\Delta L}$ ——材料的相对长度变化。

由上式可以看出,弹性模量 E 值越大,则在相同的条件下变形越小。其物理意义是,将截面积为 1cm^2 的单位长度的试样拉长1倍时所产生的应力。

弹性模量是材料的一个重要参数,它在很大程度上反映材料的结构特征。研究耐火材料的弹性模量随温度的变化,有助于了解其高温性能。

六、耐火材料的高温使用性质

1. 耐火度

耐火材料在无荷重时抵抗高温作用而不熔化的性质,称为耐火度。耐火度是一个技术指标。对于耐火材料而言,耐火度所表示的意义和熔点不同,熔点是纯物质结晶相与其液相处于平衡状态下的温度。如氧化铝(Al_2O_3)的熔点为 2050°C ,氧化硅(SiO_2)的熔点为 1713°C ,方镁石(MgO)的熔点为 2800°C 。但一般耐火材料是由各种矿物组成的多相固体混合物,并非单相的纯物质,故无一定的熔点,其熔融是在一定的温度范围内进行的,即只有一个固定的开始熔融温度和一个固定的熔融终止温度。在这个温度范围内,液相和固相同时并存。

耐火材料的耐火度是通过标准截头三角锥测定的,通常称为测温锥。这种由试验物料做成的截头三角锥(上底每边长 2mm ,下底每边长 8mm ,高 30mm ,截面呈等边三角形),在一定的升温速度下加热时,由于其自重的影响而逐渐变形弯倒,当其弯倒至顶点与底盘相接触时的温度,即为该试样的耐火度。

我国测温锥用字母“WZ”和锥体弯倒温度 $1/10$ 来标号,苏联采用“ПК”,英、日等国则用“SK”,美国使用的奥顿耐火锥(Orton cone)是修正塞格锥而制成的耐火锥。“SK”系取用德语Segar kegl的两个字头,是德国塞格(H.Egar)设计的三角锥比较方法。此外,美国还用PCE表示耐火度。PCE英文全称为Pyrometric cone equivalent即熔锥等效的意思。表2-4列出了各种测温锥的标号。

三角试锥在不同阶段中的变形和弯倒程度,主要取决于其中固相和液相的数量比以及液相粘度和材料的分散度,通常锥体弯倒时的液相含量约为 $70\sim 80\%$,其粘度为 $100\sim 500$ 泊,并随材料不同而异。

决定耐火度高低的最基本因素是材料的化学成分、矿物成分和结构特征。各种杂质成分会严重降低制品的耐火度,因此,在工艺中提高耐火材料耐火度的主要途径是,采取适当的措施来保证和提高原料的纯度。

一些常见耐火原料和耐火制品的耐火度列于表2-5。

表2-4 WZ,PK和SK测量锥的标号对照表

中 温 部 分					高 温 部 分				
WZ标号	PK标号	SK标号	Seger标准(°C)	美国标准(°C)	WZ标号	PK标号	SK标号	Seger标准(°C)	美国标准(°C)
110	110	1	1100	1160	158	158	26	1580	1595
112	112	2	1120	1165	161	161	27	1610	1605
114	114	3	1140	1170	163	163	28	1630	1615
116	116	4	1160	1190	165	165	29	1650	1640
118	118	5	1180	1205	167	167	30	1670	1650
120	120	6	1200	1230	169	169	31	1690	1680
123	123	7	1230	1250	171	171	32	1710	1700
125	125	8	1250	1260	173	173	33	1730	1745
128	128	9	1280	1285	175	175	34	1750	1760
130	130	10	1300	1305	177	177	35	1770	1785
132	132	11	1320	1325	179	179	36	1790	1810
135	135	12	1350	1335	182	182	37	1825	1820
138	138	13	1380	1350	185	185	38	1850	1835
141	141	14	1410	1400	188	188	39	1880	
143	143	15	1435	1435	192	192	40	1920	
146	146	16	1460	1465	196	196	41	1960	
148	148	17	1480	1475	200	200	42	2000	
150	150	18	1500	1499					
152	152	19	1520	1520					
153	153	20	1540	1530					

注：升温速度规定：Seger锥600°C/h，美国标准锥中温部分15°C/h，高温部分1000°C/h。

表2-5 耐火制品的耐火度

制 品 名 称	耐 火 度 (°C)
结 晶 硅 石	1730—1770
硅 砖	1690—1730
硬 质 粘 土	1750—1770
粘 土 砖	1610—1750
高 铝 砖	>1700—2000
镁 砖	>2000
白 云 石 砖	>2000

2. 高温荷重变形温度

耐火材料在高温下的荷重变形，表示它对高温和荷重同时作用的抵抗能力，也表示耐火材料呈明显塑性变形的软化范围。