

水泥工业耐火材料

隋良志 王兆国 姚春林 编著

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

水泥工业耐火材料/隋良志, 王兆国, 姚春林编著.

北京: 中国建材工业出版社, 2005. 7

ISBN 7-80159-726-5

I. 水... II. ①隋... ②王... ③姚... III. 耐火
水泥 IV. TQ172.76

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 069744 号

水泥工业耐火材料

隋良志 王兆国 姚春林 编著

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 14.25

字 数: 354 千字

版 次: 2005 年 7 月第 1 版

印 次: 2005 年 7 月第 1 次

定 价: 26.00 元

网上书店: www.ecool100.com

本书如出现印装质量问题, 由我社发行部负责调换。联系电话: (010) 88386906

前 言

水泥工业是国民经济基础的原材料产业。国家支持水泥工业发展大型、新型干法水泥，以加快结构调整，走可持续发展新型工业化的道路。据预测，到 2010 年新型干法水泥比重将达到 50% 以上，2020 年新型干法水泥比重将达到 80% 以上，技术经济指标和环保达到同期国际先进水平。

耐火材料是水泥工业生产过程中（熟料煅烧）必不可少的大宗消耗材料之一，其直接费用约占熟料生产成本的 1%~3%，且其间接影响也很大。

近几年全球耐火材料工业正朝向产量降低、质量提高、品种增加的趋势发展。一方面耐火材料的主要用户，如水泥、钢铁、玻璃、有色金属等行业的技术发展对耐火材料提出了更高的质量和品种的要求；另一方面，这些行业在激烈的质量和价格竞争中向耐火材料提出了严峻的降低单位产品耐火材料成本的要求，致使耐火材料企业要以更大的投入加快新的优质产品的开发与研究，以适应和满足这些行业的要求。原料以高纯为主，天然精选和人工合成并用。制品以高纯氧化物为主，非氧化物以及复合材料并重。制品品种则紧紧围绕用户的技术发展要求开发绿色、环保、节能、多功能产品。

随着水泥工业的结构调整，新建、改建的新型干法水泥企业数量不断地增加。伴随着新型干法窑数量的增多及近年来水泥工业的技术进步，新型干法水泥窑用耐火材料的消耗由过去的每吨熟料消耗 1.2kg 降至目前的 0.8~0.9kg，水泥工业中应用的耐火材料品种不断地增加。因此，水泥生产企业科技人员应该更多地了解耐火材料的原料、生产过程、性能测试等基本知识，以便更好地使用耐火材料，特别是新型干法水泥熟料烧成系统如何选择、设计、施工耐火材料，已成为摆在水泥企业面前一个重要问题。

在水泥企业从事耐火材料使用与管理的科技人员，一般均为非耐火材料专业的水泥工艺人员，他们对耐火材料的基本知识了解较少，但却要担负起管理、使用耐火材料的重任。所以，很多企业则让耐火材料生产商给予本企业进行配套耐火材料，可是，耐火材料制造企业的科技人员又对水泥生产工艺不甚了解，往往要走弯路，使水泥企业付出一定的代价。为此，我们编著本书，为的是让水泥企业工艺人员更系统地了解影响耐火材料性能的因素，如

何选择、设计、施工耐火材料，承担起水泥企业耐火材料选用与配套、砖型设计与施工、运行与维护的责任，为水泥工业的结构调整和发展做一点微薄的贡献。

本书由隋良志、王兆国、姚春林编著。具体分工为：隋良志撰写第一章、第七章、第九章；姚春林撰写第二章、第六章、第十章；王兆国撰写第八章；参加编著的还有王立军，撰写第三章、第四章、第五章；由隋良志负责全书统稿。

本书在编著时，注重理论与实践相结合，突出其应用性，为水泥企业科技人员使用创造了条件。在编著过程中，参阅了有关耐火材料学术会议资料 and 水泥工业耐火材料方面的有关报刊文章内容和科研成果，特向有关作者致谢。由于耐火材料发展很快，加上编著者水平有限和掌握的资料不全，我们很难编著出一本比较系统、完整、先进的技术参考书。因此，错误和不妥之处在所难免，敬请专家和读者提出宝贵意见。本书可作为水泥企业技术人员参考用书，也可以作为建材类高等院校教师和学生参考用书。

编著者

2004 年 12 月

目 录

第一章 耐火材料基本知识.....	(1)
第一节 概 述.....	(1)
第二节 主要性能.....	(6)
第二章 耐火原料	(18)
第一节 硅质原料	(18)
第二节 黏土质原料	(19)
第三节 高铝质原料	(26)
第四节 白云石质原料	(29)
第五节 镁质原料及其他	(31)
第三章 耐火原料加工及成型料制备	(38)
第一节 原料加工	(38)
第二节 成型料制备	(38)
第四章 耐火材料的成型	(40)
第一节 概 述	(40)
第二节 成型过程	(40)
第五章 耐火材料的干燥与烧成	(45)
第一节 坯体干燥	(45)
第二节 坯体的烧成	(46)
第六章 耐火制品	(49)
第一节 高铝制品	(49)
第二节 莫来石制品	(54)
第三节 黏土制品	(55)
第四节 硅质制品	(57)
第五节 镁质制品	(59)
第六节 含碳制品	(73)
第七节 含锆制品	(73)

第八节 隔热制品	(74)
第七章 不定形耐火材料	(83)
第一节 概 述	(83)
第二节 钢纤维增强耐火浇注料	(89)
第三节 耐碱型浇注料	(91)
第四节 隔热浇注料	(91)
第五节 低水泥用量型耐火浇注料	(92)
第八章 回转窑耐火材料使用设计	(98)
第一节 窑用耐火材料的选择	(98)
第二节 砖型设计与选用	(110)
第三节 金属附件设计与施工	(137)
第四节 窑衬的施工及使用	(141)
第五节 应用实例	(145)
第九章 立窑水泥耐火材料使用设计	(152)
第一节 立窑各带耐火材料的选择	(153)
第二节 隔热保温层	(156)
第三节 立窑用耐火砖的设计	(157)
第四节 砌筑要求	(162)
第十章 耐火材料新技术与新产品开发	(164)
第一节 耐火材料新技术	(164)
第二节 耐火材料新产品开发	(165)
附录 1 水泥回转窑用耐火材料使用规程（试行）	(183)
附录 2 致密定形耐火制品体积密度、显气孔率和真气孔率试验方法 （摘录）GB/T 2997—2000	(208)
附录 3 耐火制品荷重软化温度试验方法示差—升温法 （摘录）GB/T 5989—1998	(211)
附录 4 耐火材料 耐火度试验方法（摘录）GB/T 7322—1997	(218)
参考文献	(222)

第一章 耐火材料基本知识

第一节 概 述

耐火材料一般是指耐火度在 1580°C 以上的无机非金属材料。它包括天然矿石及按照一定目的要求经过一定的工艺制成的各种制品。尽管各国规定的定义不同，例如：国际标准化组织（ISO）正式出版的国际标准中规定：“耐火材料是耐火度至少为 1500°C 的非金属材料或制品（但不排除那些含有一定比例的金属材料）”，但基本概念是相同的，即耐火材料是用作高温窑、炉等热工设备的结构材料，并能承受相应的物理化学变化及机械作用。

耐火材料是高温技术工业不可缺少的基础材料。建材工业、钢铁工业、有色金属冶炼工业、机械工业、化学工业以及近代高科技工业（火箭、热核反应堆）等国民经济重要支柱工业的发展，都离不开耐火材料工业的发展。耐火材料的质量和性能特性不但直接影响到耐火材料用户的产品质量、生产成本和经济效益，有时，还会影响到生产及人身安全。耐火材料工业的发展已成为国民经济发展的重要条件之一。

我国自公元前 1700 年的青铜器时代就开始利用天然黏土砌筑炼铜炉。在河南郑州郊区古荥阳发现的炼铁遗址说明，公元前 200 年我国就开始利用黏土矿物砌筑炼铁炉。自青铜器时代开始，我国耐火材料的使用已有 3700 多年的历史。

解放前，我国冶金工业、甚至一般锅炉用的耐火材料都需从国外进口。

新中国成立后，耐火材料工业得到迅速发展，新建、扩建和改建的现代化工厂遍及各地。目前，已有一大批现代化设备的工厂，可以自制制砖用大型机械设备，自行设计现代化工厂；耐火材料的科学研究工作也得到迅速发展；这使我国耐火材料年产量从新中国成立初期的年仅 10 万余吨，发展到 2003 年的产量已达 10 000 万吨。近年来，耐火材料产量、质量、品种都有较大提高和发展，开发了镁碳砖、铝碳砖、优质硅砖、隔热砖、镁质绝热板等新产品，不定型耐火材料和熔铸耐火材料也有新的发展。

一、耐火材料应具备的性质

耐火材料由于长期使用于各种不同加热条件的高温设备，因此，必须具有以下主要性能：

1. 高的耐火度

为适应高温操作要求，耐火材料应具有在足够高的温度下而不软化、不熔融的性能。

2. 良好的荷重软化温度

耐火材料能够承受窑炉的荷重和在操作过程中所作用的应力，并在高温下不丧失结构强度，不发生软化变形和坍塌。

3. 具有高温下的体积稳定性

耐火材料在高温条件下使用时，由于材料内部的物理化学反应，体积会发生变化。要求耐火材料在高温下体积稳定，不致产生因过大的膨胀或收缩使窑炉砌体由于制品的膨胀而崩

裂，或由于收缩过大出现裂缝，降低砌体的使用寿命。

4. 好的热震稳定性

耐火材料受窑炉的操作条件影响很大，当温度急剧变化或各部位砌体受热不均匀时，砌体内部会产生应力而使耐火材料开裂、剥落，造成炉体损坏。因此，要求耐火材料具有一定的热震稳定性。

5. 良好的抗蚀性

耐火材料在使用过程中，常常受到液态溶液、炉尘、气态介质或固态物质的化学作用，使制品被侵蚀损坏。因此，耐火材料必须具有强的抵抗这种侵蚀损坏的性能。

此外，要求耐火材料具有一定的耐磨性，在某些特殊条件下有一定的透气性、导热性、导电性和硬度等，同时要求外形和尺寸准确。

二、耐火材料的分类

耐火材料的品种繁多，形状复杂，尺寸大小不一，性能各异，分类方法很多。

按化学成分可以分为：酸性、碱性和中性耐火材料。

按耐火度可以分为：普通耐火材料（ $1\ 580\sim1\ 770^{\circ}\text{C}$ ）、高级耐火材料（ $1\ 770\sim2\ 000^{\circ}\text{C}$ ）、特级耐火材料（ $2\ 000^{\circ}\text{C}$ 以上）三大类。

按加工工艺可以分为：烧成制品、熔铸制品和不烧制品。

按用途可以分为：水泥窑用、玻璃窑用、高炉用、平炉用、转炉用和连铸用耐火材料等。

按外观可以分为：标型、普型、异型、特型和超特型耐火材料制品。

按成型工艺可以分为：天然岩石切锯、泥浆浇注、可塑成型、半干成型和振动、捣打、熔铸成型等制品。

按矿物组成可以分为：硅酸铝质（黏土砖、高铝砖、半硅砖）、硅质（硅砖、熔融石英制品）、镁质（镁砖、镁铝砖、镁铬砖）、碳质（碳砖、石墨砖）、白云石质、锆英石质、特殊耐火材料制品（高纯氧化物制品、难熔化合物制品和高温复合材料）。

按密度可以分为：重质、轻质耐火材料。

三、耐火材料的组成

耐火材料的性质取决于其中的物相组成、分布及各相的特性。而物相组成包括矿物组成和化学组成。即耐火材料是由矿物组成，而矿物又由化学成分构成。

（一）化学组成

耐火材料（原料或制品）的化学组成，一般用化学分析的方法进行测定。耐火材料通常测定 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 TiO_2 、 ZrO_2 、 Na_2O 、 K_2O 等氧化物及烧失量。

化学组成是构成耐火材料制品的基础。根据耐火材料中各成分的含量及作用，通常将耐火材料的组成为两部分，即占绝对多量的基本成分——主成分和占少量的从属的副成分。副成分是原料中伴随的夹杂成分和工艺过程中特别加入的添加成分（加入物）。

1. 主成分

它是耐火材料占绝大多数的组分，是构成耐火基体材料的成分，也是耐火材料的特性基础。它的性质和数量直接决定制品的性质。其主要成分可以是氧化物，也可以是元素或非氧化物的化合物。耐火材料按其主成分的化学性质又可分为三类。

(1) 酸性耐火材料含有相当数量的游离二氧化硅 (SiO_2)。酸性最强的耐火材料是硅质耐火材料, 几乎由 94%~97% 的游离二氧化硅 (SiO_2) 构成。黏土质耐火材料与硅质相比, 游离二氧化硅 (SiO_2) 的量较少, 是弱酸性的。半硅质耐火材料居于其间。

(2) 中性耐火材料按其严格含意来说是碳质耐火材料, 高铝质耐火材料 (Al_2O_3 45% 以上) 是偏酸而趋于中性的耐火材料, 铬质耐火材料是偏碱而趋于中性的耐火材料。

(3) 碱性耐火材料含有相当数量的 MgO 和 CaO 等, 镁质和白云石质耐火材料是强碱性的, 铬镁系和镁橄榄石质耐火材料以及尖晶石耐火材料属于弱碱性耐火材料。

此种分类对了解耐火材料的化学性质, 判断在使用中它们之间及耐火材料与接触物间化学作用情况有着重要意义。

2. 杂质成分

耐火材料的原料绝大多数是天然矿物, 在耐火材料 (或原料) 中含有一定量的杂质。这些杂质是某些能与耐火基体作用而使其耐火性能降低的氧化物或化合物, 即通常称为溶剂的杂质。例如镁质耐火材料化学成分中的主成分是 MgO , 其他氧化物成分均属于杂质成分。因杂质成分的溶剂作用使系统的共溶液相生成温度降低, 单位溶剂生成的液相量愈多, 且随温度升高液相量增长速度愈快, 黏度愈小, 润湿性愈好, 则杂质溶剂作用愈强。

应用制品的化学组成可判断与溶液量变化直接有关的制品的高温性质, 如耐火度、荷重变形温度、抗渣性等, 它们之间存在下述关系:

- (1) 开始生成液相量减少, 荷重开始变形温度越高;
- (2) 生成液相量的温度曲线越平缓, 荷重变形温度范围越宽;
- (3) 耐火度与开始生成的液相量有关;
- (4) 原料和制造方法相同而配料比不同时, 开始生成液相量多的制品, 其热震稳定性和抗渣性低而常温耐压强度大。

耐火制品 (耐火材料) 中杂质成分除有上述作用外, 还具有降低制品 (原料) 的烧成温度, 促进其烧结的有利作用。但同时也会使制品的某些耐火性能降低。

3. 添加成分

在耐火制品生产中, 为了促进其高温变化和降低烧结温度, 有时加入少量的添加成分。按其目的和作用不同分为矿化剂、稳定剂和烧结剂等。除可烧掉成分外, 它们都包含在制品的化学组成中。

通常分析耐火制品和原料的灼烧减量、各种氧化物含量和其他主要成分含量。将干燥的材料在规定温度条件下加热时质量减少百分率称为灼减。其测定在进行耐火原料分析时有特殊意义, 它表征原料加热分解的气态产物 (如 H_2O 、 CO_2 等) 和有机物含量的多少, 从而可以判断原料在加热过程中是否需要预先对其进行煅烧, 使原料体积稳定。

通过化学成分分析, 按所含成分的种类和数量, 可以判断制品或原料的纯度, 制品的化学特性。借助于有关相图可大致估计制品的矿物组成和其耐火性能, 也可作为选取原料、检查和调整工艺过程的依据。

耐火材料的化学成分分析是按专门的方法进行的, 有些方法已在相应的标准中做了规定。

(二) 矿物组成

耐火制品是矿物的组成体。制品的性质是其组成矿物和微观结构的综合反映。因此, 在分析制品的组成对其性质的影响时, 单纯从化学组成出发分析考察问题是不够全面的, 应进

一步观察其化学矿物组成。耐火制品的矿物组成取决于它的化学组成和工艺条件。化学组成相同的制品，由于工艺条件不同，所形成矿物相的种类、数量、晶粒大小和结合情况有所差异，其性能可能有较大差别。例如 SiO_2 在不同工艺条件下可能形成结构和性质不同的两类矿物——鳞石英和方石英，使制品的某些性质会有差别。即使制品的矿物组成一定，但随矿物相的晶粒大小、形状和分布情况的不同，亦会对制品性质有显著的影响（如熔铸制品）。

必须从原料的加热相变化、制造中配料间相互反应产生的相变化和耐火材料在使用中的相变化等三方面来研究与考察耐火材料的矿物组成，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。

耐火材料一般是多相组成体，其中的矿物相可分两类，即结晶相和玻璃相。也可以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、数量和其间结合状态直接决定着制品的性质。

基质是指耐火材料中大晶体或骨料间隙中存在的物质。也有人将耐火制品中主晶相以外的，填充于主晶体间隙中的物质，统称为基质。基质对制品的性质（如高温特性和耐侵蚀性）起着决定性的影响。在使用时，制品往往首先从基质部分开始损坏，调整和改变制品的基质成分，是改善制品性能的有效工艺措施。

大多数耐火制品按其主晶相和基质的成分可以分为两类：一类是含有晶相和玻璃相的多成分耐火制品，如黏土砖、硅砖等；另一类是仅含晶相的多成分制品，基质多为细微的结晶体，如镁砖、铬镁砖等碱性耐火材料。这些制品在高温烧成时，产生一定数量的液相，但是液相在冷却时并不形成玻璃，而是形成结晶性基质，将主晶相胶结在一起，基质晶体的成分不同于主晶相。

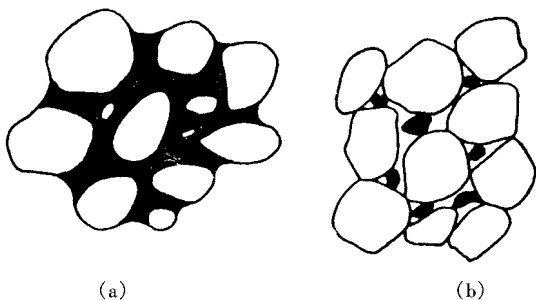


图 1—1 耐火制品的显微结构示意图

结构类型的制品的高温性能（高温力学强度、抗渣性和热震稳定性）要优越得多。因此，近些年来，国内外都在致力于研究和制造直接结合砖，即采用高纯原料，减少砖中低熔硅酸盐结合物。并在高温下使少量液相移向颗粒间隙中，而不包围在固体颗粒周围，使固体颗粒构成连续的晶体网，形成直接结合的特征结构，从而显著提高耐火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，有着非常重要的意义，它可以提供改进耐火材料质量的方向。

四、耐火材料的制作原理

耐火材料的品种很多，由于所用原料以及对产品性能的要求不同，不同类型的耐火材料

的生产方法也各有特点。根据耐火材料的生产特点，通常耐火材料生产工艺有：烧结制品生产工艺、非烧结制品生产工艺、不定形耐火材料生产工艺及熔铸耐火材料生产工艺等。

(一) 烧结耐火材料

烧结耐火制品的生产工艺流程如图 1—2 所示。



图 1—2 烧结耐火制品生产工艺流程

原料经精选提纯、均化、破粉碎和分级后，将各种不同品种、组分和性能的原料以及各粒级的熟料，加入适当的结合剂，按拟订的比例进行配制，通过各种成型机械，将坯料加工成一定形状的坯体，经过干燥，排除坯体中的水分，然后对坯体进行热处理，使其达到固定外形的作用，并具有预期显微结构和性能的产品。这类耐火材料有：硅酸铝质耐火制品、硅质耐火制品、镁质耐火制品及轻质耐火制品等。

(二) 熔铸耐火材料

熔铸耐火材料，指原料及配合料经高温熔化后浇铸成一定形状的制品。配合料的熔融方法有电熔法和铝热法两种。电熔法即在电弧炉或电阻炉中熔化配合料。铝热法是利用铝热反应放出的热量将配合料熔化。电熔法是目前生产熔铸耐火材料的主要方法。其生产工艺流程如图 1—3 所示。将具有一定化学组成的耐火材料配合料，在 2 500℃左右温度下用电弧炉熔化，熔体在与该耐火材料相适应的温度下浇入铸模内，再放到有保温填料的保温箱内或隧道窑中，进行缓慢地冷却，以形成能保证铸件具有最佳性能的显微结构，用带金刚石刀具和磨具的设备对铸件进行机械加工，确保制品具有精确的几何形状和高光洁度的表面，从而提高电熔耐火材料的质量及延长使用寿命。

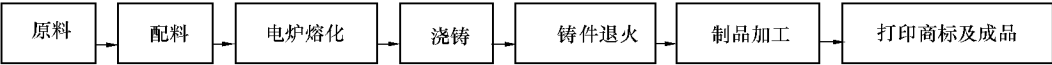


图 1—3 熔铸耐火材料生产工艺流程

由于熔铸耐火材料生产方法特殊，因而同烧结法生产的耐火材料相比有以下特点：

- (1) 制品致密，气孔少，且为闭口气孔；
- (2) 机械强度和高温结构强度大；
- (3) 具有高的导热性和抗渣性；
- (4) 组成相完全由成分决定，质量控制简单，最后稳定性好；
- (5) 耗电高，生产每吨电熔锆刚玉（AZS）耐火砖，需耗电 2 500kW · h。

电熔耐火材料的化学组成，对它的物理化学性能和使用性能有着重要影响，例如 AZS 电熔耐火材料主要由 SiO₂（10%~18%），Al₂O₃（40%~54%）和 ZrO₂（30%~40%）组成；其余的氧化物（B₂O₃，Na₂O）数量不大，是以夹杂物或专门添加物的形式存在的。

耐火材料中的氧化锆和氧化铝，是最难熔的氧化物，它们具有良好的抗硅酸盐溶液的侵蚀作用。耐火材料中的三氧化二铁和二氧化钛夹杂物，会使溶液中析出气泡和斑点，并且在很大程度上降低了耐火材料中玻璃相的渗出温度。石墨电极与耐火材料溶液接触，使溶液渗碳。溶液中碳的存在会降低耐火材料的使用性能。为消除碳影响，采用电弧氧化法、电极外

表用氧化锆细粉进行等离子喷镀保护或用锆刚玉作电极涂料保护，可排除碳的污染，制备使用性能良好的电熔耐火材料。

电熔耐火材料有：电熔莫来石质耐火材料、电熔锆刚玉质耐火材料及电熔氧化铝系耐火材料等。

（三）不定形耐火材料

不定形耐火材料是由合理级配的粒状和粉状料与结合剂共同组成的不经成型和烧成而直接供使用的耐火材料。

不定形耐火材料的生产，通常只经过粒状、粉状料的制备和混合料的混炼过程。过程简便，生产周期短，热能消耗较低，使用时整体性好，适应性强，综合使用效果好。当耐火砖的砌体或整体构筑物局部损坏时，可用此种材料更换或利用喷射、投射设备进行冷、热态修补，既迅速又经济。

在耐火材料工业方面，已由过去以烧成制品为主体，发展成现在的烧成制品与不定形耐火材料并驾齐驱的局面，不定形耐火材料已成为建材、冶金、化工等工业生产中不可取代的耐火材料。

第二节 主要性能

耐火材料的性能主要包括其物理性质（包括气孔率、吸水率、透气度、气孔孔径分布、体积密度、真密度等）、热学性质和导电性、力学性质、高温使用性质和形状的正确性及尺寸的准确性。它们是评价耐火材料质量的重要指标。

耐火材料的性能与原料和制造工艺（包括原料的种类、配比、粒度和混合、成型、干燥及烧成条件等）密切相关。

一、物理性质

耐火材料是由固相（包括结晶相和玻璃相）和气孔两部分构成的非均质体，其中各种形状和大小的气孔与固相之间的宏观关系（包括它们的数量和分布结合情况等）构成耐火材料的宏观组织结构。制品的宏观组织结构特征，是影响其高温使用性质的主要因素。例如为了提高耐火制品对外来介质的侵蚀抵抗性，其致密程度具有特别重要的意义。

（一）气孔率、体积密度、真密度

气孔率、体积密度和真密度等是评价耐火材料质量的重要指标。这些指标除直接表征它们本身的意义外，还与耐火材料的其他性质如热震稳定性、抗渣性、气体透过性以及导热性等有着密切关系，其中除真密度外，气孔率和体积密度等相互间都有着密切关系。

1. 气孔率

气孔率是耐火制品所含气孔体积与制品总体积的百分比。耐火材料内的气孔是由原料中气孔和成型后颗粒间的气孔所构成。大致可分为三类：

- （1）闭口气孔，它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，能为流体填充；
- （3）贯通气孔，贯通制品的两面，能为流体通过（见图 1—4）。

气孔率是多数耐火材料的基本技术指标。它的大小几乎影响耐火制品的所有性能，尤其

是强度、热导率、抗热震性等。气孔的容积、形状以及大小的分布对耐火材料性质有很大影响，而与原料的种类无关，耐火材料的主要性质和气孔率之间关系如图 1—5 所示。

在研究气孔对耐火制品使用过程中被外界介质侵入而加速其损坏的影响时发现，贯通气孔和开口气孔通常起着主要作用，闭口气孔影响很小。因此，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。

气孔率有三种表示，即（1）总气孔率（真气孔率） P_t ，它是总气孔体积与制品总体积之比；（2）开口气孔率（显气孔率） P_a ，它是开口气孔体积与制品总体积之比；（3）闭口气孔率 P_c ，它是闭口气孔体积与制品总体积之比。三者的关系为： $P_t = P_a + P_c$ 。

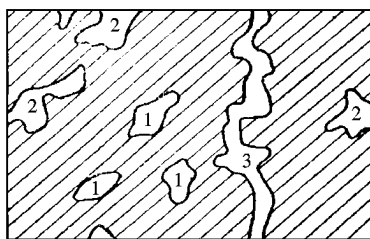


图 1—4 耐火制品中气孔类型

1—封闭气孔；2—开口气孔；3—贯通气孔

致密耐火制品的显气孔率一般为 10%~28%；隔热耐火制品的真气孔率大于 45%。

2. 体积密度

体积密度是耐火制品的质量与其总体积（包括气孔）的比值。它表征耐火材料的致密程度，是所有耐火原料和耐火制品质量标准中的基本指标之一。体积密度高的制品，其气孔率小，强度、抗渣性、高温荷重软化温度等一系列性能好。

3. 真密度

真密度是耐火制品的质量与其真体积（不包括气孔体积）之比。在耐火材料中，硅砖的真密度是衡量石英转化程度的重要技术指标。 SiO_2 组成的各种不同矿物的真密度不同，鳞石英的真密度最小，方石英次之，石英最大。

（二）吸水率

吸水率是耐火制品全部开口气孔所吸收的水的质量与干燥试样的质量百分比。它实质上是反映制品中开口气孔量的一个技术指标。由于其测定简便，在生产中习惯上用吸水率来鉴定原料煅烧质量。烧结良好的原料，其吸水率数值应较低，一般应小于 5%。

（三）透气度

透气度是耐火制品允许气体在压差下通过的性能。透气度主要是由贯通气孔的大小、数量和结构决定的。某些制品，如用于隔离火焰或高温气体的制品，要求具有很低的透气度；而有些制品，如吹氩浸入式水口透气内壁等一系列专用透气耐火制品，则又必须具有一定的透气度。

（四）气孔孔径分布

气孔孔径分布是耐火制品中各种孔径的气孔所占气孔总体积的百分率。

在气孔率相同时，孔径大的制品其强度低。熔铸或隔热耐火制品的气孔孔径可大于 1mm，称为缩孔或大气孔；致密耐火制品中的气孔主要为毛细孔，孔径多为 1~30 μm ；气

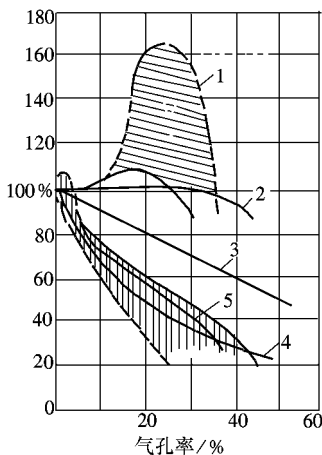


图 1—5 耐火材料性质和气孔率的关系

1—热震稳定性；2—热膨胀系数；3—体积密度；4—热传导率；5—强度

孔微细化的铝碳制品和致密高铝砖的平均孔径小于 $1\sim 2\mu\text{m}$ 。

二、耐火材料的热学性能

耐火材料的热学性能包括比热容、热导率、热膨胀性等。它们是衡量制品能否适应具体热过程需要的依据，是从事窑炉设计所需要的基本数据。耐火材料的热学性能与其制造所用原料、工艺；与其化学成分、晶体结构、显微结构都密切相关。

(一) 比热容

比热容是指 1kg 耐火材料温度升高 1°C 所吸收的热量（也称热容）。耐火材料比热容数值主要用于窑炉设计热工计算。蓄热室格子砖采用高比热容的致密材料，以增加蓄热量和放热量，提高换热效率。

比热容按下式计算：

$$C = \frac{Q}{G(t_1 - t_0)}$$

式中 C ——耐火材料的等压比热容， $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ；
 Q ——加热试样所消耗的热量， kJ ；
 G ——试样的质量， kg ；
 t_0 ——试样加热前的温度， $^\circ\text{C}$ ；
 t_1 ——试样加热后的温度， $^\circ\text{C}$ 。

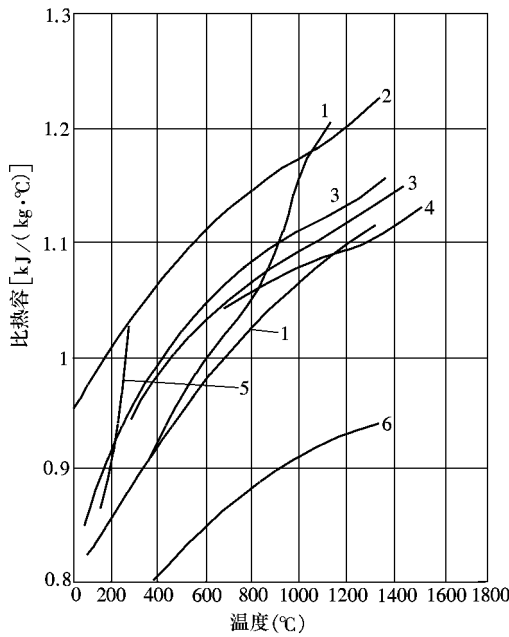


图 1—6 耐火砖的平均比热容与温度的关系曲线
1—黏土砖；2—镁砖；3—硅砖；4—硅线石砖；5—白云石砖；6—铬砖

耐火材料的比热容取决于它的矿物组成和所处的温度。常用耐火材料的比热容与温度的关系如图 1—6 所示。

(二) 热膨胀性

热膨胀性是指耐火制品在加热过程中的长度变化，其表示方法有线膨胀率和线膨胀系数两种。

线膨胀率是指由室温至试验温度间，试样长度的相对变化率。

线膨胀系数是指由室温至试验温度间，温度每升高 1°C ，试样长度的相对变化率。

材料的热膨胀与其晶体结构和键强度有关。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都较大，而类似于无定形材的玻璃，则往往有较小的热膨胀系数。

耐火材料的热膨胀系数取决于它的化学矿物组成。当制品中含有多晶转变的晶体

时，将导致热膨胀系数的不均匀变化，在相变点会发生突变，例如硅质制品。

耐火材料的热膨胀系数对其热震稳定性有直接影响。对于热膨胀达到以及有多晶转变的

制品，无论在烧成或者使用时（即确定烧成制度、烧烤升温或受温度急剧波动等）均应加以注意。

热膨胀性是耐火材料使用时应考虑的重要性能之一。炉窑在常温下砌筑，而在高温下使用时炉体要膨胀。为抵消热膨胀造成的应力，需预留膨胀缝。线膨胀率和线膨胀系数是预留膨胀缝和砌体总尺寸结构设计计算的关键参数。

常用耐火制品的平均线膨胀系数见表 1—1，常用耐火浇注料的线膨胀系数见表 1—2。

表 1—1 常用耐火制品的平均线膨胀系数

材料名称	黏土砖	莫来石砖	莫来石刚玉砖	刚玉砖	半硅砖	硅 砖	镁 砖
平均线膨胀系数 (20~1000℃) /10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹	4.5~6.0	5.5~5.8	7.0~7.5	8.0~8.5	7.0~7.9	11.5~13.0	14.0~15.0

表 1—2 耐火浇注料的平均线膨胀系数

胶结剂种类	集料品种	测定温度 (℃)	线膨胀系数
矾土水泥	高铝质 黏土质	20~1 200	4.5~6.0
			5.0~6.5
磷 酸	高铝质 黏土质	20~13 000	4.0~6.0
			4.5~6.5
水玻璃	黏土质	20~1 000	4.0~6.0
硅酸盐水泥	黏土质	20~1 200	4.0~7.0

(三) 热导率

热导率是指在单位温度梯度下，单位时间内通过单位垂直面积的热量。耐火材料的热导率对于高温热工设备的设计是不可缺少的重要数据。对于那些要求隔热性能良好的轻质耐火材料，检验其热导率更具有重要意义，可以减少厚度或热损失。

耐火材料的导热能力与其矿物组成、组织结构及温度有密切关系。材料的化学组成越复杂、杂质含量越多、添加成分形成的固溶体越多，它的热导率降低越明显。晶体结构越复杂的材料，热导率也越小。

耐火材料通常都含有一定的气孔，气孔内气体热导率低，因此气孔总是降低材料的导热能力。在一定温度以内，对一定的气孔率来说，气孔率越大，则导热率越小。而气孔率相同时，则与固相物的连续性以及气孔部分的大小、形状、分布等有关系。一般来说，气孔大的热导率大；球形和扁平气孔，影响也各不相同，扁平气孔的方向性使不同方向测出的热导率有差别。

对于粉末和纤维材料，因其间的气孔形成了连续相，材料的热导率在很大程度上受气孔相的热导率所影响。所以其热导率比烧结状态时要低的多。这也是通常粉末、多孔和纤维类材料能有良好绝热性能的原因。

影响耐火材料热导率的因素是比较复杂的，因此实际材料的热导率通常还依靠实测得到。常见耐火材料的热导率如图 1—7 所示。

三、耐火材料的力学性能

耐火材料的力学性能是指耐火材料在外力作用下，抵抗形变和破坏的能力。耐火材料在使用和运输过程中会受到各种外界作用力，如压缩力、拉伸力、剪切力、摩擦力或撞击力的作用而变形甚至损坏，因此检验不同条件下耐火材料的力学性能，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，具有重要的意义。耐火材料的力学性能指标有耐压强度、抗折强度、粘结强度、高温蠕变性和弹性模量等。

(一) 耐压强度

耐压强度是耐火材料在一定温度下单位面积上所能承受的极限载荷。耐压强度是衡量耐火材料质量的重要性能之一。耐火材料的耐压强度分为常温耐压强度和高温耐压强度。常温耐压强度是指制品在室温下测得的数值；高温耐压强度是指制品在指定的高温条件下测得的数值。

国家标准（GB/T 5072—1985）规定了致密定形耐火制品常温耐压强度试验方法，其做法是，在室温下，用压力试验机以规定的速率，对规定尺寸的试样加荷，直至试样破碎。根据所记录的最大载荷和试样承受载荷的面积，计算常温耐压强度。其计算公式如下：

$$S = \frac{P}{A}$$
$$A = \frac{A_1 + A_2}{2}$$

式中 S ——试样常温耐压强度， N/mm^2 ；
 P ——试样破碎时的最大载荷， N ；
 A ——试样受压面积， mm^2 ；
 A_1 、 A_2 ——试样上、下受压面的面积， mm^2 。

国家标准（GB/T5072.1—1998）采用无衬垫仲裁试验方法测定致密定形耐火制品的常温耐压强度。其原理是，在特定条件下，对已知尺寸的试样以恒定的加压速度施加负荷直至破碎，根据试样破碎时所承受的最大压力和平均受压断面面积计算出试样的常温耐压强度。

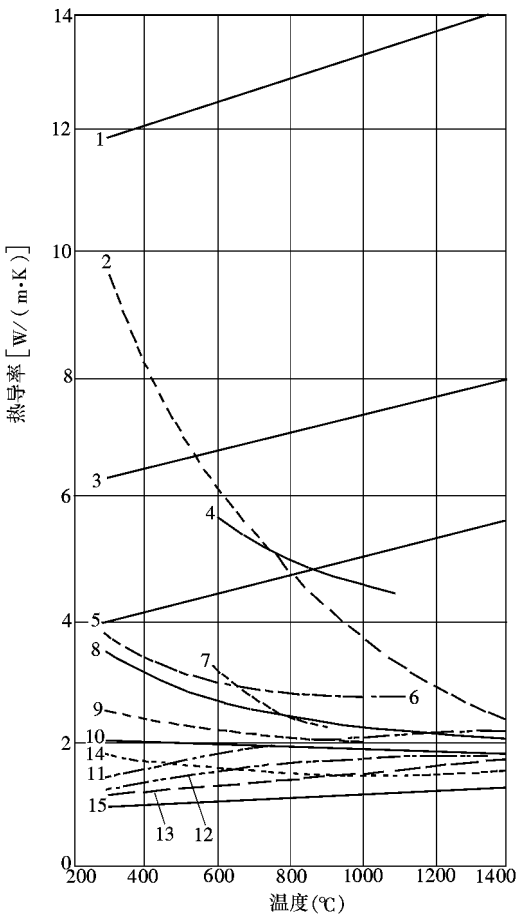


图 1—7 常见耐火材料的热导率

1—碳化硅砖；2—镁砖；3—碳化硅砖（含 SiC70%）；4—刚玉砖；5—碳化硅砖（含 SiC50%）；6—烧结白云砖；7—氧化锆砖；8—铬镁砖；9—刚玉砖（含 $\alpha-Al_2O_3$ 90%）；10—硅线石砖；11—橄榄石砖；12—铬砖；13—硅砖；14—致密黏土砖；

15—黏土砖

其计算公式如下：

$$\Sigma = \frac{F_{\max}}{A_0}$$

式中 Σ ——试样的常温耐压强度， N/mm^2 ；

$F_{\max}$ ——记录的最大荷载， N ；

A_0 ——试样受压面初始端面积， mm^2 。

国家标准（GB/T 3997—1998）和国际标准（ISO 8895）还规定了定形隔热耐火制品常温耐压强度试验方法。其做法是，在常温下，用压力试验机以规定的速率，对规定尺寸的试样加荷，直至试样破碎，或压缩到其原高度的 90% 时，根据所记录最大载荷和试样尺寸，计算常温耐压强度。其计算公式如下：

$$P_{\text{常温}} = \frac{F_{\max}}{lb}$$

式中 $P_{\text{常温}}$ ——常温耐压强度， N/mm^2 ；

$F_{\max}$ ——试验时指示的最大载荷， N ；

l ——试样长度，4 次测量的平均值， mm ；

b ——试样宽度，4 次测量的平均值， mm 。

通常，耐火材料在使用过程中很少由于常温下的静负荷而招致破损。但常温耐压强度主要是表明制品的烧结情况，以及与其组织结构相关的性质，测定方法简便，因此是判断制品质量的常用检验项目。另一方面通过常温耐压强度可间接地评定其他指标，如制品的耐磨性、耐冲击性以及不烧制品的结合强度等。

（二）抗折强度

耐火材料抗折强度是指试样单位面积承受弯矩时的极限折断应力，又称抗弯强度。

耐火材料抗折强度分为常温抗折强度和高温抗折强度。室温下测得的抗折强度称为常温抗折强度；耐火制品在规定的高温条件下所测得的强度值称为该温度下的高温抗折强度。

国家标准（GB/T 3001—1982）规定了耐火制品常温抗折强度试验方法。其要点是，将尺寸为 $230\text{mm} \times 114\text{mm} \times 65\text{mm}$ 的试样放在抗折试验仪上，在室温下以一定的加荷速率对试样施加张应力，直至试样断裂。

耐火材料的常温抗折强度按下式计算：

$$R_r = \frac{3}{2} \frac{FL}{bh^2}$$

式中 R_r ——抗折强度， N/cm^2 ；

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 ；

标准还规定了耐火制品高温抗折强度试验方法。其要点是，以一定的升温速率加热试样到试验温度，保温至试样达到规定的温度分布，以一定的加荷速率对试样施加张应力，直至试样断裂。

耐火制品高温抗折强度的计算公式与常温抗折强度计算公式相同。