

冶金炉热工及构造

第 二 册

东北工学院冶金炉教研室编

一九七七年七月

本书共分三册：第一册为炉子热工基础，包括气体力学、燃料燃烧、传热学；第二册包括耐火材料、炉子生产率和燃料消耗、余热利用、金属加热工艺；第三册包括各种加热炉及热处理炉、工业电炉、大气污染及其防治等内容。本书为冶金炉专业课试用教材，并可供有关专业的工人和工程技术人员参考。

第二册 目 录

第四章 耐火材料

第一节	概 述	1
第二节	耐火制品的性质	7
第三节	常用的几种块状耐火制品	21
第四节	耐火混凝土及其他散状耐火材料	37
第五节	绝热(轻质)材料	50
第六节	其它筑炉材料	57
第七节	耐火材料在冶金炉上的应用	67

第五章 炉子生产率和燃料消耗

第一节	炉子的生产率	75
第二节	热平衡和燃料消耗	82
第三节	火焰炉的生产率和热效率	98

第六章 余热利用

概 述	104	
第一节	换热器	106
第二节	蓄热室	136
第三节	余热锅炉及汽化冷却法	143

第七章 金属加热工艺

第一节	金属的物理和机械性能	172
第二节	金属加热时的氧化脱碳、过热、过烧与裂纹	179
第三节	金属加热工艺制度的制订	198

第四章 耐火材料

砌筑冶金炉要用能抵抗高温作用以及高温下所产生的物理化学作用的所谓耐火材料；此外，为减少热损失和铺筑基础等，还要用绝热材料、红砖、混凝土和各种钢材。

由于耐火材料砌筑的炉衬，工作条件最差，损耗最快，要经常检修，因而直接影响炉子的产量，成本和劳动条件；有的耐火制品，直接和被熔炼的金属接触，它掺入金属中就成为非金属夹杂，因而严重降低产品的质量。例如火车钢轨中如有非金属夹杂，就容易断裂造成大事故。正确地选择和使用耐火制品，不但可以提高炉子寿命，而且可以在更高的温度下进行熔炼或快速加热，因而提高产品产量和质量，降低成本。所以，在各种筑炉材料中，耐火材料是我们研究和学习的重点。

一般工业国家的耐火材料总产量约有60~70%用于冶金工业，而其中65~75%用于钢铁工业。因此，冶金工业的发展促进了耐火材料工业的发展；同样，耐火材料的新成就，也为冶金技术的发展创造条件。

我国在耐火材料的制造和使用技术方面有悠久的历史 and 杰出的成就。解放后，在党和毛主席的英明领导下，随着冶金工业的发展，耐火材料工业也欣欣向荣。现在，制砖用大型机械设备完全可以自制。耐火材料的产量，有了大幅度增长。不但能生产一般用途的耐火材料，而且还能生产高质量和特殊用途的耐火制品，如高铝砖、镁铝砖、焦炉硅砖、高密度高炉砖、碳化硅砖、电熔锆莫来石砖、电熔锆刚玉砖等。

通过本章的学习，应该能合理地选择和使用耐火材料，并能利用散状耐火材料，自行捣制炉衬；要掌握耐火材料的性质，特别是常用几种耐火砖的高温下工作性能以及它们的适用条件。

第一节 概述

一、耐火材料的分类

随着耐火材料工业的发展，用途的增加，耐火制品是多种多样的，它们各自不但具有特性，同时又具有一些共性。冶金炉工作者为了全面地系统地掌握耐火材料的性质，便于既经济又合理地选择和使用它们，有必要了解耐火制品的分类。

除了绝热材料外，所有的耐火制品都可按下列共同特征进行分类：

(一) 按耐火制品的主要化学成分的分类

根据耐火制品的主要化学组成大致将它们分为酸性、碱性和中性。这是根据各种耐火制品间以及它们和炉渣、烟尘间在高温下接触的反应性能划分的，并不是说耐火制品本身是化学纯酸性、碱性或中性。现将筑炉常用的几种耐火砖的主要化学组成分类用图解表示于下（图4-1-1）[1]：

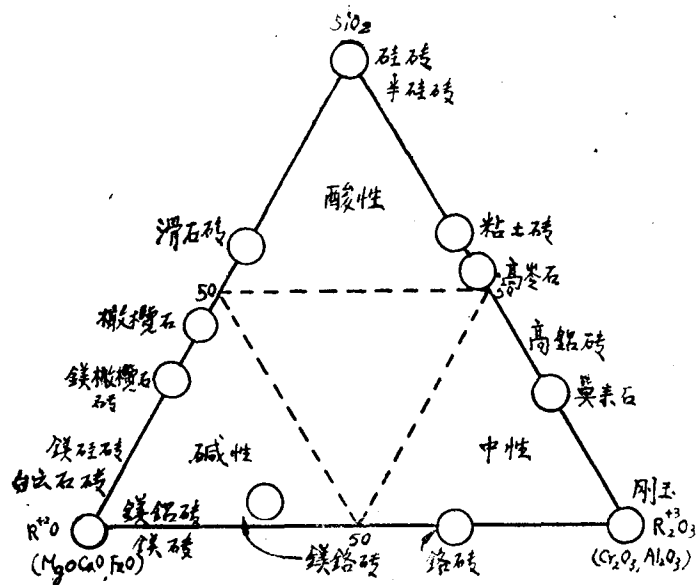


图 4-1-1 耐火制品按主要化学组成的分类图

根据耐火制品含有主要氧化物的百分率的不同，而有一系列的酸碱度逐步变化的耐火制品。目前工业炉应用最广泛的块状耐火制品是弱酸性粘土砖。

(二) 耐火制品按使用形状和制造方法不同的分类 (表 4-1-1)。

耐火制品按使用形状和制造方法不同的分类

表 4-1-1

分	类	制 品 例
块状耐火制品	结合制品	烧成制品 粘土砖, 硅砖等 不烧成制品 不烧粘土砖, 化学结合镁砖等
	熔铸制品	
散状耐火制品	耐火混凝土	电熔锆莫来石砖, 电熔锆刚玉砖等 铝酸盐耐火混凝土 (水硬性)
	可塑料和捣打料	水玻璃结合可塑性粉料 (气硬性)
	耐火泥浆	粘土质泥浆等 (热硬性)

(三) 耐火制品按耐火度不同的分类

1. 普通耐火制品 (耐火度为 1580~1770℃) —— 例如粘土砖和硅砖等。
2. 高级耐火制品 (耐火度为 1770~2000℃) —— 例如高铝砖 (1, 2 级) 等。
3. 特级耐火制品 (耐火度为 >2000℃) —— 例如镁砖和镁铝砖等。

二、冶金炉对耐火制品的一般要求

根据冶金炉的用途不同以及同一炉子的不同部位，对所用耐火制品的性能要求也是

不一样的。总的来说，为使冶金炉生产达到长寿、高产、优质、低消耗，对耐火制品的性能提出下列这些要求：

(一) 耐高温

例如普通炭素钢锭开坯前加热用的均热炉炉盖，其内表面温度一般达1300~1400℃。炉盖用耐火砖长期在这样高温下不应软化或熔化。

(二) 高温下结构强度大

其中主要是耐压，个别情况下抗冲击和耐磨损，例如加热炉各部位都受压力，均热炉墙受钢锭碰撞冲击，加热炉侧出料钢槽的耐火砖要耐磨损。耐火制品在这些机械负荷作用下，应不软化或破损。

(三) 耐急冷急热性好

例如均热炉炉盖和顶装料的电弧炉炉盖，在开始装料的瞬间，要在温度急剧变化情况下不破裂和剥落。

(四) 能抵抗炉渣、液体金属、烟尘等的浸蚀。

例如加热炉出钢端实炉底部份耐火制品应抵抗氧化铁皮的化学腐蚀；炼钢平炉熔池堤坡应抵抗炉渣和钢水的浸蚀。

(五) 在长期高温工作条件下，耐火制品的炉衬的体积和形状变化要小。

例如加热炉炉顶和均热炉炉墙，如果在使用中胀缩变化很大，就会有倒塌危险。

(六) 外形要规正，尺寸公差要小。

因为砌砖灰缝虽用耐火泥浆填充，但密度和强度都比耐火砖差，在烘干过程中又容易脱落，从而砌砖灰缝既易被炉渣浸蚀又容易漏气，为此，希望砌砖灰缝愈小愈好。要达到这点，一方面要求砌砖灰缝尽量要小，另一方面耐火砖本身的外形要规正，不能有大的扭曲、缺角、缺边、熔洞、甚至裂纹等；尺寸公差要合乎部颁标准。

有时为了特殊需要，还要考虑其导热，导电等性质。

事实上，目前常用的耐火制品的性能，往往不可能满足上面所有的要求。因此，选择使用耐火制品时，只有“对于具体情况作具体的分析”，“抓住主要矛盾”进行合理解决。

三、耐火制品一般生产工艺

毛主席指出：“事物的性质，主要地是由取得支配地位的矛盾的主要方面所规定的。然而这种情况不是固定的，矛盾的主要和非主要的方面互相转化着，事物的性质也就随着起变化”。耐火制品的某些性能，主要地取决于原料的化学——矿物组成，但是有些性能，又主要地取决于它的生产工艺。因为有时尽管原料相同，由于采取不同的生产工艺，所得制品的性能也有差异。我们冶金炉工作者一方面为了全面地了解耐火制品的性能，另一方面因有时自己须捣固炉衬（例如炼钢转炉、感应电炉……等），所以对耐火制品的一般生产工艺，也应该具备最基本的知识。

一般块状烧成耐火制品的生产工艺流程如下（图 4-1-2）：

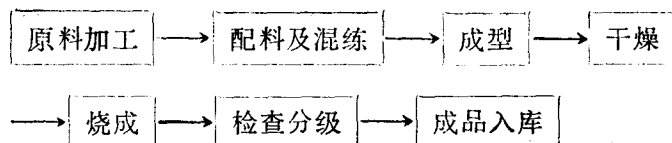


图 4-1-2 块状烧成耐火制品一般生产流程

(一) 原料加工

作为耐火原料应符合规定的理化性能。此外应考虑采运方便，成本低廉；特别还要注意分级开采、优质优用、合理使用，综合利用本国资源。对于原料的加工，大致包括下列几方面：

1. 选矿 要使耐火制品耐高温、抗渣浸蚀，高温下耐压等，就要在煨烧和破碎前后，尽量提高耐火原料的纯度（在烧成温度允许条件下）。为此，原料要经多次拣选，以减少其中有害杂质。选矿方法有用机械冲洗（例如硅石），有用人工挑选和电磁吸铁器等（例如对耐火粘土熟料）。

2. 干燥、煨烧 有的原料因水分太高，为便于破碎要先经风干、火炕烤或窑内干燥。有的原料，因加热时会排出 CO_2 或结晶水或改变结晶形态或晶体长大，从而使体积发生很大变化。为了保证制品的强度和获得优良的高温体积稳定性、热稳定性等以及外形尺寸准确，所以原料在配料前，要予先在竖窑或回转窑内煨烧成熟料。有的原料为提高纯度。经一次煨烧后再破碎选矿成型再经二次煨烧

3. 破碎和筛分 为了易于除掉原料中有害杂质和获得粗、中、细几种不同颗粒度，便于制成合乎规定形状、尺寸和理化指标的耐火制品，耐火原料一般先经破碎（粗碎和中碎，将 250~300 毫米破碎到 40~50 毫米的中块）而后再经粉碎（将 40~50 毫米粉碎到 4~5 毫米以下）。为了获得很细颗粒（ $<0.088mm$ ），部份原料粉碎筛分后再经细磨（由 10 毫米左右细磨到 <0.1 毫米细粉）。

(二) 配料及混练

配料包括原料和添加物（结合剂、矿化剂等）的配比以及颗粒度的配比。配料一般按重量计算比按容积计算精确。

假如单用耐火粘土熟料当骨料制砖，既不易成型也缺乏强度，烧成温度也要很高。故一般耐火制品（直接结合砖例外）除配熟料外，还添加少量生料（例如制粘土砖时加软质粘土和水）作结合剂。这类似普通混凝土单有石头和砂子还胶结不起来，必须加水泥和水。有时为了烧成时促进砖中生成某种比较安定的矿物结晶，还配加少量所谓“矿化剂”（例如硅砖）。

添加物的化学——矿物组成和用量，必须考虑到能否严重地影响制品的耐火度和高温强度等。

如果我们用直径相同的（不论直径大小）非可塑性（加外力不能变形）圆球体堆成立方体则其气孔率（气孔的体积占全部体积的百分率）大约接近 50%。如果改变球体的堆积方式，则气孔率仍超过 25% [2]。因此，单一尺寸的球体不可能得到致密堆积。

若向原来大球体的孔隙中加入一定数量尺寸较小的球，则堆积物料的孔隙就会进一步降低。若在两组球体堆积的孔隙中，再加入更小尺寸的第三组球体，则剩余孔隙更少。

实践证明当超过三组球体的堆积，其孔隙变化就不显著了。相邻两组球体的直径比值应大于7~8，才能使第二组球体充填于第一组球体的空隙中，第三组球体充填于剩余的空隙中。当用三组球体堆积时，各组球体的数量比值为7:1:2时堆积最紧密，细小颗粒容易填充空隙[10]。

以上虽系理论上的堆积原理，但在实际生产上仍有一定参考意义。

生产上一般采用三种颗粒组成，但还要考虑到下述情况：

(1) 究竟采用多大的最大颗粒尺寸（临界颗粒）。一般情况下，要求耐急冷急热性好的砖，临界颗粒要大些；要求致密，抗渣性好的砖，采用临界颗粒较小的。各种耐火制品生产时采用的临界颗粒上限一般波动于2~3.5毫米之间。制不烧砖时，放大到5~7毫米。过大的临界颗粒易出现偏析和砖坯表面棱角结构松散。

(2) 采用理论上颗粒配比（7:1:2）时，由于粗粒很多，成型困难（受压时移动性差），不易得到密实坯体，在烧成时也难获得良好烧结，所以细粉含量一般增加到35~40%左右。另外，还应注意某些物料烧成时的多晶转变以及混料时的再破碎现象。

混练的目的是使颗粒不同的原料以及原料和添加物、水份间均匀混合没有偏析。有时混练后的泥料，再在一定温度和湿度条件下放置一定时间，对粘土砖泥料讲，使结合粘土充分分散和均匀化；这样会增加泥料的可塑性和制品的强度。此项操作曰“困泥”，是我国古代劳动人民长期实践所得出的经验。

(三) 成 型

成型是将混练好的泥料放于模内加压成规定形状和尺寸、组织均匀致密、棱角完整、表面光滑具有相当强度的砖坯。冶金工业用耐火制品，主要采用半干法成型（坯料水分3~10%）。此法又可分为手工成型和机械成型。现代化生产一般尽可能用机械高压成型，因为它能保证砖坯有较高的质量。手工成型生产效率低，劳动强度大，只适用于产量少、外形复杂和大块的制品。

(四) 干 燥

干燥的目的是使砖坯排除一定量水份获得相当的强度，既便于搬运又不致在烧成初期因升温过快水份剧烈排出而造成裂纹废品。有些砖坯由于成型水分低、收缩小，可以不经干燥直接烧成。

干燥设备有干燥坑、室式干燥器，隧道干燥器及电接触干燥器等。对于水分高的大异形制品，应先在空气中自然干燥一定时期后再进干燥器。

(五) 烧 成

通过上述工序制成的是颗粒大小不同组织松散的砖坯，通过烧成最后能变成组织致密石头般坚硬的成品。烧成的道理可以分为两种情况来解释：

1. 有液相存在时的烧固——耐火材料原料中都含有少量杂质，再有添加的结合剂等，当烧成温度超过该系统的共晶点后，即有低熔物的液相生成。多数情况下，生成的

液相就成为制品中的玻璃相，它将骨料粒子（砖坯中主体）包裹起来，由于液相的表面张力——液面收缩倾向，使邻接的粒子互相靠近，制品就致密化。如果在烧成温度下，生成液相对固相或晶粒有一定的溶解度，达到过饱和时又析出来；或者溶解后，离子或原子重新排列变成另一种晶形，如不能溶解于液相中又会析出（重结晶）。这些变化都能促进制品良好的烧固。提高烧成温度，会降低液相粘度，促进烧固和加速重结晶过程。

2. 没有液相存在时的烧结——固相反应。

过去一直认为物质只有在液相或气相情况下才能进行反应，后来，泰曼氏于1920年总结了劳动人民丰富的实践经验，提出了晶体间进行固相反应的理论，确定固相反应开始进行的温度与反应物开始烧结的温度相当。对于硅酸盐来说：

$$T_{\text{烧结}} \approx (0.8 \sim 0.9) T_{\text{熔融}}$$

这种干式烧结法，应用到金属方面就是目前发展很快的“粉末冶金”。其他许多特级耐火制品，也采用烧结法制造。

固相间为什么能在较低温度下反应？在颗粒的表面有残余电荷，它能将带相反电荷的粒子吸引靠近（它具有将两个晶面排列成连续的结晶格的倾向）。颗粒愈细，其比表面积^{*}就愈大；反之，颗粒愈大，比表面积愈小。从细颗粒烧结成大颗粒，是减少表面能的过程，从化学热力学的观点，这是自发进行的。高压成型，使粒子间紧密结合，对烧结是有利的。另外，随着温度的升高，晶格上固体质点的振幅加大，当振幅大到一定程度时，就破坏了它和周围质点间的平衡，质点就会在点障中发生迁移或扩散现象。由于这种扩散作用，一方面使不规则的或有缺陷的晶格调整到接近于完全平衡状态；另一方面伴随着发生晶粒长大（再结晶）。由于以上这些作用，使坯料的密度和强度显著增加。

耐火材料的烧成，实质上是上述两种过程的综合结果；一般来说，在低温时以烧结为主，在高温时以烧固为主。有些文献上，不分烧结与烧固，而统称为“烧结”。

影响耐火制品烧结、烧固的因素，主要有温度、颗粒大小，成型压力、添加物的种类和数量等。

按烧成时砖坯中发生的变化以及温度制度不同，可将烧成过程划分为三个时期：

1. 加热期 砖坯从常温升到规定的最高温度（止火点），排除水分及其他挥发分，产生物理及化学变化，形成少量液相，将坯料烧结烧固，体积和强度发生变化。
2. 保温期 在止火点或稍低于止火点保持一定时期，使砖坯内外温度均匀，物理——化学变化包括晶形转变得以完全。
3. 冷却期 从止火点冷却到可以出窑的温度（一般 $<100^{\circ}\text{C}$ ），使制品内部产生的一切变化巩固下来。

烧成制度包括升温、冷却速度、止火温度、保温时间以及窑内的气氛性质。合理的烧成制度要根据具体情况（砖坯内物理化学变化、产生应力的能力及烧成设备的能力等），通过反复科学实验总结出来。

* 比表面积指材料单位体积的总表面积。

常用的耐火制品烧成设备有倒焰窑及隧道窑。前者只适用于批量小，单重大，形状复杂及烧成制度特殊的情况；后者是今日广泛采用的有发展前途的设备。

从七十年代国内外耐火材料的发展方向看，要制成优质的耐火制品，在生产工艺方面主要应做到三高，即：“高纯”、“高压”“高温”。采用高纯度的原料，必然要和高压成型及高温烧成相结合。

自学参考题

1. 为什么要了解耐火制品的分类？
2. 耐火材料的酸性、碱性和中性的依据是什么？
3. 就你参观和学习过的冶金炉，例如炼钢平炉炉顶或其他冶金炉的某部分，主要要求有什么工作性能？
4. 为什么要了解耐火制品的生产工艺？
5. 烧成的块状耐火制品各个生产工序的目的是什么？
6. 试讨论分析制造优质耐火制品的主要途径？

第二节 耐火制品的性质

要选择和使用耐火制品，就必须知道它的质量，而评价耐火制品的质量，除了按外形尺寸及断面宏观组织分级外，还主要取决于它的理化性质。

由于耐火制品是由各种天然矿石，经人工加工制成的一种非均匀的人造岩石，其化学组成、组织结构以及所形成的各种矿物的结晶形状、大小、数量及分布等极不均匀，差别很大，这些差别直接影响到耐火制品的理化性质。

对于耐火制品的理化性质，可分成化学——矿物组成、物理性质以及高温下工作性质等三部分来讨论。

对于耐火制品理化性质的一般检验法，可参考冶金部的统一标准（YB365~373—63）。

学习本节重点要掌握：耐火制品的性质特别是各项工作性质的物理概念以及它们所反映在冶金炉上的工作条件，这些性质相互间的联系，影响这些性质的主要因素。

一、化学——矿物组成

耐火制品从微观上研究，一般并非均匀的单相物质，而主要是由许多不同结构的矿物相所组成。而矿物相的种类及其性质，又和制品的化学组成有关。

（一）化学组成

耐火原料和制品主要是由各种氧化物所形成的矿物相组成。

一般耐火制品或原料按各个成分含量的多少，可以归纳为两部分，即占绝对多数的主要成分和仅占少量的杂质成分。因为杂质成分常是易熔物，它在制品（或原料）中起着熔剂作用，所以要求杂质含量愈少愈好，亦即纯度愈高愈好。纯度愈高，如其他条

件（例如组织结构）不变，相应地耐火度等一系列工作性质也会改善。

知道耐火制品的主要化学组成后，一方面可知它是属于酸性、中性还是碱性耐火材料，以免设计或筑炉时弄错；另一方面从相应的状态图上，可以探知主要矿物相组成以及在不同温度下生成的液相数量等。

（二）矿物组成

耐火制品是矿物相的组成体。因此，在考虑制品的组成对它的一些性质的影响时，应考虑制品的矿物组成而不单纯是它的化学组成。

化学组成相同的耐火制品，其矿物组成不一定相同；因为后者和外界客观条件（例如烧成温度、压力、气氛、加工工艺等）有关。

全面研究耐火制品（或原料）的矿物组成，应该包括矿物相的种类，各个相的数量，它们的分布和相互结构情况。耐火制品中存在的矿物相可分为两类：主晶和基质。主晶是耐火制品中主要组成的结晶相或骨料，它的性能基本上决定了制品的性能。基质是包围主晶的四周熔点较低起胶结作用的结晶矿物以及玻璃质，这些物质亦称结合物质。在制品中它们的数量虽然不多，但是对制品的性质往往起着很重要的影响。

从六十年代国外开始研究制造不用基质的由主晶直接结合的碱性耐火砖。这种直接结合砖须用高纯度的原料，高压成型和高温（1800~1900℃）烧成。

耐火制品的微观组织（用放大十倍以上的仪器检定）结构有两种类型：一种是主晶交错的网络结构型；另一种是主晶呈孤岛状分散型。从高温结构强度的观点出发，前一种结构较好。

二、物理性质

（一）组织结构

耐火制品的特性，不单由化学—矿物组成所决定，而且在一定程度上取决于其组织结构特征。

耐火制品从宏观上研究，其组织结构一般并非十分致密和均匀的。由于制品的组织结构不同。直接影响它高温下的工作性能。

检验耐火制品组织结构的项目有：显气孔率、体积密度（重度）吸水率、真比重、透气度及常温耐压强度。由于显气孔率、体积密度和吸水率可以用同一检验测定，方法快速简便，费用很低，而且对检定产品工作性能和控制工艺操作等有一定意义，所以一般它们和常温耐压强度等，综合地作为最必需最通用的检验项目。

影响耐火制品组织结构或物理性质的因素，除了原料的化学矿物组成之外，更主要的是制造工艺。原料尽管相同而制造工艺不同，所得制品的组织结构也不同。

1. 显气孔率、体积密度和吸水率

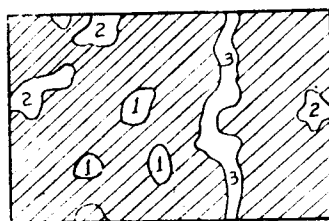


图 4-2-1 耐火制品中气孔类型
1—闭口气孔；2—不贯通的开口气孔；
3—贯通的开口气孔

试观察耐火制品的表面或断面，可发现有许多大小不同的气孔。其中部分气孔和大气相通，称为开口气孔；另一部分不和大气相通，称为闭口气孔。开口气孔又可分为贯通和不贯通制品的两种（参考图 4-2-1）。

通常检定的“显气孔率”或简称“气孔率”，是指开口气孔的总体积占耐火制品总体积的百分率。

由于开口气孔在制品使用过程中直接和熔融炉渣、金属、烟尘以及被加热的金属接触，开口气孔愈多，一方面在多相反应中的接触面就愈大，反应速度就愈快；另一方面组织结构也愈疏松，所以它对制品的抗渣性，耐磨性甚至耐压强度等的影响远较闭口气孔严重。其次，在一般耐火制品中（除掉熔注制品和泡沫轻质砖外），开口气孔的体积远远大于闭口气孔的体积；另外，闭口气孔的体积不能直接测定。因此，开口气孔率或“显气孔率”就成为评价耐火制品质量的重要指标之一。

一般块状烧成的耐火制品（隔热材料除外）的“显气孔率”约为20~30%。显气孔率≤15%的称为高密度制品（参考表 4-2-1）。

几种耐火制品的密致度和强度指标

表 4-2-1

制品名称	体积密度 (克/厘米 ³)	显气孔率 (%)	耐压强度 (公斤/厘米 ²)
普通粘土砖	1.90~2.00	28.0~24.0	125~200
致密粘土砖	2.10~2.20	22.0~16.0	300~500
高密度粘土砖	2.25~2.30	15.0~10.0	>600
硅 砖	1.80~1.95	22.0~19.0	250~450
镁 砖	2.60~2.70	24.0~22.0	300~500

体积密度（重度） 它是指耐火制品单位体积（实体部分及全部气孔）的干燥重量，以克/厘米³或吨/米³表示之。

同一原料和工艺过程所获制品的体积密度应该变化不大（参考表 4-2-1）。

通常除了根据这个指标来了解制品的密度和工作性能外，还用它来计算筑炉成本和求耐火砌砖体的蓄热量。

吸水率 它是指耐火制品开口气孔充满水的重量占制品干燥重量的百分率。

测定吸水率最简便，所以它常用来表征材料开口气孔体积的大小以及耐火制品的烧结程度。

2. 真比重

耐火制品（或原料）除去全部气孔的实体矿物部分的比重称真比重。由于一定的矿物相有一定的真比重，所以从耐火制品（或原料）真比重的大小可以判知其中含有矿物相的种类（对单一结晶）以及某种矿物相（两种结晶以上）的多少；从而也可判知耐火制品的一系列性质，或原料的纯度和烧结程度。

只有耐火材料中主晶占的比例很大，玻璃相等杂质含量极少，加热过程中又有重结

晶现象发生时，检定这个项目才特别有意义。

上述性能一般表示式为：

$$\text{显气孔率} = \frac{V_1}{V} \times 100(\%);$$

$$\text{体积密度} = \frac{W}{V_1 + V_2 + V_3} = \frac{W}{V} \text{ (克/厘米}^3\text{)};$$

$$\text{吸水率} = \frac{W_1}{W} \times 100(\%);$$

$$\text{真比重} = \frac{W}{V_3} \text{ (克/厘米}^3\text{)}。$$

式中 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V 分别代表开口气孔、闭口气孔、实体部分及总的试样体积； W 、 W_1 分别代表试样干燥重量及开口气孔中充填水重。

3. 透气度

耐火制品透气度的大小可用透气系数 (K) 来表示。 K 的计算公式如下：

$$V = K \frac{F \cdot \Delta P \cdot t}{d}$$

式中 V — 透过试样的气体体积，升；

F — 试样的断面积，米²；

ΔP — 试样两面的压力差，毫米水柱；

t — 气体通过的时间，小时；

d — 试样的厚度，米。

因此，透气系数是指：对于单位面积和单位厚度的试样，在单位压力差和单位时间内所通过气体量。

透气度和气孔率虽都是评定耐火制品致密度的指标，但两者并没有规律性的关系。因为对同样尺寸的试样，显气孔率的大小决定于开口气孔的总体积，而透气度的大小还和开口气孔的大小、贯通情况，分布的均匀性、气体的温度、粘度等许多因素有关。气体的粘度随温度的升高而增大，因而透气度也相应地降低（参考表 4-2-2）。

常用耐火砖的透气系数 (K)

表 4-2-2

制品名称	K (升·米/米 ² 毫米水柱·小时) 在下列温度下, °C			
	17	250	500	800
粘土砖	1.9~3.7	1.7~3.0	1.3~2.3	1.0~2.0
硅 砖	1.3~3.2	1.3~2.2	1.1~1.8	0.77~1.5
镁 砖	1.8	1.5	1.3	1.0

对于筑炉用耐火制品，一般要求透气度愈小愈好，但对于特殊用途（例如用氩通过

透气砖对钢液进行净化处理)，要求制品有较好的透气度。

4. 耐压强度（常温耐压强度）

“耐压强度”一般是指常温下制品单位面积所能承受的极限破坏应力，其单位是公斤/厘米²。事实上，很少有耐火制品在使用过程中由于常温下的静负荷过大而破损的。因为一般工业炉炉墙所承受的负荷不超过1公斤/厘米²，炉顶砖不超过4~5公斤/厘米²，特殊情况下如大型高炉炉底、平炉蓄热格子砖下层，最大荷重也不超过10公斤/厘米²，而按现行部颁标准(YB395—63)，则普通粘土砖的耐压强度规定不小于125公斤/厘米²，对特殊用途的耐火砖则要求更高（参考表4-2-1）。为什么提出如此高标准？因为耐压强度的高低取决于骨料颗粒本身的强度、颗粒结合的牢固性以及组织结构的均匀性。而这些一方面直接反映生产工艺是否正常，另一方面也可说明制品在高温长期使用中的体积稳定性如何、能否抗冲击、耐磨和抵抗其他机械负荷等。

据实验，一般耐火制品的耐压强度值约为抗弯强度值的2~3倍，为抗拉强度值的5~10倍；所以耐火制品最不抗拉。

因为测定耐压强度简便迅速，而且又可说明许多问题，所以它成为评定制品质量的指标之一。

多数耐火制品的耐压强度都随温度的升高而增大，在1000~1100℃时达到最大；温度继续升高时，耐压强度就急剧降低。这个现象可能和高温下制品开始呈塑性变形，以后制品内出象液相有关。

对于不烧制品，例如耐火混凝土，根据其使用条件选择测定不同温度下的“高温耐压强度”，借以了解某些高温使用性能变化规律，这对材质的选择和使用都具有一定的指导意义。

(二) 热膨胀

耐火材料和所有物体一样，有热胀冷缩的可逆变化，这个性质称为热膨胀。

热膨胀的大小一般用线膨胀百分率(β)来表示；另外，由于它和温度范围有关，所以也可用平均线膨胀系数(β_平)来表示。它们的计算公式如下：

$$\beta = \frac{L_t - L_{t_0}}{L_{t_0}} \times 100, \%$$

$$\beta_{平} = \frac{L_t - L_{t_0}}{L_{t_0}(t - t_0)} C^{0-1},$$

式中 t_0 —试样初温，℃；

t —试样终温，℃；

L_{t_0}, L_t —分别代表在 t_0 和 t 时试样的长度，厘米。

尽管耐火制品的热膨胀数值很小，但产生的应力却很大。工厂中煤气管道为防止热胀冷缩而引起的破裂，规定管道上要留伸缩接头；筑炉时也一样，为防烘炉时炉体胀裂倒塌等，要根据具体情况，砌砖时须留膨胀缝，炉体外加钢结构。

不同的耐火制品的热膨胀，主要决定于它的化学——矿物组成；对同一种耐火制品的热膨胀又取决于温度范围。

由于制品内存在着各种不同成分和结构的矿物，其热膨胀值大小不等，这就使耐火制品的热膨胀性与单一矿物组成体的热膨胀性不同。

在一定温度范围内，有的耐火制品的热膨胀比较均匀，有的就波动较大（见图 4-2-3）；后者在制订热工温度制度和烘炉曲线时就应特别注意。下面（表 4-2-3）列举了几种耐火制品的平均线膨胀系数。

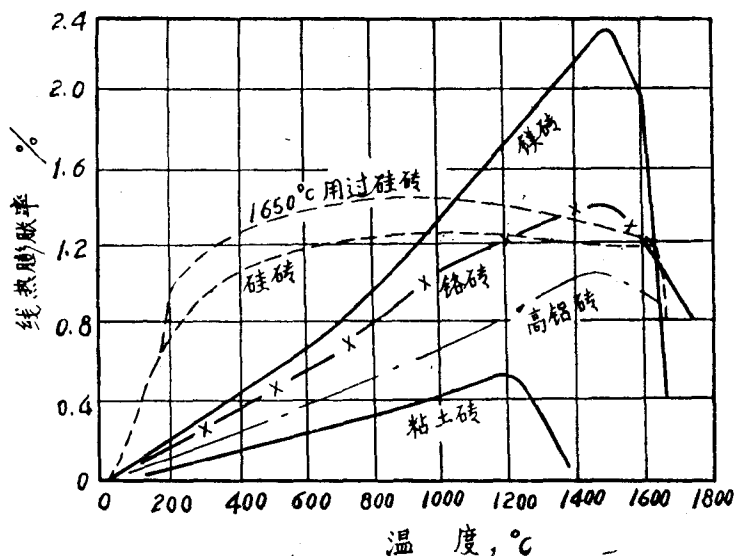


图 4-2-2 耐火制品的线热膨胀率

几种耐火制品的平均线膨胀系数 ($\beta_{平}$)

表 4-2-3

制 品 名 称	$\beta_{平} \times 10^{-6}$ (20~1000°C)
粘土制品	4.5~6.0
莫来石制品(70% Al_2O_3)	5.5~8.5
刚玉制品(99% Al_2O_3)	8.0~8.5
镁石制品 (90~92% MgO)	14.0~15.0
半硅质制品	7.0~9.0
硅质制品	11.5~13.0

与上表的数据相应，工业炉砌砖平均 1000°C 时每米砌砖应预留的膨胀缝为：

- 普通粘土砖： 5~6 毫米；
- 硅 砖： 12 毫米；
- 镁 砖： 12~14 毫米。

(三) 弹性变形

弹性变形是用于分析耐火制品在使用过程中受热时所产生的应力和应变特性。

耐火制品在常温时是属于脆性材料，弹性变形量很小。常用弹性模量来表示制品的弹性变形。按照弹性（虎克）定律，在弹性限度内，材料所受的应力和它所产生的应变成正比，这种关系可表示如下式：

$$\frac{P}{S} = E \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

式中 P — 材料在 S 截面上所受的力，公斤；

S — 材料受力的截面积，厘米²；

$\frac{\Delta L}{L}$ — 材料受力后相对长度变化；

E — 弹性模量，公斤/厘米²。

常用几种耐火制品的弹性模量数据列于表 4-2-4〔11〕。

常用几种耐火制品的弹性模量

表 4-2-4

名 称	耐 压 强 度 (公斤/厘米 ²)	气 孔 率 (%)	常温弹性模量(E) (10 ⁵ 公斤/厘米 ²)
硅 砖	710	17.4	1.16
粘 土 砖	220	26.4	0.93
高 铝 砖	>1200	13.4	9.59
镁 砖	1280	16.3	12.2
镁 铝 砖	640	20.9	4.24
镁 铬 砖	450	18.6	4.24
稳定白云石砖	1920	78	11.60

(四) 导热性

代表耐火制品的导热性的是它的导热系数。影响导热系数的因素主要是制品的矿物相组成和组织结构（孔气率）；对于同一种制品，它也 and 温度有关。

由于通常耐火制品内的固体物质是断续地填充制品的体积的，所以它的传热性，严格讲是由传导、辐射和对流三者综合实现的。

对不同物料组成的耐火制品，其导热性当然不同，对同一物料制品组织结构致密的，其导热性就高。象粘土砖中有晶体和玻璃质，玻璃质的导热性就不及晶体好。杂质多的制品导热性差。温度在一定限度内，对一定范围的气孔率讲，气孔率

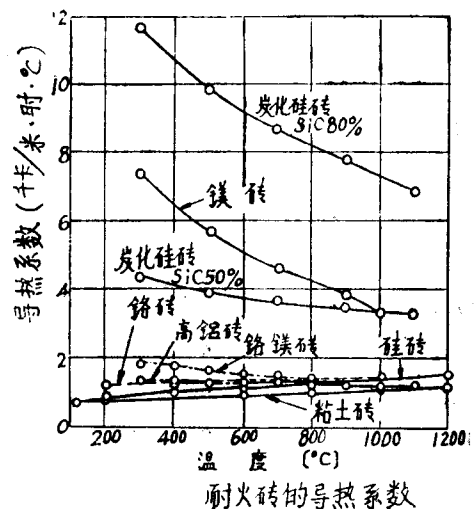


图 4-2-3 耐火制品的导热系数和温度的关系

愈大，则导热性愈差。又假如气孔率总值大体相同，还与固相的连续性以及气孔部分的大小、分布等均有影响。一般讲气孔大的，高温时由于辐射传热更为明显，故导热性好。一般晶体随着温度升高，导热系数降低，而玻璃质和非结晶质却相反。

大部分耐火制品的导热系数随温度升高而增加，但有少数耐火制品却相反（参考图4-2-3）。

三、高温下工作性能

(一) 耐火度

一般地讲，耐火度是指材料在高温下抵抗熔化的本领。耐火材料的耐火度并非指“熔点”这样的物理常数；因为“熔点”是指结晶相和它的液相平衡状态时的温度。而普通耐火材料并非纯的单一结晶矿物，其中有多种矿物和杂质，有结晶相也有玻璃相，在加热过程中，它是从固相逐步软化最后完全变成液相的，所以耐火度是一个“工艺常数”。按部颁标准（YB368—63）是将试样粉碎到规定的粒度，做成规定形状和尺寸的截头三角锥，按规定的方法插入托盘，按一定的速度加热，当试锥内部出现液相的数量达到70~80%或更多些，液相的粘度降低到一定程度，试锥由于它本身的重力作用而软化至锥尖端正好接触托盘表面，如图4-2-4那样。这一温度，就定作该试样的耐火度。

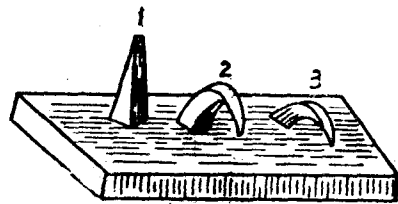


图 4-2-4 测温锥软倒情况
1—软倒前；2—在耐火度温度下软倒情况；3—超过其耐火度时软倒情况

对于不同的材料，耐火度主要决定于化学——矿物组成和它的分布情况；对同一种材料，耐火度就和颗粒度的大小，测定时的升温速度、锥的形状和安插方法以及炉内的气氛等有关。

某些耐火制品的耐火度和结晶体的熔点

表 4-2-5

结 晶 体	熔点, °C	制 品 名	耐 火 度, °C	备 注
SiO_2	1713	硅 砖	1710—1720	酸 性
$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	1870	半 硅 砖	1610—1710	半 酸 性
Al_2O_3	2050	粘 土 砖	1610—1750	弱 酸 性
$MgO \cdot Al_2O_3$	2135	高 铝 砖	1780—2000	中 性
Cr_2O_3	2300	镁 铝 砖	>2000	} 碱 性
CaO	2570	铬 镁 砖	>2000	
MgO	2800	白 云 石 砖	>2000	
		镁 砖	>2300	

测定耐火原料或制品的耐火度，可以探知它的纯度，从而在一定程度上可以估量它的抗渣性。测定使用后耐火砖工作端各层的耐火度，可以了解它被四周介质或熔渣侵蚀