

耐火材料与燃料燃烧

陈 敏 于景坤 王 楠 编著

东北大学出版社

沈 阳

陈敏，于景坤，王楠 2005

图书在版编目 (CIP) 数据

耐火材料与燃料燃烧 / 陈敏，于景坤，王楠编著 .— 沈阳：东北大学出版社，2005.12
ISBN 7-81102-211-7

. 耐... . 陈... 于... 王... . 耐火材料 . TQ175.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 135507 号

出 版 者：东北大学出版社

地 址：沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮 编：110004

电 话：024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传 真：024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress.com

http: www.neupress.com

印 刷 者：沈阳农业大学印刷厂

发 行 者：东北大学出版社

幅面尺寸：184mm × 260mm

印 张：22.625

字 数：579 千字

出版时间：2005 年 12 月第 1 版

印刷时间：2006 年 1 月第 1 次印刷

责任编辑：孟 颖 责任校对：解 丽

封面设计：唐敏智 责任出版：杨华宁

定 价：29.50 元

前言

我国耐火材料资源丰富，耐火材料的生产与应用历史悠久。为了适应国民经济的飞速发展，近年来我国耐火材料的产量急剧增加。由于在资源、人力等方面的优势，我国耐火材料的生产在激烈的国际市场竞争中占有越来越重要的地位。但就目前我国耐火材料的产品结构而言，初级产品比重过大，高附加值优质产品比重小的不合理局面亟待改善。我国高温行业的发展，对耐火材料的质量、寿命及环保等方面提出了更严格的要求。而目前我国耐火材料企业普遍存在技术力量薄弱，从业人员整体素质不高的问题，严重地制约了我国耐火材料行业的技术进步。因此，尽快解决人才短缺问题是进一步发展我国耐火材料行业的关键。

随着燃烧技术的发展，燃烧装置日新月异，科技人员必须认真学习燃料及其燃烧的基础理论知识，在工作中才能运用基本理论知识将各种燃烧装置复杂的具体问题抽象为一般问题，尽快寻找出解决问题的途径和方法。只有通过对理论知识的系统学习，才能开拓相关专业人员的知识面，增强其分析问题、解决问题的能力，培养其对新型燃烧技术的吸收和创造能力，才能促进燃烧技术的进步，促进能源的合理综合利用。

本书是为了适应冶金工程专业平台课的需要，开阔学生的专业知识面，兼顾原有色冶金、钢铁冶金及热能工程等专业的要求而编写的。作为传统学科，耐火材料和燃料燃烧两部分内容的知识体系已经比较完善，关于这两方面内容的专门教材已经很多。然而，到目前为止，尚没有兼顾耐火材料与燃料燃烧两部分内容的教材，给教学工作带来很多不便，教学效果也受到一定影响。此外，随着科学技术的不断更新和专业理论的进一步完善，原有关于耐火材料和燃料燃烧的教材中的部分知识已经陈旧，亟待补充最新的内容。因此，在学校教改的推动下，我们编写了这本集耐火材料和燃料燃烧两部分内容为一体的新教材。

全书共分上、下两篇。上篇为耐火材料部分，共有 10 章，包括铝硅系耐火材料、碱性及尖晶石耐火材料、碳复合耐火材料、含锆质耐火材料、不定形耐火材料、绝热材料、特种及新型耐火材料以及耐火材料应用等。其中第 1~9 章主要运用物理化学和无机材料学基本理论知识论述了各种耐火材料的原料组成和生产工艺与组织结构的关系，及其对耐火材料性能的影响机理。例如，在碳复合耐火材料中，通过热力学分析了抗氧化添加剂对提高碳复合耐火材料抗氧化性的作用机理以及耐火材料表面致密层的形成机理等。在第 10 章的耐火材料应用部分，主要阐述了根据各种高温设备的具体工作环境（包括温度、气氛及所接触金属液和渣相种类等）合理选择耐火材料的种类及砌筑方式等。这部分内容可以帮助学生掌握耐火材料的制备、性能检测以及损毁机理分析等方面的理论知识，从而使学生能够根据具体工作环境，合理选择耐火材料，培养学生独立从事耐火材料研究开发的工作能力。下篇为燃料

燃烧部分。由于燃烧现象十分复杂，涉及到化学、热力学、流体力学、传热传质学及反应工程学等多方面的知识，本书选取燃料燃烧中的精华部分，分为 5 章进行阐述。主要包括气体、液体和固体三种燃料的组成特点及其表示方法，常用工程的燃烧计算和三种燃料的燃烧特点及各种燃烧器的结构介绍等。这部分内容可以帮助学生掌握燃料燃烧的基本知识，为其将来从事燃料与热工方面的研究打下良好的基础。

本书由东北大学材料与冶金学院陈敏、于景坤和王楠编著。初稿完成后，东北大学施月循教授对全书进行了详细审阅并提出了许多宝贵意见，在此表示深切谢意。本书的耐火材料部分，借鉴了徐维忠主编的《耐火材料》的部分内容，在此表示深深谢意。在本书出版过程中，材料与冶金学院许多同志给予了极大帮助，在此一并感谢。

由于时间仓促和作者水平有限，疏漏难免，恳切希望读者批评指正。

作 者

2005 年 10 月

目 录

上篇 耐火材料

第 1 章 概 论.....	3
1.1 耐火材料的分类	5
1.2 耐火材料的一般生产过程	7
1.3 耐火材料的主要用途与要求.....	11
第 2 章 耐火材料的性能	13
2.1 耐火材料的宏观结构.....	13
2.2 耐火材料的热学性能及导电性能.....	18
2.3 耐火材料的力学性能.....	22
2.4 耐火材料的使用性能.....	28
第 3 章 铝硅系耐火材料	49
3.1 氧化硅质耐火材料.....	50
3.2 黏土质耐火材料.....	56
3.3 高铝质耐火材料.....	62
3.4 高铝质熔铸制品.....	65
第 4 章 碱性及尖晶石耐火材料	68
4.1 镁质耐火材料.....	68
4.2 白云石质耐火材料.....	85
4.3 镁橄榄石耐火材料.....	94
4.4 尖晶石耐火材料.....	96
第 5 章 碳复合耐火材料.....	101
5.1 碳复合耐火材料的分类及其特性	101
5.2 碳复合耐火制品的生产	103

5.3	高温条件下耐火材料内部的碳 - 氧反应	109
5.4	耐火材料内部及其与钢液和炉渣之间的反应	119
5.5	抗氧化剂在碳复合耐火材料中的作用机理	134
第 6 章	含锆质耐火材料.....	145
6.1	锆英石质耐火材料	145
6.2	锆质熔铸耐火制品	149
第 7 章	不定形耐火材料.....	153
7.1	浇注耐火材料	154
7.2	可塑耐火材料	162
7.3	其他不定形耐火材料	165
第 8 章	绝热材料.....	170
8.1	绝热材料的特征与分类	170
8.2	轻质耐火材料的绝热条件	171
8.3	多孔轻质耐火制品	173
8.4	耐火纤维及其制品	179
第 9 章	特种及新型耐火材料.....	186
9.1	纯氧化物耐火材料	187
9.2	氮化物耐火材料	191
9.3	碳化物耐火材料	195
9.4	氧化物-非氧化物复合耐火材料	201
9.5	硅化物、硼化物、硫化物材料	205
9.6	金属陶瓷	206
9.7	高温无机涂层	208
第 10 章	耐火材料的应用	210
10.1	耐火材料的选用.....	210
10.2	炼铁用耐火材料.....	212
10.3	炼钢炉用耐火材料.....	217
10.4	炉外精炼用耐火材料.....	221
10.5	连铸用耐火材料.....	224
10.6	轧钢用耐火材料.....	229
10.7	有色冶金用耐火材料.....	231
10.8	建材工业用耐火材料.....	236
10.9	垃圾焚烧用耐火材料.....	239
10.10	用后耐火材料的再生利用	240

下篇 燃料燃烧

第 11 章 燃 料 245

11.1 概 述..... 245

11.2 燃料的组成及其表示方法..... 251

11.3 各种燃料的发热量..... 257

11.4 气体燃料..... 262

11.5 液体燃料..... 264

11.6 固体燃料..... 269

11.7 燃煤新技术概述..... 275

第 12 章 常用工程的燃烧计算 283

12.1 燃烧所需空气量的计算..... 283

12.2 完全燃烧时烟气的计算..... 286

12.3 不完全燃烧时烟气量计算..... 289

12.4 烟气分析及空气消耗系数的检测计算..... 292

第 13 章 气体燃料的燃烧 300

13.1 扩散燃烧和动力燃烧..... 300

13.2 层流燃烧火焰结构..... 302

13.3 气体燃料燃烧器..... 305

13.4 火焰的稳定性、火焰监测和保焰技术..... 311

第 14 章 液体燃料的燃烧 314

14.1 液体燃料燃烧过程的特点..... 314

14.2 液体燃料的雾化过程..... 315

14.3 油滴燃烧和油雾燃烧..... 324

第 15 章 固体燃料的燃烧 330

15.1 固体燃料燃烧分类..... 330

15.2 煤的燃烧过程..... 334

15.3 固体碳粒的燃烧..... 335

15.4 碳粒燃尽所需时间及影响因素..... 344

15.5 碳粒的着火与熄火..... 347

15.6 煤粒燃烧的特点..... 349

参考文献..... 351

上篇 耐火材料

第 1 章 概 论

第 2 章 耐火材料的性能

第 3 章 铝硅系耐火材料

第 4 章 碱性及尖晶石耐火材料

第 5 章 碳复合耐火材料

第 6 章 含锆质耐火材料

第 7 章 不定形耐火材料

第 8 章 绝热材料

第 9 章 特种及新型耐火材料

第 10 章 耐火材料的应用

第 1 章

概 论

耐火材料是耐火度不低于 1 580 的无机非金属材料 and 制品。耐火度是指材料在高温作用下达到特定软化程度时的温度，它标志着材料抵抗高温作用的性能。通常将使用温度在 1 000 以上的工业窑炉用材料也看作耐火材料。

耐火材料的发展有着悠久的历史。可以说从有人类开始就有耐火材料，如旧石器时代取火用的燧石就可以称为耐火材料。但真正意义上的耐火材料，是在青铜器时代（大约公元前 3500 年）伴随着冶炼技术而产生的。1900 年以前，人们一直把砂石、耐火土等天然原料作为耐火材料直接使用。直到 1924 年，N. L. Bowen 和 J. W. Greig 发表了 Al_2O_3 - SiO_2 二元相图，解释了黏土制品随 Al_2O_3 含量的增加，耐火度提高的原因，才真正为耐火材料的开发与应用提供了理论依据。与此同时，高温 X-射线衍射仪的发明为研究耐火材料提供了有效的技术手段。因此，20 世纪 30 年代，相继出现了 $\text{FeO-Al}_2\text{O}_3$ ， $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ - SiO_2 ， $\text{FeO-Al}_2\text{O}_3$ - SiO_2 相图，全面地掀起了耐火材料研究的高潮。

耐火材料作为高温技术服务的基础材料，它与高温技术尤其是高温冶炼工艺的发展关系密切，相互依存，互为促进，共同发展。在一定条件下，耐火材料的品种质量对高温技术的发展起着关键作用。

一百多年来，在钢铁冶炼发展的过程中，每一次重大演变都有赖于耐火材料新品种的开发。碱性空气转炉成功的关键之一是开发了白云石耐火材料。近年来，钢铁冶炼新技术，如大型高炉高风温热风炉、复吹氧气转炉、铁水预处理和炉外精炼、连续铸钢等，都无例外地有赖于优质高效耐火材料的开发。另外，耐火材料在节能方面也作出了重要贡献，如各种优质隔热耐火材料、陶瓷换热器、无水冷滑轨、陶瓷喷射管和高温涂料等的开发，都对高温技术的节能起到了重要作用。现代冶炼技术的发展和节约能源的形势，既对耐火材料提出了更严格的要求，又必须借助于新品种优质耐火材料的成功及发展。其他高温技术的发展也同样需要开发相应的优质耐火材料。因此，从事高温技术的工作者必须十分重视耐火材料的技术开发，使它能与钢铁冶炼和其他高温技术同步发展，并力求先行一步。

从全球范围来看，近年来耐火材料工业面临着严重的供大于求的局面，呈现出产量降低、企业重组、竞争加剧、研发创新力加强、服务用户的意识和能力增强的发展趋势。一方面，耐火材料的主要用户如钢铁、水泥、玻璃、有色金属等工业的技术和管理的进步导致耐

火材料的消耗下降,同时对耐火材料的使用性能提出了新的更高的要求。另一方面,这些行业在激烈的市场竞争中向耐火材料提出了降低价格和消耗及提高使用寿命的要求,致使耐火材料生产企业不但要降低原料和生产成本,还要以更大的投入加快新技术和新产品的开发和应用。耐火材料品种则紧紧围绕用户工业的发展要求,实现长寿、节能、环保和多功能化。

进入 21 世纪以来,耐火材料生产能力严重过剩的局面愈显突出。2000 年全球耐火材料的年总产量在 2 300 万吨左右,而产能却在 3 500 万~4 000 万吨。近几年来,中国耐火材料的年总产量逾 1 000 万吨,且稳中有升,约占世界年总产量的一半。与日、美、欧洲等国家和地区相比,可谓“风景这边独好”。之所以如此,主要是我国的资源优势、劳动力优势和经济建设强劲的内需(如西部开发、西气东送、西电东送、南水北调等)拉动所致。例如我国钢产量从 1996 年首次突破 1 亿吨以来,稳居世界第一且一直攀升,2003 年超过 2 亿吨。水泥、有色、玻璃、陶瓷、石化等工业也都以前所未有的速度发展。近年来我国耐火材料的出口也在加大步伐。2002 年耐火制品出口达 64 万吨,耐火原料出口每年保持在 300 万~400 万吨。目前全球耐火材料工业总体形势具有以下主要特点。

(1) 总体供大于求,局部供不应求。全球耐火材料总体上供大于求,其中我国与独联体国家尤甚。这种状况在今后若干年内无望改变。局部区域仍存在供不应求的现象,如中东地区、伊朗、土耳其以及东南亚和非洲的一些国家,这些地方由于经济建设(有的是战后重建)的需要,钢铁、水泥、玻璃、有色金属等工业正在或即将蓬勃发展,而本土缺乏耐火原料资源、技术和装备,进口耐火材料是必然的补充。

(2) 全球化的理念增强。若干年前,许多发达和发展中国家,出于本民族工业的利益或政治的原因,在采购耐火原料或产品时,往往存在本地化、国产化的理念。随着世界经济全球化的到来,全球化的理念逐渐加强,用户在采购耐火材料时已突破地域和国度的限制,主要考虑的是产品的质量以及性价比,而不必非本地化或国产化不可。用户企业出于自身利益的考虑,使“地方保护主义”受到遏制。这无疑是经济全球化的一种体现,使许多耐火材料企业和用户企业受益。同时,耐火材料工业竞争也趋于全球化,而非区域性。

(3) 兼并重组形成新的格局。与其他工业一样,近年来世界耐火材料工业也经历着兼并重组的结构变化,兼并收购风靡全球。竞争力弱的一些中小企业濒临破产、倒闭;竞争力强的企业则正在强强联合,不断壮大,有的已有垄断之势。以总部设在奥地利的 RHI 集团公司为例,在过去的几年里已收购、兼并了 6 家跨国的大型耐火材料公司,形成了 2000 年销售收入达 16 亿美元的世界耐火材料工业的第一“大腕”。其他如 Cookson 公司、S.Gobain 公司等相继在近几年内完成兼并重组,形成 2000 年销售额分别为 12 亿和 10 亿美元的大型跨国公司。我国耐火材料工业也已面临着结构调整,虽然进展较慢,但势在必行。据国家统计局发布的 1 588 家国家大型工业企业中的 6 家耐火材料企业(营口青花集团公司、海城西洋耐火材料公司、海城华宇耐火材料集团公司、海城峰驰耐火材料总公司、太原刚玉特种耐火材料有限公司和洛阳耐火材料集团有限公司),多数是在重组中脱颖而出的。但它们的年销售额都在 1 亿美元以下,目前的规模尚不足以与国外的大公司相提并论。可以说,我国耐火材料的现代企业结构仅初见端倪。

(4) 技术进步和创新的步伐加快,能力增强。耐火材料工业的技术进步与其用户工业的技术进步相辅相成,互为促进。受用户工业尤其是钢铁工业技术进步的驱使,近年来耐火材料的新原料、新产品、新技术和新装备可谓层出不穷,主要体现在以下几个方面。

越来越多新型的、高性能的人工合成原料被开发出来，为高性能耐火材料的研制和应用奠定了基础。

不定形耐火材料在整个耐火材料中所占的比例增加。以日本为最盛，目前其不定形耐火材料产量占全部耐火材料的比例超过 60%。在钢铁工业用耐火材料中不定形耐火材料占 70% 以上。

氧化物和非氧化物复合的耐火材料增多。继 20 世纪 70 年代将石墨引入耐火材料而刮起一股“黑旋风”以来，近年又出现了含塞隆(Sialon)、阿隆(Alon)、金属相的复合型耐火材料。

新的成型和烧成工艺。如用浇注料制成各种预制件、氮化反应烧成等。

简单化、机械化、高效化的新型筑衬施工方法。如自流浇注、喷涂、湿式喷射、预制件的采用等。

功能型、环保型耐火材料增多。不少耐火材料不但能耐高温，还具有诸如透气、防堵塞、净化钢水等功能。含铬、沥青或其他有害挥发分的耐火材料正在被取代。

先进的生产和施工设备。如高吨位等静压机、造粒设备、高温窑、高效搅拌机、泵送和喷射设备等。

我国耐火原料资源丰富，品种多，储量大，品位高。高铝矾土和菱镁矿蕴藏量大，品质优良，世界著名；耐火黏土、硅石、白云石和石墨等储量多，分布广，品质好；叶蜡石、硅线石、橄榄石和锆英石等储量多；隔热耐火材料的各种原料在各地都有储藏。另外，我国漫长的海岸线和内陆湖泊均蕴藏着大量的镁质原料资源。近年来，我国在提高耐火原料质量和人工合成原料方面，取得了较为显著的成就。因此，我国有发展优质耐火材料的资源优势。

我国生产耐火材料的历史悠久。特别是中华人民共和国成立以来，随着科学技术和工业水平的提高，为了适应金属冶炼和其他高温技术工业以及热能工程的需求，我国耐火材料工业有了重大的发展。新建了许多优质耐火材料生产厂和有关机构；开发出许多优质耐火材料新品种。最近国家提出调整钢铁工业结构布局，提高钢铁质量的钢铁政策，必将促进我国耐火材料工业依靠科学技术的进步和整体工业水平的提高，加强生产技术管理，以材料的质量和品种为中心，继续提高原料质量；发展合成原料，改进生产装备，全面提高产品质量和改善性能，积极开发优质新品种；合理利用和提高耐火材料服役寿命，进一步降低消耗，注重环境保护与资源的综合利用，保证和促进高温技术工业和热能工程以及国民经济的发展。

1.1 耐火材料的分类

耐火材料的种类很多，为了便于研究、生产和选用，通常按其共性与特性划分类别。其中按材料的化学矿物组成分类是一种基本分类方法，也常按材料的制造方法、性质、形状和尺寸、应用等来分类。

1.1.1 按化学矿物组成分类

(1) 氧化硅质耐火材料。是以二氧化硅为主要成分的耐火材料，主要品种有各种硅砖和石英玻璃制品。

(2) 硅酸铝质耐火材料。是以氧化铝和二氧化硅为基本化学组成的耐火材料，根据制品

中 Al_2O_3 和 SiO_2 含量分为半硅质耐火材料、黏土质耐火材料和高铝质耐火材料。

(3) 镁质耐火材料。是以氧化镁为主要成分和方镁石为主要矿物构成的耐火材料，依其次要的化学和矿物组成的不同包括镁砖、镁铝砖、镁硅砖、镁钙砖、镁铬砖、镁碳砖和镁白云石砖，以及冶金镁砂。

(4) 白云石质耐火材料。是以氧化钙(质量分数 40% ~ 60%)和氧化镁(质量分数 30% ~ 42%)为主要成分的耐火材料。主要品种有焦油白云石砖、烧成油浸白云石砖、烧成油浸半稳定性白云石砖、烧成稳定性白云石砖、轻烧油浸白云石砖和冶金白云石砂。

(5) 橄榄石质耐火材料。是一种 $w(\text{MgO}) = 35\% \sim 62\%$ ， $m(\text{MgO})/m(\text{SiO}_2) = 0.95 \sim 2.00$ ，由镁橄榄石为主要矿物组成的耐火材料。

(6) 尖晶石质耐火材料。是主要由尖晶石组成的耐火材料。主要品种有由铬尖晶石构成的铬质制品($w(\text{Cr}_2\text{O}_3) \geq 30\%$)，由铬尖晶石、方镁石构成的铬镁质制品($w(\text{Cr}_2\text{O}_3) = 18\% \sim 30\%$ ， $w(\text{MgO}) = 25\% \sim 55\%$)和由镁铝尖晶石构成的制品。

(7) 含碳质耐火材料。这类材料中均含有一定数量的碳或碳化物。主要品种有由不定形碳构成的炭砖或炭块，由石墨构成的石墨制品，由碳化硅构成的碳化硅制品，由碳纤维及碳纤维与树脂或其他碳素材料复合为整体构成的材料。

(8) 含锆质耐火材料。这类材料中均含有一定数量的氧化锆。主要品种有以锆英石为主要成分的锆英石质制品，以氧化锆和刚玉或莫来石构成的锆刚玉和锆莫来石制品，以及以氧化锆为主要组成的纯氧化锆制品。

(9) 特殊耐火材料。是由较纯的难熔的氧化物、碳化物、硅化物和硼化物以及金属陶瓷构成的耐火材料。

1.1.2 按其他方法分类

(1) 按耐火材料制造方法分类。除天然矿石切割加工外，人造制品常根据其成型特点分为块状制品和不定形材料。依热处理方式不同分为不烧制品、烧成制品和熔铸制品。其中块状的烧成制品曾是生产与使用最普遍的耐火材料。但近年来，不定形耐火材料得到了快速发展。目前不定形耐火材料的产量占总耐火材料产量的 60% 以上。

(2) 按制品性质分类。评价耐火材料质量的高低主要以其性质优劣为依据，故耐火材料也常以其性质不同划分类别。其中依其耐火度的高低分为三类：普通耐火制品，耐火度 $1580 \sim 1770$ ；高级耐火制品，耐火度 $1770 \sim 2000$ ；特级耐火制品，耐火度 2000 以上。依其化学性质分为酸性耐火材料、中性耐火材料和碱性耐火材料。依其密度或导热性分为重质耐火材料和轻质耐火材料或隔热耐火材料。其他如依抗热震性和抗渣性等都可划分为若干类别。

(3) 按制品形状和尺寸分类。按制品形状和尺寸可分为标准砖、异型砖、特异型砖、管、耐火器皿等制品。

此外，依其应用分类可分为焦炉用耐火材料、高炉用耐火材料、炼钢炉用耐火材料、连铸用耐火材料、有色金属冶炼用耐火材料、水泥窑用耐火材料、玻璃窑用耐火材料等。

1.2 耐火材料的一般生产过程

耐火材料的品种和质量取决于耐火材料的原料及其生产工艺。在原料确定的情况下，耐火材料的生产工艺方法与制度是否正确与合理，对所得耐火制品的质量影响极大。耐火材料性能的控制，必须通过特定的工艺手段来实现。因此，耐火材料的生产者必须精于此道；使用者为能正确选用具有某一特性的耐火材料，使其物尽其用，也必须对耐火材料的生产工艺有所了解。

耐火材料的生产工艺流程如图 1-1 所示。对块状制品，一般包括如下几个过程：原料的加工→配料→混练→成型→干燥→烧成→拣选→成品。

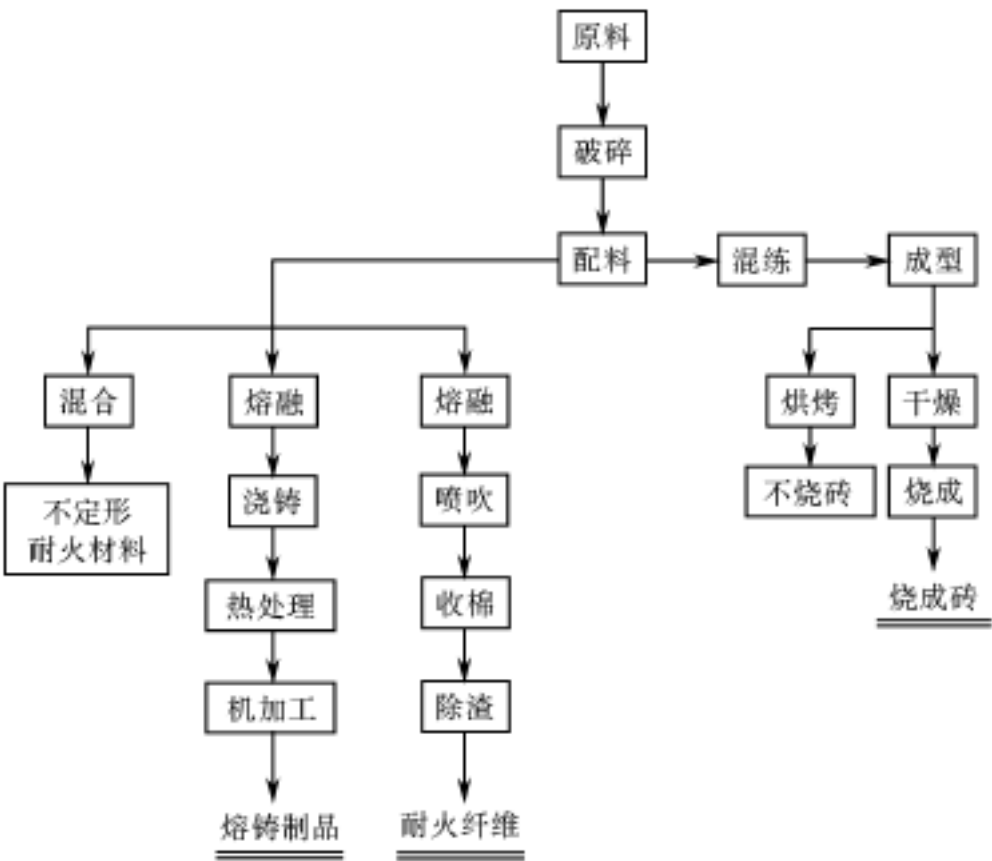


图 1-1 耐火材料生产过程示意图

1.2.1 原料的加工

原料的质量是耐火材料质量的基本保证。要发展优质高效的耐火制品，必须有纯净的质量均一和性质稳定的原料。因此，选取适宜作为耐火材料原料的天然矿石，开采后必须再经过加工。原料的加工主要包括原料的精选提纯(或均化、合成)，原料的干燥和煅烧，原料的破粉碎和分级。

(1) 原料的精选提纯和均化。为了提高原料纯度，一般需经拣选或冲洗，剔除杂质；有的还需采用适当的选矿方法进行精选提纯；原料中成分不均的需要均化；有的在精选后还可引入适量有益加入物，高性能的复合原料需采用人工合成方法。

(2) 原料的煅烧。为了保证原料的高温体积稳定性、化学稳定性和高强度，多数天然原料和合成原料需经高温煅烧制成熟料或经熔融制成熔块。熟料煅烧温度一般多控制在使其达到烧结致密化的范围内。对主晶相为氧化物的原料，烧结温度 T_s 约为其熔点 T_m 的 $0.7 \sim$

0.9 倍, 即 $T_s \approx (0.7 \sim 0.9) T_m$, 多高于制品的烧成温度, 更高于制品的使用温度。熟料煅烧一般在竖窑或回转窑中进行。

有的原料, 如软质耐火黏土作为黏合剂虽不经煅烧, 但若含水过多, 应经干燥, 以便破碎和分级。

(3) 原料的破粉碎和分级。原料破粉碎是为了制成不同粒级的颗粒及细粉, 以便于调整成分, 进行级配, 使多组分间混合均匀, 便于相互反应, 并获得致密的或具有一定粒状结构的制品坯体。一般先将颗粒破碎到极限粒径 $40 \sim 50\text{mm}$ (粗碎); 再将粒度破碎到极限粒径 $4 \sim 5\text{mm}$ (中碎), 然后细碎。细磨是将颗粒破碎到粒径小于 $88\mu\text{m}$ 的细粉。生产普通耐火制品所用的颗粒料皆为中碎以后所获得的产品。

经破粉碎后的颗粒状产品, 需依粒度粗细分级, 以便合理配料。通常多以筛分方法将颗粒分级, 对粉状料常以风选法分级。

1.2.2 配 料

耐火材料的配料是将各种不同品种、组分和性质的原料以及将各级粒度的熟料颗粒按一定比例进行配合的工艺。各种原料的配合是为了获得一定性质的制品。粒度的配合是为了获得最紧密堆积的或特定粒状结构的坯体。

(1) 各种原料的配合。各种原料的配合依材料的品种和性质的要求而定, 不同制品各有特点。对烧结制品、不烧制品和不定形耐火材料, 各种颗粒的熟料或其他瘠性料与各种结合剂的配合是配料中的重要一环。任何结合剂的选用及其加入量皆应严格控制, 应保证其既有利于制品的生产, 又不会给制品的性质带来危害。

(2) 粒度的配合。各级粒度的颗粒配合对砖坯的致密度影响极大。只有使各级粒度颗粒的堆积体达到最紧密的程度, 才能得到致密的制品。

欲使多级不同粒度的颗粒组成的堆积体密度得到提高, 必须使粗颗粒级中的空隙全部由细颗粒级填充, 而细颗粒级中的空隙由更细的颗粒级填充, 如此逐级填充即可获得最紧密堆积。

各级颗粒的粒径比。以紧密堆积的同径球的空隙而论, 若使小球填于其中, 小球的粒径必须小于大球堆积体的空隙尺寸。因此, 两种球球径之比必须恰当。以圆球交错排列的堆积状态计算, 大小两种球的球径比约为 6.5。由此可见, 若两级颗粒配合成堆积体时, 粒径比在此值以上, 对实现紧密的堆积是有利的。如此多级颗粒配合, 更可实现致密化。采用此种粒径比很大的各级颗粒的配合常称为间断级配。在实际生产中为避免颗粒产生严重偏析, 并充分利用各级颗粒, 常采用粒度连续的颗粒, 并以平均粒径划分为若干级别进行配合。

各级颗粒配合的比例(级配)。在保证粗细颗粒粒径比恰当的条件下, 由各级颗粒组成的堆积体中, 每级颗粒配合的数量, 应以细者填满粗者的空隙为宜。

以密度相同的同粒径的圆球堆积体为例, 其空隙率(P)约为 38%。二级配合时, 粗与细的数量比应为 $1 : 0.38$ 。采取多级颗粒配合时, 堆积体的空隙率变化如表 1-1 所示。

同粒径的粒状颗粒堆积体的空隙率约为 45%。当多级配合超过 4 级时, 空隙率变化不显著, 为了简化工艺, 普通烧结制品的粒度组成, 一般为 3 ~ 4 级。以粒度粗、中、细三级配合为例, 堆积体空隙率变化如图 1-2 所示, 以粗颗粒 55% ~ 65%, 中颗粒 10% ~ 30%, 细颗粒 15% ~ 30% 较宜。通常为获得高密度的制品, 并避免由这种级配组成的泥料产生颗粒偏析和便于制品的烧结, 常采取细粉量较多的配合, 如采取粗 中 细 = (4 ~ 6) (2 ~ 1)

(4 ~ 3)。

表 1-1 各级粒度堆积体的空隙率变化					
粒度级数	球体实体积/ %		堆积体空隙率/ %		空隙下降率/ %
一级	$(1 - P_1)$,	62.0	P_1 ,	38.0	—
二级	$(1 - P_1 P_2)$,	85.6	$P_1 P_2$,	14.4	23.6
三级	$(1 - P_1 P_2 P_3)$,	94.6	$P_1 P_2 P_3$,	5.4	9.0
四级	$(1 - P_1 P_2 P_3 P_4)$,	98.0	$P_1 P_2 P_3 P_4$,	2.0	3.4
五级	$(1 - P_1 P_2 P_3 P_4 P_5)$,	99.2	$P_1 P_2 P_3 P_4 P_5$,	0.8	1.2

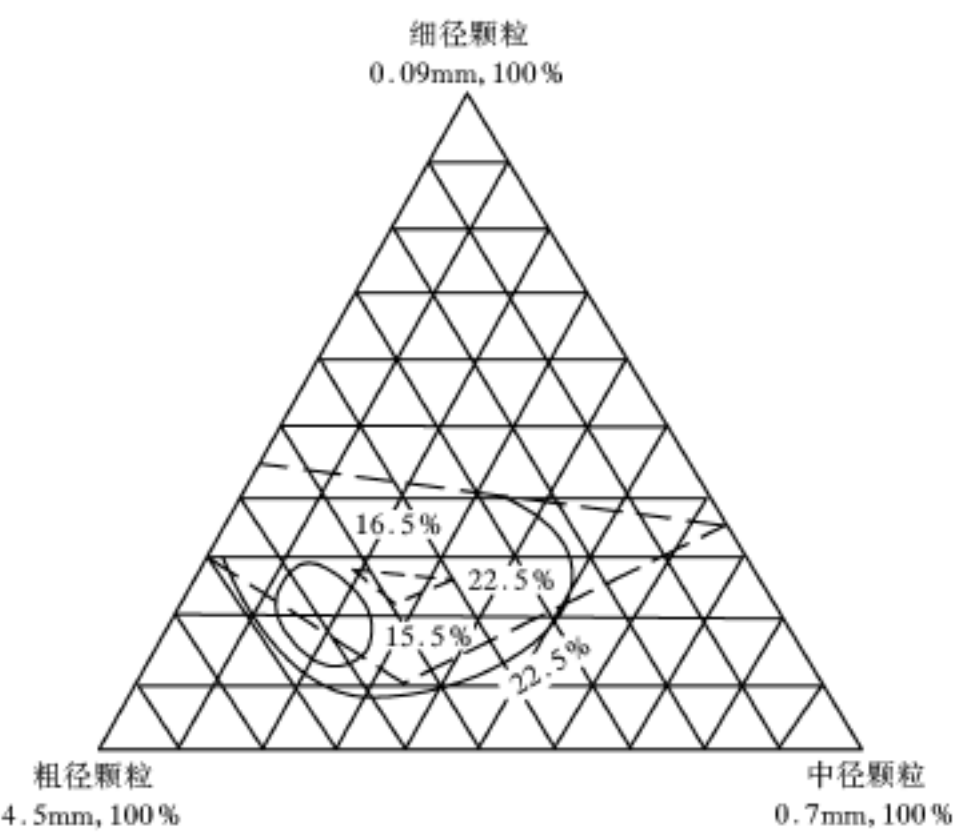


图 1-2 堆积体空隙率变化

极限粒径的确定。耐火制品中颗粒的极限粒径，根据制品形状的复杂程度、断面尺寸大小或成型的方法以及对其组织结构和性质的要求而定。一般而论，形状复杂、断面小者，极限粒度应小；适当提高极限粒径，对制品的抗热震性可能有利。近于标准形状의普通烧结制品，极限粒径一般控制在 2 ~ 3.5mm，大型块状制品可相应增大。

1.2.3 泥料的混练

混练是将合理配合的各种物料准确称量后，制成各种组分、颗粒均匀分布的泥料，并使泥料中各种物料实现结合良好的加工过程。

根据物料的组分和性质，采取适当的混练设备与方法。使各种物料通过对流、扩散和剪切等作用达到泥料均匀化和颗粒料与结合剂等的互相结合，既使泥料获得良好的成型性能，又避免了泥料中颗粒的再破碎和某些物料的散失或在混练过程中发生显著反应变质。

耐火材料泥料的混练多在湿碾机中进行。虽产量较低，电耗较高，并有使颗粒再破碎等缺点，但可获得均匀致密的泥料。高效行星式强制混合机混练泥料，颗粒不再经破碎，效率及质量较好。还有用双轴混料机的，但泥料质量较差。

某些耐火制品在泥料混练过程中，还需进行“困料”，即将经初混的泥料在一定温度、

湿度的条件下贮放一定时间，然后再经二次混练，以改善泥料的质量。

1.2.4 成 型

成型的目的是将泥料制成具有一定形状和适当密度、强度的砖坯。对烧结制品和不烧砖，砖坯的致密度决定着制品的致密度，从而影响制品的许多物理化学性质和使用性能。因此，成型是这类耐火材料生产中很重要的一道工序。

砖坯成型方法很多，主要依泥料的性质、制品形状和对制品性质的要求而定。如对有流动性的泥料，采用注浆成型；对有可塑性的泥料，采用可塑法成型；对有触变性的泥料，经振动成型；对含水量较低(3%~6%)的半干泥料，采用半干压成型或捣打成型；干粉料用等静压成型等。对普通烧结制品和不烧砖，最普遍采用的方法为借助外力排除大部分空气，将泥料中的各级颗粒重新分布，使其致密化的半干压成型。对形状复杂的大型制品也常采用可塑法、振动法或捣打法。

半干压成型后，砖坯的密实度除受泥料组成与性质影响以外，还受压制外力、增压速度和加压时间等压制制度控制。压制方法与制度不当，易使砖坯出现缺陷。如果开始加压过大过快，气体未及时排出，易产生层裂。

经成型后的砖坯，由于其中各种物料间的机械结合力、静电引力及摩擦力的作用，使砖坯的形状保持下来，并具有一定的强度。

1.2.5 干 燥

许多成型后的砖坯含水量较高，强度较低，不便堆码和烧成，必须经干燥排除其中游离水分，使强度得到提高，才可装车入窑。有些成型后含水量已很低的砖坯，虽可码放适当高度，直接入窑，但入窑后还必须首先经过干燥阶段。

砖坯的干燥是热量传递过程，利用热空气或热废气将热量传递给砖坯，砖坯受热温度升高，使水分由砖坯内扩散逸出。必须控制适当的干燥制度，以使砖坯内水分向外扩散和表面水分蒸发的速率接近。由于砖坯在干燥过程中往往产生收缩，切忌砖坯表面干燥速率不当，以免造成开裂、鼓爆等缺陷。

砖坯干燥多采用隧道干燥器，也可采用室式干燥器和电热干燥器，还有采用炕室干燥器的，但后一种设备效率较低。

1.2.6 烧 成

烧成是绝大多数烧结耐火材料生产的最后一道工序，也是关系制品质量最重要的工序。

烧成是使砖坯在高温下发生一系列物理化学反应而达到烧结的目的，即砖坯形成一定高温稳定的物相和结构，定形，并获得具有相当高的密度、强度和其他各种性能的制品。

一般烧结制品在烧成过程中，除可能排除残余水分外，其中全部或部分物相可能首先发生矿物的分解和新矿物的形成，有的晶体可能发生晶型转变。随着温度的提高，可能发生固相反应、液相形成、新晶体形成和晶体长大，达到固相烧结和液相烧结。

(1) 固相烧结。砖坯中的晶体结构皆存在缺陷。这些晶体在温度升高到使其中质点的活动能力达到能克服周围质点的作用力时，就会发生扩散。由于质点扩散作用而使互相接触的同晶体或异晶体间进行固相反应，使晶体长大或形成新的晶体。最后经较充分的再结晶和聚

集再结晶作用，使晶体长大和结合而烧结。

微小晶粒的晶格缺陷多，比表面较高，随温度的提高，固相反应易于进行。因此，砖坯中粉粒愈细，其所占比例愈大，并互相充分接触，愈有利于砖坯的烧结。

这种固相反应对由较纯原料组成的高级耐火材料的烧结具有重要的实际意义。

(2) 液相烧结。当温度升高到一定程度时，原料中的杂质或砖坯中其他组分，可共同作用形成液相。此种液相可将砖坯中的晶体润湿。在晶体之间，由于表面张力的作用，能使其互相靠近，并填充于砖坯的孔隙中，从而使其致密度提高。

液相的存在有助于减缓砖坯内因受热不均或新相形成或晶相转化可能产生的内应力。此外，液相的存在可使砖坯内溶解度较大的、细小的和缺陷较多的晶体溶于其中，并使其重结晶由液相中析出。

总之，液相的存在有助于砖坯的烧结。此种烧结作用称为液相烧结。液相烧结作用与液相的性质和数量有关。一般而论，液相黏度低和数量多有利于液相烧结。普通耐火材料的烧结多是由此种烧结完成的，但液相黏度低、数量多对制品的高温性能危害很大。因此，优质耐火制品应严格控制液相生成量。

耐火制品的烧成制度，即升温速率、最高温度、保温时间、冷却速率以及气氛等，影响制品内物相组成和组织结构，从而对制品的性质影响极大。应根据砖坯在高温下可能发生的化学和物理变化及变化速率与程度，如各组分间发生何种化学反应和伴有何种附加效应，及其在变化中可能产生的内应力，以及砖坯在烧成过程中的强度等情况，采取相应的方法与制度。此外，也应与制品的形状和尺寸相适应。

耐火材料的烧成通常在隧道窑和间歇式室窑中进行。前者生产效率及热效率较高；后者工艺灵活，适应性强。在确定烧成制度时应考虑窑炉构造及热工特点。

1.2.7 非烧结制品的生产特点

(1) 不烧砖的生产。不烧砖是不经烧成而能直接使用的耐火制品。其他生产工艺与烧成制品基本相同，只是不烧砖中各种粒状料和粉状料的结合，不是由物料经高温烧结完成的，而主要是靠加入的化学结合剂的作用实现的。因此也称之为化学结合耐火砖。

(2) 不定形耐火材料的生产。不定形耐火材料是由合理级配的粒状料和粉状料同结合剂或再加少量增塑剂、促硬剂或缓硬剂及其他外加剂等，按一定比例共同混合的不经成型和烧成而直接供使用的耐火材料。此种材料的生产工艺，以各种原料的配制并使其均化为中心环节。当以这种混合料筑成构筑物时，施工方法与技术对构筑物的性能影响很大。应根据不定形耐火材料混合料的工艺特性，采用相应的施工方法。

(3) 熔铸耐火制品的生产。将耐火原料在电炉中经高温熔化，并向模型中浇注，再经凝固退火而制成熔铸耐火制品。熔化的方法有还原熔融法和氧化熔融法。

1.3 耐火材料的主要用途与要求

1.3.1 耐火材料应用的主要领域

耐火材料是高温技术领域的基础材料，应用范围十分广泛，其中应用最为普遍的是在各