



TOHELM
天汇磨介

陶瓷研磨体应用技术

陈绍龙 王峰 宋南京 编著

山东天汇研磨耐磨技术开发有限公司
水泥行业粉磨系统陶瓷研磨体专业生产商与服务商



中国建材工业出版社

陶瓷研磨体应用技术

陈绍龙 王 峰 宋南京 编著

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

陶瓷研磨体应用技术 / 陈绍龙, 王峰, 宋南京编著.

—北京: 中国建材工业出版社, 2016. 11

ISBN 978-7-5160-1681-7

I. ①陶… II. ①陈… ②王… ③宋… III. ①陶瓷—研磨体—应用—水泥—制备—研究 IV. ①TQ172.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 253633 号

内 容 简 介

陶瓷研磨体, 俗称“陶瓷球”, 在白水泥和彩色水泥生产中应用多年。近年来, 部分院校和企业出于节能降耗的目的, 在通用硅酸盐水泥粉磨系统, 进行了利用陶瓷球代替钢球、钢锻的系列研究与开发, 取得了明显的节电效果。

由于各种原因, 陶瓷球应用技术还没有被大多数水泥企业认可, 由此带来的一些问题, 在认识上仍显不足。过多的“破球”和“减产”, 不仅给水泥企业带来经济损失, 而且使其对陶瓷球应用的可行性产生质疑。

为了进一步指导水泥企业正确使用陶瓷球, 实现节能降耗目的, 本书集“知识系统性、原理先进性、技术适用性、技能可操作性”于一体, 深入浅出, 简明扼要地解析了陶瓷球应用中常见的技术难题。

本书适合水泥粉磨车间生产工人、技术管理人员以及陶瓷球生产企业营销人员学习阅读, 也可以作为相关院校师生理论联系实际的参考用书。

陶瓷研磨体应用技术

陈绍龙 王 峰 宋南京 编著

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市海淀区三里河路 1 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm

印 张: 8

字 数: 140 千字

版 次: 2016 年 11 月第 1 版

印 次: 2016 年 11 月第 1 次

定 价: 49.80 元

本社网址: www.jcbs.com 微信公众号: zgjcgycbs

广告经营许可证号: 京海工商广字第 8293 号

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

序

水泥粉磨中的节能是一个永恒的话题。

在现代水泥生产过程中，粉磨工序能耗主要体现在生料制备、煤粉制备和水泥粉磨三个环节，其电量消耗约占水泥生产综合电耗的 70%。国家标准 GB 16780—2012《水泥单位产品能源消耗限值》要求水泥系统粉磨电耗 32kWh/t，以粉磨 P·O 42.5 级水泥为例，现阶段国内许多优势企业水泥粉磨系统电耗实际值已达到 28kWh/t 以下，已为国际先进水平，这主要得益于利用高效节能的辊压机联合粉磨工艺系统。研究表明：在辊压机联合粉磨工艺系统中，辊压机电耗约占 14%，选粉机等其他辅机电耗约占 15%，而球磨机电耗占 71%。可见，球磨机仍是耗电的主要设备。而水泥粉磨系统电耗大幅下降主要是因为采用辊压机后带来的系统产量显著提高。也正因为如此，水泥专家们除了注重节能高效的粉磨装备和新的工艺系统研发外，在粉磨装备的结构改进和新材料的应用方面也不断地探索，这就有了本书的主题——陶瓷球以及陶瓷球在球磨机中用于水泥粉磨的应用尝试。

本人有过从事水泥行业粉磨技术研究二十多年的经历，从 2005 年调到中国水泥协会工作后，已离开研究岗位十多年了，关注水泥企业粉磨技术进展也是自己业务的本能和情感的延续。正可能是这个原因，作者邀我写这本书的序言。说实话，今天我已不能以一个粉磨专家的身份来谈书的技术内容，行业内公认的知名粉磨技术专家人数众多。我只能站在行业管理的角度对这本书的出版谈一些个人观点。

球磨机内的研磨体，传统做法采用的是钢球，其材质多数是以铬系合金材料为主。用陶瓷球替代钢球来粉磨水泥是一种大胆尝试，其出发点是通过新材料的应用达到降低球磨机粉磨电耗。在这本书写作之前，一批专家和水泥企业合作，已经在陶瓷球应用方面取得了许多成果。陶瓷球是否可全面取代钢球来粉磨水泥还必须有一个完善提高的过程，但这种探索的科学精神是值得我们赞许的。

中国水泥行业的未来发展关键取决于我们的创新能力，在技术创新、管理创新、体系创新中技术创新是关键。我想，陶瓷球用于水泥粉磨的想法一旦成为完全可行的技术，那对世界水泥工业发展也是不小的贡献。

这本技术专著的出版使人欣慰之处在于，过去我们水泥行业技术研发中多数

只注重获取科技成果，很少关注成果本身的理论研究。我几乎参加过行业内绝大多数的技术成果鉴定，在多数鉴定材料中，写技术应用内容的多，对核心技术的理论研究内容多数显得苍白。这是我愿意为这本专著写序言的本意，虽然书中所谈技术还有待完善提高。

中国水泥协会常务副会长

Handwritten signature of Kong Xianzhong in black ink.

2016年10月1日于北京

前 言

近年来,部分水泥企业出于节能降耗的目的,进行了利用陶瓷研磨体及陶瓷衬板代替钢球、铸钢衬板等系列研究,初步取得了一些效果。但由于各方面的原因,这项研究至今还没有一个系统的研究成果发表,其科研也大多局限于个别水泥企业和陶瓷球生产企业,尽管在理论上或部分水泥企业的应用中证实,陶瓷球在水泥粉磨系统中应用能够实现明显的节电效果,但对由此带来的一些实际问题,在认识上仍显不足。

为满足广大水泥生产企业及陶瓷行业员工对水泥工业用陶瓷研磨体技术的了解,以促进企业在各自的生产过程中进一步创新,推进供给侧结构性改革,加快走“资源节约型、环境友好型”的新型工业化道路,我们认真总结了从事陶瓷球研发与推广应用的经验,在国内首次全面、系统地介绍陶瓷研磨体在水泥工业粉磨节能工作中的应用技术。

本书的主要内容包括:氧化铝耐磨陶瓷球的生产工艺技术、水泥粉磨工艺及设备基本知识、陶瓷球在通用硅酸盐水泥中的应用技术、氧化铝耐磨陶瓷球的质量标准;并列举了大量水泥企业(集团)应用陶瓷球的实际案例等,以利于读者在结合本企业水泥生产现状、解决陶瓷球应用的具体技术问题时借鉴与参考,同时对于陶瓷球行业研发新产品、规范生产与服务提供指导性的帮助。本书以大量翔实的资料和试验数据为依托,力求原理明确、通俗易懂、具有可操作性。本书适合于水泥企业生产技术人员、陶瓷企业营销人员以及相关专业院校师生阅读参考。

本书的编写,在中国水泥协会技术中心的指导下,得到了山东天汇研磨耐磨技术开发有限公司总经理尹方勇、中国建材咸阳陶瓷设计研究院教授级高工阎蛇民、齐鲁工业大学沈建兴教授、山东宏艺科技股份有限公司董事长赵洪义研究员的关心和支持,并受到了水泥行业和陶瓷行业同仁们的热情关注以及相关企业的鼎力相助,在此一并表示诚挚的感谢!由于笔者水平所限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评和指正。

编著者

2016年9月

特别鸣谢

山东天汇研磨耐磨技术开发有限公司

中国建材咸阳陶瓷设计研究院

齐鲁工业大学

山东宏艺科技股份有限公司

目 录

第一章 陶瓷球生产工艺技术	1
第一节 概述	1
一、我国陶瓷工业发展简史	1
二、工业陶瓷分类及其应用	2
第二节 耐磨氧化铝陶瓷球生产工艺技术	6
一、陶瓷球原料及坯料制备	6
二、陶瓷球生产工艺	7
三、氧化铝陶瓷球产品质量标准	13
第二章 水泥粉磨工艺及设备	20
第一节 水泥粉磨工艺流程	20
一、水泥粉磨工艺简介	20
二、开路粉磨系统	25
三、闭路粉磨系统	26
四、水泥粉磨系统综合评析	26
第二节 水泥粉磨工艺设备	30
一、辊压机	30
二、V 型选粉机	33
三、O-Sepa 选粉机	35
四、立式磨	38
五、球磨机	41
第三章 钢球、钢锻级配方案的设计与调整	54
第一节 钢球、钢锻级配方案设计原则	54
一、研磨体基本知识	54
二、研磨体（钢球、钢锻）级配设计原则	60
第二节 钢球、钢锻级配方案的检验与调整	62
一、根据磨机产量和出磨物料细度变化进行检验与调整	62
二、根据“听磨音”或磨机负荷检测进行检验与调整	62
三、根据磨内研磨体与物料的填充情况进行检验与调整	63
四、根据绘制磨内筛析曲线进行检验与调整	63

五、级配调整中的注意事项 65

第三节 钢球、钢锻级配方案设计实例..... 65

一、原始数据 65

二、参考同类企业生产数据 65

三、本厂实际生产数据 65

四、研磨体级配设计计算 66

第四章 陶瓷球在通用硅酸盐水泥中的应用技术 67

第一节 陶瓷球与钢球的差异性 67

一、通用硅酸盐水泥粉磨用陶瓷球 67

二、小磨试验 69

三、大磨试验 71

四、试验故障分析及结论 83

第二节 陶瓷球在水泥粉磨中的应用技术..... 85

一、水泥粉磨系统及其工艺参数的选择 85

二、陶瓷球级配设计原则 86

三、陶瓷球与钢球配合使用注意事项 87

第三节 陶瓷球应用实例 88

一、辊压机—球磨机联合粉磨系统 88

二、其他球磨机粉磨系统 92

三、陶瓷球应用技术经济效益分析 103

附录一 《耐磨氧化铝球》JC/T 848.1—2010（摘要） 106

附录二 《建材工业用铬合金铸造磨球》JC/T 533—2004（摘要） 113

参考文献 120

第一章 陶瓷球生产工艺技术

第一节 概 述

一、我国陶瓷工业发展简史

说到陶瓷，我们首先想到的便是：光滑、精美、细腻、剔透，似乎很难用几个简单的形容词来描绘它。陶瓷是用天然和人工合成的粉状化合物，经过成型和高温烧结而成的、由金属和非金属元素的无机化合物构成的多相（晶相、玻璃相、气孔等）固体材料。陶瓷是陶器和瓷器的总称。

陶瓷的传统概念是指所有以黏土等无机非金属矿物为原料的人工工业产品。它包括由黏土或含有黏土的混合物经混炼、成形、煅烧而制成的各种制品，由最粗糙的土器、细陶器、炆器到精细的瓷器都属于它的范围。它的主要原料是取之于自然界的硅酸盐矿物（如黏土、石英等），因此，陶瓷与水泥、玻璃、搪瓷、耐火材料等工业，同属于无机非金属材料“硅酸盐工业”范畴。

陶器与瓷器的区别在于原料土质的不同及烧结温度的不同。一般来说，在制陶的温度基础上再添火加温，陶就变成了瓷。陶器的烧制温度在 $800\sim 1000^{\circ}\text{C}$ ，瓷器则是用高岭土在 $1300\sim 1400^{\circ}\text{C}$ 的温度下烧制而成。陶瓷制品的品种繁多，它们之间的化学成分、矿物组成、物理性质以及制造方法，相互接近、交错，无明显界限，而在应用上却有较大区别。

在我国，制陶技艺的产生，可追溯到公元前 4500 年至公元前 2500 年的时代，陶瓷发展史是中华民族历史中重要组成部分之一，享誉全球。在英文中“瓷器”（china）与“中国”（China）同为一词。在我国科学技术上的成果以及对美的追求与塑造，在许多方面都通过陶瓷制作来体现，并形成各时代非常典型的技术与艺术特征。

距今约 7000 年，在新石器时期，我国就有了陶器，在距今 6000 年的仰韶文化时期发展为彩陶；距今 4000 年的龙山文化时期以黑陶为主要产品；公元前 16 世纪的殷、周时代，发明了釉料，创造了釉陶；到公元 25~220 年东汉时期，原始瓷器质量实现了飞跃，生产出成熟的瓷器——青瓷；公元 618~907 年年出现了著名的越窑、青窑和邢窑的白瓷，还有变化多端的“唐三彩”；公元 906~1279 年的宋代

是我国瓷器生产蓬勃发展的时期，定窑、汝窑、官窑、哥窑、钧窑五大陶瓷窑闻名于世；从公元 1368~1661 年的明代开始，以江西景德镇为代表的陶瓷釉色由单彩向多彩方向发展。

新中国成立后，从 1950 年开始，我国的陶瓷工业得到了恢复和发展，各种陶瓷产品的产量和质量迅速增加和提高。特别是近十几年来，我国陶瓷产品品种之多、规模之大、发展速度之快，都超过了历史上任何一个时期。改革开放以来，我国对国外的先进生产工艺、技术装备，不断地引进、消化、吸收，实现了原料加工机械化，生产控制自动化。成型与干燥线联动、定向集中气流强化干燥、远红外线干燥、微波干燥等新技术基本普及；隧道窑、梭式窑、辊道窑等新型节能窑炉广泛应用，新工艺、新设备、新技术不断涌现，使我国陶瓷工业迅猛发展。陶瓷材料和产品应用领域越来越多，如功能陶瓷、结构陶瓷、生物陶瓷、电子陶瓷等先进陶瓷，作为新型材料成为国家高科技发展不可或缺的资源供给侧。

21 世纪以来，科学技术的高速度发展，对陶瓷工艺的技术进步提出了新的挑战。尽管陶瓷中的玻璃相使其变得坚硬致密，然而也正是它妨碍了陶瓷强度的进一步提高。同时，玻璃相也是陶瓷绝缘性能、特别是高频绝缘性能差的根源。随着陶瓷制造工艺的不断改进，特别是对陶瓷烧结过程、显微结构的深入研究，人们已制造出玻璃相含量甚低、几乎不含玻璃相，而由许多微小晶粒结合成的结构态陶瓷，高科技的微晶陶瓷，实现了我国陶瓷工业技术进步从传统陶瓷到先进陶瓷的飞跃。

先进陶瓷材料是指以精制高纯人工合成的无机化合物为原料，采用精密控制的工艺，经烧结而制得的陶瓷材料，具有高强度、高硬度、耐磨损、耐腐蚀、耐高温及声、光、电、磁等优异性能，而区别于传统陶瓷（日用陶瓷、建筑卫生陶瓷等），亦称为高技术陶瓷、精细陶瓷、精密陶瓷、现代技术陶瓷、工业陶瓷、特种陶瓷等。无论从材料本身性能或材料所采用的制备技术来看，先进陶瓷材料已成为陶瓷科学和材料工程领域里非常活跃、极富挑战性的前沿研究学科，微晶氧化铝陶瓷成为先进陶瓷中异军突起的重要材料之一。

二、工业陶瓷分类及其应用

（一）陶瓷分类

1. 按用途的不同，陶瓷可分为三大类。

（1）日用陶瓷：如餐具、茶具、缸、坛、盆、罐、盘、碟、碗等；

（2）艺术陶瓷：如花瓶、雕塑品、园林陶瓷、器皿、陈设品等；

(3) 工业陶瓷：指应用于各种工业的陶瓷制品。

2. 按产品材质致密程度，陶瓷可分为：

(1) 粗陶：用含沙量、含铁量比较多的陶泥烧制的陶器，如花盆、茶具等；

(2) 细陶：材质较细腻，经素烧、施釉的陶器，如内墙釉面砖等；

(3) 炻器：原料常用含较多伊利石类黏土。坯体易于致密烧结，吸水率一般在6%以下，不透明，无釉，也不透水。质地致密坚硬，跟瓷器相似，多为棕色、黄褐色或灰蓝色；如：砂锅、水缸和耐酸制品等；

(4) 半瓷器：包括瓷炻质器、细炻质器和炻质器。这三类制品的吸水率介于瓷和陶之间，其性能也在二者之间。瓷炻质器的吸水率为0.5%~3%，由于有较小的吸水率，制品机械强度高，抗冻性好，吸湿膨胀低，施釉后可作为人流较多地方的铺地材料和寒冷地区的外墙铺贴。吸水率为0.5%~6%的彩色釉面墙地砖、施釉瓷质砖和TB 6952规定的吸水率 $\leq 1\%$ 的卫生陶瓷均属此类陶瓷。

(5) 瓷器：由瓷石、高岭土、石英石、莫来石等烧制而成，外表施有玻璃质釉或彩绘的物器。瓷器的成形要通过在窑内经过高温（约1280~1400℃）烧制，瓷器表面的釉色会因为温度的不同发生各种化学变化。烧结的瓷器含铁 $\leq 3\%$ ，且不透水，用以制造高级日用器皿如电瓷、化学瓷等。

这样分类的特点是：材料及制品的原料是从粗到精；坯体是从粗松多孔逐步到达致密；烧结过程中，温度也是逐渐从低趋高。

粗陶是最原始最低级的陶瓷器，一般以一种易熔黏土制造。在某些情况下也可以在黏土中加入熟料或砂与之混合，以减少收缩。这些制品的烧成温度变动很大，要依据黏土的化学组成所含杂质的性质与多少而定。以其制造砖瓦，如气孔率过高，则坯体的抗冻性能不好，过低又不易挂住砂浆，所以吸水率一般要保持在5%~15%之间。烧成后坯体的颜色，决定于黏土中着色氧化物的含量和烧成气氛，在氧化焰中烧成多呈黄色或红色，在还原焰中烧成则多呈青色或黑色。

精陶按坯体组成的不同，又可分为黏土质、石灰质，长石质、熟料质等四种。黏土质精陶接近普通陶器。石灰质精陶以石灰石为熔剂，其制造过程与长石质精陶相似，而质量不及长石质精陶，因此近年来已很少生产，而为长石质精陶所取代。长石质精陶又称硬质精陶，以长石为熔剂，是陶器中最完美和使用最广的一种，近年来很多国家用以大量生产日用餐具（杯、碟盘等）及卫生陶器以代替昂贵的瓷器。

瓷器是陶器发展的更高阶段。它的特征是坯体已完全烧结，完全玻璃化，因此很致密，对液体和气体都无渗透性，胎薄处呈半透明，断面呈贝壳状，以舌头去

舔,感到光滑而不被粘住。硬质瓷具有陶瓷器中最好的性能。

(二) 工业陶瓷分类

1. 工业陶瓷分类

工业陶瓷可分为普通陶瓷和特种陶瓷两大类,它区别于其他工业造型材料的特点是:陶瓷结构中,离子键和共价键是主要的结合键,键的性质与材料结构和性质有密切关系。

(1) 普通陶瓷又称传统陶瓷,一般是指日用陶瓷、建筑陶瓷、卫生陶瓷、电工陶瓷、化工陶瓷等。普通陶瓷是用天然硅酸盐矿物,如黏土、长石、石英、高岭土等为原料烧结而成。其中建筑卫生陶瓷,主要用于建筑物饰面、建筑构件和卫生设施的陶瓷制品。它包括了各种陶瓷墙砖、地砖、琉璃制品、饰面瓦、陶管和各种卫生间用的陶瓷器具及配件。

(2) 特种陶瓷又称现代陶瓷,是采用纯度较高的人工合成原料,如氧化物、硅化物、硼化物、氟化物等制成,具有特殊的力学、物理、化学性能。

特种瓷种类很多,多以各种氧化物为主体;如高铝质瓷,它是以氧化铝为主;镁质瓷,以氧化镁为主;滑石质瓷,以滑石为主;铍质瓷,以氧化铍或绿柱石为主;锆质瓷,以氧化锆为主;钛质瓷,以氧化钛为主。

特种陶瓷按性能不同,又可分为高强度陶瓷、高温陶瓷、压电陶瓷、磁性陶瓷、绝缘陶瓷、导电陶瓷、半导体陶瓷、生物陶瓷、光学陶瓷(光导纤维、激光材料等)等;

如果按化学组成不同,又可分为氧化物陶瓷、氮化物陶瓷、碳化物陶瓷、复合陶瓷、纤维增强陶瓷、金属陶瓷(硬质合金)等。

本书介绍的通用硅酸盐水泥用研磨体,主要是微晶氧化铝耐磨陶瓷球,属于高强度陶瓷和氧化物陶瓷。

2. 重点工业陶瓷的特征与用途

(1) 普通陶瓷

普通陶瓷是指黏土类原料为主的陶瓷,由黏土、长石、石英配比烧制而成,其性能取决于三种原料的纯度、粒度与比例。一般质地坚硬、耐腐蚀、不氧化、不导电,能耐一定的高温且加工成形性好。

工业上普通陶瓷主要用于绝缘用的电瓷、对酸碱要求较高的化学瓷、承载要求较低的结构零件用瓷等,如绝缘子、耐腐蚀容器、管道及日常生活中的装饰瓷、餐具等。

(2) 氧化铝陶瓷

该陶瓷是以 Al_2O_3 为主要成分的陶瓷, 根据瓷坯中主晶相的不同, 可分为三种类型: 刚玉瓷、刚玉-莫来石瓷和莫来石瓷等; 也可按 Al_2O_3 的质量分数分成 75 瓷、95 瓷和 99 瓷等。

氧化铝瓷熔点高、硬度高、强度高, 且具有良好的抗化学腐蚀能力和介质介电性能。但脆性大、抗冲击性能和抗热震性差, 不能承受环境温度的剧烈变化。可用于制造高温炉的炉管、炉衬、内燃机的火花塞等, 还可制造高硬度的切削刀具、粉磨设备(湿法球磨机)的研磨体, 又是制造热电偶绝缘套管的良好材料。从 2014 年底开始, 在国内新型干法水泥生产线球磨机水泥粉磨系统进行试用, 节电效果明显, 至今已逐步推广应用。另外, 在水泥厂风机叶轮、物料料斗、溜管、溜槽、窑尾预热器、除尘管道、增湿塔进出口管道等, 作为耐磨、耐蚀衬里, 延长管道、部件使用寿命, 也广泛被采用。

(3) 氮化硅陶瓷

氮化硅陶瓷具有自润滑性, 摩擦系数小, 耐磨性好, 而且化学性能稳定, 具有优良的抗高温性能, 即使在 1200°C 下工作强度仍不降低。

氮化硅陶瓷抗震性是氧化铝陶瓷和任何其他陶瓷材料所不能比拟的, 可用于制造耐磨、耐腐蚀的泵和阀、高温轴承、燃气轮机的转子叶片及金属切削工具等, 也是测量铝液的热电偶套管的理想材料。

(4) 碳化硅陶瓷

碳化硅陶瓷的最大特点是耐高温性能强, 具有很高的热传导能力, 耐磨、耐蚀、抗蠕变性能高, 常被用做国防、宇航等科技领域中的高温烧结材料, 即用于制造火箭尾喷管的喷嘴、浇注金属用的喉嘴及热电偶套管、炉管等高温零件。

由于热传导能力高, 还可用于制造汽轮机的叶片、轴承等高温强度零件, 以及用做高温热交换器的材料、核燃料的包封材料等。

(5) 氮化硼陶瓷

氮化硼陶瓷有六方氮化硼和立方氮化硼两种。六方氮化硼具有良好的耐热性, 导热系数与不锈钢相当, 热稳定性好, 在 200°C 时仍然是绝缘体。

六方氮化硼还具有硬度低、自润滑性好的优点, 可用做热电偶套管、半导体散热绝缘零件、高温轴承、玻璃制品成形模具等材料。

立方氮化硼的硬度与金刚石相近, 是优良的耐磨材料, 可用于制作磨料和金属切削刀具。

第二节 耐磨氧化铝陶瓷球生产工艺技术

一、陶瓷球原料及坯料制备

1. 微晶氧化铝陶瓷及其分类

氧化铝具有多种晶体结构,大部分是氢氧化铝脱水转变为稳定结构的 α - Al_2O_3 时所产生的中间相,其结构具不完整性,在高温下具不稳定性,最后变为 α - Al_2O_3 。据文献报道有 α 、 β 、 γ 、 δ 、 ϵ 、 η 、 θ 、 λ 等以及无定型氧化铝12种晶型,最常见的是 α - Al_2O_3 、 β - Al_2O_3 、 γ - Al_2O_3 三种晶型。微晶氧化铝陶瓷是指以高纯 α - Al_2O_3 为主要原料,以各种陶瓷工艺制成的晶相晶粒尺寸小于 $6\mu\text{m}$ 并以刚玉为主要晶相的陶瓷材料。

微晶氧化铝陶瓷通常可分为高纯型和普通型两种。高纯型微晶氧化铝陶瓷是指 Al_2O_3 含量在99.9%以上的陶瓷材料,其烧结温度达到 $1650\sim 1990^\circ\text{C}$,投射波长在 $1\sim 6\mu\text{m}$ 之间,利用其透光性及耐碱金属腐蚀等性能,可做高压钠灯灯管。普通型微晶氧化铝陶瓷按 Al_2O_3 含量不同,可分为99、95、92、90、85瓷等品种,其主要作用是制造耐磨、耐腐蚀材料和部件,可用于球磨机的陶瓷研磨体和陶瓷衬板。

2. 氧化铝粉体原料

作为陶瓷原料主要成分之一的氧化铝,在地壳中含量非常丰富,在岩石中平均含量为15.34%,是自然界仅次于 SiO_2 存量的氧化物。一般应用于陶瓷工业的氧化铝原料有两大类:一类是工业氧化铝,一类是电容刚玉。

(1) 工业氧化铝

工业氧化铝一般以含铝最高的天然铝土矿(由铝的氢氧化物,如一水硬铝石、一水软铝石、三水铝石等氧化铝的水化物组成)为原料,通过化学法(多采用拜尔—碱石灰法)处理,除去硅、铁、钛等杂质,制备出氢氧化铝,再经煅烧而得。其矿物成分绝大部分是 γ - Al_2O_3 。工业氧化铝是白色松散的结晶粉状物料,由许多粒径小于 $0.1\mu\text{m}$ 的 γ - Al_2O_3 晶体组成的多孔球形聚集体。其孔隙率约为30%,平均颗粒粒径为 $40\sim 70\mu\text{m}$ 。工业氧化铝的三项主要杂质中, Na_2O 和 Fe_2O_3 会降低氧化铝瓷件的电性能,所以, Na_2O 含量应控制在0.5%~0.6%,而 Fe_2O_3 含量应小于0.04%。另外,在电真空瓷件中,工业氧化铝不得含有氯化物和氟化物,否则会侵蚀电真空装置。

(2) 电容刚玉

电容刚玉是以工业氧化铝或富含铝的原料在电弧炉中熔融，再缓慢冷却，使晶体析晶出来，其 Al_2O_3 含量可达 99% 以上， Na_2O 含量可减少到 0.1%~0.3%；常见电容刚玉的矿物组成主要是 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ，纯正的电容刚玉呈白色，俗称“白刚玉”。熔制时加入氧化铬，可制成红色的铬刚玉；若加入氧化锆，可制成锆刚玉；电容刚玉中含有 TiO_2 ，则称“钛钢玉”。这一系列的电容刚玉，由于熔点高、硬度大，是制造高级耐火材料、高硬磨具磨料的优质原料。

二、陶瓷球生产工艺

（一）陶瓷球加工工艺流程

陶瓷球的加工工艺流程见图 1-1。



图 1-1 陶瓷球加工工艺流程图

微晶氧化铝陶瓷材料的制备工艺流程如下：

原料配料→研磨加工→制粉→成型（半干压、滚制、等静压）→干燥→烧成→
检选（冷加工）→包装入库→出厂

1. 粉料制备

陶瓷体在成型前以粉体形式存在，是大量固体粒子的集合系。粉体粒度、粒度分布与表面特性等对随后所制成陶瓷烧结体的性能具有极大的影响。获得陶瓷粉体的方法如下：

（1）粉碎法

将团块颗粒陶瓷用机械或气流粉碎而获得细粉。机械法是将物料置于球磨机中不停地回转，靠球磨机中的磨球与物料相互撞击被粉碎成细颗粒状。气流法是将物料导入粉碎机内部并通过喷嘴通入压缩空气使物料形成粉碎状，物料互相碰撞、摩擦而细化。

将合格的高温氧化铝粉料根据产品性能的要求与成型工艺的特点，按配方配料后，经研磨设备（球磨机、搅拌磨等）加工至要求的细度，制备出合格的坯用粉料。采用半自动或全自动干压成型，有一定的工艺参数要求，需要采用喷雾造粒法对粉料进行处理（粉料应呈球形颗粒），以利于提高粉料的流动性，便于在成型中自动充填模壁。另外，为了减少粉料对模壁的摩擦，还需添加 1%~2% 的润滑剂（如：硬脂酸铝）及粘结剂 PVA。喷雾造粒后的粉料，必须具备流动性好、密度松

散、颗粒组成合理等条件,以获得较大的素坯密度。采用挤压成型或注射成型时,粉料中需引入粘结剂与可塑剂,有机粘结剂应与氧化铝粉体混合均匀,以利于成型操作。采用热压铸工艺成型时,不可加入粘结剂。

(2) 合成法

由离子、原子和分子通过反应、成核和成长、收集、后处理而获得微细颗粒。该法制取的粉料纯度高、粒度小而均匀。合成法有固相法、液相法和气相法三种。

2. 成型

陶瓷成型技术是将陶瓷粉体转变成具有一定形状、体积和强度的坯体的过程。氧化铝陶瓷制品成型方法常采用干压法、注浆法、挤出法、等静压法(干法、湿法)、热压铸法等。不同的产品因其形状、尺寸、造型复杂与精度各异,需要采用适合具体要求与操作的成型方法。本书重点介绍微晶氧化铝陶瓷球的等静压成型法。

陶瓷球球坯成型的方法常见的有滚制成型和压制成型,后者包括干压法成型和等静压成型。它们的共同特点是都采用干粉料,在粉料中只含有很少的水分或有机粘结剂。

(1) 干压法成型

干压法是一种最简单、最直观的成型方法。只要将经过造粒、流动性好的粉料,倒入球形钢模内,通过模塞施加压力,便可将粉料压制成球形坯体。一般情况下,干压法可以得到比较理想的坯体密度。由于干压成型的坯体比较密实,尺寸比较精确,烧成后收缩较小,所以其机械强度较高。但是该法的致命缺点是:它的加压方向只限于一个方向(上、下或上下同时加压),缺乏侧向压力,压成的陶瓷球坯体结构具有明显的各向异性,烧结时侧向收缩大,机械电气性能也远非各向均匀。

(2) 等静压成型

等静压成型是针对干压法制造的毛坯球结构和强度各向异性这一问题而发展起来的。该法通过液体内压力使毛坯球得到均匀的各向加压:将预压好的粉料坯体,包封于弹性的塑料或橡皮胶套内,置入一个能承受高压作用的钢筒中,用高压泵把流体介质(气体或液体)压入筒体,高压流体的静压力直接作用在弹性模套内的粉状物料上,粉料在同一时间、各个方向上,均衡地受到同等大小的压力。

等静压成型过程由以下工序构成:初期成型压力较小,粉体颗粒迁移和重新堆积;中期压力提高,粉体局部流动和碎化;后期压力最大,粉体体积压缩,排出气孔,达到致密化阶段,而获得密度分布均匀和强度较高的压坯。等静压成型对模具