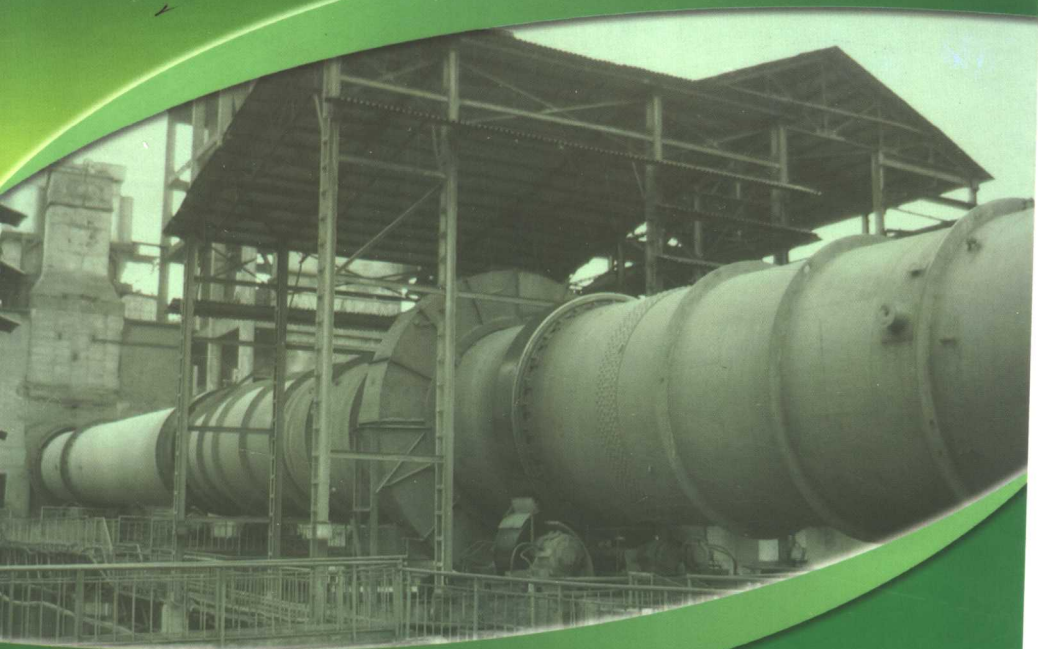


回转窑

健康维护理论与技术



回转窑健康维护理论与技术

李学军 刘义伦 陈安华 编著



机械工业出版社

内 容 简 介

回转窑是一种重载、大转矩、多支点、超静定运行系统，是冶金、化工、建材等行业生产流程中的核心设备，一次停窑事故将引起整个生产流程的中断，造成重大经济损失。本书面向工程应用，重点研究了回转窑运行轴线与其托轮支承力、窑体轴向运动、主体部件强度和寿命以及产品质量等的关系。全书针对回转窑运行中发生的机械故障与安全事故，系统地论述了实施回转窑设备健康维护的理论与方法，详细地介绍了回转窑支承载荷分配建模、主体部件应力分布、轴向运动调控、健康维护策略与建模，调窑参数优化、健康维护检测技术及回转窑健康维护信息管理系统。

本书对水泥、冶金、化工、建材与环保等行业中，从事回转窑设备管理与维护的工程技术人员，是一本有较大指导作用或参考价值的书籍；也是高校教师、研究生和相关的研究人员从事机械系统动态监控与维护研究的重要参考著作。

图书在版编目（CIP）数据

回转窑健康维护理论与技术/李学军等编著. —北京：
机械工业出版社，2005.1
ISBN 7-111-17395-3

I. 回… II. 李… III. 回转窑-维护-研究 IV. TQ172.6

中国版本图书馆CIP数据核字（2005）第106465号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

责任编辑：杨绍臣

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005年1月第1版·2005年1月第1次印刷

定价：30.00元

前 言

回转窑是冶金、化工、建材等行业生产流程中的核心设备，一次停窑事故将引起整个生产流程的中断，造成重大经济损失。目前生产中对回转窑运行的管理与维护，采用的是一种依靠经验指导的管理与维护方式；对回转窑运行状态的调整，是通过窑的冷静态轴线测量，结合一些经验计算来进行的。存在着各档托轮受力不清楚、轴向运动不易调控、运行状态历史数据无记录、变化趋势不了解等问题，也就不能掌握回转窑何时该调整、如何最佳调整。因此对回转窑的维护理论与技术的研究具有重要意义。

近年来，作者对回转窑运行轴线及与运行状况的关系进行了系统的研究，通过研究和总结现有的应用经验，发现回转窑运行时设备的运行状态、主体部件的强度及寿命状况和产品质量等都与其运行轴线息息相关，对回转窑健康维护的研究，可以围绕其运行轴线展开。本书以形成根据回转窑健康状态实施设备维护的理论与方法为目标，对回转窑运动、受力、强度、健康状态与轴线的关系以及轴线检测、轴线调整和断轴诊断的技术方法等方面进行了系统的论述。全书把重点放在运行轴线上，着重介绍了回转窑支承载荷分配与轴线偏差的关系建模，轴向运动调控建模与方法，带约束条件的支承系统等载荷、主体部件等强度和主体部件等寿命调密优化建模及相应的优化实现方法，回转窑健康维护检测技术研究及相应的信息管理系统研制。这些理论方法和技术手段为回转窑的健康维护提供了技术保障，克服了单纯凭经验进行维护的盲目性。

写作本书是为回转窑健康维护提供理论依据，以及为研究回转窑同类机械的科技工作人员提供一本参考书。本书为便于广大现场工作人员使用参考，在结合基础理论研究 with 工程实际时，论

述通俗易懂，深入浅出。由于作者学识水平有限，书中难免存在错误与疏漏，恳望读者指教。

本书所涉及的研究工作得到了湖南省自然科学基金(04JJ30050)、湖南省教育厅重点科研计划(03A052)、湖南省科技攻关项目(01JZY2057)和湖南省制造业信息化专项(Hnmie-A-050)的资助及相应企业、湖南科技大学机械设备健康维护省重点实验室和振动、冲击与诊断研究所的大力支持，湖南科技大学著作出版基金对本书的出版给予了资助，硕士研究生宾光富、沈意平、何宽芳、张美阳和蒋玲莉承担了大量的书稿整理工作，特此一并致谢。

作者

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 回转窑概述	1
一、回转窑基本结构	1
二、回转窑应用与发展概述	7
三、我国回转窑应用与发展概述	10
第二节 回转窑轴线	11
一、回转窑轴线基本几何关系	11
二、回转窑轴线变化几何关系	12
三、回转窑轴线对运行的影响	14
第三节 回转窑健康运行的重要意义	15
第四节 回转窑运行健康状态建模	16
一、回转窑支承载荷分配计算	16
二、主体部件应力应变分析	17
三、健康状态建模	18
第五节 回转窑轴向运动分析与调控	18
一、窑体轴向下滑机理	18
二、轴向运动调控	19
第六节 回转窑运行轴线检测与调整	20
一、轴线检测技术	20
二、轴线调整	22
第二章 回转窑支承载荷分配建模	23
第一节 回转窑支承系统载荷分配问题	23
第二节 支承载荷求解通用方程组	25
一、通用求解力学模型	25
二、求解通用变形方程	28

三、求解通用方程组	31
第三节 支承系统载荷分配建模	35
一、刚度与载荷分布	35
二、支承系统载荷分配程序化求解	40
三、支承系统载荷分配模型结构	46
四、支承系统载荷分配刚度矩阵	50
第四节 托轮载荷分配通用求解	54
一、支承系统载荷分配通用求解方法	54
二、回转窑托轮力计算线性公式	60
第三章 回转窑主体部件的应力分布规律	63
第一节 有限元法与 ANSYS 概述	63
一、有限元法概述	63
二、有限元法刚度矩阵的建立	64
三、有限元软件 ANSYS 概述	67
四、Solid95 和 Shell93 单元分析	69
第二节 托轮应力分布规律	74
一、托轮有限元分析建模	74
二、托轮约束分析与加载	77
三、托轮应力分布规律	78
第三节 滚圈应力分布规律	81
一、滚圈有限元分析建模	81
二、滚圈约束分析与加载	82
三、滚圈应力分布规律	86
第四节 筒体应力分布规律	97
一、筒体有限元分析建模	97
二、筒体约束分析与加载	100
三、筒体应力分布规律	102
第四章 回转窑轴向运动调控理论	111
第一节 回转窑轴向下滑问题	111
一、滚圈与托轮接触静态力学分析	111

二、滚圈与托轮接触动态力学分析	113
三、回转窑轴向下滑弹性滑动理论	114
四、回转窑轴向下滑当量摩擦学说	117
第二节 回转窑轴向下滑接触力学机理	118
一、接触区弹性滑动分析	118
二、接触区正压力和剪切应力分布	119
三、接触区周向与轴向打滑比公式	123
四、回转窑轴向下滑速度计算与分析	126
第三节 回转窑轴向运动调控方法	128
一、轴向运动调控的必要性	128
二、轴向运动调控的一般要求	130
三、窑体上行的托轮歪斜原理	130
四、轴向运动变摩擦因数调控方法	132
第四节 回转窑轴向运动模型与调控应用	134
一、托轮歪斜对接触区应力影响	134
二、轴向运动速度模型与调控应用	140
三、回转窑轴向运动调控计算实例	144
第五章 回转窑健康维护策略与建模	146
第一节 设备维护策略与健康维护方法	146
一、设备维护策略概述	146
二、设备健康维护方法	148
第二节 回转窑健康维护策略	151
一、回转窑设备维护现状	151
二、回转窑健康维护策略	152
第三节 回转窑健康状态建模	154
一、支承轴健康状态建模	154
二、托轮健康状态建模	164
三、滚圈健康状态建模	167
第六章 回转窑调窑参数优化	173
第一节 支承系统等载荷优化	174

一、支承系统等载荷优化建模	174
二、支承系统等载荷优化应用	176
第二节 主体部件等强度优化	179
一、主体部件等强度优化建模	179
二、主体部件等强度优化应用	181
第三节 主体部件等寿命优化	184
一、主体部件等寿命优化建模	184
二、主体部件等寿命优化应用	185
第七章 回转窑健康维护检测技术	190
第一节 回转窑运行轴线检测技术	191
一、运行轴线时域分析测量法	191
二、运行轴线 45°方向键相测量法	195
三、运行轴线零位移方向键相测量法	200
第二节 回转窑托轮断轴在线检测技术	204
一、托轮轴疲劳断裂振动检测原理	204
二、托轮轴疲劳断裂振动检测应用	205
第八章 回转窑健康维护信息管理系统	209
第一节 信息管理监测系统	209
一、系统硬件	209
二、系统软件	213
二、系统功能与操作	216
第二节 信息管理便携式检测系统	229
一、系统硬件	229
二、系统软件	232
三、系统功能与操作	240
第三节 系统应用	245
参考文献	247

第一章 绪 论

第一节 回转窑概述

在建材、冶金、化工、环保等许多生产行业中，广泛地使用回转圆筒设备对固体物料进行机械、物理或化学处理，这类设备被称为回转窑。回转窑属于大型回转圆筒类设备，小角度倾斜安装，以低速回转。运行时，物料从窑的高端（又称窑尾端）加入；燃料由窑的低端（又称窑头端）喷入，烟气由高端排出；随着窑筒体的回转，窑内物料在沿周向翻滚的同时沿轴向移动；物料在移动过程中，通过与热气流的逆流换热而得到加热，经过物理与化学变化，成为合格产品从低端泄出。

一、回转窑基本结构

回转窑烧成工艺虽然种类较多，但从机械结构来看，均由筒体、窑衬、滚圈、支承装置、传动装置、燃烧器和窑头、窑尾密封装置等部分组成，回转窑基本结构实物照片及示意图如图 1-1 所示。

1. 筒体

筒体由钢板卷成圆筒，然后一段段铆接或焊接而成，是回转窑的主体部件之一。由于铆接筒体有制造工艺复杂、筒体重量大、铆钉易松动导致筒体变形、窑衬砌砖困难、窑衬稳定性差等一系列的缺点，随着焊接技术的提高及筒体卷制能力的加强，目前已不再设计制造铆接筒体。筒体由于长度长，分 2 至 9 档支承。按物料和温度的变化过程，筒体内划分为烘干带、预热带、分解带、烧成带（或反应带）、冷却带等 5 个工作带，各工作带的长度和种类随物料的化学反应及处理方法而异。

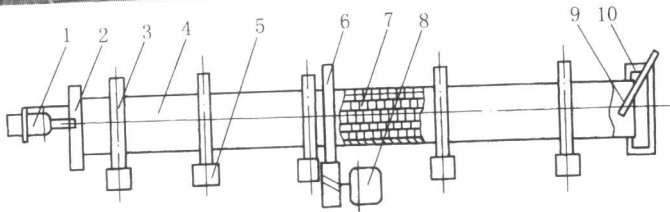
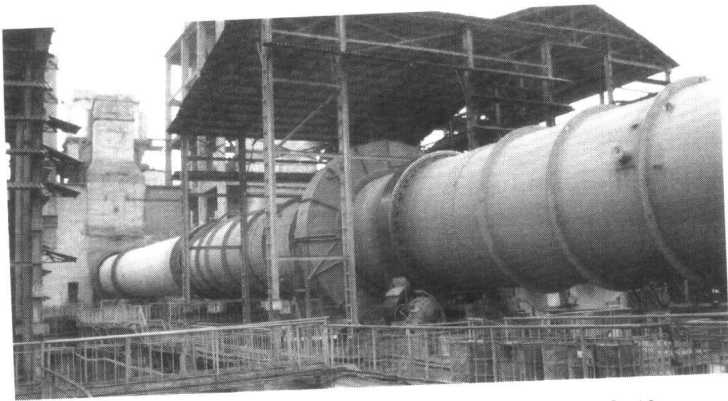


图 1-1 回转窑基本结构实物照及示意图

1. 燃烧器 2. 窑头罩 3. 滚圈 4. 筒体 5. 托轮（支承装置）
6. 大齿圈 7. 窑衬 8. 传动装置 9. 喂料管 10. 窑尾罩

筒体的强度问题表现为筒体在交变载荷作用下产生疲劳裂纹而开裂，尤其是滚圈附近的筒体存在着相当大的应力。比较理想的筒体状态应是“横刚纵柔”，即在横断面上具有较大的刚度，纵向则要有较好的柔性。因为大的径向变形使在筒体转动中产生大的振动和交变应力，导致内部衬砖的松动等，直接影响到窑的运转率。筒体的径向变形在支点处为最大，到跨中逐渐减小，衰减速度随筒体的厚度与直径的比值的增大而加快。较好的纵向柔性可以减轻筒体轴线变化引起的载荷分配不均。

2. 窑衬

筒体内物料烧结时温度可达 1450°C 以上，为保护筒体和减少散热作用，在筒体内用耐火材料砌筑有窑衬。一般窑的高温带窑衬需要经常更换，它的更换期即窑的运转周期。使用优质窑衬；

砌筑、维护好窑衬；减小筒体的截面变形防止窑衬脱落，对窑长期稳定运行起着重要作用。

3. 滚圈与垫板

滚圈为一厚圆环，在水泥窑中称之为轮带，它也是回转窑的主体部件之一。回转窑筒体、窑衬、物料等所有回转部分上千吨的载荷，要通过滚圈施加到托轮上。单个滚圈便要传递几百吨的载荷，其自重也达数十吨。滚圈按其截面形式分为矩形、箱形、剖分式和滚圈与筒体联合化。

矩形滚圈截面是实心矩形，结构是整体的，形状简单；铸造裂缝少，铸造缺陷不突出。但与重量相同的箱形滚圈比，矩形滚圈刚度小得多。箱形滚圈刚性大，有利增强筒体刚度，与矩形相比可节约材料。但截面形状复杂、尺寸大，铸造中易产生裂缝等缺陷。一般设计成如图 1-2 所示带键滚圈形式，凸出的键由两块垫板夹紧，阻止了滚圈与垫板间沿周向的相对滑动。当滚圈尺寸大、重量重时，采用将滚圈分成若干块，再用螺栓连接成整体的剖分式滚圈，以克服铸造、运输的困难。图 1-3 是四剖分式滚圈。为增强筒体刚性简化制造、安装工艺，消除松套滚圈与筒体垫板、挡板间的磨损，可采用将滚圈与筒体的短节设计成一体。如图 1-4 所示为三种结构形式的滚圈与筒体联合化。图 1-4a 所示为箱形钢板的焊接结构；图 1-4b 和图 1-4c 为整体铸钢结构。

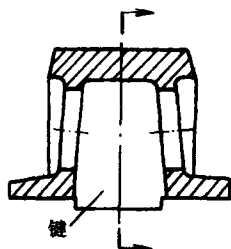


图 1-2 带键滚圈

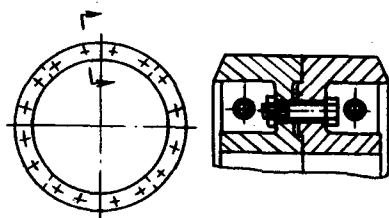


图 1-3 四剖分式滚圈

滚圈套在筒体上，分固定和活套式连接种。固定式是将筒体

的短节与滚圈焊接在一起,这种结构筒体的截面抗变形刚度较好,但由于回转窑起停时筒体和滚圈的温差变化大,产生较大热应力。活套式是将滚圈松套在筒体上,筒体和滚圈之间采用焊接式垫板来连接,目前回转窑筒体和滚圈基本上是采用活套式连接方式。

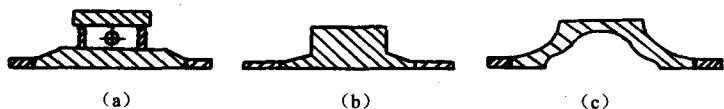


图 1-4 滚圈与筒体联合结构

滚圈活套式连接结构,垫板用来将载荷传递到滚圈上;使筒体不直接与滚圈摩擦;垫板之间的空隙增加了散热。垫板厚度一般 30mm~60mm;宽度 200mm~280mm;中心距 300mm~400mm;垫板块数根据宽度和中心距而定,覆盖整个圆周的 60%~70%。垫板两侧焊有挡板或挡圈限制滚圈与筒体之间的轴向窜动,滚圈垫板与挡板的形式如图 1-5 所示,冷态时滚圈内径与垫板外径间留有间隙。预留间隙选择要合理,间隙过小,升温时筒体热膨胀快于滚圈,将引起筒体“缩颈”现象,产生很大的热应力;间隙过大则两者相对滑动大,滚圈与垫板接触磨损大。为便于对垫板间隙作调整和更换,采用如图 1-6 所示间隙可调式垫板。

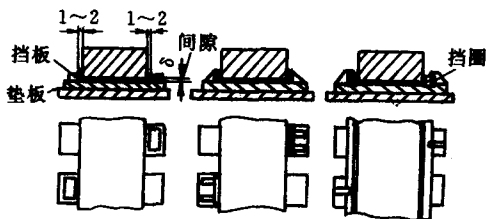


图 1-5 松套式滚圈垫板与挡板形式

4. 支承装置

支承装置的组数称为档数,一般 2~9 档。每档支承由一对托轮、托轮轴、滑动轴承和底座组成,托轮分别与垂直方向成 30°

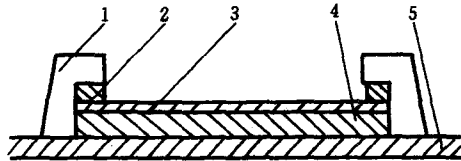


图 1-6 间隙可调式垫板

1. 挡板 2. 楔块 3. 薄垫片 4. 厚垫片 5. 筒体

夹角安装，支承截面示意图如图 1-7 所示。滚圈支承在托轮上，靠摩擦带动托轮转动。托轮既保证筒体转动，又承受巨大的载荷，是支承装置中最易损坏的部件。如在其中有一档或几档的支承装置上装有挡轮，称为带挡轮支承装置。挡轮的作用是限制或控制窑回转部分的轴向运动，挡轮分普通挡轮和液压挡轮。只带普通挡轮的回转窑要靠调整托轮位置和角度来调控窑体轴向运动，准确控制较困难；带液压挡轮的回转窑则采用压力油来调控，控制容易。我国由于液压元件制造技术较落后，目前回转窑基本上都是使用普通挡轮。

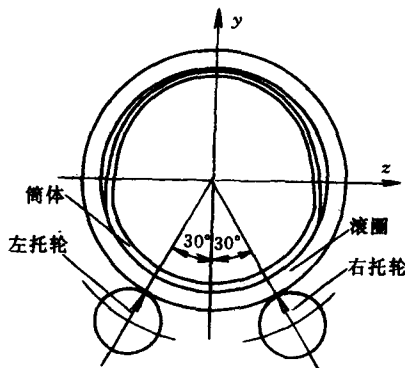


图 1-7 支承截面示意图

5. 传动装置

传动装置由电机、减速器、大齿圈等组成，大齿圈固结在筒体上，传动系统示意图如图 1-8 所示。回转窑传动的特点是速比

大，筒体转速一般为 $1.5\sim 2.5\text{r/min}$ ，高的也不超过 3r/min 。筒体的弯曲或热变形会引起齿圈振摆，导致载荷不能沿整个齿圈均匀分布，而造成齿廓的过度磨损，甚至损坏。为保证窑检修时筒体以低转速转动，还设有辅助传动装置。随着窑体的加大，传动功率亦随之加大，国外特大型窑已达 2000kW 。由于大功率，大速比减速器的设计制造困难，较大的回转窑都采用双传动。双传动除了能解决大型电动机、减速器的选型外，还有一系列优点：减轻齿圈的重量；单侧传动件发生故障时，可降低产量用另一侧继续运转；同时啮合的齿对数增加，传动更平稳。其缺点是：零部件数量增加，增加了安装和维修工作量。用直流电动机驱动双传动两侧电动机可以实现同步运行。

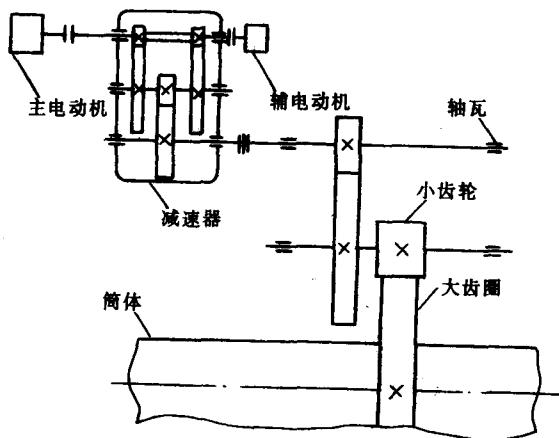


图 1-8 传动系统示意图

6. 其他装置

回转窑作为热工设备，设置换热装置，增强其换热效果，对提高产量，降低热耗至为重要。换热装置有两种：一种设在物料进窑之前，利用窑气的余热；另一种设在窑内，增强窑内的热交换。回转窑的加热设备称为燃烧器，根据不同的燃料选用喷煤管、油喷枪、煤气喷嘴等不同形式的燃烧器。燃烧器大多是通过窑头罩，

伸入窑头筒体内。当反应温度较低时，在窑头罩旁另设燃烧室，将热烟气通入窑内来供给热量。回转窑常用的燃料有煤粉、煤气、天然气和重油，根据工艺要求、当地资源及供应情况来选用。

回转窑的窑头有窑头罩，它是连接窑头端与流程中下道工序设备的中间体。在静止的窑头罩与回转的筒体间有密封装置，称窑头密封。燃烧器及燃烧所需空气经过窑头罩入窑，窑头罩上设有看火孔及检修门，是看火工进行生产操作的地点。相应地在回转窑的尾部有窑尾罩，它是连接窑尾端与物料预处理设备以及烟气处理设备的中间体，窑尾罩与筒体间有窑尾密封装置。窑的喂料装置及一些窑灰的返回溜管装设在窑尾罩上，原料和循环窑灰由此进入窑内，窑的烟气经此进入排风收尘系统。

回转窑的应用领域广泛，种类也很多。不同的回转窑，其结构也不尽相同，但对于回转窑的机体，主要还是由上述几个部分组成。

二、回转窑应用与发展概述

回转窑的应用起源于水泥生产，1824年英国水泥工J.阿斯普发明了间歇操作的土立窑；1883年德国狄茨世发明了连续操作的多层立窑；1885年英国人兰萨姆（F.Ransome）发明了回转窑，在英、美取得专利后将它投入生产，很快获得可观的经济效益。

回转窑的发明，使得水泥工业迅速发展，同时也促进了人们对回转窑应用的研究，很快回转窑被广泛应用到许多工业领域，并在这些生产中越来越重要，成为相应企业生产的核心设备。它的技术性能和运转情况，在很大程度上决定着企业产品的质量、产量和成本。“只要大窑转，就有千千万”，这句民谣就是对生产中回转窑重要程度的生动描述。

在回转窑的应用领域，水泥工业中的数量最多。水泥的整个生产工艺概括为“两磨一烧”，其中“一烧”就是把经过粉磨配制好的生料，在回转窑的高温作用下烧成为熟料的工艺过程。因此，回转窑是水泥生产中的主机，俗称水泥工厂的“心脏”。建材行业中，回转窑除煅烧水泥熟料外，还用来煅烧粘土、石灰石和进行矿渣烘干等；耐火材料生产中，采用回转窑煅烧原料，使其尺寸

稳定、强度增加，再加工成型。

有色和黑色冶金中，铁、铝、铜、锌、锡、镍、钨、铬、铍等金属以回转窑为冶炼设备，对矿石、精矿、中间物等进行烧结、焙烧。如：铝生产中用它将氢氧化铝焙烧成氧化铝；炼铁中用它生产供高炉炼铁的球团矿；国外的“SL/RN法”、“Krupp法”用它对铁矿石进行直接还原；氯化挥发焙烧法采用它提取锡和铅等。选矿过程中，用回转窑对贫铁矿进行磁化焙烧，使矿石原来的弱磁性改变为强磁性，以利于磁选。

化学工业中，用回转窑生产苏打，煨烧磷肥、硫化钡等。20世纪60年代，美国Lapple等发明了用回转窑生产磷酸的新工艺。该法具有能耗低、用电少、不用硫酸和可利用中低品位磷矿的优点，很快得到推广。

此外，在环保方面，世界上发达国家利用水泥窑焚烧危险废物、垃圾已有20余年的历史，这不仅使废物减量化、无害化，而且将废物作为燃料利用，节省煤粉，做到废物的资源化^[1~3]。

回转窑从发明至今已有100多年的历史，回顾回转窑逐步发展和完善的革新过程，回转窑发展经历了三个重要的技术突破阶段^[4~6]：

(1) 立波尔窑的问世。1928年，德国的伯力姆公司O.Lellp成功研制了立波尔窑。这样，熟料的烧成方式在干法、湿法基础上，又增加了半干法。由于热气流在加热机中从料球间穿插通过，热交换效果较好，物料升温速度达 $45^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，使入窑生料的碳酸盐分解率达到30%上下，从而较大幅度地提高了窑系统的热效率。

(2) 悬浮预热器窑的研制。1934年，丹麦的M.V.Jorgensen研制成了悬浮预热器，并获得专利。到1951年，联邦德国的洪堡公司F.Muller将专利用于水泥窑，制造了第一台悬浮预热器窑，即洪堡窑。物料在悬浮预热器中呈悬浮态，与热气流充分接触，热交换速率进一步加快，入窑生料的碳酸盐分解率可达40%左右。

(3) 窑外预分解的发明。丹麦史密斯公司在1963年获得了装有分解炉、悬浮预热器和旁路放风系统的专利，1974年在丹尼亚