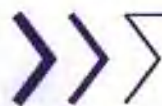




教育部高职高专规划教材



水泥热工设备与测试技术



王汉立 张振平 主编



化学工业出版社
教材出版中心

教育部高职高专规划教材

水泥热工设备与测试技术

王汉立 张振平 主编



化学工业出版社
教材出版中心

·北京·

本书为高职高专硅酸盐工艺及工业控制专业教学用书。全书涵盖了传统水泥厂和新型干法水泥厂热工设备和热工测试的内容。介绍了水泥工业中典型窑炉的基本结构、工作原理、操作要点、窑炉的节能以及热工仪表基本知识,热工测试技术等专业知识。本书反映了水泥工业新的热工设备、新的生产技术以及水泥厂热工测定的真实数据。

本书可供水泥工艺等专业工程技术人员参考,也可作为技术工人培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

水泥热工设备与测试技术/王汉立,张振平主编.——北京:
化学工业出版社,2006.6
教育部高职高专规划教材
ISBN 7-5025-8733-0

I. 水… II. ①王…②张… III. ①水泥-热工操作-机械
设备-高等学校;技术学院-教材 ②水泥-热工测量-高等学
校;技术学院-教材 IV. TQ172.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第071031号

教育部高职高专规划教材
水泥热工设备与测试技术
王汉立 张振平 主编
责任编辑:程树珍 王文峡
文字编辑:项 激
责任校对:洪雅姝
封面设计:潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心
(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码100029)

购书咨询:(010)64982530

(010)64918013

购书传真:(010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
化学工业出版社印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 12 字数 306 千字

2006年7月第1版 2006年7月北京第1次印刷

ISBN 7-5025-8733-0

定 价:22.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

教育部高职高专材料工程技术专业教材编写委员会

名誉主任	周功亚				
主任委员	张战营				
副主任委员	张志华	李坚利	肖争鸣	王继达	替和平
	周惠群	顾申良	刘晓勇		
委 员	王新锁	赵幼琨	陈 鸣	冯正良	
	农 荣	隋良志	郭汉祥	黄为秀	
	辛 颖	彭宝利	芮君渭	葛新亚	
	蔡红军	毕 强			

序

全国建材职业教育教学指导委员会为建材行业的高职、高专教育发展做了一件大好事，他们组织行业内职业技术学院数百位骨干教师，在对有关企业的生产经营、技术水平、管理模式及人才结构等情况进行深入调研的基础上，经过几年的努力，规划开发了材料工程技术和建筑装饰技术两个专业的系列教材。这些教材的编写含有课程开发和教材改革的双重任务，在规划之初，该委员会就明确提出课程综合化和教材内容必须贴近岗位工作需要的目标要求，使这两个专业的课程结构和教材内容结构都具有较多的改进和新意。

在当前和今后的一段时期，我国高职教育的课程和教材建设要为我国走新型工业化道路、调整经济结构和转变增长方式服务，更好地适应于生产、管理、服务第一线高素质的技术、管理、操作人才的培养。然而我国高职教育的课程和教材建设当前面临着新的产业情况、就业情况和生源情况等多因素的挑战，从产业方面分析，要十分关注如下三大变革对高职课程和教材所提出的新要求：

1. 产业结构和产业链的变革。它涉及专业和课程结构的拓展和调整。

2. 产业技术升级和生产方式的变革。它涉及课程种类和课程内容的更新，涉及学生知识能力结构和学习方式的改变。

3. 劳动组织方式和职业活动方式的变革——“扁平化劳动组织方式的出现”；“学习型组织和终身学习体系逐步形成”；“多学科知识和能力的复合运用”；“操作人员对生产全过程和企业全局的责任观念”；“职业活动过程中合作方式的普遍开展”。它们同样涉及课程内容结构的更新与调整，还涉及非专业能力的培养途径、培养方法、学业的考核与认定等许多新领域的改革和创新。

建筑材料行业的变化层出不穷，传统的硅酸盐材料工业生产广泛采用了新工艺，普遍引入计算机集散控制技术，装备水平发生根本性变化；行业之间的相互渗透急剧增加，技术创新过程中学科之间的融通加快，又催生出多种多样的新型材料，使材料功能获得不断扩展，被广泛应用于建筑业、汽车制造业、航天航空业、石油化工业和信息产业，尤其是建筑装饰业，是融合工学、美学、材料科学及环境科学于一体的新兴服务业，有着十分广阔的市场前景，它带动材料工业的加速发展，每当一种新的装饰材料问世，又会带来装饰施工工艺的更新；随着材料市场化程度的提高，在产品的检测、物流等领域形成新的职业岗位，使材料行业的产业链相应延长，并对从业人员的知识能力结构提出了新的要求。

然而传统的材料类专业课程模式和教材内容，显然滞后于上述各种变化。以学科为本位的教学模式应用于高职教育教学过程时，明显地出现了如下两个“脱节”，一是以学科为本的知识结构与职业活动过程所应用的知识结构脱节；二是以学科为本的理论体系与职业活动的能力体系脱节。为了改变这种脱节和滞后的被动局面，全国建材职业教育教学指导委员会组织开展了这一次的教材和课程开发工作，编写出版了这一系列教材。其间，曾得到西门于分析仪器技术服务中心的技术指导，使这批教材更适应于职业教育与培训的需要，更具有现

代技术特色。

随着它们被相关院校日益广泛地使用，可望我国高职高专系统的材料工程技术和建筑装饰技术两个专业的教学工作将出现新的局面，其教学水平和教学质量将上一个新的台阶。

中国职业技术教育学会副会长、学术委员会主任

高职高专教育教学指导委员会主任

杨金土

2006年1月

前 言

《水泥热工设备与测试技术》由全国建材职业教育教学指导委员会组织编写。本教材适用于高职、高专硅酸盐工艺及工业控制专业的专业课教学。该课程的主要任务是：使学生了解、熟悉、掌握水泥工业生产过程中常用的窑炉及干燥设备的基本结构、工作原理、操作要点、日常维护；了解、掌握硅酸盐工业热工测量的基本知识、热工测量仪表、测量参数及测量点的确定；了解筑炉材料的特性，初步掌握窑炉热平衡测算及窑炉的节能方法。

本教材总学时数为72学时，涵盖了传统水泥厂和新型干法水泥厂热工设备和热工测试的内容。《水泥热工设备与测试技术》是一门实践性较强的专业课，本教材在内容选择上更加注重水泥厂实际生产情况，采用水泥厂热工测定的真实数据，针对性强。希望老师在教学过程中突出职业教育的特点，培养学生的动手能力，提高其职业技能，尤其是在进行热工仪表和热工测试内容的教学时，要以实践教学为主，带学生到生产现场进行热工测定，训练其操作技能。也可以借助于多媒体教学手段，特别是计算机仿真软件进行教学。

本教材由湖北教育学院王汉立、山西综合职业技术学院张振平主编。全书编写情况如下：绪论、第1章由湖北教育学院王汉立编写；第2章2.1~2.4节由山西综合职业技术学院张振平编写；第3章、第4章及2.5~2.6节由云南冶金专科学校陈伟编写。

本教材在编写过程中得到湖北教育学院黄为秀老师、华中科技大学汤淑华老师的大力帮助，在此表示感谢。

对于本教材中的不足之处，恳请大家批评指正。

编者
2006.5

目 录

0 绪论	1
1 回转窑及预分解技术	3
1.1 水泥熟料的形成	3
1.1.1 水泥熟料煅烧方法及窑型的演变	3
1.1.2 水泥熟料的形成	5
1.1.3 水泥熟料的形成热	7
1.1.4 加速熟料煅烧的措施	8
1.2 回转窑的结构	8
1.2.1 筒体	9
1.2.2 轮带	10
1.2.3 托轮支撑装置	11
1.2.4 挡轮	14
1.2.5 传动装置	15
1.2.6 密封装置	18
1.2.7 燃烧装置	19
1.2.8 窑衬	20
1.3 回转窑的工作原理	24
1.3.1 熟料在回转窑内煅烧	24
1.3.2 物料在回转窑内的运动	26
1.3.3 气体在回转窑内的运动	26
1.3.4 燃料在回转窑内燃烧	27
1.3.5 回转窑内的传热	31
1.4 熟料冷却机	32
1.4.1 单筒冷却机	32
1.4.2 多筒冷却机	33
1.4.3 复合推动算式冷却机	33
1.5 回转窑的操作	34
1.5.1 开窑与点火操作	34
1.5.2 挂窑皮操作	35
1.5.3 回转窑的正常操作	37
1.5.4 不正常窑况的操作	39
1.6 预分解窑	41
1.6.1 悬浮预热器	41
1.6.2 预分解窑	42
1.6.3 分解炉的工艺性能及热工性能	44
1.6.4 预分解系统中窑的热工性能	46

1.6.5 预分解窑操作及热工参数控制	47
本章小结	52
复习思考题	52
2 立窑及干燥设备	54
2.1 立窑的工作原理	54
2.1.1 立窑内燃料的燃烧	54
2.1.2 立窑内的熟料煅烧	55
2.1.3 立窑内的气体流动	56
2.1.4 立窑内的传热	58
2.1.5 立窑内物料的运动	58
2.2 立窑的结构	59
2.2.1 窑体结构	59
2.2.2 加料装置	59
2.2.3 卸料装置	60
2.3 立窑煅烧水泥熟料的方法	60
2.3.1 立窑煅烧水泥熟料的配煤方式	60
2.3.2 生料成球	61
2.4 立窑的煅烧操作	61
2.4.1 烘窑与点火	61
2.4.2 正常煅烧操作	62
2.4.3 不正常煅烧情况的操作	63
2.5 立窑热工测试	67
2.5.1 热平衡体系的确立	67
2.5.2 机械化水泥立窑的标定方案	68
2.5.3 机械化水泥立窑测定实例	72
2.6 干燥设备	83
2.6.1 回转烘干机	83
2.6.2 立式烘干机	88
本章小结	88
复习思考题	89
3 热工测量仪表	90
3.1 热工测量仪表基本知识	90
3.1.1 常用热工测量仪表的组成及分类	90
3.1.2 测量方法	91
3.1.3 测量仪表的测量误差和主要品质指标	92
3.2 温度测量仪表	96
3.2.1 温度测量概念	96
3.2.2 膨胀式温度计	98
3.2.3 压力式温度计	100
3.2.4 热电偶温度计	100
3.2.5 热电阻温度计	105
3.2.6 非接触式测温仪表	106

3.3 气体测量仪表	110
3.3.1 气体压力测量仪表	110
3.3.2 气体流量测量仪表	114
3.3.3 气体含尘率测量仪表	121
3.3.4 气体湿含量测定仪表	126
3.3.5 气体成分分析仪	127
本章小结	129
复习思考题	129
4 水泥窑热工测试	130
4.1 水泥窑的热工计算	130
4.1.1 物料平衡计算	130
4.1.2 热平衡计算	132
4.1.3 窑的热效率计算	136
4.1.4 冷却机的热平衡与热效率计算	137
4.2 回转窑热工测试	138
4.2.1 水泥窑热工测试的意义和目的	138
4.2.2 热工测试的实施与组织	138
4.2.3 热平衡体系的确立	139
4.2.4 热工标定方案	140
4.2.5 回转窑的单项热工测定	142
4.3 水泥厂热工测试实例	154
4.3.1 测试项目	154
4.3.2 数据汇总表	155
4.3.3 单项测量及计算	159
4.3.4 物料平衡	170
4.3.5 热量平衡	171
4.3.6 冷却机热平衡	174
4.3.7 预热器工作技术指标	176
4.3.8 综合分析意见	176
本章小结	177
复习思考题	177
附录	178
参考文献	182

0 绪 论

水泥是国民经济建设不可缺少的基础性材料。2003年中国水泥总产量为8.63亿吨,其中新型干法水泥约为2亿吨,占水泥总量的23%。2004年全国水泥累计产量9.7亿吨,新型干法水泥产量3.15亿吨,占水泥总产量达32.5%,比上年提高近10%。立窑等落后工艺生产能力淘汰的速度明显加快。2005年水泥10.6亿吨,比上年增加10%,消费水泥占全球消费的40%。随着中国工业化、城镇化和社会主义新农村建设的加快,将使水泥消费仍保持一定增长。

国家发改委在“十一五”规划中设定了对水泥行业的调整目标:预期到2010年,中国水泥产量12.5亿吨,累计淘汰落后水泥生产能力2.5亿吨,水泥企业平均生产规模从2005年的20万吨提高到40万吨,水泥行业规模以上企业户数从5100多家减少到3500家左右,水泥产量前10位企业的生产集中度从15%提高到30%;新型干法水泥的比重从2005年的40%提升到70%以上。国家将加大对水泥工业发展循环经济的政策支持,完善现行资源综合利用政策中有关水泥利废税收优惠规定。能耗高、污染大是水泥工业的特点,在促进水泥工业健康发展方面,要以节约能源资源、保护生态环境和提高产品质量档次为重点,促进水泥工业结构调整和产业升级。在有条件的地区发展5000t/d及以上的新型干法水泥,逐步淘汰立窑等落后生产能力。

在水泥生产过程中,生料要经过高温煅烧成为熟料,各种原料、燃料要经过干燥处理。人们通常将这些煅烧设备和干燥设备称为热工设备,例如水泥回转窑、立窑以及各种烘干机。水泥热工设备往往是一个复杂的系统。在这个系统中,燃料燃烧提供了热量,生料经过输送、加热、发生物理化学反应、冷却等过程成为“熟料”。

水泥窑分为回转窑和立窑两大类。传统的回转窑又分为湿法回转窑、干法回转窑和半干法回转窑。随着科技的进步和发展,原料预均化技术、生料均化技术、新型粉磨技术、自动化控制技术在水泥生产工艺中大量采用,以悬浮预热和窑外分解技术为核心的新型干法水泥回转窑系统逐步取代了传统的干法回转窑、湿法回转窑以及半干法的立波尔窑,实现了水泥的文明化生产方式。单机能力大型化、生产与管理信息化、水泥生产生态化(节能利废)已成为水泥窑的发展方向。

为了保证窑系统良好的燃料燃烧和热传递条件,从而保证窑系统最佳的稳定的热工制度,在生产中必须做到生料化学成分稳定、生料喂料量稳定、燃料成分(包括热值、煤的细度、油的雾化等)稳定、燃料喂入量稳定和设备运转稳定(包括通风设备),即“五稳保一稳”,这是水泥窑生产中一条最重要的工艺原则。在新型干法生产中,采用的许多新技术、新装备,如原料的预均化、生料均化、X荧光分析仪、电子计算机、电子秤、自动调节回路以及各种耐热、耐磨、耐火新材料,都是为了这个目的。水泥窑生产,只有做到“五稳保一稳”,才能保证各个技术参数经常处于最佳值,生产经常处于最佳状态,才能取得最佳的经济效益。

对于立窑系统,尽管它不属于先进的窑型,但基于我国的基本国情,目前仍大量存在,尤其在交通不便的边远地区,机立窑仍具有很强的生命力。

热工测试是判定水泥窑炉热工过程是否合理的有效手段,也是优化生产操作的有效方法

之一。它是利用热工仪器，并综合运用现代测量技术对水泥窑炉及其水泥生产工艺过程进行定期或连续监测。通过监测得到的参数，对水泥窑炉进行判定；对生产过程进行经济控制；并能有效地研究分析操作参数和总结操作经验；同时能为有效地控制环境污染、减少水泥工业粉尘公害、改造收尘设备提供可靠依据。随着水泥工业现代化发展的需要，通过对热工过程 and 生产工艺过程的监测，与调节和执行机构配合，并联合计算机使用，为实现水泥工业大规模生产自动化奠定良好的基础。

热工测试仪表和热工测试在水泥工业中占有重要的地位，对于从事水泥工业生产的技术人员来说，学习和掌握水泥工业常用热工仪表和热工测量的一些必要的基础知识，无疑是十分必要的。

根据能量守恒原理，对于一个稳定的系统，输入热量之和应等于输出热量之和，称之为“热平衡”。通过热平衡计算，可以确定单位产品的热耗，并为热工设备的选型提供依据。

合理地选择耐火材料，才能使水泥回转窑长时间连续安全运转。对于水泥回转窑来讲，常用的耐火材料是高铝砖、镁质砖以及浇注料。根据窑系统内部不同区域的温度、使用条件分别选用不同种类的耐火材料，既保证窑炉经久耐用，又可合理地降低成本。

本教材既介绍了新型干法水泥回转窑系统，又保留了传统的回转窑相关知识，以便于学生掌握水泥工业热工设备的基本结构、工作原理、操作要点；熟悉热工测量仪表和测量的基本方法，掌握测量参数及测量位置的确定；了解筑炉材料的特性，初步掌握窑炉热平衡计算及节能方法。

本教材适用于水泥工艺专业高职高专教学，总学时数为 72 学时左右，老师在教学过程中应联系水泥厂生产实际，加强实践教学环节，强化学生的专业知识，提高学生解决生产过程中常见问题的能力。

1 回转窑及预分解技术

本章提要 回转窑是煅烧水泥熟料的主要设备。合格生料在水泥窑中连续加热，经过1450℃的高温煅烧，发生一系列的物理化学反应，成为熟料，然后进入冷却机进行冷却。熟料的形成热就是熟料形成在理论上消耗的热量，约为1734kJ/kg-ck。回转窑的基本结构由筒体、轮带、托轮、挡轮、传动装置、密封装置、窑衬、燃烧装置等组成。回转窑煅烧熟料的质量与产量，在相当大程度上取决于回转窑的看火操作与控制。回转窑的操作，一般包括：开窑、点火、挂窑皮、停窑、回转窑的正常操作及不正常操作。

悬浮预热和预分解技术的出现，是近代水泥工业发展中的重大技术革命。悬浮预热窑的特点是：在缩短回转窑筒体的条件下用多级悬浮预热器代替部分的回转筒体，使窑内以堆积态进行的气固换热过程一部分转移到多级悬浮预热器内在悬浮状态下进行。由于呈悬浮态的生料粉能够与从窑内排出的炽热气流充分混合，气固两相接触面积大，传热速率快，效率高，因此有利于窑系统生产效率提高和熟料烧成热耗降低。预分解窑的特点是：在悬浮预热窑的悬浮预热器和回转窑之间增设了一个分解炉作为窑系统的第二热源，使燃料燃烧的放热过程与生料的碳酸盐分解的吸热过程，在悬浮态或流态化条件下极其迅速地进行，从而减轻了回转窑的热力强度，并使入窑生料的碳酸盐分解率从悬浮预热窑的40%左右提高到85%~95%，使窑的生产能力成倍增长。因此，在生产效率、产品质量、能源消耗、衬料寿命和环境保护诸多方面，表现出更加优越的性能。

1.1 水泥熟料的形成

水泥是重要的建筑材料之一，它的煅烧方法从立窑生产到现代干法生产经过了180年的历史。而水泥熟料是水泥生产的半成品，其形成过程是水泥生产的一个重要的环节，它决定着水泥产品的产量、质量、消耗三大指标。本节将主要阐述熟料的形成过程和水泥熟料形成热的计算方法。

1.1.1 水泥熟料煅烧方法及窑型的演变

1.1.1.1 水泥熟料的煅烧方法

从水泥熟料的生产方法分为干法生产、湿法生产以及半干法生产。干法生产是指干生料粉进入窑内进行煅烧；湿法生产是将原料加水粉磨，黏土用淘泥机制成泥浆，然后将含水量为32%~40%的生料浆搅拌均匀后入窑煅烧；半干法生产是将生料粉加入12%~14%的水分成球后，再入窑进行煅烧。

1.1.1.2 水泥窑型的演变

自发明水泥以来，水泥窑型发生了巨大的变化，经历了立窑、干法中空回转窑、湿法窑、立波尔窑、悬浮预热器窑至窑外分解窑的变化。其规模从19世纪的日产几吨，发展到目前日产1万吨，增加了1000倍以上。

在这些变化中有几次重大技术突破，第一次是20世纪初湿法回转窑的出现并得到全面推广，提高了水泥的产量和质量，奠定了水泥工业作为现代化工业的基础；第二次是20世

纪 50~70 年代悬浮预热和预分解技术的出现（即新型干法水泥生产技术），大大提高了水泥窑的热效率和单机生产能力，促进了水泥工业向大型化、现代化的进一步发展；第三次是 20 世纪 80 年代以后计算机信息化和网络化技术在水泥工业中得到了广泛应用，使得水泥工业真正进入了现代化阶段。

1824 年，世界上第一台立窑在英国诞生，这是人类最早的用来煅烧水泥熟料窑型。它是一个竖直放置的静止的圆筒，窑内自然通风，生料制成块状，与燃料块交替分层加入窑内，采用间歇的人工加料和出料操作。立窑的产生揭开了水泥工业窑的历史。1877 年出现了回转窑，它是一个倾斜卧着的回转圆筒，生料粉由高端加入，低端有燃料燃烧，物料一方面运动一方面被煅烧。这便是最早的干法回转窑生产（见图 1-1）。

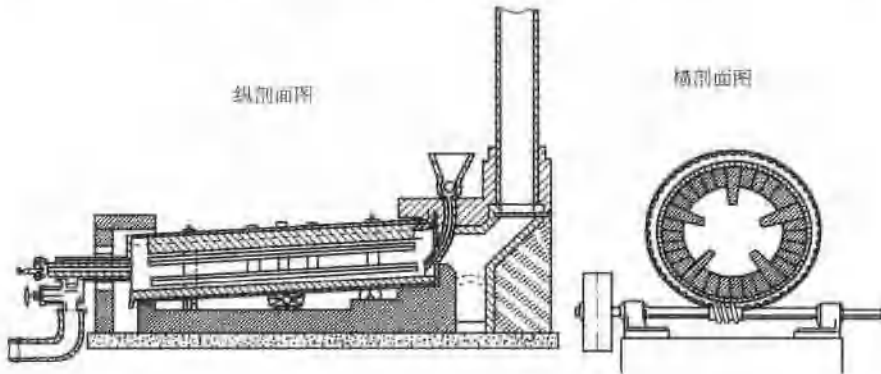


图 1-1 回转窑的最初形式

在干法回转窑的生产中，由于初期的回转窑窑体较短，出窑废气的温度较高，热耗较多，随后出现了干法长窑，即干法中空窑，以及带预热锅炉的回转窑。由于干法生产中生料粉得不到充分的均化，熟料质量难以提高。在 1905 年出现了湿法回转窑。湿法生产中的生料浆能够充分搅拌均匀，使熟料质量大幅度提高，发展比较迅速，但湿法生产的热耗相当大，这也是湿法生产的主要缺点。与此同时，立窑也发挥了自己的优势，得到了迅速的发展，1910 年实现了机械化的连续生产，它是将生料和燃料混合成球入窑煅烧，窑底部用机械进行强力通风，较显著地提高了立窑熟料的质量。在水泥熟料的煅烧领域里，曾有一段时期，干法回转窑、湿法回转窑、立窑形成了三足鼎立的局面。

1928 年，在德国出现了带回转炉箅子加热机的回转窑，即立波尔窑。它是将生料粉加入一定的水分成球，在回转炉箅子加热机中加热干燥，然后入窑煅烧的生产方法。由于该技术使当时窑的产量大幅度提高，在 1935 年，人们更深刻地认识到这种技术的优点，因而成为盛极一时的窑型，主导了 20 世纪 40~50 年代的世界水泥工业，并逐步取代了代表 20~30 年代先进窑型的湿法生产工艺。但是，该窑由于生料球的预热不够均匀，因而熟料质量比湿法窑差，且加热机结构复杂，容易损坏，维修工作量大，窑的运转率低。1934 年丹麦的工程师研究成功了悬浮预热技术，在此基础上，1951 年德国的工程师把这一技术应用于水泥工业中。当时由于原料的预均化和生料的均化尚未解决，熟料质量无法与湿法生产相媲美，致使这种窑难以发挥潜力和迅速推广。直到实现了原料预均化和生料均化技术后，带悬浮预热器的回转窑才得到迅速的发展，成为 20 世纪 60~70 年代的主导窑型，而且为后来日本人发明窑外分解技术培植了“母体”。

1963 年日本引入德国的悬浮预热器技术，经过研究和改进，于 1971 年发明了水泥窑外分解窑技术。自窑外分解技术发明以来，特别是 20 世纪 80 年代以来，世界上新建的大中型

水泥厂，基本上都采用这种窑型。

目前我国已经能够自行设计 5000t/d 熟料的生产线，拥有比较成熟的生产技术，达到了现代化干法生产的水平。

1.1.2 水泥熟料的形成

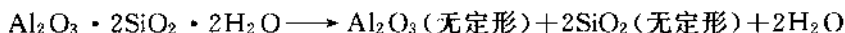
水泥熟料的形成过程，是对合格生料进行煅烧，使其连续加热，经过一系列的物理化学反应，变成熟料，再进行冷却的过程。整个过程主要分为水分蒸发、黏土质原料脱水、碳酸盐分解、固相反应、烧结反应及熟料冷却六个阶段。

1.1.2.1 水分蒸发

入窑物料当温度从室温升高到 100~150℃时，物料中的自由水全部被排除，这一过程称为干燥过程，它是一个吸热过程。特别是湿法生产，因为料浆中的含水量为 32%~40%，要在干燥过程中将水分全部蒸发，故此过程较为重要。

1.1.2.2 黏土质原料脱水

当入窑物料的温度升高到 450℃时，黏土中的主要组成高岭石 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 将发生脱水反应，吸收热量脱去其中的化学结合水。

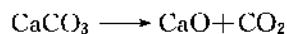
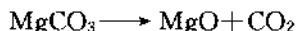


脱水后变成无定形的 Al_2O_3 和 SiO_2 。在 900~950℃时，由无定形物质变成晶体，同时放出热量。此过程是放热过程。

1.1.2.3 碳酸盐分解

(1) 碳酸盐分解反应

当物料温度升高到 600℃以上时，石灰石中的碳酸钙和原料中夹杂的碳酸镁进行分解，在 CO_2 分压为 1atm^① 下，碳酸镁和碳酸钙的剧烈分解温度分别是 750℃和 900℃。此过程是强吸热过程。



(2) 碳酸盐分解反应的特点

① 碳酸盐分解时，要放出大量的 CO_2 气体。

② 碳酸盐分解时需要大量的热量，其热效应为 1660kJ/kg- CaCO_3 ，这些热量大约占熟料形成热的一半左右。碳酸盐分解所需的温度不高，但所需的热量最多。所以这一过程对于提高热的利用率有着重要的影响。

(3) 影响碳酸钙分解的因素

① 温度 当 CO_2 的分压一定时，温度越高，碳酸钙分解速度越快。

② CO_2 的分压 当温度一定时， CO_2 的分压越低，碳酸钙越易分解。

因此，在煅烧窑内加强通风，及时将 CO_2 气体排出，有利于 CaCO_3 的分解。窑内废气中的 CO_2 含量每减少 2%，约可使分解时间缩短 10%；当窑内通风不畅时， CO_2 含量增加，且影响燃料的燃烧，使窑温降低，延长 CaCO_3 的分解时间。

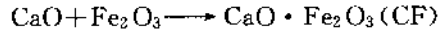
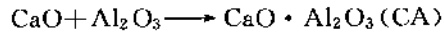
1.1.2.4 固相反应

硅酸盐水泥熟料的主要矿物是硅酸三钙 (C_3S)、硅酸二钙 (C_2S)、铝酸三钙 (C_3A)、铁铝酸四钙 (C_4AF)，其中 C_2S 、 C_3A 、 C_4AF 三种矿物是由固态物质相互反应生成的。从原料分解开始，物料中便出现了性质活泼的氧化钙，它与入窑物料中的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 进行固相反应，形成熟料矿物。

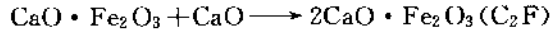
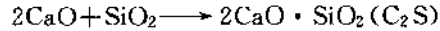
① 1atm=101325Pa，下同。

(1) 固相反应过程

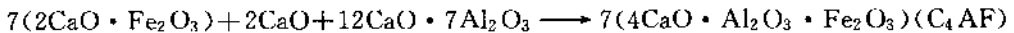
800~900℃时



900~1100℃时



1100~1300℃时



(2) 固相反应的特点

固相反应在进行时放出一定的热量，故亦称为“放热反应”阶段。

(3) 影响固相反应的因素

① 生料的细度及均匀程度 生料细度高，则表面积大；生料的分散及均匀程度高，则使生料中各成分之间充分接触，均有利于固相反应的进行。

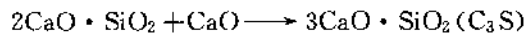
② 原料的物理性质 原料中含有石英砂，石灰石结晶粗大，使固相反应难以进行，熟料矿物很难生成。

③ 温度 温度提高使质点能量增加，加快了质点的扩散速度和化学反应速度，有利于固相反应的进行。

1.1.2.5 硅酸三钙 (C₃S) 的形成和烧结反应

水泥熟料中的主要的矿物是硅酸三钙，而它的形成需在液相中进行，当温度达到1300℃时，C₃A、C₄AF及R₂O熔剂矿物熔融成液相，C₂S及CaO很快被高温熔融的液相所溶解并进行化学反应，形成C₃S。

(1) 烧结反应



该反应也称为石灰吸收过程，它是在1300℃~1450℃~1300℃范围进行，故称该温度范围为烧成温度范围；在1450℃时此反应十分迅速，故称该温度为烧成温度。

(2) 影响烧结反应的因素

① 温度 烧结反应所需的反应热甚微，但需要使物料达到烧成所需的温度才能顺利形成C₃S，从而面提高熟料的质量。

② 时间 为使烧结反应完全进行，需保证一定的反应时间，一般为10~20min。

③ 液相量 液相量多，液相黏度低，则有利于C₃S的形成，但容易结圈、结块等，难以操作；液相量少，则不利于C₃S的形成，一般控制液相量以20%~30%为宜。

当温度降到1300℃以下时，液相开始凝固，由于反应不完全，没有参与反应的CaO就随着温度降低，凝固其中，这些CaO称为游离氧化钙，习惯上用“f-CaO”符号表示。为了便于区别，称其为一次游离氧化钙，它对水泥安定性有重要影响。

1.1.2.6 熟料的冷却过程

熟料烧成后出窑的温度很高，需要进行冷却，这不仅便于熟料的运输、储存，而且有利于改善熟料的质量，提高熟料的易磨性，还能回收熟料的余热，降低热耗、提高热效率。对熟料的改善体现在以下几个方面。

(1) 熟料冷却能够防止或减少C₃S的分解

C_3S 在 $1250^{\circ}C$ 时分解成为 C_2S 和 CaO ，出现了二次游离氧化钙，它虽然对水泥安定性没有大的影响，但降低了熟料中 C_3S 的含量，从而也影响了熟料的强度。故需急冷以快速越过这个温度线，保留较多的 C_3S 。

(2) 熟料冷却能够防止或减少 C_2S 的晶型转变

C_2S 由于内部结构不同，有不同的结晶形态，而且相互之间能发生转化。当温度低于 $500^{\circ}C$ 时，将由 β 型 C_2S 转变成为 γ 型 C_2S ，密度由 $3.28g/cm^3$ 变为 $2.97g/cm^3$ ，体积增加了 10% 左右。由于体积增加产生了膨胀应力，引起了熟料的“粉化”现象。而且 γ 型 C_2S 几乎没有水化强度，因此粉化料属废品。熟料急冷能防止其晶型转变，以免降低强度。

(3) 熟料冷却能够防止或减少 C_3S 晶体长大

有资料表明，晶体粗大的 C_3S 会使强度降低且难以粉磨，熟料急冷可以避免晶体长大。

(4) 熟料冷却能够防止或减少 MgO 晶体析出

当熟料慢冷时， MgO 结晶成方镁石，其水化速度很慢，往往几年后还在水化，水化后的产物体积增大，使水泥制品发生膨胀而遭破坏。急冷可使 MgO 凝结于玻璃体中，或者结晶成细小的晶体，其水化速度与其他成分大致相等，不会产生破坏作用。

(5) 熟料冷却能够防止或减少 C_3A 晶体析出

结晶型 C_3A 水化后易产生快凝现象，急冷后可以防止快凝现象发生，同时还可以提高水泥的抗硫酸盐性能。

1.1.3 水泥熟料的形成热

1.1.3.1 水温熟料形成热的概念

熟料的形成热，是指在一定的生产条件下，用某一基准温度（一般是 $0^{\circ}C$ 或 $20^{\circ}C$ ）的干燥物料，在没有任何物料损失和热量损失的情况下，制成 1kg 同温度的熟料所需要的热量（熟料形成热效应）。

因此，熟料的形成热就是熟料形成在理论上消耗的热量，它仅与原、燃料的品种、性质及熟料的化学成分和矿物组成、生产条件等因素有关。

1.1.3.2 水泥熟料形成热的计算方法

水泥熟料在形成过程中发生一系列物理化学变化，有些是吸热反应，有些是放热反应，将全过程的总吸热量，减去总的放热量，并换算为每生成 1kg 熟料所需要的净热量就为熟料的形成热。

现以 $20^{\circ}C$ 为计算的温度基准。生成 1kg 熟料需理论生料量约为 1.55kg。在一般原料的情况下，根据物料在反应过程中的化学反应热和物理热，可计算出生成 1kg 普通硅酸盐水泥熟料的理论热耗（见表 1-1）。

表 1-1 水泥熟料形成热

吸收热量	kJ /kg-ck	所占百分数/%	放出热量	kJ /kg-ck	所占百分数/%
干物料由 $20^{\circ}C$ 加热到 $450^{\circ}C$ 吸热	697	16.4	黏土无定形物质结晶放热	41	1.6
黏土脱水吸热	164	3.9	熟料矿物形成放热	410	16.4
脱水物料由 $450^{\circ}C$ 加热到 $900^{\circ}C$ 吸热	800	18.9	熟料由 $1400^{\circ}C$ 冷至 $20^{\circ}C$ 放热	1476	59.0
碳酸盐分解吸热	1948	46.0	CO_2 由 $900^{\circ}C$ 冷至 $20^{\circ}C$ 放热	492	19.7
剩余物料由 $900^{\circ}C$ 加热到 $1400^{\circ}C$ 吸热	523	12.4	水汽由 $450^{\circ}C$ 冷至 $20^{\circ}C$ 放热	82	3.3
形成液相吸热	103	2.4	合计	2501	100
合计	4235	100	$Q=4235-2501=1734(kJ/kg-ck)$		