

中等专业学校试用教材

# 水泥工业

## 热工设备及热工测量

韩梅祥 主编



武汉工业大学出版社

中等专业学校试用教材

# 水泥工业热工设备及热工测量

韩梅祥 主编

武汉工业大学出版社

## 内容简介

本书为中等专业学校水泥工艺专业试用教材。全书分七章，介绍了水泥生产中热加工过程的有关设备的结构、工作原理、操作要点等方面的知识。还介绍了热工测量、热工计算及热工标定等方面的知识。本书是一本理论联系实际着重于应用内容的专业教材。

本书也可供从事水泥专业的工程技术人员、技术工人参考。

中等专业学校试用教材  
水泥工业热工设备及热工测量

韩梅祥 主编

责任编辑 王忠林

米

武汉工业大学出版社出版(武汉市武昌珞狮路14号)

新华书店湖北发行所发行 各地新华书店经销

中南三〇九印刷厂印刷

米

开本: 787×1092 mm<sup>1</sup>/16 [照排胶印] 印张: 20.625 字数: 502千字

1991年5月第一版 1991年9月第三次印刷

印数: 6001—7500册

ISBN7-5629-0385-9/TQ·25

定价: 4.90元

# 前 言

本教材是根据国家建材局1985年8月在长春召开的教材会议精神，将原《水泥工业热工过程及设备》，分为《硅酸盐工业热工基础》和《水泥工业热工设备及热工测量》而编写的。内容依据1986年全国建材中专水泥工艺专业及建材机械专业教学计划、大纲审定会（绵阳会议）通过的，由国家建材局人才开发司批准的“建材中等专业学校《水泥工业热工设备及热工测量教学大纲》”，读者在使用本书前应已具备了热工基础理论方面的知识。

本教材在原《水泥工业热工过程及设备》的基础上，广泛地征求了有关学校的意见，做了大量的修改与补充，较详细地阐述了水泥生产过程中所用热工设备的结构，工作原理、操作要点以及热工仪表、热工测量等方面的知识，特别注意了新设备、新技术的介绍。

本书由山东建材学院韩梅祥主编。第三章由北京建材工业学校刘述祖编写，第五、七章由山东建材学院李兆钰编写，其余各章由韩梅祥编写。

本书由上海建材学院孙晋涛主审，北京建材学校杨树森等参审。在编写过程中得到国家建材局人才开发司范令惠同志的大力支持与指导，在此一并致谢。

由于编者水平有限，对书中的缺点、错误，恳请广大师生和读者予以指正。

编 者

1990、2

# 目 录

绪论	1
第一章 水泥熟料的形成及煅烧方法	3
第一节 水泥熟料的形成	3
第二节 水泥熟料的形成热	5
一、水泥熟料形成热的计算方法	6
二、水泥熟料形成热计算举例	10
第三节 影响水泥熟料形成速度的因素	13
一、原料的物理性质	13
二、生料细度、分散度及均匀程度	13
三、生料的化学成分	13
四、煅烧温度	14
五、矿化剂的使用	14
第四节 水泥熟料的煅烧方法	16
一、水泥熟料的煅烧方法及窑型的发展与演变	16
二、水泥工业窑的分类	20
三、几种新型煅烧方法	21
第二章 回转窑	23
第一节 回转窑的结构	23
一、筒体	23
二、轮带	24
三、托轮与窑体的窜动	25
四、挡轮	28
五、传动装置	30
六、密封装置	33
七、窑衬	34
八、燃烧装置	39
第二节 回转窑的工作原理	40
一、回转窑内熟料的煅烧过程及“带”的划分	40
二、回转窑内的燃料燃烧	42
三、回转窑内的物料运动	51
四、回转窑内的气体流动	54
五、回转窑内的传热	56
第三节 熟料冷却装置	60

R27-1#

一、单筒冷却机	61
二、多筒冷却机	62
三、篦式冷却机	63
四、几种新型的冷却设备	68
第四节 回转窑的操作	70
一、开窑与点火操作	70
二、挂窑皮操作	70
三、回转窑的正常操作	71
四、回转窑不正常情况的处理	75
第五节 其他型式的热转窑	77
一、湿法长窑	77
二、带料浆蒸发机的热转窑	80
三、带热转炉篦子加热机的热转窑(立波尔窑)	80
四、带余热锅炉的热转窑	83
五、带悬浮预热器的热转窑	84
第三章 预分解窑	92
第一节 窑外分解技术原理	92
第二节 预分解窑的种类	93
一、分解炉的一般构造	98
二、预分解窑的生产流程	94
三、预分解窑的分类	95
四、几种主要的预分解窑	97
五、预分解窑的优缺点	107
第三节 分解炉的工艺性能	108
一、生料中碳酸盐分解反应的特性	108
二、碳酸钙颗粒的分解过程	110
三、料粉分解的化学动力学方程	111
四、分解炉中料粉的分解时间及影响因素	112
第四节 分解炉的热工性能	113
一、分解炉内的燃烧特点	114
二、分解炉内的传热	115
三、分解炉内的气体运动	117
四、分解炉内的旋风效应与喷腾效应	118
五、料、煤粉的悬浮及含尘浓度	121
第五节 预分解系统中窑的性能	124
一、热转窑内的工艺带及工艺反应	124
二、窑内物料反应的热效应	125
三、窑的热工性能	127

第六节 预分解窑的操作及工艺管理 .....	129
一、预分解窑的点火方法 .....	129
二、预分解窑的正常操作 .....	129
三、系统主要工艺参数的控制范围及监测调节方法 .....	130
四、系统的结皮、堵塞及旁路放风 .....	134
第七节 窑外分解技术与老厂的技术改造 .....	138
一、用新型干法技术进行技术改造的意义 .....	138
二、用窑外分解技术改造老厂的方法 .....	138
三、窑外分解系统简要设计计算 .....	140
第四章 立窑 .....	142
第一节 立窑煅烧水泥熟料的方法、配煤及成球 .....	142
一、立窑煅烧水泥熟料的方法 .....	142
二、配煤 .....	143
三、成球 .....	149
第二节 立窑的工作原理 .....	154
一、立窑内的燃料燃烧 .....	154
二、立窑内的熟料煅烧 .....	156
三、立窑内的气体流动 .....	158
四、立窑内的传热 .....	161
五、立窑内的物料运动 .....	163
第三节 立窑的结构 .....	164
一、窑体 .....	165
二、加料装置 .....	170
三、卸料装置 .....	170
四、卸料密封装置 .....	175
五、鼓风装置 .....	176
六、排气及收尘装置 .....	179
第四节 立窑的简易计算 .....	179
一、立窑规格的计算 .....	179
二、立窑生产能力的计算 .....	180
三、立窑鼓风量的计算 .....	182
四、立窑废气量的计算 .....	182
第五节 立窑的煅烧操作 .....	184
一、烘窑与点火 .....	184
二、正常煅烧下的操作 .....	184
三、不正常煅烧情况下的操作 .....	190
第五章 窑的热工计算 .....	193
第一节 机械化水泥立窑热工计算 .....	193

一、物料平衡计算 .....	193
二、热量平衡计算 .....	197
三、热效率计算 .....	198
四、熟料烧成的综合能耗计算 .....	199
第二节 水泥回转窑热工计算 .....	201
一、物料平衡计算 .....	201
二、热量平衡计算 .....	203
三、窑的热效率计算 .....	206
四、冷却机的热平衡及热效率计算 .....	206
五、熟料烧成的综合能耗计算 .....	208
第三节 热工计算举例 .....	211
一、测定数据 .....	211
二、物料平衡计算 .....	214
三、热量平衡计算 .....	218
四、热效率计算 .....	220
五、综合分析意见 .....	221
第六章 烘干设备 .....	223
第一节 回转烘干机 .....	223
一、回转烘干机的生产流程 .....	223
二、回转烘干机的构造 .....	228
三、回转烘干机的操作控制参数及产、质量的影响因素 .....	229
四、回转烘干机的有关计算 .....	230
五、烘干机的热工计算 .....	233
六、回转烘干机计算举例 .....	236
第二节 粉磨-烘干设备 .....	239
一、提升循环磨 .....	239
二、风扫烘干磨 .....	243
第三节 水泥厂用其他烘干设备 .....	250
一、破碎-烘干设备 .....	250
二、流态烘干机 .....	252
三、悬浮式烘干机 .....	256
第七章 热工测量仪表及热工标定 .....	257
第一节 概述 .....	257
一、热工测量仪表在水泥生产过程中的作用 .....	257
二、热工测量仪表的分类和品质指标 .....	257
第二节 压力测量仪表 .....	258
一、液柱式压力计 .....	258
二、弹性式压力计 .....	260



三、差压计 .....	263
第三节 流量测量仪表 .....	263
一、动压式流量计 .....	263
二、转子流量计 .....	272
三、风速计 .....	275
第四节 气体中含尘率的测定 .....	276
一、管道外滤尘法 .....	276
二、管道内滤尘法 .....	280
第五节 温度测量仪表 .....	283
一、膨胀式温度计 .....	284
二、压力式温度计 .....	286
三、热电偶温度计 .....	288
四、热电阻温度计 .....	296
五、半导体电阻温度计 .....	300
六、热辐射式高温计 .....	301
第六节 表面散热量的测定 .....	308
一、热流量计 .....	308
二、用表面温度推算散热量 .....	308
第七节 水泥窑的热工标定 .....	311
一、测量前的准备 .....	311
二、试测 .....	311
三、测量时间、周期、项目和方法 .....	311
第八节 水泥窑自动化概况及热工控制 .....	315
一、自动检测、远动操作 .....	315
二、模拟控制 .....	316
三、计算机控制 .....	317
第九节 工厂能量平衡 .....	317
一、工厂能量平衡的方法 .....	317
二、测试总报告的内容和要求 .....	317
三、节约能源的途径 .....	318

## 绪 论

水泥工业中所用的热工设备，主要包括熟料煅烧设备（水泥工业窑）和原材料的烘干设备。它们的任务是对物料进行热加工，在加工过程中发生一系列的物理化学变化。如果设备设计的不合理，或者选型使用不当，必然会影响产品产量和质量，或增加能量和原材料的消耗量，因此，人们常常把水泥工业的煅烧设备形象地称做水泥厂的“心脏”，可见它们是非常重要的。

近几十年来，水泥工业窑发展是很迅速的，50年代以前主要是中空回转窑和立窑；50年代在回转窑上附设各种类型的余热利用装置，提高了窑的热效率；60年代中期，各种带悬浮预热器的回转窑，不断涌现；到70年代又出现了窑外分解技术，所用的窑称为预分解窑。所以差不多每10年就有一次大的发展变化，现在还正在研究更新的煅烧方法及设备，如悬浮煅烧法、沸腾煅烧法等。

由于新型窑的不断出现，使水泥生产发展方向有了很大的变革，如过去曾一度以发展湿法生产为主，而由于悬浮预热窑和预分解窑的大量使用，将以发展干法生产为主，使熟料的单位热耗大为降低，同时由于产量的成倍增加，使窑的单机日产量大为提高，如悬浮预热窑单机日产量可达5000t熟料，预分解窑单机日产量可达8000~10000t熟料。与此同时，由于我国特有的条件，立窑在我国也得到了广泛的使用和较快的发展，其生产条件也在不断改善，熟料质量不断提高，在一定历史时期内，仍然是值得研究和使用的煅烧设备。

随着新型干法窑的不断发展，水泥生产过程中的烘干设备近十几年来也有了很大的发展，如除了目前广泛使用的回转烘干机外，能够充分利用回转窑及冷却机余热的粉磨兼烘干、破碎兼烘干的设备也不断得到发展。

因此，合理的设计、选择、使用管理水泥工业中的热工设备，是发展水泥工业的关键。作为中等专业技术人员来说，更要在使用和管理上下功夫，除了在操作管理中广泛应用电子技术，实现自动控制外，更重要的是设备本身要有先进的热工参数（如产量、单耗、热效率、使用寿命、产品质量等）。这就要求热工设备有合理的结构，燃料在设备内必须充分燃烧，有较高的传热效率，能最大限度地利用热量，保证物料完成必要的物理、化学反应。与此同时还要尽量减少对周围环境的污染。这就要求我们对设备的结构、工作原理、操作原理等有较深刻的了解，同时能对各项热工参数进行测量和标定，以使用科学的方法总结实际生产设备的经验，以改进现有的设备，挖掘设备的潜力，或设计和研制更新的热工设备，这是本教材要讨论的主要内容和学习本课程达到的主要目的。

根据教学大纲要求，本教材按72学时编写，共分七章，各章学时分配如下，仅供参考，使用者可根据具体要求有所增减。

第一章 水泥熟料形成过程及煅烧方法	4 学时
第二章 回转窑	15 学时
第三章 预分解窑	14 学时
第四章 立窑	15 学时

第五章	窑的热工计算	5 学时
第六章	烘干设备	6 学时
第七章	热工测量仪表及热工标定	12 学时
机动		1 学时
合计		72 学时

# 第一章 水泥熟料的形成及煅烧方法

水泥熟料的形成是水泥生产过程中最重要的环节，它决定着水泥产品的产量、质量、消耗三大指标，是长期以来科技与管理工作者十分关注的重要问题。

## 第一节 水泥熟料的形成

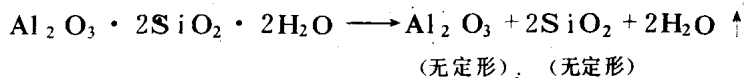
水泥熟料的形成过程，是对合格的水泥生料进行煅烧，使其连续被加热，经过一系列的物理化学反应，变成熟料，再进行冷却的过程。其主要的物理化学反应有：

### (1) 水分蒸发

无论是干法生产还是湿法生产，入窑生料都带有一定量的自由水分，特别是湿法生产，入窑料浆含的水分更多，可达32~40%。由于加热，物料温度逐渐升高，物料中的水分被蒸发，物料被烘干后温度逐渐上升，当温度升高到100~150℃时，生料中的自由水分全部被排除，这一过程也称为干燥过程。

### (2) 粘土质原料脱水

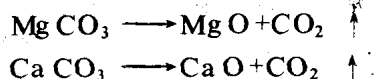
生料被烘干后，继续被加热，当温度升高到450℃时，粘土中的主要组成高岭土( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )发生脱水反应，脱去其中的化学结合水。



高岭土在失去化学结合水的同时，分子结构也产生变化，变成游离的无定形的三氧化二铝和二氧化硅。在900~950℃时，由无定形物质转变成晶体，同时放出热量。

### (3) 碳酸盐分解

脱水后的物料，温度继续升至600℃以上时，生料中的碳酸盐开始分解，主要是石灰石中的碳酸钙和原料中夹杂的碳酸镁进行分解，其反应式为：



实验表明，碳酸盐的分解速度随着温度的升高而加快，在600℃时碳酸镁开始分解，加热到750℃时，分解剧烈进行。碳酸钙的分解温度较高，在900℃时才快速分解。另外还须指出的是，碳酸盐的分解温度与物料周围气体中 $\text{CO}_2$ 的分压有关，物料周围气体中 $\text{CO}_2$ 的分压愈高（也即 $\text{CO}_2$ 的浓度越大）其分解温度愈高，反之， $\text{CO}_2$ 的分压愈低其分解温度愈低。以上所说的温度是 $\text{CO}_2$ 分压在一个大气时的分解温度。

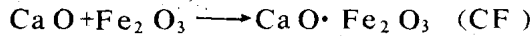
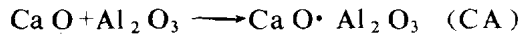
碳酸盐分解时，需要吸收大量的热量，是熟料形成过程中消耗热量最多的一个过程，因此它是水泥熟料煅烧过程中重要的一环。

### (4) 固相反应

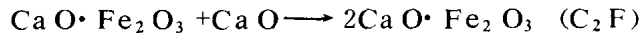
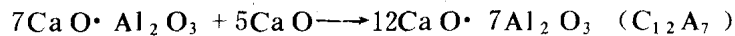
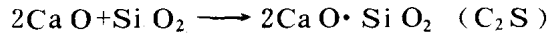
水泥熟料中的一些主要矿物都是由固态物质相互反应而生成的。在水泥熟料的形成过程

中，从碳酸盐开始分解起，物料中便出现了性质活泼的游离氧化钙，它与生料中的二氧化硅、三氧化二铁和三氧化二铝等氧化物进行固相反应，其反应速度随着温度的升高而加快。水泥熟料中的各种矿物并不是经一级固相反应就形成的，而是经过多次固相反应的结果，反应过程比较复杂，大致如下：

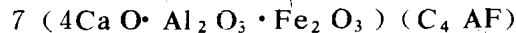
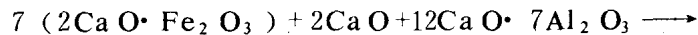
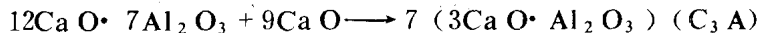
800 ~ 900 °C 时



900 ~ 1100 °C 时



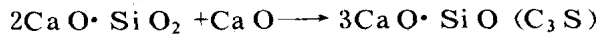
1100 ~ 1300 °C 时



以上反应在进行时放出一定的热量，因此，从热化学的角度，也统称为“放热反应”，在进行这些反应时物料本身温度上升很快。

#### (5) 硅酸三钙 (C<sub>3</sub>S) 的形成和烧结反应

由于固相反应，生成了水泥熟料中的 C<sub>4</sub>AF、C<sub>3</sub>A、C<sub>2</sub>S 等矿物。但是，水泥熟料中的主要矿物 C<sub>3</sub>S 要在液相中才能大量形成。当物料温度升高到近 1300 °C (1250 ~ 1280 °C) 时，C<sub>3</sub>A、C<sub>4</sub>AF、R<sub>2</sub>O 等熔剂矿物会变成液相，大部分 C<sub>2</sub>S 和 CaO 很快被高温熔融的液相所溶解，这种溶解于液相中的 C<sub>2</sub>S 和 CaO 很容易进行反应而生成硅酸三钙。



实践证明，C<sub>3</sub>S 的生成，在配合料适当、生料成分稳定的条件下，与烧成温度和反应时间有关，C<sub>3</sub>S 的生成温度范围一般为 1300 ~ 1450 ~ 1300 °C，它是决定水泥熟料质量好坏的关键，若此温度有保证，则生成的液相量较多且粘度较小，有利于 C<sub>3</sub>S 的形成，熟料质量较好；反之，生成 C<sub>3</sub>S 较少，熟料质量则差。在一般情况下，1450 °C 下 C<sub>3</sub>S 形成非常迅速，此温度称为熟料的烧成温度，因此水泥熟料的煅烧设备必须能使物料达到这一温度。除此之外，C<sub>3</sub>S 的形成还要有一定的反应时间（一般需要 10 ~ 20 min），煅烧设备也应该保证物料在此高温下保持这一时间。C<sub>3</sub>S 形成需要的反应热甚微，因此主要热量消耗应使物料达到烧成温度。当然，温度过高对熟料的煅烧也不利，它会使液相量过多、粘度过小，给煅烧操作带来困难，如易结大块、结圈、烧流等，同时也使煅烧设备容易损坏，因此配料时和在正常温度下液相量一般控制在 20 ~ 30 % 为宜。

当熟料烧成后，温度开始下降，C<sub>3</sub>S 的生成速度也不断减慢，温度降到 1300 °C 以下时，液相开始凝固，C<sub>3</sub>S 的生成反应结束，若此时凝固体中含有少量未化合的 CaO 则称为游离氧化钙，习惯上以 “f CaO” 符号表示。温度再继续下降便进入熟料的冷却阶段。

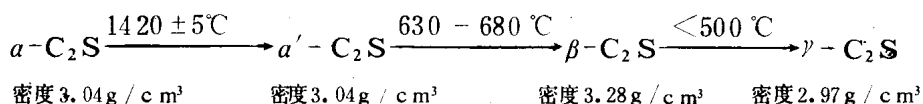
#### (6) 熟料的冷却过程

在熟料冷却过程中，将有一部分熔剂矿物 (C<sub>3</sub>A 和 C<sub>4</sub>AF) 形成晶体析出，另一部分因冷

却速度较快来不及析晶而呈玻璃态存在。 $C_3S$ 在高温下是一种不稳定的化合物，在 $1250^\circ\text{C}$ 时，容易分解，所以要求熟料自 $1300^\circ\text{C}$ 以下要进行快冷，使 $C_3S$ 来不及分解，越过 $1250^\circ\text{C}$ 以后， $C_3S$ 就比较稳定了。

对于 $1000^\circ\text{C}$ 以下的熟料，也是以快速冷却为好，这是因为熟料中的 $C_2S$ 有 $\alpha$ 、 $\alpha'$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 四种结晶型态，温度及冷却速度对 $C_2S$ 的晶型转化有很大影响。

高温下的 $\alpha-C_2S$ 缓慢冷却时：



由上看出，在高温熟料中只存在 $\alpha-C_2S$ ，若冷却速度缓慢，则发生一系列的晶型转化，最后变为 $\gamma-C_2S$ ，在由 $\beta-C_2S$ 转化为 $\gamma-C_2S$ 时，由于密度减小使体积增大10%左右，从而导致熟料块的体积膨胀，变成粉末状，在生产中叫做“粉化”现象。粉化后的产物 $\gamma-C_2S$ 与水进行水化反应时，几乎没有水硬性，因而会使水泥熟料的强度大为降低。为了防止这种有害的晶型转化，要求熟料快速冷却，使其来不及转化，除此之外，熟料快冷还有下列优点：

1. 可以防止 $C_3S$ 晶体长大或熟料矿物完全变成晶体。有关资料表明，晶体粗大的 $C_3S$ 会使熟料的强度降低；若熟料中的矿物完全变成晶体就难于粉磨。

2. 快冷时， $MgO$ 凝结于玻璃体中或以细小的晶体析出，可以减轻水泥凝结硬化后由于方镁石晶体不易水化而后缓慢水化出现体积膨胀，造成水泥的安定性不良。

3. 快冷时， $C_3A$ 的晶体较少，水泥不会出现快凝现象并有利于抗硫酸盐性能的提高。

4. 快冷时可使水泥熟料中产生应力，从而增大了熟料的易磨性。

此外，从“热工”角度来看，熟料的冷却可以部分地回收熟料出窑带出的热量，从而降低熟料热耗，提高热的利用率。

由此可见，熟料的冷却过程对熟料质量和节约能源方面都有着重要的意义，因此如何使水泥熟料快速冷却和尽可能多地回收熟料带出的热量，一直是水泥熟料生产过程的一个重要的课题，也是研究和发 展水泥熟料冷却设备的重要依据。

实际上水泥熟料的形成过程是非常复杂的，各个过程之间互相影响、互相联系而又互相交叉。

## 第二节 水泥熟料的形成热

由水泥熟料的形成过程看出，在一系列的物理化学变化中，有的吸收热量，有的放出热量，现将各反应过程的温度与热性质归纳入表1-1中。

所谓熟料形成热(熟料形成热效应)，是指在一定生产条件下，用某一基准温度(一般是 $0^\circ\text{C}$ 或 $20^\circ\text{C}$ )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。也就是用一定成分的干物料生产一定成分的熟料进行物理化学变化所需要的

\* 若以煤为燃料包括干生料与煤灰，若用气体或液体燃料则为干生料

水泥熟料形成各反应过程的温度与热性质

表 1-1

温度 (°C)	反 应 名 称	热 性 质
100 ~ 150	自由水分蒸发	吸 热
450	粘土结晶水脱水	吸 热
900	粘土中无定形物转变为晶体	放 热
900	碳酸盐分解	吸 热
900 ~ 1200	固相反应, 形成 $C_3A$ 、 $C_4AF$ 、 $C_2S$	放 热
1250 ~ 1280	形成液相	吸 热
1400	硅酸三钙形成 $C_2S + CaO \rightarrow C_3S$	微吸热
< 1400	冷却	放 热

热量。因此,它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与矿物组成、生产条件等因素有关。

根据熟料在加热过程中的各项物理化学变化,可以计算出熟料形成热的多少。

### 一、水泥熟料形成热的计算方法

熟料形成热的计算方法很多,有理论计算方法,也有经验公式计算方法,在理论计算方面,我国过去多采用苏联郝道劳夫提出的公式,它是根据生料和熟料的成分来计算熟料形成热,但是在实际生产中,生料成分和熟料成分往往并不对应,在计算中常常会出现偏差,同时对矿渣或粉煤灰配料用起来也比较麻烦。因此本书介绍日本等其他一些国家所用的,也是我国《水泥回转窑热平衡、热效率综合能耗计算通则》中所采用的方法。首先是按照熟料成分、煤灰成分与煤灰掺入量直接计算出煅烧 1kg 熟料的干物料消耗量,然后再计算形成 1kg 熟料的理论热消耗量。若采用普通原料(石灰石、粘土、铁粉)配料,以煤粉为燃料,其具体计算方法如下:

首先确定计算基准,一般物料取 1kg 熟料,温度取 0°C,并给出如下已知数据:(1)熟料的化学成分;(2)煤的工业分析及煤灰的化学成分\*;(3)熟料单位煤耗,对于设计计算要根据生产条件确定,对于热工标定计算通过测定而得。

#### (一) 生成 1kg 熟料干物料消耗量的计算

##### 1. 煤灰的掺入量

$$m_A = m_r A^y a \frac{1}{100} \quad (1-1)$$

式中  $m_A$  ——生成 1kg 熟料,煤灰的掺入量(kg/kg-ck);

$m_r$  ——每 kg 熟料的耗煤量(kg/kg-ck);

$A^y$  ——煤灰分的应用基含量(%);

$a$  ——煤灰掺入的百分比(%)。

##### 2. 生料中碳酸钙的消耗量

$$m_{CaCO_3} = \frac{CaO^k - CaO^A m_A}{100} \cdot \frac{M_{CaCO_3}}{M_{CaO}} \quad (1-2)$$

\* 若采用矿渣或粉煤灰配料还应给出矿渣或粉煤灰的化学成分及配比。

2  
式中  $m'_{\text{CaCO}_3}$  ——生成 1kg 熟料碳酸钙的消耗量 (kg / kg - ck) ;

$\text{CaO}^k$  ——熟料中氧化钙的含量 (%) ;

$\text{CaO}^A$  ——煤灰中氧化钙的含量 (%) ;

$M_{\text{CaCO}_3}$ 、 $M_{\text{CaO}}$  ——分别为碳酸钙、氧化钙的分子量;

$m_A$  ——同 (1-1) 式

### 3. 生料中碳酸镁的消耗量

$$m'_{\text{MgCO}_3} = \frac{\text{MgO}^k - \text{MgO}^A \cdot m_A}{100} \cdot \frac{M_{\text{MgCO}_3}}{M_{\text{MgO}}} \quad (1-3)$$

式中  $m'_{\text{MgCO}_3}$  ——生成 1kg 熟料碳酸镁的消耗量 (kg / kg - ck) ;

$\text{MgO}^A$  ——煤灰中氧化镁的含量 (%) ;

$M_{\text{MgCO}_3}$ 、 $M_{\text{MgO}}$  ——分别为碳酸镁、氧化镁的分子量;

$m_A$  ——同 (1-1) 式。

### 4. 生料中高岭土的消耗量

$$m'_{\text{AS}_2\text{H}_2} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3^k - \text{Al}_2\text{O}_3^A \cdot m_A}{100} \cdot \frac{M_{\text{AS}_2\text{H}_2}}{M_{\text{Al}_2\text{O}_3}} \quad (1-4)$$

式中  $m'_{\text{AS}_2\text{H}_2}$  ——生料中高岭土的消耗量 (kg / kg - ck) ;

$\text{Al}_2\text{O}_3^k$  ——熟料中三氧化二铝的含量 (%) ;

$\text{Al}_2\text{O}_3^A$  ——煤灰中三氧化二铝的含量 (%) ;

$M_{\text{AS}_2\text{H}_2}$ 、 $M_{\text{Al}_2\text{O}_3}$  ——分别为高岭土和三氧化二铝的分子量;

$m_A$  ——同 (1-1) 式。

### 5. 生料中 $\text{CO}_2$ 的消耗量

$$m'_{\text{CO}_2} = m'_{\text{CaCO}_3} \cdot \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CaCO}_3}} + m'_{\text{MgCO}_3} \cdot \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{MgCO}_3}} \quad (1-5)$$

式中  $m'_{\text{CO}_2}$  ——生成 1kg 熟料  $\text{CO}_2$  的消耗量 (kg / kg - ck) ;

$m'_{\text{MgCO}_3}$ 、 $m'_{\text{CaCO}_3}$  ——同 (1-3)、(1-2) 式

$M_{\text{CO}_2}$  ——二氧化碳的分子量;

$M_{\text{MgCO}_3}$ 、 $M_{\text{CaCO}_3}$  ——分别为碳酸镁及碳酸钙的分子量。

### 6. 生料中化合水的消耗量

$$m'_{\text{H}_2\text{O}} = m_{\text{AS}_2\text{H}_2} \cdot \frac{2 M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{AS}_2\text{H}_2}} \quad (1-6)$$

式中  $m'_{\text{H}_2\text{O}}$  ——生料中化合水的含量 (kg / kg - ck) ;

$M_{\text{H}_2\text{O}}$  ——水的分子量;

其他符号同 (1-4) 式。

### 7. 生成 1kg 熟料干生料的消耗量

$$m^d = 1 + m'_{\text{CO}_2} + m'_{\text{H}_2\text{O}} \quad (1-7)$$

式中  $m^d$  ——生成 1kg 熟料干生料的消耗量 (kg / kg - ck) ;

$m'_{\text{CO}_2}$ 、 $m'_{\text{H}_2\text{O}}$  ——见 (1-5)、(1-6) 式。

若采用矿渣或粉煤灰配料时, 在计算各成分含量时还要分别将熟料各成分中减去来自矿渣



或粉煤灰中各相应的成分含量；若采用液体或气体燃料时，则可将各项公式中  $m_A$  作为零代入。

(二) 形成 1kg 熟料吸收热量的计算

1. 干物料从 0℃ 加热到 450℃ 时吸收的热量

$$q_1 = m_r^d C_r^d (450 - 0) \quad (1-8)$$

式中  $q_1$  —— 干物料从 0℃ 加热到 450℃ 时吸收的热量 (kJ/kg-ck)；

$m_r^d$  —— 见 (1-7) 式；

$C_r^d$  —— 干物料在 0 ~ 450℃ 时的比热；一般为 1.058 kJ/kg·℃；

2. 高岭土脱水吸收热量

$$q_2 = m_{H_2O}^r \times 6690 \quad (1-9)$$

式中  $q_2$  —— 高岭土脱水吸收的热量 (kJ/kg-ck)；

$m_{H_2O}^r$  —— 见 (1-6) 式；

6690 —— 高岭土脱水热效应 (kJ/kg-H<sub>2</sub>O)；

3. 脱水后物料由 450℃ 加热到 900℃ 时吸收的热量

$$q_3 = (m_r^d - m_{H_2O}^r) C_m (900 - 450) \quad (1-10)$$

式中  $q_3$  —— 脱水后物料吸收的热量 (kJ/kg-ck)；

$m_r^d$ 、 $m_{H_2O}^r$  —— 见 (1-7)、(1-6) 式；

$C_m$  —— 脱水后物料在 450 ~ 900℃ 之间的平均比热一般为：1.184 kJ/kg·℃。

4. 碳酸盐分解吸收热量

$$q_4 = m_{CaCO_3}^r \times 1660 + m_{MgCO_3}^r \times 1420 \quad (1-11)$$

式中  $q_4$  —— 碳酸盐分解吸收热量 (kJ/kg-ck)；

$m_{CaCO_3}^r$ 、 $m_{MgCO_3}^r$  —— 见 (1-2)、(1-3) 式

1660 —— 碳酸钙分解热效应 (kJ/kg-CaCO<sub>3</sub>)；

1420 —— 碳酸镁分解热效应 (kJ/kg-MgCO<sub>3</sub>)。

5. 物料由 900℃ 加热到 1400℃ 时吸收热量

$$q_5 = (m_r^d - m_{H_2O}^r - m_{CO_2}^r) C_m (1400 - 900) \quad (1-12)$$

式中  $q_5$  —— 分解后的物料由 900℃ 加热到 1400℃ 时吸收的热量 (kJ/kg-ck)；

$m_r^d$ 、 $m_{H_2O}^r$ 、 $m_{CO_2}^r$  —— 分别见 (1-7)、(1-6)、(1-5) 式；

$C_m$  —— 物料在 900 ~ 1400℃ 时的比热一般为 1.033 kJ/kg·℃；

6. 形成液相吸收热量

$$q_6 = 109 \text{ kJ/kg-ck} \quad (1-13)$$

(三) 形成 1kg 熟料放热量的计算

1. 粘土脱水后无定形物质转变为晶体放出热量

$$q_1' = m_{AS_2H_2}^r \frac{M_{AS_2}}{M_{AS_2H_2}} \times 301 = m_{AS_2H_2}^r \times 0.86 \times 301 \quad (1-14)$$

式中  $q_1'$  —— 粘土脱水后无定形物质结晶放热 (kJ/kg-ck)；

$m_{AS_2H_2}^r$  —— 见式 (1-4)；

0.86 —— 脱水高岭土 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 2SiO<sub>2</sub>) 和高岭土 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · 2SiO<sub>2</sub> · 2H<sub>2</sub>O) 分子数之比；