
技术资料译丛

水泥制造技术

CEMENT PRODUCTION TECHNOLOGY

(二)

国家建筑材料工业局

武汉建筑材料工业设计研究院

一九九七年十月

目 录

一、低挥发份固体燃料用于预分解炉.....	1
二、优化预分解炉设计与操作性能.....	7
三、优化水泥厂分解炉的燃烧.....	19
四、水泥窑煤火焰.....	37
五、回转窑火焰中分子间电子迁移可减少 NO_x 形成.....	44
六、空气动力学与煤.....	50

低挥发分固体燃料用于预分解炉

1. 引言

今天水泥工业几乎完全由烧油改为烧煤, 某些国家目前倾向于使用低挥发份固体燃料, 如石油焦、低挥发份烟煤和无烟煤。与国际市场上标准煤相比, 这些燃料具有价格上的优势。

现有技术允许水泥厂旋窑使用低挥发份燃料而不会引起任何问题。但根据经验, 在水泥生料预分解炉中低挥发份煤很难完全燃烧。这就是说, 分解炉内已经燃烧的煤屑以碳颗粒形式与分解生料混合后进入旋窑。

旋窑中碳颗粒可能生成CO、SO₂导致FeO₂还原。CO 可能在窑尾燃烧, 从而提高烟室温度。这种情况, 伴随着硫循环或许再加上低熔点的FeO₂的存在, 可能引起烟室, 窑尾上升烟道及最低一级预热器旋风筒内结皮。此外, 在带旁路的窑中, 窑烟气温度升高, 增加了能量损失, 鉴于此, 应尽可能提高预分解炉中煤的燃烬率。

2. 低挥发份煤中试厂试验

为了研究在水泥分解炉中使用低挥发份燃料的方法, 在中试厂设备中(图1)开始了一系列试验。

该试验设备有一个预热器塔(带三级旋风预热器), 一个FLS分解炉和一个旋风冷却器。冷却器只用于将煅烧后的生料冷却到可处理的温度。设备产量相当于日产75t熟料。热发生器中产生750℃热燃烧空气用于分解炉。通过注入纯氧气将氧含量调节到21%。由皮带喂料机计量喂煤, 并引进分解炉进料锥体下的热空气管道。

试验包括二个阶段,一是用正常的挥发份的煤燃烧,一是用含18%气体(20%干燥、干灰)的低挥发份煤燃烧。两种情况下煤粉磨到细度为90 μ m筛上筛余10%

两个试验阶段中分解炉内温度,气体在分解炉内停留时间以及分解炉出口管道内氧气含量是变化的,从分解炉旋风筒中取约100个经过煅烧的物料试样,并对未燃烬的碳进行分析。

使用特殊研制的取样器,对热的煅烧物料取样。这种取样器中,有少量的生料试样密封在一带内部冷却针的杯中。这样可确保试样快速冷却,而不与空气中氧气接触,因而避免试样中未燃烬的碳进一步发生反应。

图2 示出中间试验厂试验获得的结果所进行的多重线性回归分析结果。图中,左图示出煤中固定碳百分量(分解炉未燃烧的)——依据气体停留时间画出的曲线图。两条曲线分别表示燃烧正常高挥发分煤与低挥发份煤的情况。

显然,燃烧低挥发份煤,增加了煅烧生料中未燃烬碳含量。同时,该曲线图表明,可通过加大分解炉体积延长分解炉中气体停留时间来减少未燃烬碳。第二个图表明燃烧低挥发分煤时,可明显提高分解炉内燃烬率。(当分解炉中温度从正常900℃升高到1000~1100℃时)。第三个图表明正如熟料一样,随着分解炉中过剩空气量增加,燃烬率也有提高。

3. 在4000t/d·FLS分解炉中燃烧无烟煤和石油焦。

当在日本ASO水泥公司Tagawa厂日产4000吨的FLS预分解窑系统中燃烧无烟煤和石油焦时,可运用中间试验获得的经验。

上述窑系统为FLS-SLC型(离线分解炉)。该系统有两个单独的

预热器系列,一个利用窑出口气体,另一个利用预分解炉废气,如图3所示。

来自篦冷机的热燃烧空气由中部进入底部为锥体的分解炉,在此与两个预热器的预热生料及分解炉燃料相遇。分解的生料通过分解炉顶部出口随分解炉燃烧气体离开分解炉炉身。

预分解系统起始于1977年,最初是为燃烧重油而设计的。1980~1981年转换成烧煤,分解炉体积由 400m^3 扩大到 500m^3 ;到1983年分解炉可燃烧正常的高挥发份煤,无任何问题。1984年春天,开始在分解炉中进行无烟煤和石油焦燃烧试验。开始试验之前,分解炉系列中较低的预热器旋风筒以下插入一特别设计的分叉阀门,如图3所示。借助于该分叉阀门来自 C_3 旋风筒的适量的预热的生料旁路通过分解炉,直接引到分解炉出口管道。操作过程中,当转动分叉阀门时,将部分生料引入分解炉出口管道,这样离开分解炉的生料分解率将会提高,但当和分解炉出口管道与来自 C_3 的未分解生料混合时,温度就会降低。按这种方法,可使分解炉后的旋风筒保持正常温度,且喂入窑内的生料分解率保持正常,分叉阀门如图4所示。

图5表中示出试验期间的标准结果(几个星期),已煅烧的分解物料中碳含量值为上述特殊取样器取的6~8个试样,这可防止取样过程中和取样后的进一步反应。因此,不可以不加鉴别地将图5中所示的分解炉燃料,燃烧率值与其它文献中给出的值进行比较。因为文献中的值可能依据其它取样方法与分析方法。

表中第一列是正常高挥发份煤参照试验结果,试验过程中由于打开了分隔门,约有30%的 C_3 旋风筒生料进入分解炉出口管道,分解炉的温度有所升高。煤相当细($7\%+90\mu\text{m}$)测得的燃烬率为97%。

第二列给出燃烧半无烟煤(约11%气体,或干燥状态下14%,无灰)获得的依据,操作系数几乎与第一次试验一样。分解炉中燃烬率为94%,当考虑到无烟煤低反应率时,这种结果已很不错了。

第三列给出分解炉中“正常”温度(900℃)时,无烟煤的试验结果。由此可见,即使分解炉出口管道内氧气增加到4%,分解炉中燃烬率降到88%,这表明分解炉中温度标准的重要性。

最后一列给出分解炉较粗的石油焦作燃料数据(14%+90 μ m)。通过分叉阀门将部份C₃物料直接引进分解炉出口管道;分解炉中温度再次升高。由于分解炉出口内煤粒相对较粗,氧气含量较低,测得的分解炉中燃烬率只有90%。但是这些条件下,几天中窑操作结果与熟料质量完全令人满意。

4. 结论

由上文可得出这样的结论:当水泥分解炉中燃烧低挥发分固体燃料时,应采用特殊措施以确保分解炉中燃料有较高的燃烬率。

除了要将燃料磨得较细,增加气体与物料在分解炉中停留时间外,提高温度标准是提高分解炉中燃料燃烬率的一种有效方法。

A₅₀·Tagawa进行的试验证实,当用无烟煤和石油焦作燃料时,水泥分解炉中可达到较高的燃烬率。

高平译自《Z-K-G》84年2期

李福州校

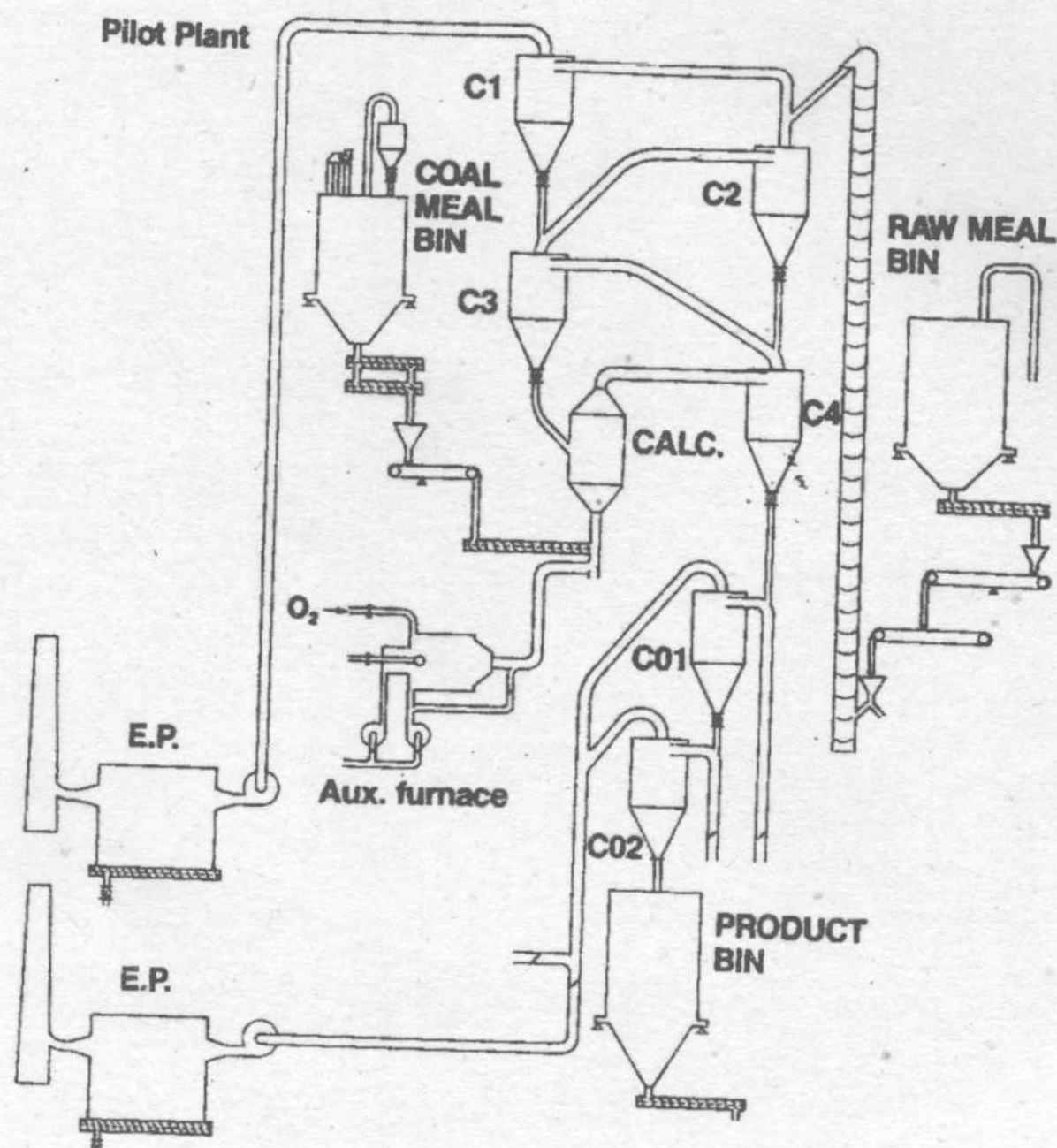
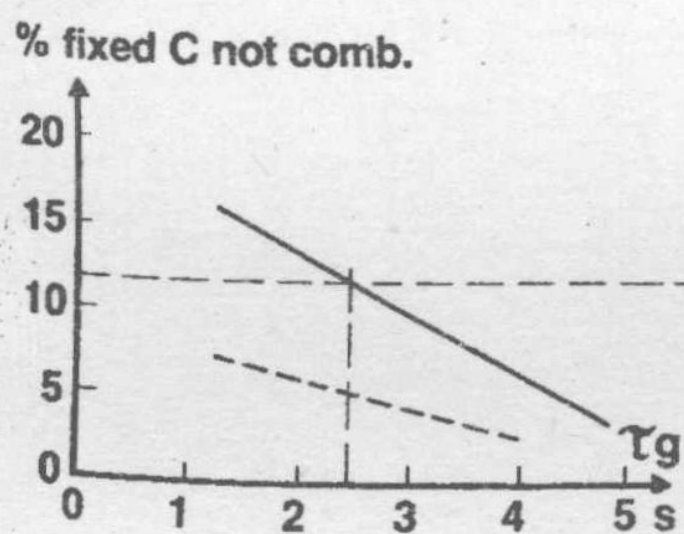
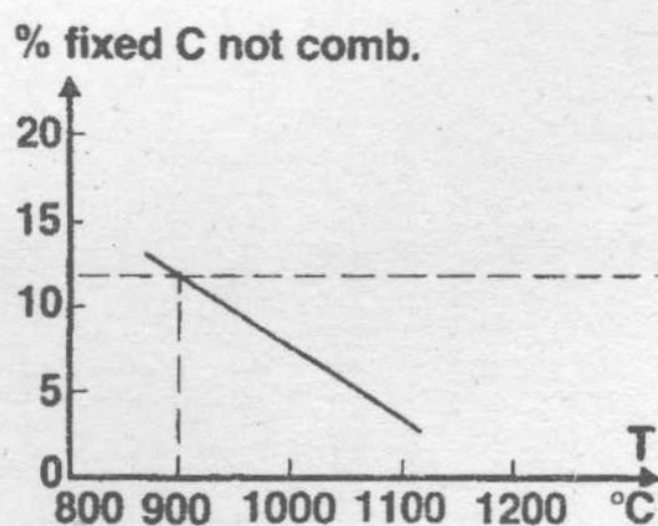


图1 FLS 中间试验厂

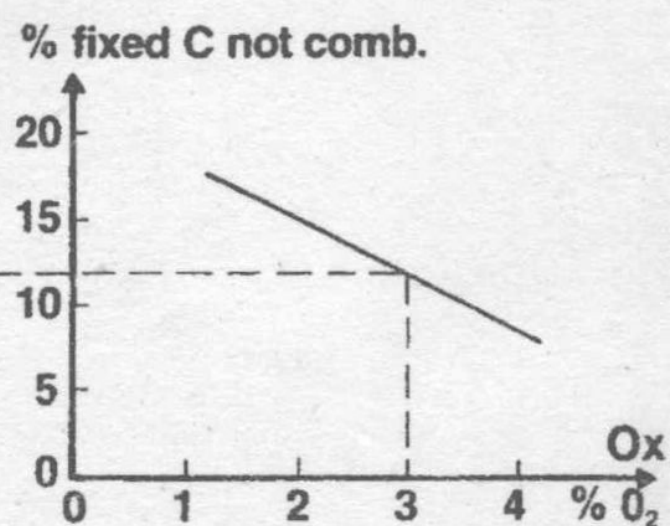
Results of pilot plant test.



Gas ret. time in calc.
T = 900°C Ox = 3% O₂



Temperature in calc.
τg = 2.5 s Ox = 3%



Oxygen in calciner exit
T = 900°C τg = 2.5 s

— Low-volatile coal: 18% gas, 10% + 90μm
--- "Normal" coal: 30% gas, 10% + 90μm

图2

Untersuchungsergebnisse, die an der Versuchsanlage gemessen

Research results as obtained from pilot plant measurements

图2 中间试验厂获得的研究结果

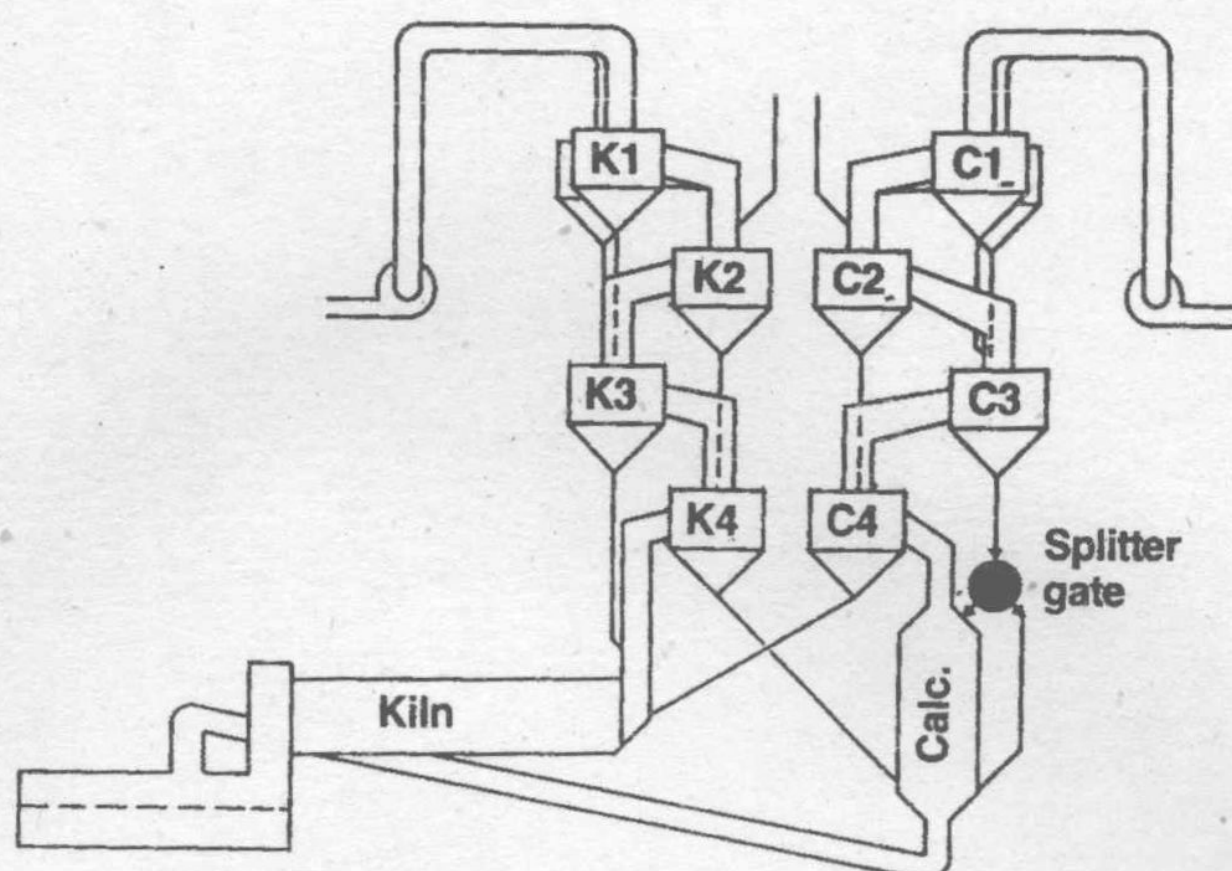


图3 . ASO 水泥公司 FLS-SLC 预分解设备原理图

Production: 4250 tpd

Set-point for C4-temp.: 900°C
Degree of calc. of C4-mat.: 93-98%

Fuel type		Normal coal	Semi-anthracite	
Volatiles, dry, ash free	%	37	14	
Fineness + 90µm	%	7	7	
Pos. of splitter gate	deg.	60	60	0
Av. temp. in calciner	°C	990	970	900
Oxygen in calciner exit	%	3	3	4
Carbon in calc. mat.	%	0.13	0.30	0.54
Degree of comb. in calc.	%	97	94	88

图5.

优化预分解炉设计与操作性能

预分解炉的主要优点是增产量,降低窑的热应力,提高工艺稳定性,减少 NO_x 排放。但因预分解炉是低温燃烧,粉尘浓度高,环境污染问题很严重。某些采用窑废气作为燃烧氧气源的分解炉氧气含量较低。因而燃烧不充分,一氧化碳及其它未烧烬物排放量高也不是为奇。此外,有时 NO_x 排放量高得出乎意料。天然气由于其可燃性范围窄,点火温度高,在预分解炉中特别难烧,这使大多数工艺工程师感到吃惊。低挥发份燃料如石油焦在上述分解炉条件下难以燃烧。

预分解炉中燃烧和热传递状况与回转窑有根本区别。回转窑中物料的加热由火焰的热力分布确定。作为对照,一个内燃分解炉实际上是一个等温系统,在这个等温系统中煤粉燃烧放热迅速被 CaCO_3 分解反应吸收。

20年代末Martin在研究水泥回转窑时首次认识到回转窑工艺中火焰的重要性。为了克服传统回转窑的局限性,Martin 制造了第一台内燃分解炉,但由于资金欠缺而放弃了。70年代初,Moles 和 Jenkins首次发明了优化回转窑火焰的方法。该技术最初应用很成功(被Moles称做火焰控制)。这些早期技术采用经验公式和物理模型。随着PC的出现,也利用热传递模型。

本文涉及预分解炉燃烧优化以及热传递的物理与计算机模型技术。这些技术的大量运用,改进了工艺稳定性,产品更符合要求,降低了燃料消耗和废气排放量,设备操作更稳定,提高了耐火材料寿命。

预分解炉中燃烧与热传递

燃烧是燃料氧化反应放热。燃烧工程师和设备操作者的目的是要在所需速率下获得稳定的放热。碳氢燃料氧化作用的化学过程十分复杂,这在以前的《世界水泥》中已有论述。空气中的氧气与燃料接触才能发生反应。因此按下列步骤发生燃烧过程:

混合→点火→化学反应→产品分散

燃烧速率取决于上述步骤的减慢。大多数工业燃烧系统,混合步骤慢,而其它步骤很快。因此可由燃料/空气混合速率和完全程度来控制燃烧过程的速率和完全程度。混合不充分,燃料气体和废燃料中形成未烧烬的Co。为了充分燃烧,必须保证提供足够的空气。燃烧器有效地混合燃料与空气流,从而通过燃料/空气混合速率及完全程度来控制燃烧,即它们的混合、燃烧。

就窑燃烧器而言,由于引入射流,产生燃料/空气混合。图1示出回转窑中燃烧器喷嘴的燃料射流。射流(一般是燃料与一次风)与周围介质间产生摩擦,使周围的二次风局部加速到射流速度。然后将加速后的空气引入射流,并使之膨胀。这个过程的控制及连续直至射流速度与周围介质相同。射流动量越大,引入到燃料的二次风越快,火焰越短。

预分解炉口燃料/空气的混合较复杂。燃烧器通常穿墙安装,大多数混合物是逆流,图2。由于大多数燃烧空气必须引入到一次风和燃料射流,那么分解炉内的空气流模型对燃料/空气混合影响巨大。主要通过分解炉身及三次风进风口的设计来确定空气动力学。火焰浮力、喂料浓度及料流模式对燃烧也有很大影响。由于分解炉喂料

从燃烧过程吸热,这降低了燃烧反应速率,特殊情况下可能导致一种“不燃烧”。这样“混合过的就是烧过的”这种假设对内燃分解炉完全不正确。

由于分解炉炉身及其三次风进风口的设计,燃烧器位置与形式以及进风口布置对燃烧与分解过程影响很大。任何一种预分解炉工艺模型均必须充分全面地考虑这些因素。

预分解炉中 NO_x 的生成

火焰中 NO_x 生成一般由热与燃料两条路径(煤、油和石油焦)。在燃气工厂,没有燃料 NO_x ,因此所有 NO_x 均是热 NO_x 。但必须注意,燃气厂虽然没有燃料 NO_x ,但因为火焰温度较高,并没有使 NO_x 排放量有所减少。

高温下(一般 1200°C 以上)大气中氮和氧结合生成热 NO_x 。由于反应的活化能高,要求高温,因此它与温度密切相关。在 Zeldovich 反应对中,氧基、氮基和氮分子间发生反应。除温度外,火焰中氧气浓度与高温带停留时间影响最终的热 NO_x 排放量。

大多数燃料(除气体外)作为有机物均含有氮,燃料燃烧时,这种有机氮转化成氰化物和胺,随后,根据局部氧含量而氧化成 NO_x 。但这一机理几乎与温度无关。

热 传 递

预分解炉是一个较好的混合系统,由于热气体与喂料均匀混合,

通过对流发生热传递。经比较, 由于沿火焰和通过其截面的气体浓度、放热以及温度变化大, 回转窑比较复杂。预分解炉中, 若空气流或料流不稳定, 燃烧、热传递及分解度可能受到不利的影响。

预分解炉常见问题

燃烧不完全

预分解炉的一氧化碳及未烧尽的碳氢化合物排放量高于老式湿法和干法窑。排放量增加, 一部分是由于使用低一次风燃烧器, 窑中燃料/空气混合差, 大部分是因为分解炉自身燃料/空气混合不好或由于火焰急冷所致。在烧天然气的分解炉或用石油焦的分解炉中, 由于燃料的易燃性范围较窄, 这些问题一般较严重。

燃烧状况差常常是预分解炉操作中一个不可避免的问题。但事实上这是设计不当所致。通过应用模型技术, 实现实际生产设备的设计, 可大大改善燃烧效率。

操作不稳定

燃烧过程很差, 或喂料流不稳定的地方导致系统, 分解率、出口温度、氧气、 NO_x 和CO浓度的周期性变化或随意变化, 而使分解炉操作不稳定。模拟试验可快速识别这类问题的真正原因, 通常可提供一种有效的且费用低的解决方法。

过 NO_x 生成

由于喂入料分解快速吸热, 周围温度不超过 1000°C , 热 NO_x 应该很低。但由于燃烧过程中“热芯”的原故, NO_x 排放量常常比预期的要高。这种情况下, 要求降低 Nox 排放量。通过燃烧过程与喂料分在

布模拟试验可实现这一目的,以确保整个炉身温度尽可能平均。

物料结块

由于物料表面熔化或再燃烧形成碳酸钙,局部过热或物料在高温带停留时间过长可能使物料结块。通过改善燃烧及喂料分布的空气动力学,可大大减少或消除这一问题。也可再次利用模拟试验来辨别问题的原因并提供一种解决问题的办法。

预分解炉模拟试验

燃烧和热传递是十分复杂的课题,不容易适用严格的数学分析。因此燃烧器、燃烧设备及相关设备的运行预测十分困难。设计燃烧与热传递系统有3种基本选择:

- . 假设
- . 结合经验推断简化计算
- . 系统模拟试验

任一分解炉要达到最佳操作性能就必须优化燃料与喂料部分,以在相对较低温度及高喂料浓度下达到最稳定的操作。同样这将获得最好的产品,要求设计该系统时充分考虑分解炉空气动力学特性及喂料浓度,利用模拟试验可获得这一结果。

有效的模拟试验要求识别并能显示出所研究的过程的重要参数。由于不可能按比例计算其大小,因而物理模型只能给出部分答案。同样由于现有计算机能力以及我们用数学描述燃烧与热传递过程的能力所限,数学模型也受到限制。结果每种模型技术提供的均是不完全的工艺过程。本研究的目的是为真实系统中真实火焰操作提供预言性的技术,并有助于改进操作性能。

火焰的物理模型

尽管计算机模型发展快,但物理模型仍是确定回转窑中火焰长度和形状以及分解炉的最有效的方法。早在 1938 年, William Hawthorne 在 MIT 发明了酸碱模型,并用其来模拟将燃料/空气混合确定火焰特性的燃烧工艺模型。用透明聚丙烯塑料建立一个全比例设备的物理模型。用稀释的含酚酞指示剂的苛性苏打溶液表示燃料,用稀释的盐酸表示燃烧空气。选择碱浓度及碱与酸的化学当量比表示对特殊燃料的正确的空气/燃料要求。调节酸流量以模拟不同的过剩空气量,从而确定火焰光晕与过剩空气间的关系。在完全混合的边界,酚酞变成无色,这样由有色区域确定模型火焰光晕。根据物理模型再形成全比例系统空气动力学,这样可精确模拟燃料/空气混合特性及典型条件下的火焰光晕。图3 示出水泥预分解窑的典型酸碱模拟试验。

热传递模拟试验(热传递模型)

燃烧过程及其综合能量传递设备的设计是所有工艺工程问题中最复杂的一个,要求同时解决热物质和动量传递。由于回转窑和内燃分解炉之间差异明显,若燃烧与热传递模型有效的话,必须考虑许多不同因素。数学模型用于各式各样的燃烧与热传递过程,包括该过程中油、煤与焦炭颗粒的燃烬,热传递及停留时间、喂料浓度及产品。

内燃分解炉是一个较好的混合系统,可利用 Hottel 开发的简单搅拌炉模型。经比较,由于湍流射流扩散火焰,且沿火焰及其横截面气体浓度、放热及温度变化明显,回转窑比较复杂。

计算流体动力学模型

由于料流问题的增多,尤其是悬浮物料问题(如预分解炉喂料),目前FCT采用PHOENICS计算流体动力学(CFD)部件作为一种设计工具。将要计算的区域细分成单元进行计算,这样形成计算栅。建立该栅时,规定了流体性能与边界条件。规定了该栅在内部形成了控制流体动力学的流体特性与边界条件,(Navier-stokes 偏微分方程规定形式),并由PHOENICS采用各种有限一体积求解。

PHOENICS能够求解50个相关变量,但求出的大多数一般变量是压力、每相出现的三个速度分量、焓、紊流性能以及出现的各种化学物质浓度。辅助变量如温度、密度、Mach 数或绝对速度一般直接由上述求出的变量推导出。将这些值贮存于每一计算单元用于以后的分析或绘图、划曲线。

CFD模型在预分解炉喂料系统流设计中起着重要作用,可用它来研究内燃分解炉内粒子流轨迹、浓度及停留时间(图4),并经适当调整喂料口位置和喂料速度对其进行优化。这些技术优化了新型设备的设计,提高了现有装置的产量。

模型确认

首先要形成一个预测方法,然后要确保其预测正确,即与实验观察一致。因此,FCT做了大量工作努力以确认这些计算机模型。该方法对预测和实验做了详尽的比较,并对根据该假设计算的不准确性、不适用性及测量不精确性差异予以解释,然后进行改进,最终将差异减小到可接受的最小值。FCT 的计算机模型已得到设备设计人员与操作人员的确认,使用可靠。

模型的应用

可用模型解决现有设备存在的问题,优化现有系统的操作性能,评价燃料或工艺变化对制造或优化设计新型预分解炉的影响。为此,一种特殊用途一般不只采用一种模型技术,因为每种技术只能提供部分答案。酸/碱模型用于模拟燃烧,而热传递充分搅动模型用来预测火焰到产品的热传递,CFD模型用于预测粒子流轨迹与停留时间。

在模拟试验中采用有效操作数据十分重要。这尤其适合于研究操作不稳定的系统。某些环境下采用专业仪器可能要求现场测量。图5示出预分解炉中不稳定燃烧条件下的酸/碱模型。根据大量的现场研究对该装置进行模拟。最初,燃烧条件在两种显示出的条件间跳跃,通过重新确定燃烧器位置解决这个问题。这可以在设备上完成,可以发现,煅烧过程越稳定,产品质量越好,燃料消耗越少。由于燃料的不同燃烧特性,燃料特性也大大影响工艺稳定性,因而形成不同的放热模型。

结 论

模拟工艺的成功更多地取决于工程师解释设备数据与确定要采用的相关模型技术的特殊技术,而不是技术自身的精美。通常只有经过适当训练的工程师,特殊情况下可用这种燃烧计算机模型“运行”这些模型。仅使用一种技术,只能给充分的信息提供一种可靠的解决方法。因此使用模型的工程师必须熟练使用所有这类方法,所以在不合适的环境下他们可能赞成使用上述技术中的一种技术。

在预分解炉上应用模型技术,提高了操作稳定性,增加了产量,

降低了单位燃料消耗与排放量。

高平译自《world cement》96年4期

李福洲 校