

低氮燃烧的关键是窑炉还原气氛的控制

The key to low nitrogen combustion is the control of furnace reduction atmosphere

赵玲彩 杨恒杰 沈文婷

(北京凯盛建材工程有限公司, 北京 100024)

摘要: 本文从氧化还原反应的基本原理入手, 通过详细阐述水泥窑炉低氮燃烧的系统控制及氧化还原反应气氛控制的若干种途径, 指出了水泥窑炉低氮燃烧技术中的分级燃烧和再燃脱硝技术的实质是窑炉内还原气氛的控制。

关键词: 低氮燃烧; 还原气氛控制; 分级燃烧; 再燃脱硝

Abstract: The paper begins with the basic principle of redox reaction, and points out that controlling reducing atmosphere is the essence of staged combustion and reburning denitration technology of the cement kiln low nitrogen combustion technology by elaborating the system control of low nitrogen combustion and several ways of the atmosphere control in redox reaction of cement kiln.

Key words: low nitrogen combustion; reducing atmosphere control; staged combustion; reburning denitration

中图分类号: TQ172.622.2 文献标识码: B 文章编号: 1003-8965(2017)04-0038-02

低氮燃烧的关键是窑炉还原气氛的控制, 而低氮燃烧技术中的分级燃烧和再燃脱硝技术的出发点和归宿也都是窑炉还原气氛的控制, 同时这也是判定分级燃烧和再燃脱硝是否成功的标准^[1]。窑炉的还原气氛控制是我们在推动低氮燃烧时必须牢牢把握的基本原则。遵循这一原则, 就可以有效降低烟气中的氮氧化物。在水泥窑炉上低氮燃烧, 虽然有一些成功的实践, 但从整体而言, 无论是实践上还是理论上, 还存在争议。空气分级燃烧和燃料分级燃烧合理注入点的选取和各自比例的优化分配; 通过优化注入点或注入比例, 达到窑炉内特定还原气氛区域的扩大和还原气氛的强化, 为烧煤水泥窑炉氮氧化物的削减, 创造充分和必要的条件。

1 氧化还原反应的基本化学原理

水泥行业和电力、化工等烟气脱硝的先行行业, 在大量的工业窑炉烟气脱硝的实践中, 充分反映出影响氧化还原化学反应的两个基本原理。1) 气氛决定氧化/还原化学反应的方向, 而温度决定氧化/还原化学反应的速度。前者是氧化或还原反应内在的物质条件, 后者是氧化或还原反应外在的环境条件; 2) 氧化/还原反应的气氛, 不仅取决于氧化或还原物质的摩尔比, 也取决于其各自的化学反应活性^[2]。如果说摩尔比是氧化/还原反应的基本数量上的比例要求, 而化学反应活性则是氧化/还原反应物质的质量方面的门槛要求。对于水泥生产线的低氮燃烧而言, 要考虑反应区域的气氛。在化学气氛有利于我们所需的化学反应时, 可通过提高温度来加速我们所期望的化学反应的进行。通过对于温度和化学气氛的有效调控, 可对氧化还原反应实现有效调控, 控制氧化还原反应的激烈程度和化学反应方向。同时, 我们对于某一区域气氛的判断, 不仅仅是该区域内氧化与还原物质的多寡比较, 还要更多的考虑氧化物质和还原物质的化学活性, 一些化学反应活

性差的物质, 因为通不过“门槛”标准, 即使是在温度较高的化学反应条件下, 也根本不可能参与我们所期望的化学反应, 只能视为不参与反应的惰性物质。因此, 除了氧化、还原物质的摩尔比以外, 我们还可以通过强化或弱化某一物质的化学反应活性, 来影响窑炉的某一特定区域的氧化或还原气氛, 调控氧化或还原反应的方向和速率。

2 低氮燃烧系统控制

可使用图 1 反映水泥窑炉低氮燃烧的系统控制过程。

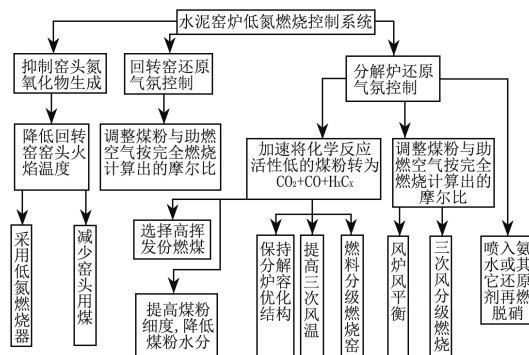


图 1 水泥窑炉低氮燃烧控制系统

3 氧化还原反应气氛控制的途径

3.1 还原物质与氧化物质的比例控制

如图 1 所示。煤粉在回转窑内停留时, 均保持在较高温度的烟气中, 燃烧器强力空气的喷吹旋喷转动量, 使烟气呈强烈的湍流状态, 造就了煤粉与助燃空气的快速充分混合, 在放出大量热量的同时, 煤粉可以实现完全燃烧生成 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 或不完全燃烧生成 $\text{CO} + \text{H}_x\text{C}_x$ 。因此只要将窑尾的过剩空气系数控制在 0.92-0.98 (当然不可过低, 以免形成较强的还原烟气, 甚至一些煤粉根本未燃烧就排出

回转窑外，造成窑尾烟室和缩口等处的还原燃烧导致粘结和堵塞），则可以将回转窑中后部相当大的区域有效控制为还原气氛。而还原氮氧化物之后多余的 $\text{CO}+\text{H}_x\text{C}_x$ ，则可以在之后进入分解炉和旋风预热器系统，最后在分解炉出口处，依靠之后空气分级燃烧再次注入的富裕的助燃空气稀释还原物质，将过剩空气系数调整到大于 1.0 的微氧化状态，实现完全燃烧，而不至因化学不完全燃烧而导致水泥熟料烧成热耗的无谓升高。

在分解炉、预热器系统中，其温度场和气流场与回转窑不同，作为一种固定设备，很易实现回转窑根本不可能做到的燃料和助燃空气的多点注入和各点比例的按需分配，实现注入量的优化灵活控制。所谓的助燃空气的分级燃烧，就是将分解炉 20%–30% 的助燃空气，从主燃烧器的影响区域内移出，而转移至分解炉中上部。对于分解炉而言，通过助燃空气的分级注入和燃烧，就形成中下部和上中部两个不同的区域，中下部按照完全燃烧计算得出的氧化物质与还原物质的摩尔比，还原物质占优势，过剩空气系数约在 0.8–0.9。在 RSP 分解炉 1200℃–1300℃ 的温度场里，比例偏高的煤粉在与高温助燃空气的充分混合，造就了部分因不完全燃烧转化为气态的碳氢化合物 $\text{CO}+\text{H}_x\text{C}_x$ 的良好条件，这样就在分解炉的中下部，人为的创造了一片可以充分还原氮氧化物的还原区域，促成了氮氧化物的还原。而没有充分燃烧的残留碳氢化合物，在富裕的助燃空气注入分解炉的上部以后，可以在分解炉的上部，甚至鹅颈管中实现完全燃烧，因此就可以在保证水泥熟料煅烧质量和产量，不额外增加水泥熟料烧成热耗的前提下，大幅度降低烟气中氮氧化物的排放。

因此在窑头精准控制煤粉与助燃空气的比例；而在分解炉内，则在主燃烧器的影响区域，将 20–30% 的助燃空气移至分解炉中上部，并改善一系列促进煤粉燃烧的技术措施，就有可能在主要氮氧化物生成区域——回转窑窑头和分解炉主燃烧器影响区域的后面，造就一个具有较强还原能力的区域，最终控制烟气中的氮氧化物的含量^[3]。

3.2 在特定区域内提高化学反应活性较低的煤粉向化学反应较高的气态碳氢化合物的转化率

提高化学反应活性较低的煤粉向化学反应活性较高的 $\text{CO}+\text{H}_x\text{C}_x$ 的转化率大致有两种途径。

1) 煤粉分级燃烧是通过提前注入部分煤粉的方式，提高煤粉在分解炉内的平均停留时间，在分解炉主燃烧器上游的适当部位注入少量煤粉，将使这部分煤粉利用窑内过剩空气提前不完全燃烧，进而少许提高主燃烧器燃烧区域的燃烧温度，从而加速整个煤粉的燃烧或不完全燃烧速度，提高分解炉中下部这一特定区域内固态煤粉向气态物质的转化。当然，由于还原物质的摩尔比稍大，因而部分煤粉，因不完全燃烧而转化为 $\text{CO}+\text{H}_x\text{C}_x$ 气态还原物质。

2) 加快煤粉不完全燃烧速率的系列措施

可以采用一系列措施，加快煤粉的燃烧，从而在助燃空气分级燃烧的前提下，在分解炉内促成大量的气态还原

物质的形成，造就一片很厚实的、可以大量还原氮氧化物的还原区域。

①选择高挥发份的燃煤；

②制备高细度、低水分的煤粉；

③改进分解炉燃烧器和分解炉结构，加强煤粉与高温助燃空气的混合，提高与煤粉混合的助燃空气湍流速度；

④用高温纯空气助燃空气取代回转窑烟气 + 三次风的混合物，促成煤粉的早发火和快速燃烧。

⑤提高篦式冷却机的热交换效率，提高助燃空气的温度。

3) 确保分解炉的基本有效容积和结构优化

这一命题与水泥熟料生产的高效、低能耗是一致的，也与我们采用无烟煤和劣质煤取代烟煤的资源政策所采取的技术措施是一致的。优化水泥熟料生产的系列措施，以及优化燃煤资源化的技术措施都是我们应予以尊重的。因此，确保分解炉的容积（保证煤粉有足够的停留时间，以便在助燃空气分级燃烧再次注入前，可以较大幅度将煤粉转化为气态的 $\text{CO}_2+\text{CO}+\text{H}_x\text{C}_x$ ，从而较大幅度实现氮氧化物的减量）和分解炉的结构优化，是促进燃料快速、充分燃烧的措施，也是保证水泥熟料的高产、低耗的重要措施，而且这也无疑为降低氮氧化物的排放创造了条件。

4 SCR 的实质也是一种再燃脱硝

SCR 就是将气态的还原物质——通过将氨水（或氨气、尿素）以雾化的方式转变成成为微小的液滴，注入到助燃空气不足的烟气中，在高温环境里进一步气化为化学反应活性很高的气态 NH_3 。这种化学活性较高的 NH_3 就在高温条件下，与氮氧化物反应生成 $\text{N}_2+\text{H}_2\text{O}$ ，完成烟气的无害化处置。冶金、化工、电力等部门，根据自身的条件，也有采用其它的液态或气态的、化学反应活性高的还原物质，在主燃烧器的下游，以雾化状态注入，造就主燃烧之后的窑炉空间的还原气氛，实现所谓的再燃脱硝（ERD），大幅度消除燃料燃烧时产生的氮氧化物。

无论是 SCR 还是再燃脱硝（ERD）工艺，其燃料的形式，注入点的位置和比例，注入时流场的形式和湍流速度强度，均应立足于还原区域还原气氛的强化。我们应该以这个原则分析分级燃烧、再燃脱硝（ERD）的技术细节，以求得最好的工艺效果。

5 结语

1) 分级燃烧、再燃脱硝（ERD）、SCR 等工艺，从实质上讲，都是从气氛控制、调节出发，将煤粉燃烧过程中产生的氮氧化物还原为无害物质的过程，必须从还原气氛的控制出发，来解析各种低氮燃烧技术的特点和细节，将水泥窑炉的低氮燃烧，健康、合理的推进。

2) 应采用各种措施，在助燃空气分级燃烧技术造就

（下转第 45 页）

因此,式(13)即为内摆的下摆量和挠性梁厚度的理论关系式。

4 内摆下摆量的试验测试

将石英摆片的外环放置在带孔的平台上,内摆在孔内自然下垂,测量平台和内摆最低点的距离就可测得摆片的实际下摆量。

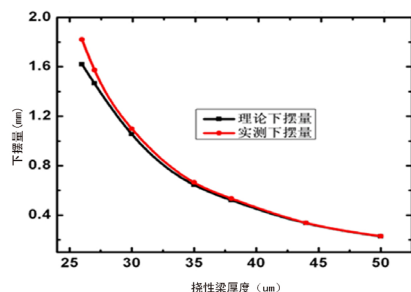


图6 石英摆片下摆量和挠性梁厚度的关系

将摆片破碎,取出挠性梁,用螺旋测微器测得挠性梁的实际厚度。Ⅳ类石英摆片的理论下摆量和实测下摆量随厚度的变化关系绘于图6。由图中可见,在挠性梁较厚时,理论值和实测值非常吻合;但是,随着挠性梁的减薄,实测下摆量的数值超过理论下摆量。其原因是:1)公式13是以弹性力学变形固体的模型为依托的,当挠性梁的变形较大后,挠性梁的实际性能偏离了变形固体的理论假设;2)当挠性梁达到很薄的尺寸时,表面和内部的缺陷使得弹性模量的数值降低。

5 结语

摆片灵敏度由挠性梁的厚度决定,因此可用挠性梁的厚度表征灵敏性。由于摆片形状的限制,挠性梁的厚度尚无法直接测量。本文通过测量内摆的下摆量来表征挠性梁的厚度,进而表征挠性梁的灵敏性。文章建立了挠性梁下摆量和厚度的关系公式,并通过破坏法测出了挠性梁的实际厚度,发现计算值和实际值吻合。

参考文献

- [1] 吕志清,侯正君.线性加速度计的现状和发展动向.压电与声光,Vol.20,No.5,1998,6:313-321
- [2] 袁峰.石英摆片加工工艺的研究.哈尔滨工业大学硕士学位论文,1988
- [3] 施平,袁峰,梁志兴等.石英摆片加工过程中若干问题的研究.哈尔滨工业大学学报,1993,25(6):86-89
- [4] 周岩等.石英摆片成形工艺研究.航天工艺,N0.5,1999,10:23-27
- [5] 林庄,袁峰,黄鸿斌等.摆片工艺流程的研究.哈尔滨工业大学学报,1993,25(2):18-24
- [6] 周岩,刘晓胜,杨乐民等.石英器件加工工艺最新进展.中国机械工程,Vol.11,No.6,2000,6:668-670

(上接第39页)

缺氧的条件下,将化学反应活性较低的煤粉,部分转化为化学活性较强、可以有效还原氮氧化物的气态还原物质。

3)通过温度控制、燃料细度水分控制等局部性手段,实现氧化还原反应速率的提升,从而更好的服务于反应方向。

4)气氛决定反应方向,温度决定反应速率。在合适的区域通过控制不同的反应气氛和温度,可以达到可观的效果。

参考文献

- [1]《低氮燃烧的出发点是水泥窑炉还原气氛的控制》水泥杂志2016第5期;
- [2]《提高还原燃烧水平,降低脱硝氨水消耗》水泥工程杂志2015年第3期;
- [3]《全过程低氮燃烧技术在水泥厂的应用》水泥杂志2016年第8期;