

# 工业窑炉脉冲燃烧技术的应用与效益浅析

黄瑾<sup>1</sup> 王晓春<sup>2</sup>

(1. 武汉理工大学; 2. 黄冈市中洲窑炉公司)

**摘 要:** 对工业窑炉脉冲燃烧技术的原理和特点进行了阐述,对该技术在工业窑炉中的应用作了介绍,并根据国家产业政策和行业发展动态对其经济与社会效益进行了初步分析。

**关键词:**

工业窑炉是我国的耗能大户,对窑炉的燃烧控制也成为社会和各企业关注的重点之一。因为窑炉的燃烧控制水平不但直接影响窑炉的整体性能(包括温度均匀性、控制灵活性及应用经济性等),而且它还决定窑炉的节能水平及其对环境污染的程度。目前国内的工业窑炉一般都采用连续比例燃烧控制的形式,即通过控制燃料和助燃空气流量的大小来使温度、燃烧气氛达到工艺要求。但由于这种连续燃烧控制的方式往往受到燃料流量的调节和测量等环节的制约,在大多数工业窑炉中的控制效果不佳。脉冲燃烧控制技术是近年来新发展起来的一种工业窑炉控制技术,在国内外已得到了一定程度的应用并取得了良好的效果。该技术与传统的比例(PID)控制、限幅控制相比,具有以下优势:对不同燃料有良好的适应性,不受燃料量的测量和调节这一关键性环节的制约,特别对于温度上升与下降的滞后性十分严重的大型窑炉,它均能达到理想的温度控制曲线。目前高档工业窑炉产品对窑炉内温度场的均匀性要求较高,对燃烧气氛的稳定可控性也要求较高,使用传统的连续比例调节控制方式无法实现。随着宽断面、大容量工业窑炉的不断出现,必须采用脉冲燃烧控制技术才能有效地控制窑炉内温度场的均匀性,从而提高窑炉的生产率和产品质量,降低能耗。

## 1 脉冲燃烧控制技术的原理和特点

顾名思义,脉冲燃烧控制技术采用的是一种间断燃烧的方式,使用脉宽调制技术,通过调节燃烧时间的占空比(通断比)实现窑炉的温度控制。燃烧状态下的燃料流量可通过主燃料控制阀门在线调节,喷咀(即烧嘴)一旦燃烧,就处于其设计的最佳燃烧状态,保证喷咀燃烧时的燃气出口速度均匀不变。控制系统使窑内喷咀交替燃烧,通过燃气在窑内不断搅拌,使窑内温度场均匀分布。当需要升温时,喷咀

燃烧时间加长,间断时间减少;需要降温时,喷咀燃烧时间减小,间断时间加长。同时根据窑炉的设定温度来控制燃烧时的燃料流量,当设定温度较低时,将主燃料控制阀门关小,当设定温度较高时,将主燃料控制阀门开大,避免窑内处于低温状态时,燃气与窑炉的温差过大,对窑内制品造成直接热冲击。

脉冲燃烧是一种新型的高效节能的低污染技术,其主要优点为:(1)系统简单可靠,造价低,无需在线调整流量,即可实现空燃比和炉内气氛的精确控制;(2)可提高窑内温度场的均匀性,减少 $\text{NO}_x$ 的生成;(3)喷咀的负荷调节比大,热工效率高,大大降低了能耗。

与传统的比例燃烧控制相比,脉冲燃烧控制系统中参与控制的仪表大大减少,仅有温度传感器、控制器和执行器,省略了大量昂贵的流量、压力检测控制机构。并且,由于只需两位式开关控制,执行器也由原来的气动(电动)控制阀门变为电磁阀门,降低了系统造价并增加了系统的可靠性。脉冲喷咀中的压力、速度、温度等参数是随时间周期性变化的,从而大幅度地强化了喷咀中的传热质混合过程,因而具有一般常规稳态喷咀不可比拟的优点。它可以在很低的过量空气条件下达到极高的燃烧效率(近似于100%),可以自行排出燃烧的烟气,而不需要使用烟囱,加之它本身具有极高的传热性能,对陶瓷及相关产品的烧成起到良好的作用。

当然脉冲燃烧控制技术也有一些缺点,如脉冲燃烧会对燃料压力、空气压力和窑内压力产生冲击,造成窑内压力的波动,燃料和助燃空气的调节难以完全同步进行,最佳的燃料和助燃空气的配比亦难以在全过程得到保证。在低热量工况下,窑内气流循环与温度均匀性较差。但是上述情况会随着窑炉材料性能的提高和窑炉体结构的完善而不断改进。

## 2 脉冲燃烧控制的关键技术

目前国内窑炉燃烧系统所用的喷咀多采用平焰式结构,燃料与助燃空气之间只进行简单的混合就进入窑内燃烧,因而喷咀流速较低,最多只能达到 100 m/s,并且入射锥角不合理,旋转不够,因而使燃烧不够充分,等温性差。而脉冲燃烧控制技术的喷咀必须满足如下要求:(1)能适应多种燃烧介质(最低燃料发热值可以达到 1 000 kcal/N·m<sup>3</sup>);(2)满足工业窑炉高温烧成要求,(最高烧成温度达到 1 800 ℃时喷咀和炉体不至于损坏);(3)适应低压燃料烧成(进喷咀前燃烧压力大于 1 000 Pa 即可)和适应热风助燃(满足 400 ℃热风助燃要求);(4)喷咀出口流速高( $V \geq 200$  m/s),燃烧效率高(达到 90%以上);(5)具有可靠的自动点火、火焰监测、熄火保护等功能。

考虑到窑炉的热工参数为多变量、强耦合、慢时变的参数系统,为使各项参数有机匹配,以达到最佳的燃烧效果,提高热效率,达到节能降耗的目的,关键技术在于高温脉冲燃烧系统的研究设计,以实现窑炉结构、喷咀布阵、燃料与助燃空气预处理的协同优化。

## 3 脉冲燃烧控制技术的应用

发达国家对于窑炉节能的基础理论研究十分重视,运用 CAD、CFD(计算流体动力学)相结合的手段,从理论上解决燃烧过程的分析和预测,并相当重视基础实验研究工作,为工程应用提供可靠依据。

德国 KROM 公司在窑炉燃烧控制技术方面代表了国际最高水平。其生产的脉冲燃烧系统及其控制部件如系列喷咀、控制器、执行器等居国际领先水平。而其燃烧控制系统多采用仪表控制,应用计算机控制的不多,采用现场总线系统的更少。基于现场总线技术优化集成的燃烧控制系统是当前燃烧控制领域的热点。该技术是控制系统应用于现场控制单元与控制系统之间的一种全数字化、双向、分布式通讯技术,在冶金、石化、机械、汽车等行业已得到了广泛的应用。近年来,德国的 KROM 等公司已开始在窑炉燃烧系统控制方面应用推广该技术,效果良好。

近年来国际上已有不少窑炉制造商把脉冲燃烧控制方式借鉴到硅酸盐梭式窑上。如以澳大利亚通用等公司为代表的纯脉冲燃烧控制梭式窑,用来烧成微晶玻璃、洁具等;以美国 SD 等公司为代表的脉动+比例燃烧控制梭式窑,用于烧成卫生洁具、日用瓷、微晶玻璃等。根据脉冲燃烧方式的特点和陶瓷烧成的工艺要求,一般认为采用“脉冲+比例”燃烧控制方式更适合于陶瓷的烧成。

脉冲燃烧技术并非传统燃烧技术的简单改造。脉冲燃烧很大程度上体现在一个“脉”字上,包括对脉动周期、大小火脉宽和脉动转化过程都有严格的要求,因此采用普通快开快闭型电磁阀阀板上打孔漏风配合电磁阀的通断方式实现“脉动”是荒唐的,也是有害的;另外,高速脉冲烧嘴与普通烧嘴也是不同的,脉冲燃烧系统要求烧嘴必须满足大、小火的频繁交替和大、小火功率的连续或跳跃式可调。在国内,湖北黄冈华窑中洲窑炉有限公司从 1994 年开始工业窑炉高温脉冲燃烧技术的相关研究,并取得了相当的技术成果。自 2000 年以来,该公司先后在设计制造的 300 余条(座)工业窑炉中应用了高温燃烧节能系统及其优化控制技术。此外,北京神雾热能技术公司也研发了“神雾脉冲燃烧系统”。它主要由高速燃烧器和工业炉控制系统 2 部分组成,采用脉冲燃烧技术来完成工业炉的升温、控温。对于燃气窑炉内部温度场和温度波动为  $\pm 2$  ℃,对于燃油(柴油)窑炉内部温度场和温度波动为  $\pm 3$  ℃,在使用重柴油时效果良好。针对普通燃烧器当窑炉内部温度低于燃料自燃温度时,燃料间断后火焰立即熄灭,无法继续燃烧的情况,神雾公司还研发了带有先导点火装置的高速燃烧器,该装置的发热量只占燃烧器设计发热量的 1/20~1/30,对炉内温度不会产生影响,从而解决了熄火难题,并采用当今最先进的气泡雾化技术,使燃烧器的雾化效果更好、雾化介质使用量更少,原来烧轻柴油的窑炉现可烧重柴油。其控制系统采用工业 PC 机作为控制单元和现场总线体系结构,极大地提高了系统可靠性。

## 4 技术经济分析和社会经济效益分析

### (1) 与现有技术装备对比分析

表 1 经济技术对照表(以年产 1 000 万件液化气日用瓷窑炉为例)

主要对比指标	脉冲燃烧技术	传统燃烧技术
每天耗气量/t	1.6	2.5
每年耗气金额(按 330 d)/万元	200.64	313.50
产品质量合格率	98%以上	92%
需要调控操作人员/人	1	3
燃烧控制系统造价/万元	40	50

从表 1 可以看出,无论从降低系统造价,节约能源消耗,提高产品烧成质量,还是从优化自动化控制程度,减少调节操作人力资源支出等方面,脉冲燃烧技术都具有很强的优越性、适用性、先进性和可操作性。

(下转第 16 页)

技术以及仪器设备都在迅速发展,出现了一些自动化程度高、灵敏度高、稳定性好的新型测量仪器和方法,它们的应用也越来越广泛。目前的热分析技术已大大超出文中所提到的内容,热分析技术在陶瓷材料领域的应用也远不止这些,只是由此可见一斑。热分析技术为分析和研究陶瓷材料的结构和性能,为陶瓷材料制备过程中产品质量的分析和控制提供了标准的和例行的检验方法,为陶瓷材料学科的热力学和动力学研究提供了操作简便、快速、灵敏的等温法和非等温法研究手段。但是,要分析和鉴定物质,以分析资料来指导科研和生产,只依靠单一的分析方法是不行的,在解答从科研和生产实践中提出的各种问题时,有时并非一种分析手段就可以得到圆满的答案,往往需要多种技术配合使用方能奏效。各种热分析方法联用,如 TG-DTG(微商热重法)-DTA 综合热分析,或热分析方法和其它的分析方法相结合,才会得到比较全面的物质鉴定资料,才能对物质进行全面的、系统的、深入的研究。陶瓷材料领域的分析技术中,热分析方法也只是其中普遍使用的一种,其它的分析技术如电子能谱分析、x-射线衍射分析、透射及扫描电镜分析等分析方法在陶瓷材料领域的应用也非常广泛。合适的分析技术能够成为科研工作者的有力工具,也是制备高性能的陶瓷

材料所必需的。

### 参考文献

- [1] 陈镜泓,李传儒. 热分析及其应用[M]. 北京:科学出版社,1985.
- [2] Sestak, J. et al. Thermal Analysis Applied to Materials Science. J Therm Anal, 1995, 43:371.
- [3] 胡荣祖,史启祯. 热分析动力学[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [4] 李世普. 特种陶瓷工艺学[M]. 武汉:武汉工业大学出版社,1990.
- [5] 陆昌伟,奚同庚. 热分析质谱法[M]. 上海:上海科学技术文献出版社,2002.
- [6] Laureiro Y. Dehydration Kinetics of Wyoming Montmorillonite Studied by Controlled Transformation Rate Thermal Analysis. Thermochimica Acta, 1996, 278:165~173.
- [7] Nagasaki, S. Thermal Anal And Phase Diagram. Seramikkusu, 1997, 32(3):183~186 (Japan).
- [8] 张惠英. TAG24S24 型同时热分析仪简介及应用. 国外分析仪器技术与应用, 1993, 4:35~39.

收稿日期:2005-01-30.

作者简介:罗文辉,讲师,武汉,武汉理工大学自动化学院(430070).

(上接第 13 页)

### (2) 能源与环境分析

采用脉冲燃烧控制技术后,燃烧热效率可达 45% 以上,比未采用此技术的工业窑炉的燃料消耗至少降低 30% 以上,并显著提高工业窑炉内温度场的均匀性和产品烧成质量。采用脉冲燃烧技术可使燃料充分燃烧,减少燃烧排放物和有害气体的排放,从而减少环境污染。

### (3) 社会效益分析

采用脉冲燃烧技术的社会效益显著。仅按全国每年新建、改造陶瓷窑炉 1 500 余条、建材窑炉 2 000 余条、石化窑炉 500 余座、冶金及热处理窑炉 500 余座等窑炉量来简单计算,每条窑每年仅燃料消耗费用就能节约 112.86 万元(见经济技术对照表),则每年可以节约燃料支出 507 870 万元,即约 50 亿元。同

时,该技术的使用能提高产品烧成合格率,提高自动化程度,减少人力资源支出,节约系统造价,并且间接的可以增强相关产品在国际市场上的竞争能力。

## 5 结论及展望

脉冲燃烧控制技术作为一项新技术具有广阔的应用前景,可广泛应用于陶瓷、冶金、石化等行业,对提高产品质量、降低能耗、减少污染将发挥重大作用,是今后工业窑炉在自动控制领域的一个重要发展方向。

收稿日期:2005-03-12.

作者简介:黄瑾,硕士,武汉,武汉理工大学土木工程与建筑学院(430070).