

燃烧热能工程技术在加热炉 节能减排方面的具体应用

杨砾¹, 钱永康²

(1. 中国石油天然气集团公司, 北京 100007; 2. 北京航天石化技术装备工程公司, 北京 100011)

摘要:介绍了实现加热炉系统节能减排的工程途径。结合工程实例, 针对各类工业加热炉的具体特点, 优化热力参数性能指标, 实现以节能减排为目的的加热炉单元系统改造方案。

关键词:加热炉; 燃烧; 热能工程; 节能减排

中图分类号: TK175

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2012)01-0069-04

Application of thermal engineering technology in energy saving and emission reduction of heating furnace

YANG Li¹, QIAN Yong-kang²

(1. China National Petrochina Company, Beijing 100007, China;

2. Beijing Spaceflight Petrochemical Technology and Equipment Engineering Company, Beijing 100011, China)

Abstract: The approaches for energy saving and emission reduction of heating furnaces are introduced in this paper. Based on the specific features of various industrial heating furnaces, the performance parameters are optimized. The reformation scheme of heating furnace is obtained with the purpose of energy saving and emission reduction in the end.

Key words: furnace; burning; thermal engineering; saving energy and emission reduction

各类工业加热炉系统是一种有燃烧的加热设备, 广泛应用于石油化工、化肥和有机化学工业, 在石油化工生产中占有举足轻重的地位, 其运行好坏直接关系到整个生产装置的安全、高效、稳定、长周期运行。

石化行业工艺加热炉是连续运转的设备, 要求长周期操作。大型石油化工厂的加热炉的热负荷和能量消耗都很大, 对于一个中等加工深度的炼油厂来说, 其所拥有的加热炉的燃料消耗, 约占其处理原油能力的4%~8%, 所消耗燃料费用约占其操作费用的60%~70%。因此, 加热炉热效率的高低与生产成本有着密切的关系。

从调研数据看, 加热炉节能方面尚有很多潜力可挖。采用先进的燃烧热能工程技术, 结合各类工业加热炉的具体特点, 优化热力参数性能指标, 实施技术改造, 可实现装置热能利用效率的最优化。

1 加热炉系统节能减排的工程途径

热效率是衡量加热炉系统燃料消耗、评价炉子设计和操作水平的重要指标。扣除排烟热损失 q_2 、化学不完全燃烧热损失 q_3 (指排走的烟气中含有的未燃尽的可燃气体CO、H₂、CH₄等)、机械不完全燃烧热损失 q_4 (未燃尽的碳造成的热损失)、散热损失

q_5 (由于加热炉温度高于环境温度而向环境散失的热量)后的部分, 计算公式为:

$$\eta = [1 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5) / Q_{in}] \times 100\%$$

理论上分析, 能够减小公式中分子各项的技术措施, 都能够提高加热炉系统的热效率。但实施的工程途径却各有不同, 根据实践经验, 提高加热炉系统的燃烧效率最有效的工程技术手段应该重点在如何提高燃烧质量(减少 q_3 、 q_4)和减少排烟热损失(减少 q_2)方面。因为这些指标是影响加热炉系统热效率的主要因素。

1.1 排烟温度及其影响

在加热炉系统的热效率组成中, 排烟损失占到总热量的15%~20%, 是加热炉热损失的主要部分。从以下3个方面可以看出排烟温度对热效率的影响:

(1) 在不同排烟温度下, 过剩空气系数变化对热效率的影响是不同的。排烟温度为200℃时, 过剩空气系数 α 每增大0.1, 全炉热效率将下降约0.75%。而且排烟温度越高, 过剩空气带走的热量越多, 对热效率的影响越大(见图1)。

(2) 不同的排烟温度下, 对应不同的过剩空气系数值, 炉子的热效率相差很大。在过剩空气系数值较小时, 随排烟温度的增加, 热效率下降的幅度要小一些。

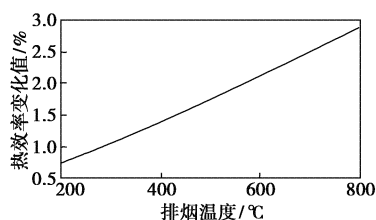


图1 过剩空气系数对热效率的影响

(3) 排烟温度每降低 10℃, 可以节省燃料 1% 左右。

采用余热回收装置(主要是空气预热器), 降低烟气热量损失, 可以明显提高加热炉热效率。

1.2 过剩空气系数及其影响

过剩空气系数是影响加热炉热效率的一项重要指标。过剩空气系数太小会造成不完全燃烧, 增加不完全燃烧热损失, 降低热效率; 过剩空气系数太大, 多余的空气在排烟温度下排入大气将带走大量热量, 直接增加排烟热损失而使热效率降低; 另外, 过剩空气系数的大小直接影响烟气阻力的大小。烟气中含氧量增加还会增加炉内构件的氧化, 烟气中过量氧气使炉管表面氧化程度加深, 缩短炉管寿命。并且, 烟气中过多的氧还会增加 SO_2 向 SO_3 转化, 加重低温烟气露点腐蚀等。

过剩空气系数对炉膛燃烧温度也有较大的影响。过剩空气系数过大, 会使加热炉内的燃烧温度降低。燃料燃烧温度越高, 热辐射强度越高, 火焰和高温烟气传给辐射炉管的热量就越多, 由于辐射室内燃烧温度由以上原因而改变, 会改变炉膛的温度场的分布, 影响加热炉内辐射段和对流段传热量的比例。图 2 表示了某种燃料油过剩空气系数和最高燃烧温度的关系。

从图 2 中可以看出, 当空气过剩系数由 1.2 升至 1.6 时, 最高燃烧温度下降约 330℃。由于炉子辐射室过剩空气系数增大后, 降低了燃烧温度, 使

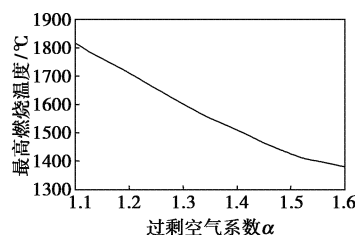


图2 过剩空气系数和最高燃烧温度的关系

辐射炉管吸热量下降, 多余热量被带入对流段, 因此增加了对流段的换热强度。一方面使得对流段管壁温度超温, 另一方面必须增加燃料用量才能保持加热炉的恒定热负荷, 因此加热炉的热效率下降。由于炉膛温度场的改变, 加热炉系统排烟温度上升, 热效率下降很快。在实际运行中, 由于操作不当, 使过剩空气系数过高, 对流室介质超温严重, 甚至使某些加热炉根本无法运行。

虽然过剩空气系数 α 减小, 排烟热损失 q_2 可以降低, 但是, 如果过剩空气系数过小, 则会产生缺氧现象, 导致化学不完全燃烧热损失 q_3 和机械不完全燃烧热损失 q_4 增加, 浪费燃料, 同时炉子烟囱冒大量的黑烟, 污染环境。

综上所述, 过剩空气系数对加热炉的热效率有较大影响。在保证燃烧完全的前提下, 使炉子在低而稳定的过剩空气系数下操作是有利的。过剩空气系数过小会造成燃烧不完全而浪费燃料, 过剩空气系数过大, 进入炉膛的空气量大, 炉膛温度下降, 由于烟气与炉管之间的换热系数与二者之间的温差是 4 次方的关系, 所以炉膛温度下降会极大地影响传热效率, 同时也增加了烟气的量, 即增加了同样温度下烟气的排烟损失。此外烟气中的氧气较多, 会使炉管表面氧化加剧, 缩短了炉管的寿命。因此合理选用过剩空气系数并能在实际操作中控制好, 对加热炉非常重要。

(上接第 68 页)

- [6] 王世明, 崔中利, 李顺鹏, 等. UASB 反应器处理 PTA 废水的研究[J]. 环境污染与防治, 2003, 25(4): 237-239.
- [7] 叶芬霞, 徐向阳, 俞秀娥, 等. 载体好氧预挂膜处理对厌氧消化反应器启动的影响[J]. 环境科学与技术, 2001, 24(1): 24-28.
- [8] Ostergaard K. Flow phenomena of three-phase fluidization bed[J]. AIChE Symp Ser, 1973, 69(1): 28-39.
- [9] Epstein N. Three-phase fluidization: some knowledge gaps[J]. Can J Chem Eng, 1981, 59(6): 649-657.
- [10] 李欣, 祁佩时, 刘云芝. 厌氧复合床反应器处理制药废水启动研究[J]. 2004, 20(6): 82-85.
- [11] 王进. 高效厌氧技术在印染废水处理中的研究应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [12] Hidalgo M D, Garcia-Encina P A. Biofilm development and bed segregation in a methanogenic fluidized bed reactor[J]. Water Research, 2002, 36(12): 3083-3091.
- [13] 金啸. 固定化微生物法处理 PTA 废水的研究[J]. 工业用水与废水, 2010, 41(3): 34-37.
- [14] 梅特卡夫和埃迪公司. 废水工程: 处理及回用[M]. 秦裕行, 史忠义, 杨文良, 等, 译. 北京: 化学工业出版社, 2004: 461-462. ■

2 加热炉系统节能减排的工程实例

根据上述介绍和分析,按照强化炉膛燃烧、强化炉膛辐射对流传热温度场分析,控制炉膛负压、减小过剩空气系数、降低排烟温度、增强保温等设计理念,实施加热炉系统节能改造,取得了良好的节能效果。

2.1 炉膛温度场分布的优化技术

采用先进的燃烧模拟技术及燃烧控制技术,通过使加热炉炉膛温度场的合理分布,合理分配加热能量,确定合适的加热火焰构型,强化燃烧,防止炉膛过热点的出现,延长炉管寿命,降低排烟温度和热损失,提高加热炉系统的综合性能。

某厂乙烯裂解炉装置由于生产需要,需将原有

的甲烷氢和 C_5 燃料改换成天然气燃料。由于燃料的改变以及炉子热负荷的改变,导致炉膛温度场改变。改造之前,由于对炉膛温度场的分布分析不清,炉膛上部过热,下部却偏冷,炉膛内存在严重的超温过热点。炉管结焦严重,炉管使用寿命不到1年。采用工程模拟计算方法并结合必要的实验和燃烧器结构的设计思想,对裂解炉内燃烧过程和传热过程进行模拟,从而得到了裂解炉炉膛内的温度分布情况。改造后乙烯裂解炉内的温度场分布更趋合理,横跨段温度和炉管表面温度分布也基本一致,说明乙烯裂解炉的燃烧系统改造后,能够很好地组织燃烧,形成比较合理的炉膛温度分布,能够适应燃料的变化,满足裂解炉正常运行的需要。改造前后炉管壁温测试结果见表1。

表1 改造前后炉管壁温测试结果

℃

管号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
改造前																
底部	977	1001	984	990	1002	992	951	996	1007	1007	1002	1019	989	991	982	916
中部	1001	1009	1004	974	1021	1008	977	1002	1011	1017	1011	1022	1225	1009	1012	983
上部	934	925	957	961	978	991	960	960	943	950	930	917	927	917	906	888
改造后																
底部	1010	965	986	1008	980	978	984	993	989	990	1021	1018	985	997	1002	990
中部	968	960	940	946	952	940	987	975	980	953	975	972	984	993	942	942
上部	940	932	966	921	927	934	923	922	963	935	923	928	968	955	923	933

排烟温度降低后,燃料消耗降低,加热炉热效率能够提高1%~3%。炉管寿命延长后,企业的设备采购费降低显著。由于烧焦周期延长,停炉维修时间缩短。

2.2 高热值燃料与低热值燃料的替代技术

采用先进的燃烧器设计和试验技术手段,在保证炉膛供热性能不变的前提下,采用低热值燃料(例如 $5\ 020 \sim 10\ 460\ \text{kJ/m}^3$ 的燃气)代替高热值燃料,对工业炉群燃烧装置优化设计,能够大幅度减少企业燃料采购费。

某公司50万t合成氨(煤化工)装置热风炉系统,原设计燃料为柴油和天然气。由于燃料成本的上升和天然气供应的困难,为节约燃料成本,企业拟采用系统平衡下来的低热值液氮洗尾气(热值 $2\ 092\ \text{kJ/m}^3$)和合成气(热值 $8\ 950\ \text{kJ/m}^3$)为热风炉系统的燃料。2007年经过全系统燃烧装置和燃烧控制系统技术改造后,热风炉系统可以节省 $1\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$ 的天然气和 $860\ \text{kg/h}$ 的柴油,同时由于降低

了放空火炬的排放量,企业经济效益显著提升。

采用企业自身工业装置平衡下来的低热值燃料后,由于这部分燃料一般成本低,排放量大,作为替代燃料后,企业的燃料采购费因此大幅度降低。另外,无效的火炬排放量可大幅度降低。

2.3 无动力消耗的工业炉群节能减排技术

在无附加能耗的前提下,集中利用企业剩余的低位热源(例如 $100 \sim 200\ ^\circ\text{C}$ 的水汽资源、低压蒸汽、急冷水等),对工业炉群燃烧装置优化设计,采用专用设备提高工业炉助燃空气的温度,改善了燃烧条件,强化燃烧,降低排烟温度,使工业炉的炉膛温度场分布更趋合理,降低工业炉群燃料消耗。该技术在中国石油、中国石化多套乙烯装置进行了工业应用。

由于采用企业剩余的低位热源作加热介质,能够提高工业炉助燃空气的温度 $50 \sim 120\ ^\circ\text{C}$; 全系统无附加能耗,因此,系统本身不再消耗额外能耗,并且将企业对低位热源降温系统的能耗也节省下来,

节能效益显著,燃料气节约量为炉子总燃料气量的2%~4%。

对于企业平衡后剩余的低位热源,如厂区内经水汽平衡后放空的低压蒸汽,须经二次能耗而降温降压回收的低压蒸汽、各种凝液、工业污水、锅炉排污等介质,都可以采用该项技术,将多余的废热集中利用于工业炉群的燃烧装置。由于系统无附加大型设备,空气预热器分散布置,便于施工,因此对工业加热炉系统有比较好的适用性。

2.4 负压加热炉系统的节能改造技术

针对炼油厂负压加热炉系统经常出现的“大马拉小车”,大功率设计小负荷运行的生产情况,在不改变原有加热炉系统的设计条件下,采用强制供风和外设空气预热器方案,实现燃烧自动控制 and 负荷的自动调节,显著降低排烟温度,全面提高热效率和燃烧控制水平。

某石化企业聚酯厂二甲苯车间 L101 炉为 20 世纪 70 年代制造的管式加热炉,炉型为典型的自然通风底烧圆筒炉。加热炉长期工作负荷为 3 349 MJ/h,运行时排烟温度 267℃,烟囱残氧 9.3%,据此测算系统热效率为 73%~74%。改造前点炉操作需要现场专人使用明火操作,改造后全自动点火(由控制程序完成风机启动、对炉膛内气体置换、长明灯点火并返回火焰信号、主燃气点火并返回火焰信号)。改造前对燃烧配风无法控制,仅能通过操作人员现场根据火焰情况调节燃烧器进口翻板和烟道翻板阀,加热炉负荷变化时助燃风配比需要人工边观察边调节,对操作者要求较高,而且很难达到高效率。改造后只需要在操作间就可以直观了解加热炉工作情况。提供烟气残氧控制,实现助燃风自动配比,加热炉可以始终处于最佳工作状态。改造前对燃烧器熄火需要操作人员现场观察,不可能做出迅速反应;改造后如果出现燃烧器熄火,加热炉会自动执行切断燃料供应,并对炉膛进行吹扫,以确保设备安全。改造前后参数记录见表 2。

表 2 改造前后参数记录

参数位置	流量/m ³ ·h ⁻¹	压力/kPa	温度/℃	氧量/%	热效率/%
改造前					
燃料气	110	50	20		40~73
排烟口	1470		267	9.3	
改造后					
燃料气	95	100	20		89~90
排烟口	1260		131	3.2	

改造后加热炉系统热效率由改造前 73% 提高到改造后的 89%,加热炉系统热效率提高 16%,节约燃气 15 m³/h,每年可节约燃气 126 000 m³。

该技术可以应用于热负荷大于 8 374 MJ/h,运行效率低于 80% 的加热炉系统性能提升。对于小负荷运行的大功率负压炉系统,结合改变火焰的发热分布,同时保持火焰的高度不变的技术措施,具有更为明显的经济效益和社会效益。

2.5 动力锅炉及加热炉燃烧和控制系统的改造技术

该技术通过采用低 NO 排放燃烧器以及与之配套的先进燃烧控制系统,不仅可以较大幅度降低工业加热炉系统以及锅炉系统的有害气体排放量,而且可以采用更为廉价的燃料(例如高黏度渣油、焦油等)为替换燃料,燃烧器具有油气混烧功能,最大限度降低用户在燃料方面的成本,实现加热炉自动控制系统操作的升级和燃烧效率的最优化。

某石化企业总厂 2 台 165 t/h 燃油蒸汽锅炉是乙烯装置中的关键设备,是日本三菱 CE-RBP 型高压锅炉。改造前为全烧油燃烧系统,改造后采用油气双燃料燃烧系统,分级平流配风器、Y 型烧嘴、周边型燃气喷嘴,既能单烧油,又能油气混烧。控制系统采用先进的 DCS 系统代替原锅炉的常规仪表和由继电器构成的安保系统,并增加了主燃料气投烧后的自控和安保系统,实现了锅炉自动启停、安保连锁、各主要参数的自动调节。改造后的热负荷调节范围为 50%~100%,炉膛过氧系数≤2%,机械与化学不完全燃烧损失≤0.3%,排烟碳黑含量符合国家标准,热效率提高 3%~4%。

3 结论

工艺加热炉是石油化工行业重要的耗能设备,其热效率的高低直接影响到石化企业的能源利用水平。通过分析影响加热炉效率的各种因素,提出了提高加热炉系统的燃烧效率最有效的工程技术手段应该在提高燃烧质量和减少排烟热损失方面。按照强化炉膛燃烧、强化炉膛辐射对流传热温度场分析,控制炉膛负压、减小过剩空气系数、降低排烟温度、增强保温等设计理念,系统分析加热炉运行存在的问题,通过优化炉膛温度场分布技术、高热值燃料与低热值燃料的替代技术、无动力消耗技术、负压加热炉技术、优化燃烧和控制技术等工程改造,结果表明,加热炉热效率能够大幅提高,节能效果显著。■