

# 催化裂化余热锅炉的技术特点

孙凯红<sup>1</sup>, 王 恒<sup>2</sup>

(1. 中国石化工程建设公司, 北京 100011; 2. 北京科技大学 热能工程系, 北京 100083)

**摘 要:** 催化裂化余热锅炉与普通锅炉相比, 过热汽温的调节范围大, 其运行工况受装置操作条件制约, 有其特殊性。针对催化裂化再生工艺及其烟气性质的不同情况, 重点介绍了避免过热器超温、防止经济器低温腐蚀、减轻积灰、保证给水调节阀稳定控制所采取的措施。提出了大型化炼油装置高温余热产生高参数蒸汽, 实现蒸汽逐级利用的建议。

**关 键 词:** 炼油厂; 催化裂化装置; 余热锅炉; 技术特点

中图分类号: TK229. 92 文献标识码: B

## 1 前 言

催化裂化装置是个热量过剩且高品位能量较多的炼油装置, 能量回收在节能中的作用十分显著。例如, 燃料型炼厂, 其产汽基本上能满足全厂用汽的需要。目前大型催化裂化装置的产汽量超过 100 t/h。中国自 20 世纪 80 年代初期在炼油工业开展节能活动以来, 已经开发了多种节能技术, 使装置的能耗不断降低, 装置的能量利用更趋合理。尤其是近年来利用催化裂化再生烟气、再生器取热和循环油浆等全部高温余热发生中压蒸汽, 驱动背压汽轮机做功后利用 1.0 MPa 或 0.5 MPa 背压蒸汽作为工艺或全厂用汽, 收到了良好的节能效果。典型催化裂化装置余热产汽设备汽水系统流程图见图 1。

由图 1 可以看出, 催化裂化装置不仅产汽量大, 产汽参数高, 而且产汽点多。其产汽设备包括: 高温取热器、外取热器、油浆蒸汽发生器和余热锅炉本体。催化裂化余热锅炉与普通中压锅炉相比有较大区别, 其特点为:

(1) 承担着装置全部饱和蒸汽的过热任务, 高温取热器、外取热器、油浆蒸汽发生器均产中压饱和蒸汽, 这部分蒸汽全部由余热锅炉

过热;

(2) 承担着装置全部产汽设备的给水加热任务;

(3) 汽水负荷变化范围大。根据操作需要外取热器有时取热, 有时不取热, 其产汽负荷的变化范围为 0~100%。这一变化直接影响过热器和省煤器的负荷;

(4) 再生烟气负荷变化范围大, 其负荷取决于原料性质、装置处理量和渣油掺炼量;

(5) 再生烟气组成变化范围大, 烟气组成取决于再生工艺;

(6) 炉膛均为微正压炉膛, 其密封性要求较高。

催化裂化余热锅炉及其产汽设备是装置的一部分, 运行工况受装置的操作条件限制。因此其设计必须结合再生工艺的不同情况、烟气性质以及产汽系统自身的特点满足工艺装置在各种工况下的要求。

## 2 催化剂再生工艺及其烟气余热回收

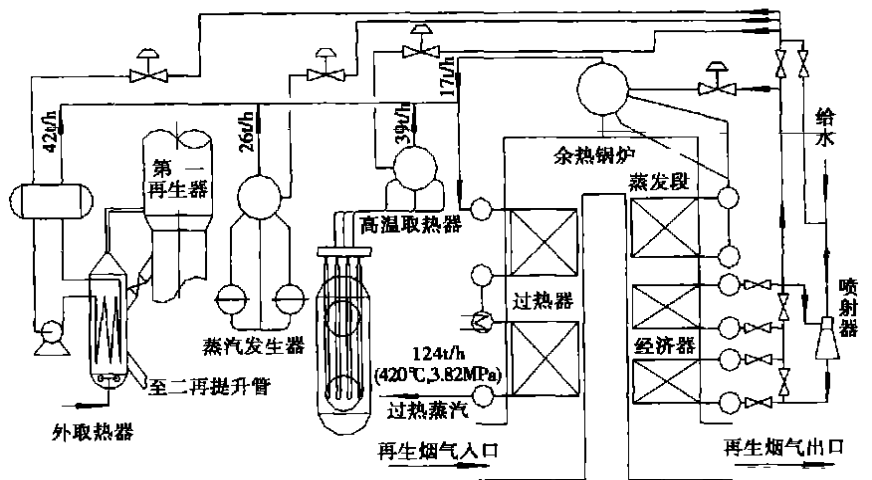


图 1 典型催化裂化装置产汽设备汽水系统流程图

收稿日期: 2004-06-03; 修订日期: 2004-08-12

作者简介: 孙凯红(1961-), 男, 吉林通化人, 中国石化工程建设公司高级工程师, 北京科技大学在职研究生。

催化裂化装置的进料通常是蜡油掺入部分减压渣油或是全部常压渣油,这些进料含有较高的残碳、重金属和难于裂解的组分。在提升管反应器内,进料与催化剂接触进行裂解反应,生成轻烃,如汽油、柴油和气体产品等。同时,难于裂解的组分缩合成焦炭,焦炭沉积在催化剂表面致使催化剂失去活性。为了使失活的催化剂再生,必须向再生器内通入空气,烧掉催化剂表面的焦质,恢复催化剂的活性。在这种再生烧焦过程中所释放出来的热量,一部分使催化剂提高温度,提供裂化反应所需的热量,另一部分被烟气带走,产生大量的高温烟气。再生工艺包括完全再生和不完全再生。加助燃剂的再生烟气不含CO,烟气温度为 $500\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,烟气压力约为 $0.3\text{ MPa}$ 。采用烟气轮机(以下简称烟机)回收其压力能,用余热锅炉回收烟气显热。有些工艺流程的再生烟气含有CO,加辅助燃料使CO燃烧后的烟温可达 $900\sim 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。烟气温度取决于烟气中的CO含量和辅助燃料量。CO含量的范围为 $2\%\sim 10\%$ 。对于一段不完全再生和同轴不完全再生,曾经用CO锅炉回收这部分热量。为了减少辅助燃料量,目前用CO焚烧炉回收其CO化学能和烟气显热,CO焚烧炉的炉膛温度可达 $900\sim 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。并联式两段再生,其烟气由两个再生器分别排出,一段再生烟气含有CO,二段再生烟气含有过剩氧,是中国石化工程建设公司开发研制的新流程。该流程的特点为,将一、二再生器排出的高温烟气在管道内直接混合燃烧,其烟温可达 $1000\sim 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,燃烧后的烟气依次进入高温取热器、第三级旋风分离器(以下简称三旋)、烟机和余热锅炉。这一流程的核心设备是高温取热器,其设计特点为:

(1)两个高温取热器沿烟气流动方向串联布置,共用一个汽包,产生中压饱和蒸汽,这样有利于提高取热降温的可靠性。

(2)在第二个高温取热器烟气进出口之间设有旁路,在烟气旁路上和第二个取热器出口分别装有一个高温蝶阀,用来调节取热器出口进三旋的烟气温度,使其温度控制在既能保证设备安全运行,又能实现最大的回收效率。

(3)高温取热器采用了较为安全可靠的水管式自然循环锅炉的设计方案。受热面垂直布置在两个立式容器内,每个容器内设置72根取热管,分为四组独立运行。取热管为夹套式,中心为下降管,夹层为上升管。水循环的路径为饱和水由汽包经下降管

进入入口集箱,然后分配至取热管。饱和水受热形成汽水混合物后进入出口集箱,再经上升管引入汽包。

### 3 再生烟气的性质

再生烟气含有催化剂粉尘,对烟机有磨损。在烟机前设置三旋,经三旋分离后的烟气含尘量为 $0.2\text{ g/m}^3$ 。烟气携带的催化剂粉尘粒度较细,其中90%以上的粉尘粒度 $< 10\text{ }\mu\text{m}$ ,但无腐蚀性。催化剂粉尘使受热面产生积灰,积灰呈疏松状,遍及整个锅炉受热面。

再生烟气含有硫化物 $\text{SO}_x$ , $\text{SO}_x$ 含量取决于进料含硫量,通常催化裂化原料油中含有 $0.3\%\sim 3.0\%$ (重)的硫。国产催化原料油的含硫量通常 $> 1\%$ (重),而中东产原油生产的催化原料油的含硫量较高。原料油中的硫以有机硫化物的形式存在着。经裂化后进料中的硫大约50%以 $\text{H}_2\text{S}$ 形式进入气体产物,40%进入液体产品,其余的10%进入焦炭,沉积在裂化催化剂上<sup>[1]</sup>。在再生器烧焦过程中焦炭中的硫氧化为 $\text{SO}_2$ 和 $\text{SO}_3$ ,统称为 $\text{SO}_x$ ,存在于烟气中。通过计算可知,当催化原料油含硫量超过 $0.5\%$ (重)时,烟气中的 $\text{SO}_x$ 就达到 $300\text{ }\mu\text{g/g}$ 以上。受反应动力学条件限制,烟气中的 $\text{SO}_3$ 一般占 $\text{SO}_x$ 总量的10%以下。 $\text{SO}_3$ 可以提高烟气露点,能与低温受热面上的凝结液形成稀硫酸,对受热面金属产生低温腐蚀。

## 4 余热锅炉及其产汽设备在装置中的作用

### 4.1 余热锅炉

催化裂化余热锅炉除回收再生烟气显热、保护环境外,还承担着装置所产全部中压饱和蒸汽的过热任务。要求过热器蒸汽温度的调节范围比普通中压锅炉大得多。同时,承担着装置全部产汽设备的给水加热任务。因此,余热锅炉一旦出现故障,全部中压饱和蒸汽只能减压使用,这必将影响装置的正常操作。

### 4.2 高温取热器

并联式两段再生烟气经管道混合燃烧后,其烟温可达 $1000\sim 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。而三旋和烟机可能承受的最高温度约为 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为了保证三旋和烟机的安全,设置高温取热器取热将烟气温度降至 $740\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。同时,回收高品位烟气显热并产生中压饱和蒸汽。

### 4.3 外取热器

对重油或渣油催化裂化,在催化剂再生烧焦过程中所释放出的热量将超过两器(反应器、再生器)热平衡所需要的热量。过剩的热量必须转移出去,否则将会引起催化剂水热失活。水热失活将对催化剂产生破坏作用。转移热量的办法就是对催化剂进行冷却,即取热。外取热技术是在再生器外部设置一个外取热器,从再生器出来的催化剂在外取热器内被汽水介质冷却并产生中压饱和蒸汽。总之,外取热器的作用一方面要保证反应—再生系统的热平衡;另一方面要对催化剂进行冷却,保证催化剂不产生水热失活。

### 4.4 油浆蒸汽发生器

油浆蒸汽发生器用于回收循环油浆的高温余热,是催化裂化装置节能降耗,能量综合利用的一项重要措施。循环油浆的温度约为 $300\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,用来发生中压饱和蒸汽。

## 5 蒸汽过热器的设计特点

催化余热锅炉蒸汽过热器与普通中压锅炉相比,过热汽温的调节范围较大。其主要原因是外取热器的取热量受工艺操作条件制约,而烟气又要首先流经过热器。在图1所示的典型流程中,外取热器产汽负荷的变化范围为 $0\sim 42\text{ t/h}$ 。受其影响过热器的负荷范围为 $82\sim 124\text{ t/h}$ ,这样就给调温装置的设计带来了很大困难。若以 $124\text{ t/h}$ 作为设计工况,在 $82\text{ t/h}$ 即 $66\%$ 额定设计负荷时,可能使过热器超温,引起爆管事故危及装置的安全运行。在实践中,我们根据过热器入口烟温通常不超过 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 这一特点,采用烟气旁路挡板作为过热器的调温手段。

催化余热锅炉蒸汽过热器通常布置在余热锅炉前部,直接与高温烟气接触。而过热器炉管通常选用20G和12Cr1MoV,过热蒸汽温度一般为 $410\sim 430\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,过热蒸汽压力为 $3.82\text{ MPa}$ 。在设计时所遇到的主要问题是在过热器负荷从 $66\%$ 到 $100\%$ 的范围内如何避免其超温。在这种情况下,如果单独采用面式减温器已经不能满足要求。为此对于蒸汽负荷变化范围较大的蒸汽过热器,我们通常采用调节幅度较大的烟气旁路挡板调温装置。烟气旁路挡板调温是通过改变流经过热器的烟气量来实现的。其缺点在于挡板大控制困难和投资较高。在采用挡板调温的余热锅炉上同时配备燃气燃烧器调节装置或面式减温器,运行时以旁路烟道作为粗调手段,以燃烧器

或面式减温器作为微调手段,这样调节幅度更大、更灵活。并且在结构设计和受热面布置方面做到合理,力求消除流量偏差、结构偏差和热偏差。具体措施是在过热器前、后级之间设有中间混合联箱或者进行左右交叉,这样即可使得前、后级的热偏差相互抵消。实践证明,这种调温手段效果良好。

## 6 经济器的设计特点

催化裂化余热锅炉经济器除了向余热锅炉本体蒸发段供应给水外,还承担着装置其它产汽设备的给水加热任务。其给水调节阀的安装位置与普通锅炉不同,另外我们在防止低温腐蚀以及在减少其泄漏对锅炉运行的影响等方面采取了一些特殊的办法,具体措施为:

(1)催化装置各产汽设备给水调节阀的安装位置均在余热锅炉经济器的后面,这与普通锅炉正相反。这是因为催化装置各产汽设备均有自己的汽包和自己的水位调节机构,因此其给水必须独立调节。另外,经济器所承受的压力比普通锅炉的经济器要高。

(2)在结构设计方面,通常将经济器受热面分成两到三组,在每一组的进出口之间均设有旁路,以便在其出现腐蚀泄漏时将其与系统隔离,使其对余热锅炉本体及其产汽设备的影响减至最低程度。

(3)由于再生烟气中含有 $\text{SO}_3$ , $\text{SO}_2$ 使烟气露点提高到 $120\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。同时,再生烟气还含有催化剂细粉尘,当受热面温度太低使烟气中的水蒸气在受热面上凝结时,不仅会在受热面上形成稀硫酸,对受热面金属产生强烈的腐蚀作用,而且还会将催化剂粉尘粘结到受热面上形成积灰。因此,提高受热面金属壁温是防止低温腐蚀、减轻低温受热面积灰的有效手段,为此我们在实践中采取了以下措施:

第一,余热锅炉的给水温度通常为 $104\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,为了提高给水温度,防止低温腐蚀,将经济器出口部分水通过喷射器注入到经济器入口给水中,使经济器的进口水温提高到 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。采取这种措施时,要求给水压力要有余量,因为喷射器的压降通常为 $0.4\sim 0.5\text{ MPa}$ ,并且经济器的压降不能过大,否则将无法循环。

第二,将锅炉给水经真空除氧后与装置低温余热换热,换热后的水温可达 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,然后直接进高压除氧器,这样即可达到提高给水温度、防止低温腐蚀和减轻低温受热面积灰的目的。

第三,采用耐低温腐蚀低合金钢管。

(4) 为了防止经济器在某些工况(如烟机不开时)下产生沸腾,影响各产汽设备给水调节阀的控制,因为各产汽设备给水调节阀均位于经济器之后,调节阀是按单相介质,即水设计的,对于汽水混合物,难以稳定控制其流量。因此,在设计时必须保持经济器出口水温有一定的欠热。

## 7 汽水循环回路的结构特点

中国石化工程建设公司设计的催化余热锅炉蒸发受热面的汽水循环回路与普通锅炉相比有较大区别,原因是大部分饱和蒸汽来自装置内其它产汽设备,蒸发受热面比常规锅炉少,为与锅炉整体相配合,采用如图2所示的结构。

由图2可知,该余热锅炉蒸发段汽水循环回路的结构特点为:只设上汽包;蒸发受热面为带有坡度的水平布置的蛇型管束,可分组设置;采用自然循环方式,用大管径集

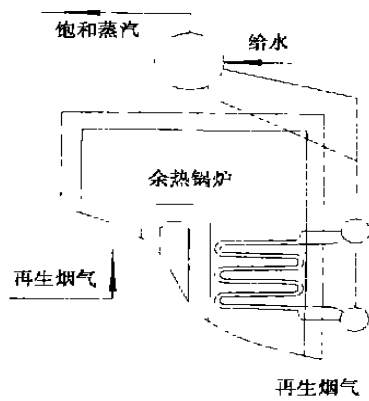


图2 蒸发段管束

中下降管将锅水从汽包引至蒸发受热面入口集箱,为使水量分配均匀,在集中下降管底部与蒸发受热面入口集箱之间采用多根分配支管连接;锅水在蛇形管内受热产生汽水混合物后进入出口集箱,汽水混合物由出口集箱经两根大直径汽水导管直接引入汽包;对这种水平布置的蒸发管束,为防止管内汽水混合物发生分层流动,管中流体的质量流速应不小于文献[2]所确定的数值,其值取决于蒸发管的管径、热负荷和工作压力,其循环流速通常不低于0.7 m/s;此外,设计时要保证这种自然循环回路有一定的循环倍率,可以通过计算确定,其值取决于回路的结构尺寸、汽包与蒸发受热面进出口集箱间的高度、热负荷和工作压力等因素,通常为20左右。这种结构适合于蒸发段入口烟温不超过600℃的区段,实践证明这种结构运行平稳,效果良好。

## 8 存在问题

### 8.1 受热面积灰

催化余热锅炉在运行过程中出现的主要问题是受热面积灰。积灰使传热热阻增大,传热效率下降,排烟温度升高,受热面得不到有效利用,例如其热有效系数通常只有0.55~0.65。清除受热面积灰的传统方法是采用各种形式的吹灰。例如,钢球除灰、蒸汽除灰和振动除灰等,实践证明这些除灰手段均不理想。而目前采用的声波除尘技术虽有效果但还不能从根本上解决问题。总之,积灰问题是制约催化裂化余热锅炉技术发展的重要因素之一,需要继续深入研究。

### 8.2 大型化挑战

炼油装置规模大型化是中国炼油企业发展的必然趋势,大型化炼油装置产生大量的高温余热,利用这部分高温余热可产生高、中压蒸汽。例如,中国石化工程建设公司为兰炼设计的 $300 \times 10^4$  t/a重油催化裂化装置再生烟气产生6.4 MPa次高压蒸汽超过300 t/h。大型化炼油装置余热锅炉的设计具有挑战性,除利用国内现有的技术外还可从以下两个方面获得技术支持:一是借鉴国内电站锅炉设计与制造的成熟经验,实现产、学、研一体化,共同完成关键技术的开发工作;二是引进国外的先进技术。因此,探索和研究面向21世纪大型化炼油装置和炼油厂的建设是中国广大炼油及其相关行业的科技工作者所面临的一项新的研究课题。

## 9 结束语

本文是在结合工作实践的基础上,对中国石化工程建设公司多年来催化裂化余热锅炉的设计工作进行了总结,以供同行在工程实践中参考。同时针对国内炼油厂及炼油装置规模大型化的发展需要,提出了研究与开发高参数、大容量炼油装置余热锅炉新技术的建议。

### 参考文献:

- [1] 陈俊武,曹汉昌.催化裂化工艺与工程[M].北京:中国石化出版社,1995.
- [2] 北京锅炉厂译.锅炉机组水力计算标准方法[M].北京:电力工业出版社,1980.

ty, Chongqing, China, Post Code: 400044), CAO Hong (Huaneng Chongqing Gas Turbine Power Plant, Chongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 617 ~ 619, 637.

By adopting a method combining theoretical analysis with historical operating data an off-design performance calculation was conducted of a combined cycle power plant. Through an evaluation of calculation results one can ascertain whether there is a lowering in performance of any one system. Moreover, on the basis of a graded fault classification to utilize BP algorithm-based sensitivity analytical method, it is possible to perform an on-line diagnosis of the causes triggering a performance deterioration, thus accumulating the experience of combined cycle plant operation and enhancing management level. **Key words:** combined cycle, off-design operation, BP algorithm

一般传热规律下广义不可逆卡诺热机的构形优化 = **Configuration Optimization of a Generalized Irreversible Carnot heat Engine under a General Heat Transfer Law** [刊, 汉] / ZHANG Xiao-hui, YANG Mo (College of Power Engineering under the Shanghai University of Science & Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 620 ~ 623.

On the basis of a generalized irreversible Carnot heat engine model and in conjunction with a general heat transfer law the characteristics of heat engine configuration optimization under the condition of finite construction materials were obtained, namely, a new relation of quantitative allocation of optimum heat conductivity. An analysis was conducted of the impact of such factors as the internal irreversibility and heat transfer laws, etc on the characteristics of heat engine configuration optimization. It has been found that the conclusions given in some now available literature pertain to a special case of the relation obtained by the authors. The conclusion reached herein can serve as a theoretical guide for the optimized design of heat engines. **Key words:** heat engine, general heat transfer law, optimization, allocation of thermal conductivity

催化裂化余热锅炉的技术特点 = **Technical Features of Waste Heat Boilers Used in a Fluid Catalytic Cracking Unit** [刊, 汉] / SUN Kai-hong (SINOPEC Engineering Construction Corp., Beijing, China, Post Code: 100011), WANG Heng (Thermal Energy Engineering Department, Beijing University of Science & Technology, Beijing, China, Post Code: 100083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 624 ~ 627.

In comparison with conventional boilers waste heat boilers destined for catalytic cracking units have some specific features, such as a wide range of superheated steam temperature regulation and operating conditions subject to changes in step with the working conditions of a fluid catalytic cracking unit. In light of the different conditions of catalytic cracking regeneration technology and flue gases the authors have focused on such problems as the avoidance of superheater overheating and low-temperature corrosion of economizers, as well as the alleviation of ash deposits. Some measures are proposed for ensuring the stable control of feedwater regulating valves. Furthermore, in connection with the production of high-parameter steam by high-temperature waste heat from a large-sized oil refinery unit, it is recommended to realize the utilization of steam on a graded basis. **Key words:** oil refinery, catalytic cracking unit, waste heat boiler, technical features

基于 Symphony 的风粉在线监测系统的实现和应用 = **Realization and Application of a Symphony-based On-line Air and Pulverized Coal Monitoring System** [刊, 汉] / SHENG Sai-bin, LI Guo-qiang (Automation Department, Wuhan University, Wuhan, China, Post Code: 430072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 628 ~ 630.

An on-line air and pulverized coal monitoring system based on Symphony distributed control system is described. As compared with an independently developed monitoring system, the recommended system enjoys a marked edge in terms of safety, cost effectiveness and the visualization of operation effect. Proceeding from the system functions a concise analysis