

催化重整装置低温烟气热能深度回收与品位提升系统优化

张冠博¹, 王随林^{1*}, 穆连波¹, 孟繁瑞¹, 张弛¹, 周英正², 翟慧星¹

(1.北京建筑大学环境与能源工程学院, 北京 100044;

2.黄河三角洲京博化工研究院有限公司, 山东 博兴 256500)

摘要:针对石化行业重整加热炉排烟温度较高、能耗高、烟气余热深度回收难、低温余热难以满足工业应用对温度的要求等问题,以重整加热炉为对象,研究低温余热梯级深度回收与温度提升方案;以山东某石化四合一加热炉为例,采用烟气冷凝热能回收装置与热泵结合的方案,对不同烟温降和工业用热水温度条件下的方案进行了技术经济比较,为解决工业低温余热回收难和低温热难以满足工业要求等问题及类似工程的节能设计和改造提供参考。

关键词:重整加热炉;烟气余热深度回收;余热品位提升;优化方案

中图分类号:TE08

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2018)02-0166-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2018.02.039

System optimization of deep heat recovery and energy-level upgrade of low temperature flue gas from catalytic reforming facility

ZHANG Guan-bo¹, WANG Sui-lin^{1*}, MU Lian-bo¹, MENG Fan-rui¹, ZHANG Chi¹, ZHOU Ying-zheng², ZHAI Hui-xing¹

(1.School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2.Chambroad Chemical Industry Research Institute Co., Ltd., Boxing 256500, China)

Abstract: The heating furnace for catalytic reforming facility in the petrochemical industry has problems such as higher temperature of flue gas, high energy consumption, difficulty in deep heat recovery from flue gas and low temperature remaining heat not meeting the requirements of industrial applications. This paper studies and develops the cascade deep recovery and temperature lifting schemes of low temperature remaining heat based on the heating furnace. A quadruple heating furnace of a certain petrochemical company in Shandong province is taken as an example to adopt a scheme combining the flue gas condensation heat recovery equipment with heat pump, the technical and economic performances of the scheme are compared under conditions of different flue gas temperature drops and different industrially-used hot water temperatures. This paper aims to provide references for solving the problems such as difficulty in deep heat recovery from flue gas and low temperature remaining heat not meeting the requirements of industrial applications, and also provides references of energy-saving design and renovation for the similar projects.

Key words: heating furnace for catalytic reforming; deep heat recovery from flue gas; energy-level upgrade of remaining heat; optimization scheme

我国《“十三五”节能减排综合工作方案》指出,到2020年,规模以上工业企业单位增加值能耗比2015年降低18%以上;燃煤工业锅炉实际运行效率提高5%,到2020年新生产燃煤锅炉效率不低于80%,燃气锅炉效率不低于92%^[1]。工业和信息化部《工业绿色发展规划(2016—2020年)》提出,到2020年,中低品位余热余压利用率达到80%^[2]。国家发改委和住建部《余热暖民工程实施方案》指出,采暖季我国北方工业余热总量约1亿t标准煤^[3]。2015年我国北方城镇供暖能耗为1.91亿t标准煤^[4]。据此,我国北方工业余热可满足北方地区采

暖能耗需求约50%。

我国炼油行业的能耗占全国总能耗的16%^[5]。有资料显示,截至2013年底,我国炼油能力千万吨以上炼油企业24家,2014年全国炼油加工量约4.88亿t,按较先进的炼油综合能耗(折标油)为47.33 kg/t计,能耗为2310万t标油,相当于2个千万吨炼厂的加工量^[6]。因此,炼油企业作为产能大户,又是能耗大户,如何降低炼油行业的能耗,提高生产效率和效益,实现节能减排的目标,成为炼油行业亟待解决的难题。

石化加热炉烟气中含有大量腐蚀性气体,会对

收稿日期:2017-10-19

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0601100);北京学者计划项目

作者简介:张冠博(1992-),男,硕士生;王随林(1956-),女,教授,研究方向为供热节能与热能高效利用,通讯联系人, suilinwang@ bucea.edu.cn。

余热回收设备造成腐蚀,缩短设备的使用寿命。同时低温烟气余热回收过程传热温差小,换热系数小,常出现设备体积大、耗材多、投资高等问题。另一方面,增加余热回收设备会增大烟气流动阻力,若配置不当,会产生噪声和震动,对原有工艺系统造成影响。在生产过程中,生产工艺要求的热媒温度较高,烟气余热的深度回收受工程条件限制。因此,开发和利用防腐、低阻、高效的烟气余热深度回收与低温热媒品位提升的方案和技术成为亟待解决的问题。

针对石化行业催化重整加热炉排烟温度较高、能耗高、烟气余热深度回收难、低温余热难以满足工业应用对温度的要求等问题,以催化重整加热炉为对象,研究低温余热梯级深度回收与温度提升方案;以山东某石化四合一加热炉为例,采用烟气冷凝热能回收装置与热泵结合的方案,对不同烟温降和工业用热水温度条件下的方案进行了技术经济比较,为解决工业低温余热回收难与低温热难以满足工业要求等问题及类似工程的节能设计和改造提供参考。

1 生产工艺特点与工程概况

1.1 工艺特点

催化重整装置是石化炼油装置中的重要装置之一。催化重整指在一定温度与压力及催化剂作用下,烃分子发生重新排列,使环烷烃与烷烃转化成芳烃与异构烷烃,同时产生氢气。因此,保证催化重整装置中温度、压力条件符合工艺要求是深度回收排烟余热的重要前提。催化重整反应示意图见图1。

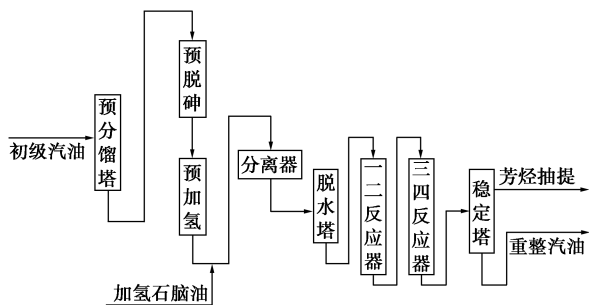


图1 重整反应示意图

1.2 工程概况

山东某石化100万t/a催化重整装置的F-201、F-202、F-203、F-204加热炉构成“四合一”加热炉,燃料为气体燃料,由PSA解析气、轻烃回收干气与外来的燃料气组成,燃料组分与燃料气热值见表1。加热炉原有效率为93.6%,排烟温度约120℃,燃料燃烧过剩空气系数1.15,烟气成分与烟气量见表2。

表1 气体燃料组分与热值

燃料组分	H ₂	C1	C2	C3	IC4	NC4	C5+
体积分数/%	50.22	14.69	17.23	9.29	2.19	1.2	1.34
燃料组分	H ₂ O	O ₂	CO ₂	CO	N ₂	H ₂ S	合计
体积分数/%	0.07	0.17	1.17	2.41	0.02	0.002	100
燃料气热值/(MJ·m ⁻³)	36.434						

表2 烟气成分与烟气量

烟气成分	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	SO _x
体积分数/%	8.56438	17.34997	71.60937	2.47628	0
烟气量/(kg·s ⁻¹)	24.07				

2 低温烟气余热深度回收与品位提升方案

根据工程现场条件,提出2种排烟余热深度回收与品位提升方案,进行技术经济比较。

方案一:烟气冷凝热能回收装置加热工业水与补水方案。烟气冷凝热能回收装置分两级将烟气余热梯级利用,第一级将工业水从70℃加热至100℃,烟气温度从120℃降至80℃;第二级将不同流量的补水从20℃加热至60℃,烟气温度从80℃分别降至30、35、45、55℃,方案原理见图2。

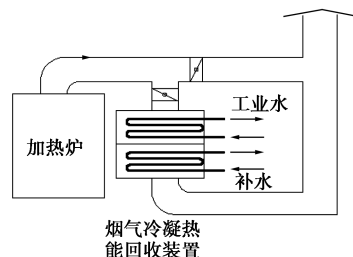


图2 烟气余热加热工业水与补水方案原理

方案二:烟气冷凝热能回收装置与热泵结合加热工业水方案。烟气冷凝热能回收装置分两级将烟气余热梯级利用,第一级将工业水从70℃加热至90℃,烟气温度从120℃降至80℃,第二级加热电动热泵制出的冷水,热泵的蒸发器制出的冷水进/出烟气冷凝热能回收装置以回收烟气热能,进口水温分

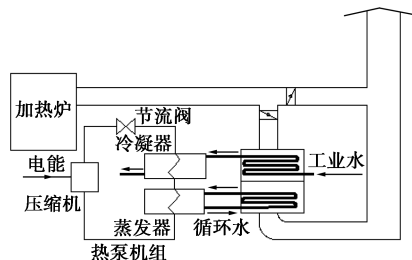


图3 烟气余热与电动热泵结合加热工业水方案原理

别为 25、30、40、50℃，出口水温分别为 35、40、50、60℃，烟气温度从 80℃ 分别降至 30、35、45、55℃；热泵的冷凝器加热工业水，工业水从 90℃ 加热至 100℃，方案原理见图 3。

3 节能潜力分析

3.1 加热炉排烟余热

根据该加热炉排烟温度 120℃，烟气的量 24.07 kg/s，烟气露点温度 56℃，过剩空气系数 1.15，燃料低热值 36.434 MJ/m³，燃料耗量 5 924 m³/h，得出燃料输入热量 59 954 kW，排烟余热 9 884 kW，相当于 14.1 t/h 锅炉的供热量，其中潜热 5 932 kW，占排烟余热量的 60.5%，排烟余热占燃料输入热量的 16.5%。

3.2 排烟降到不同温度下的节能潜力

该加热炉烟气温度从 120℃ 分别降至 30、35、45、55℃，排烟节能潜力见图 4。

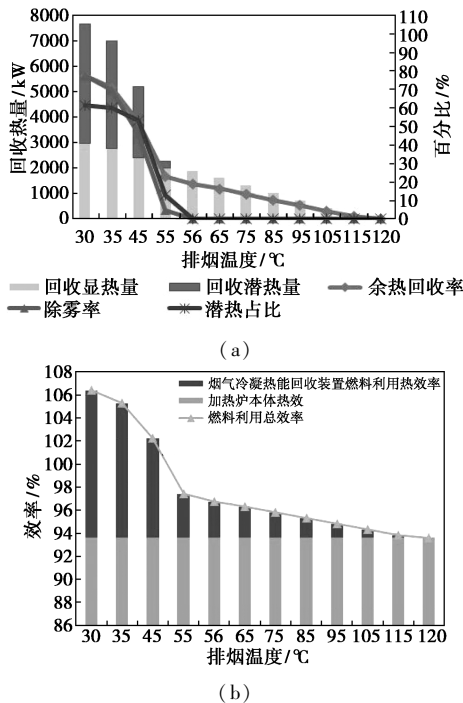


图 4 排烟节能潜力

排烟温度分别降至 30、35、45、55℃，可回收热量 2 288~7 670 kW，相当于 3.2~10.9 t/h 锅炉的供热量，余热回收率 23.1%~77.6%，烟气冷凝热能回收装置的燃料利用热效率 3.8%~12.8%，该加热炉总的热效率(以低热值计算)达到 97.0%~105.9%；潜热占可回收热量的比例 12.8%~61.4%，烟气除雾率 4.9%~77.5%，回收烟气冷凝水 11~175 t/d。

3.3 烟气冷凝热能回收装置中两级燃料利用热效率

烟气冷凝热能回收装置分两级，第一级烟气温

度由 120℃ 降至 80℃，第二级烟气温度从 80℃ 分别降至 30、35、45、55℃。两级燃料利用热效率见表 3。

表 3 第一级与第二级燃料利用热效率

排烟温度/℃	30	35	45	55
第一级燃料利用热效率/%	2.0	2.0	2.0	2.0
第二级燃料利用热效率/%	10.8	9.7	6.6	1.8

烟气冷凝热能回收装置第一级回收热量 1 206 kW，第二级烟气温度从 80℃ 分别降至 30、35、45、55℃，以第一级回收热量为基准，两级回收热量之比分别为 5.4、4.8、3.3、0.9。

4 不同排烟温度下热泵性能

4.1 热泵水温

蒸发器进口水温分别为 35、40、50、60℃，出口水温分别为 25、30、40、50℃，冷凝器进水温度均为 90℃，出水温度均为 100℃。

4.2 热泵的制冷量

热泵蒸发器制出的冷水温度分别为 25、30、40、50℃，进入烟气冷凝热能回收装置后出口水温分别为 35、40、50、60℃，将烟气温度从 80℃ 分别降至 30、35、45、55℃，热泵从烟气中回收的热量(热泵的制冷量)见表 4。

表 4 不同排烟温度下热泵制冷量

排烟温度/℃	30	35	45	55
热泵制冷量(从烟气中回收的热量)/kW	6489	5830	4012	1108

4.3 不同排烟温度下热泵性能参数

根据热泵厂家提供不同排烟温度下热泵性能参数见图 5。

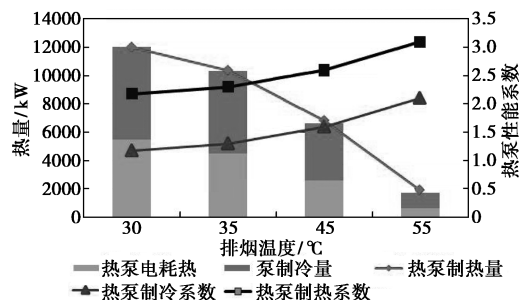


图 5 不同排烟温度下热泵性能参数

由图 5 看出，排烟温度从 80℃ 分别降到 30、35、45、55℃，热泵电耗分别为 5 510、4 508、2 617、612 kW，热泵制热量分别为 11 999、10 338、6 629、1 720 kW，热泵制冷系数分别为 1.2、1.3、1.6、2.1，

热泵制热系数分别为 2.2、2.3、2.6、3.1。

5 初投资与运行费

热泵制出低温冷水,使烟温降得更低,同时热泵冷凝器可以提升热媒品位。热泵节能量 Q_0 按下式计算:

$$Q_0 = Q_1 - W/\eta \quad (1)$$

式中, Q_0 为热泵节能量, kW; Q_1 为热泵制热量, kW; W 为热泵耗电量, kW; η 为燃气发电效率, 此处取 40%。

2 个方案初投资与运行费主要差别是方案二“烟气冷凝热能回收装置与热泵结合加热工业水方案”增加了热泵、水泵等设备,故主要分析热泵的初投资与耗电,2 种方案设备投资回收期相差为热泵的投资回收期。

投资回收期采用静态投资回收期方法计算,公式如下:

$$P_i = I/A \quad (2)$$

式中, P_i 为静态投资回收期,年; I 为设备总投资,此处为热泵设备投资及安装费,安装费按设备总投资的 20% 计,万元; A 为每年净收益,万元。

(1) 根据某厂家提供的热泵,在排烟温度分别为 30、35、45、55℃ 时,需配备热泵投资与耗电量见表 5。

表 5 配置热泵投资与耗电量

参数	数值			
排烟温度/℃	30	35	45	55
单台热泵制冷量/kW	179	209	278	438.5
单台热泵制热量/kW	331	370	453	647
热泵总制热量/kW	11999	10338	6629	1720
热泵节能量/kW	-1681	-932	85.9	190.1
单台热泵耗电/kW	152	161	174.5	204
所需热泵台数	36	28	15	3
每年运行时间/h	8000			
单台热泵价格/(万元·台 ⁻¹)	56	56	57	60
热泵设备投资/万元	2030	1568	855	180
热泵安装费/万元	406	313.6	171	36
热泵总投资/万元	2436	1881.6	1026	216
热泵总投资比(以 55℃ 排烟为基准)	11.2	8.7	4.7	1

(2) 在不同排烟温度下热泵投资回收期见表 6。

由表 6 看出,烟气温度从 80℃ 分别降到 35、45、55℃,方案二,即与热泵结合的方案,比烟气余热加热工业与补水方案投资回收期分别长 18.0、4.8、3.6 a。烟温从 80℃ 降至 30℃,与热泵结合的方案

比烟气余热加热工业与补水方案投资回收期长(超过 18.0 年)。

表 6 各项费用及热泵投资回收期

参数名称	参数值		
排烟温度/℃	35	45	55
热泵节能量折合耗气量/(万 m ³ ·a ⁻¹)	-73	6.79	15.02
燃料单价/(元·m ⁻³)	2.60		
热泵节能量折合燃料费/(万元·a ⁻¹)	-191.49	17.66	39.06
节水量/(万 t·a ⁻¹)	126.0	83.3	8.8
水单价/(元·t ⁻¹)	2.35		
节约水费/(万元·a ⁻¹)	296	196	21
热泵总投资/万元	1881.60	1026	216
热泵投资回收期/a	18.0	4.8	3.6

6 结论

以山东某石化催化重整加热炉为例,研究低温余热梯级深度回收与温度提升方案,进行技术经济分析,得出如下主要结论。

(1) 加热炉排烟温度 120℃,烟气量 24.07 kg/s,排烟余热 9 884 kW,相当于 14.1 t/h 锅炉的供热量,加热炉排烟余热占燃料输入热量的 16.5%,排烟潜热占排烟余热量的 60.5%。

(2) 排烟温度从 120℃ 分别降至 30、35、45、55℃,回收热量 2 288 ~ 7 670 kW,相当于 3.2 ~ 10.9 t/h 锅炉的供热量,余热回收率 23.1% ~ 77.6%,燃料利用热效率 3.8% ~ 12.8%,加热炉总的热效率 97.0% ~ 105.9%,加热炉潜热占回收热量的 12.8% ~ 61.4%。

(3) 2 个方案初投资与运行费主要差别是烟气冷凝热能回收装置与热泵结合的方案,增加了热泵等设备,2 方案投资回收期相差为热泵的投资回收期,即烟气温度从 80℃ 分别降到 35、45、55℃,与热泵结合的方案比烟气余热加热工业与补水方案投资回收期分别长 18.0、4.8、3.6 a。

参考文献

- [1] 国务院.“十三五”节能减排综合工作方案[Z].2017.
- [2] 工业和信息化部.工业绿色发展规划(2016—2020年)[Z].2016.
- [3] 国家发改委,住建部.余热暖民工程实施方案[Z].2015.
- [4] 清华大学建筑节能研究中心.中国建筑节能年度发展研究报告[M].北京:中国工业出版社,2017:11.
- [5] 沈潺潺,赵东风,李石,等.炼油企业低温余热回收利用的研究进展[J].现代化工,2012,32(11):22-26.
- [6] 陈余兴.炼油厂低温热替代高品质蒸汽加热的技术经济性分析[D].广州:华南理工大学,2015.■