

延迟焦化装置加热炉烟气余热深度回收利用方案与工程实测

孟繁瑞¹, 王随林^{1*}, 穆连波¹, 张弛¹, 张冠博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. 山东京博石油化工有限公司, 山东 博兴 256500)

摘要:针对石化延迟焦化装置加热炉排烟温度高、腐蚀性强、余热回收难题,以山东某石化 80 万 t/a 延迟焦化装置加热炉节能改造为例,基于烟气特点研究基础上,提出烟气余热深度利用节能改造方案,采用自主研发防腐高效低阻烟气冷凝热能回收装置并进行工程跟踪检测。研究表明,额定工况下,加热炉排烟温度由 200℃ 降至 40℃,节能 15.6%;部分负荷工况下,加热炉排烟温度由 150~180℃ 降至 40℃,节能 13.5%~14.6%,回收冷凝水 33.1~46.4 t/d,明显减少了雾气排放,节能、节水、环保、经济效益显著。

关键词:延迟焦化;烟气冷凝;深度回收;方案;工程实测

中图分类号:TE08

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2018)03-0199-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2018.03.044

Deep utilization scheme of heat in flue gas from heating furnace in delayed coking facility and engineering practices

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

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

Abstract: The flue gas from the heating furnace in petrochemical delayed coking facility exhibits high temperature, strong corrosion and difficult heat recovery. Taking a heating furnace in an 800,000 tons/year delayed coking facility of a Shandong petrochemical company as an example, this paper puts forward an energy-saving innovation scheme for deep utilization of flue gas heat, based on the study of flue gas characteristics. A flue gas condensation heat recovering facility that exhibits anti-corrosion, high efficient and low resistance is developed independently and used to perform engineering tracking and testing. It is shown that under rated operation conditions, the temperature of flue gas discharged from the heating furnace is reduced from 200℃ to 40℃, saving energy by 15.6%. Under the conditions of partial load, the temperature of flue gas discharged from the heating furnace is lowered from 150~180℃ to 40℃, saving energy by 13.5%~14.6% and recycling 33.1~46.4 t/d of condensate water. This scheme can obviously reduce mist discharge, save energy and water, and will bring about remarkable environmental and economic benefits.

Key words: delayed coking unit; condensation heat of flue gas; deep recovery; project; engineering test

石油是世界第一大能源,2016 年石油消费占全球能源消费的 1/3^[1]。中国是世界第二大石油消费国。在全球的原油资源日益重质化和劣质化的趋势下,含硫含酸原油和非常规原油越来越多地被开采,焦化工艺作为高硫原油和重质原油的主要加工工艺,日益受到重视^[2]。其中,延迟焦化具有轻油收率高,投资及操作费用低和经济效益好等特点,成为重油加工的首选工艺,世界上 85% 以上的焦化处理装置都采用延迟焦化工艺^[3]。2013 年,我国延迟焦化装置加工能力为 1.26 亿 t/a,仅次于美国,居世界

第二位^[4]。

延迟焦化是将重质油品加热后,经裂解、缩合反应,生成轻质油、中间馏分油和焦炭的热加工过程。将重质油品在加热炉中加热,采用高流速和高热强度,使油品在加热炉中短时间达到焦化反应所需的温度(495~505℃)后,离开加热炉进入焦炭塔,从而使焦化反应基本不在加热炉中进行,而延迟到焦炭塔中去进行。延迟焦化渣油是一种含有多族烃类的复杂混合物,沸点高,平均分子质量大。在高温作用下一方面裂解成小分子的气体、轻油等,另一方面又

收稿日期:2017-11-17;修回日期:2018-01-10

基金项目:国家“十三五”重点研发计划项目(2016YFB0601100);北京学者计划项目

作者简介:孟繁瑞(1991-),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, suilwang@ bucea.edu.cn。

缩合成焦炭。延迟焦化装置属于高能耗装置,混合原料在焦炭塔中反应需要高温,同时需要供给反应热,这些热量完全由加热炉供给^[5]。加热炉燃料燃烧后的废气温度可达到 300℃,造成高能耗、高成本,烟气中含有大量 SO_x、NO_x 等污染气体和水蒸汽,造成大气污染与烟雾排放。

我国《节能中长期规划》将余热余压利用工程列为“十项重点节能工程”之一,国家发展和改革委员会与住房和城乡建设部联合印发的《余热暖民工程实施方案》提出,2014 年,我国北方地区城镇集中供热面积为 71 亿 m²。采暖用能超过 1.8 亿 t 标准煤(燃煤约占 90%)。我国北方地区电力、钢铁、水泥、有色金属、石化等行业仍有约 3 亿 t 标准煤低品位余热资源尚未利用。并提出,到 2020 年,通过集中回收利用低品位余热资源,代替燃煤供暖 20 亿 m² 以上,减少供暖用原煤 5 000 万 t 以上。

延迟焦化加热炉烟气冷凝余热及烟气冷凝水深度回收利用,可以回收烟气中显热和大量水蒸汽凝结潜热,节约能源减少排放,烟气冷凝水可资源化利用,烟气冷凝过程对烟气中的 SO_x、NO_x 有吸收净化作用,节能、节水、除雾、减排潜力巨大。

本文中针对石化延迟焦化加热炉排烟温度高、腐蚀性强、余热回收难等难题,以山东某石化 80 万 t/a 延迟焦化装置加热炉节能改造为例,基于烟气特点分析基础上,提出烟气余热深度利用节能改造方案,采用自主研发防腐高效低阻烟气冷凝热能装置,进行工程改造和跟踪检测,为延迟焦化加热炉排烟冷凝余热和烟气冷凝水深度回收利用提供参考。

1 烟气冷凝余热深度利用方案

以山东某石化 80 万 t/a 延迟焦化加热炉节能改造为例,基于烟气特点研究基础上,提出烟气余热深度利用节能改造方案。

1.1 工程建设条件

该 80 万 t/a 延迟焦化装置由焦化炉、焦炭塔、分馏、吸收稳定、吹气放空、水力除焦、冷焦和切焦水循环以及干气脱硫、液化气脱硫部分组成,加热炉设计热负荷为 25.44 MW。

原料为减压渣油,掺炼外购渣油。采用延迟焦化工艺,在温度 495~505℃,压力 0.15~0.20 MPa 的工况下,经过裂解、缩合的一系列化学反应,生产焦化液化气、焦化汽油、焦化柴油、焦化蜡油、石油焦等产品。燃料为炼厂干气,主要来自原油如重油催

化裂化、热裂化、延迟焦化等的二次加工过程,主要成分为甲烷和氢气,燃料气低热值为 26 301 kJ/m³,高热值为 29 288 kJ/m³。设计燃料气消耗量约为 3 500 m³/h,设计年运行时数为 8 000~8 600 h,年耗气量为 2 800~3 010 万 m³。该套延迟焦化加热炉膛内微正压,烟气经原有空气预热器后排烟温度 150~200℃。

1.2 改造前烟气温度与烟气成分检测

延迟焦化加热炉余热回收改造前,烟气温度及烟气成分检测见表 1。

表 1 烟气温度及成分

排烟温度/℃	O ₂ /%	CO ₂ /%	NO/10 ⁻⁶	NO _x /10 ⁻⁶	SO ₂ /10 ⁻⁶
154.9	2.72	10.19	19	19	36

1.3 烟气余热深度利用方案

由于烟气中含有大量 SO_x、NO_x 腐蚀性气体,提出采用自主研发防腐高效低阻烟气冷凝热能回收装置,在空气预热器出口增设防腐高效低阻烟气冷凝热能回收装置,并辅以自然空气冷却除湿,进行排烟冷凝热能和烟气冷凝水深度回收利用及除雾改造,将烟温从 150~200℃降到 40~80℃,回收热能将工业用水加热至 60~85℃,采暖季用于厂区及周围建筑采暖,非采暖季用于厂区工业用热,系统原理图见图 1。

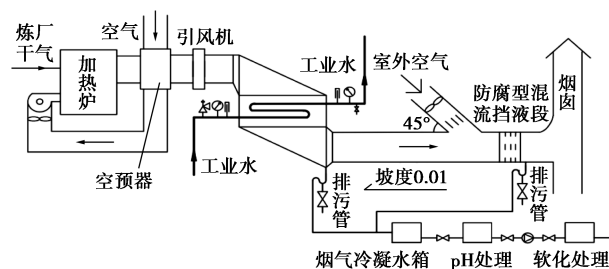


图 1 烟气余热深度利用方案原理图

2 排烟节能潜力分析

2.1 排烟余热量

延迟焦化加热炉额定工况下和部分(70%、50%)负荷工况下的排烟余热量见表 2。

由表 2 看出:①加热炉额定工况下,排烟余热量 4 954 kW,相当于 7.1 t/h 锅炉供热量,占燃料气输入热量的 19.9%;其中潜热占余热量 57%;②加热炉 70% 负荷工况下,排烟余热量 3 284 kW,相当于 4.7 t/h 锅炉供热量,占燃料气输入热量的 18.9%;其中潜热占余热量 60%;③加热炉 50% 负荷工况

下,排烟余热1 888 kW,相当于2.7 t/h 锅炉供热量,占燃料气输入热量的17.7%;其中潜热占余热65%。

表2 原加热炉排烟余热

参数名称	额定负荷	70%负荷	50%负荷
	工况	工况	工况
加热炉热负荷/MW	25.44	17.81	12.72
燃料气消耗量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	3400	2450	1750
过剩空气系数	1.15	1.15	1.15
燃料气输入热量/kW	24840	17390	12420
原空预器出口排烟温度/ $^{\circ}\text{C}$	200	180	150
烟气露点温度/ $^{\circ}\text{C}$	58	58	58
排烟余热/kW	4954	3284	1888
潜热占排烟余热量的比例/%	57	60	65
潜热/显热	1.3	1.5	1.9
排烟余热占燃料气输入热量的比例/%	19.9	18.9	17.7

2.2 排烟节能、节水、除雾潜力分析

加热炉额定工况下,排烟温度分别降至 80°C 和 40°C ;在加热炉70%和50%负荷工况下,排烟温度降至 40°C ,加热炉排烟节能、节水、除雾潜力见表3。从表3看出:①加热炉额定工况下,排烟温度降至 80°C ,回收热量为1 548 kW,相当于2.2 t/h 锅炉的供热量,余热回收率为31.3%,节能率为6.2%;排烟温度降至 40°C ,回收热量为3 887 kW,相当于5.6 t/h 锅炉的供热量,余热回收率为78.5%,节能率为15.6%;②70%负荷工况下,加热炉排烟温度降至 40°C ,回收热量为2 536.8 kW,相当于3.6 t/h 锅

表3 排烟余热节能潜力分析

	额定工况	70%负荷	50%负荷
	工况	工况	工况
入口烟气温度/ $^{\circ}\text{C}$	200	180	150
出口烟气温度/ $^{\circ}\text{C}$	80	40	40
回收余热/kW	1547.7	3887.4	2536.8
回收余热中潜热所占比例/%	0	49.7	53.1
余热回收率/%	31.3	78.5	77.2
回收余热占输入热量的比例(节能率)/%	6.2	15.6	14.6
入口烟气含湿量/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	134.7	134.7	134.7
出口烟气含湿量/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	134.7	49.5	49.5
回收烟气冷凝水量/($\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$)	0	66.3	46.4
烟气除水(雾)率/%	0	63.2	63.2

炉的供热量,余热回收率为77.2%,节能率为14.6%,潜热占可回收热量的53.1%;③50%负荷工况下,加热炉排烟温度降至 40°C ,回收热量为1 681.0 kW,相当于2.4 t/h 锅炉的供热量,余热回收率为89.0%,节能率为13.5%,潜热占可回收热量的59.2%。

3 延迟焦化装置加热炉烟气冷凝余热和水深度回收利用工程实例

3.1 检测依据与方法

检测依据为GB/T 2587—2009《用能设备能量平衡通则》,检测系统不同工况下稳定运行时的数据,同时采用正平衡法和反平衡法进行测试。

3.2 检测结果与分析

在46.1%~61.5%负荷条件下,对采用烟气冷凝热能回收装置节能改造后的延迟焦化加热炉进行了跟踪测试。

(1)烟气冷凝热能回收装置进出口烟温与水温变化

烟气冷凝热能回收装置进出口烟温、水温变化见图2。

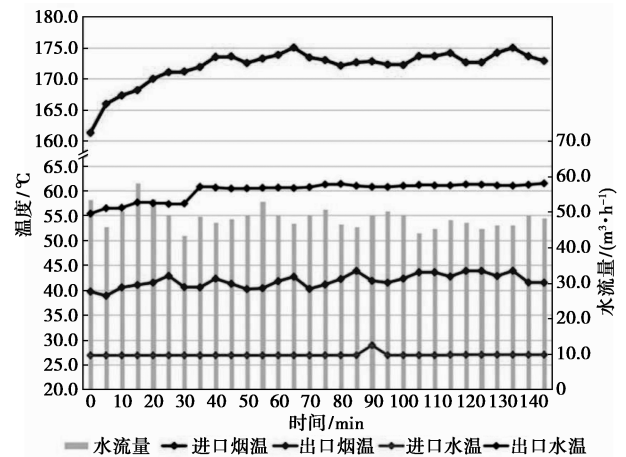


图2 烟气冷凝热能回收装置进出口烟温、水温

由图2看出,在加热炉负荷46.1%~61.5%,烟气冷凝热能回收装置进口水温为 $26.8 \sim 28.9^{\circ}\text{C}$ 条件下,烟道中心温度从 $161.3 \sim 175.0^{\circ}\text{C}$ 降至 $38.8 \sim 43.9^{\circ}\text{C}$ (烟道断面平均温度低于此值),将工业用水加热至 $55.4 \sim 61.5^{\circ}\text{C}$ 。

(2)烟气冷凝热能回收装置回收余热与节能率

烟气冷凝热能回收装置回收的烟气余热见图3,烟气冷凝热能回收装置的节能率见图4。

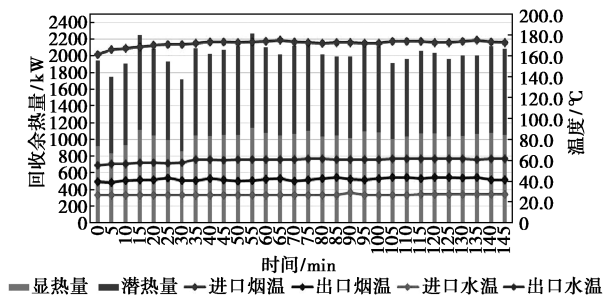


图 3 烟气冷凝热能回收装置回收排烟余热

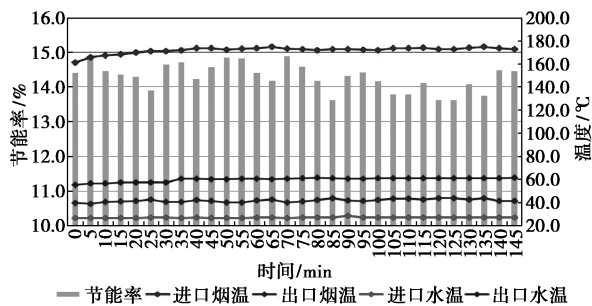


图 4 烟气冷凝热能回收装置节能率

由图 3、图 4 看出, 加热炉负荷在 46.1% ~ 61.5%, 进口水温为 26.8~28.9℃ 条件下, 经烟气冷凝热能回收装置后烟温从 161.3 ~ 175.0℃ 降至 38.8~43.9℃, 回收加热炉总余热 1 720~2 268.5 kW, 相当于 2.46~3.24 t/h 锅炉的供热量, 其中, 潜热量占总回收余热的 46.1% ~ 61.5%, 节能率为 13.6% ~ 14.9%。

(3) 烟气冷凝热能回收装置回收的烟气冷凝水量及除雾率

加热炉不同工况下, 烟气冷凝热能回收装置除雾率及回收的冷凝水量见图 5。

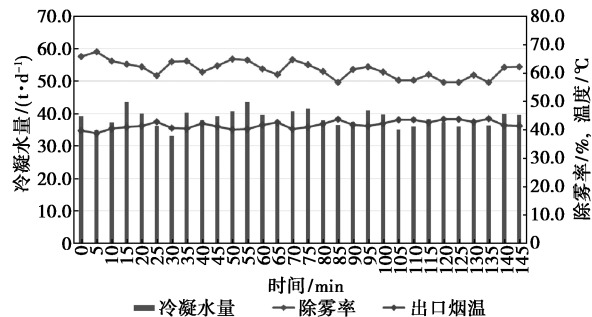


图 5 烟气冷凝热能回收装置烟气冷凝水量及除雾率

由图 5 看出, 加热炉负荷在 46.1% ~ 61.5%, 进口水温为 26.8~28.9℃ 时, 经烟气冷凝热能回收装置后烟温从 161.3 ~ 175.0℃ 降至 38.8 ~ 43.9℃, 烟气冷凝水量为 33.2 ~ 43.6 t/d, 除水率为 56.7% ~

67.5%, 明显减少了雾气排放量。

(4) 理论分析结果与工程实测结果比较
理论潜力分析结果与工程实测比较见表 4。

表 4 理论分析与实测结果比较

参数	理论分析		工程实测
	额定工况	70% 负荷工况	46.1% ~ 61.5% 负荷工况
入口烟气温/℃	200	180	150
出口烟气温/℃	40	40	40
回收余热/kW	3887.4	2536.8	1681
回收余热占输入热量的比例(节能率)/%	15.6	14.6	13.5
回收烟气冷凝水量/(t·d ⁻¹)	66.3	46.4	33.1
烟气除水(雾)率/%	63.2	63.2	63.2
			56.7~67.5

4 经济与社会效益分析

加热炉在额定负荷、70% 负荷、50% 负荷下, 烟温降到 40℃, 节能率分别为 15.6%、14.6%、13.5%。

工程检测表明, 加热炉负荷即使在 46.1% ~ 61.5% 时, 烟温降到 40℃ 左右, 烟气冷凝热能回收的节能率大于 13%。

在设计燃料气消耗量 3 500 m³/h, 设计年运行时数为 8 000~8 600 h 条件下, 即使节能率 13%, 按燃料气 2.6 元/m³, 水 3.25 元/m³ 计, 加热炉每年可节约燃料气 364~391 万 m³, 节约燃料气费 946.4~1 016.6 万元; 相应减少 NO_x、CO₂ 排放量 13% 以上。回收烟气冷凝水量 33.2~43.6 t/d, 每年节约水费 3.9~5.2 万元, 燃料气及水费共节约 950.3~1 021.8 万元, 且明显减少了雾气排放。

若在全国推广应用, 节能、节水、减排、经济效益社会效益巨大。

5 结论

通过对山东 80 万 t/a 延迟焦化装置加热炉烟气冷凝热能深度回收节能改造工程的节能潜力分析与跟踪实测, 得出主要结论如下。

(1) 采用自主研发防腐高效低阻烟气冷凝热能回收装置, 进行烟气冷凝余热和烟气冷凝水深度回收利用节能改造, 加热炉在额定负荷、70% 负荷、50% 负荷下, 烟气温度分别由 200、180、150℃ 降到 40℃, 节能率分别为 15.6%、14.6%、13.5%。

(下转第 204 页)

表 1 杂质类型及其影响

杂质种类	影响
磷类杂质	
可溶磷	对磷石膏性能影响最大,当石膏水化时,会与 Ca^+ 反应生成难溶性盐,覆盖在磷石膏表面,阻碍磷石膏进一步溶出与水化,不仅影响磷石膏的物理性能,而且促使水化产物晶体粗化,结构疏松;此外,在石膏制品干燥后,会使制品表面发生粉化、泛霜
共晶磷	磷石膏水化时,共晶磷会从晶格中溶出,反应机理类似于可溶性磷,但影响程度比可溶性磷稍弱,是除可溶性磷、氟杂质以外影响最大的杂质
难溶磷	惰性组分,对磷石膏基本没有不良影响
氟类杂质	
可溶氟	影响磷石膏性能的主要形式之一,在石膏制品中将缓慢地与石膏发生反应,释放一定的酸性。当质量分数较高,超过 0.3% 时,会使二水石膏晶体粗化,使得晶体间分子力削弱,结构疏松,降低磷石膏制品强度;反之,影响较小
难溶氟	有惰性,作为填料时对磷石膏影响较小;若以同晶配合物存在会有很大的活性和不稳定性
有机物杂质	
异硫氰、甲烷等	分布在二水石膏晶体表面,当磷石膏发生水化硬化时,增加需水量,削弱二水石膏晶体间的结合,使硬化体结构疏松,强度降低,此外,还将影响石膏制品的颜色
其他杂质	
碱金属盐等	磷石膏制品受潮时,产生粉化、泛霜

1.2 磷石膏的净化工艺

常见的磷石膏净化方法主要有化学法、物理法以及热处理法等,分别介绍如下。

1.2.1 化学法

化学净化工艺主要是利用了磷石膏中的杂质与化学试剂反应生成沉淀或化合物的原理,通常采用的方法是在磷石膏中加入石灰、氨水、柠檬酸、硫酸等碱性或酸性物质。大量研究结果表明,采用石灰中和的方法可有效改变磷石膏的 pH,改善磷石膏的性能,且石灰中和工艺简单、成本低,是目前应用最

广泛的一种除杂方法,但石灰中和不能消除有机质和共晶磷对磷石膏性能的影响,适用于品质较稳定,有机质和共晶磷含量不高的磷石膏。

1.2.2 物理法

物理净化工艺主要包括水洗、浮选、球磨、筛分、陈化等方法。其中水洗是最有效的一种除杂方法,能除去大部分可溶性杂质及有机物,但水洗工艺复杂、投资高,容易造成二次污染;浮选工艺主要针对有机物含量较高的磷石膏,效果不如水洗显著,但所用水可循环使用,节约资源;球磨可改变磷石膏的颗

(上接第 202 页)

(2) 对烟气冷凝热能回收装置的跟踪检测表明,加热炉负荷在 46.1%~61.5% 时,进口水温为 26.8~28.9℃,经烟气冷凝热能回收装置后烟温从 161.3~175.0℃ 降至 38.8~43.9℃,节能率为 13.6%~14.9%;潜热量占总回收余热量的 46.1%~61.5%;回收烟气冷凝水量 33.2~43.6 t/d,烟气除雾率为 56.7%~67.5%,减少 NO_x 排放量 13% 以上。

(3) 烟气冷凝热能回收即使节能率 13%,按 1 台加热炉设计燃料气消耗量 3 500 m^3/h ,设计年运行时数为 8 000~8 600 h,燃料气 2.6 元/ m^3 ,水 3.25 元/ m^3 计,加热炉每年可节约燃料气 364~391 万 m^3 ,节约燃料气费 946.4~1 016.6 万元;相应减少 NO_x 、 CO_2 排放量 13% 以上。回收烟气冷凝水量 33.2~43.6 t/d,节水量可观,明显减少了雾气排

放,每年节约水费 3.9~5.2 万元,燃料气及水费共节约 950.3~1 021.8 万元。若在全国推广应用,节能、节水、减排、经济效益社会效益巨大。

参考文献

- [1] BP 中国. 2017 年 BP 世界能源统计年鉴 [Z]. 北京: BP 中国, 2017.
- [2] 胡尧良. 延迟焦化装置技术手册 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2013: 3.
- [3] 王雪松, 袁志祥, 尹鲁江, 等. 延迟焦化工艺的技术进展 [J]. 工业催化, 2006, 14(4): 22-25.
- [4] 梁朝阳. 延迟焦化 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2015: 4.
- [5] 程丽华. 石油炼制工艺学 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2013: 210.
- [6] 王随林, 刘贵昌, 温治, 等. 新型防腐镀膜气冷凝换热器换热实验研究 [J]. 暖通空调, 2005, 35(2): 71-74.
- [7] 马兆康, 王随林, 穆连波, 等. 大型燃气锅炉低温烟气冷凝余热梯级深度利用工程实测分析 [J]. 暖通空调, 2017, 47(4): 81-86. ■