

余热锅炉在绿色油田建设中的应用

李 锐¹ 李卫东¹ 郭新勇¹ 樊 川¹ 吴秀英² 马 曦³

(1. 中国石油塔里木油田分公司油气生产技术部; 2. 中国石油塔里木油田分公司天然气事业部; 3. 中国石油塔里木油田分公司)

摘 要 余热锅炉的运用使得不同品级的能源可以得到充分合理的利用。中国石油塔里木油田公司在生产实践中,采用燃气发电机组—余热锅炉联合循环技术,用不能再发电的燃气尾气生产蒸汽,对天然气中蕴含的能量进行分级利用,实现了发电、供热双重效益,也降低了对周边环境的热污染。文章对该热电联合循环的工艺流程进行介绍,通过对燃气发电机组尾气的能量传递进行计算,用热力学原理进行分析,以期实现对使用余热锅炉后的热电联产经济性进行综合评价的目的。

关键词 余热锅炉 节能 尾气利用

中图分类号: X706

文献标识码: A

文章编号: 1005-3158(2011)05-0048-03

0 引 言

余热锅炉是回收利用工业设备工作循环完成后排出的废热产生蒸汽或热水的一种供热设备。轮南燃机电站二期工程于 2003 年起筹备兴建,共建成燃气发电机组三台,余热锅炉两台。其中两台余热锅炉利用燃气发电机组排烟温度高的特点,使用燃机尾气作为热源,对已经不能继续推动燃气涡轮做功发电的尾气进行回收利用,产出可供整个轮南工业片区使用的高压蒸汽,满足了工业生产和生活采暖对热能的需求。余热锅炉的使用使天然气能源得到充分利用,并显著提升了机组的整体热效率,同时减少了电力工业生产对环境的热污染,节约大量的天然气资源和运行成本。对建设绿色油田,倡导环境和谐型企业具有重要意义。

1 Titan130 机组及余热锅炉概况

1.1 Titan130 机组概况

轮南燃机电站装备的 Titan130 由美国 Solar 公司设计制造,它继承了 Solar 公司以往机型的优点,在燃气发电机组中性能优异。机组额定负荷为 13.5 MW,热效率为 34.5%,采用单轴水平布置方式。整个机组完全采用风冷方式进行冷却,冷却系统包括对机体本身进行负压通风及对润滑油进行空冷冷却,无水资源依赖性。机组的燃料系统、润滑油系统、负荷调节系统等各个功能模块完全由 PLC 控制完成,运行过程中几乎无需人工干预。

1.2 余热锅炉概况及工艺流程

余热锅炉布置于 Titan130 机组排气机构之后,

其设计蒸汽压力为 1.57 MPa,设计温度为 275 ± 25℃。在未投用天然气补燃装置条件下,锅炉最大出力为 16 t/h,若投用补燃装置,则最大出力可达到 25.5 t/h。

1.2.1 烟气流程

锅炉与燃机通过三通挡板阀门相连接,当三通挡板阀门向锅炉侧关闭时,烟气从燃机尾部烟道直接排出,不对余热锅炉进行换热。当三通挡板阀门逐渐打开时,烟气会一部分分流至锅炉烟道内,余热锅炉即进入工作状态。对三通挡板阀门的开度角进行调节可快速调整余热锅炉的出力,当开度角为 90°时,则烟气全部流入余热锅炉烟道,锅炉的出力最大。在三通挡板阀门后的水平烟道内,设有两组天然气补燃装置,如余热锅炉负荷较大,烟气余热不能满足负荷要求时,可投用补燃装置使烟气进口温度从 486℃升至 560℃,此时余热锅炉的出力最高可达到 25.5 t/h。烟气分别流经过热器、蒸发器、省煤器、热水炉和补水加热器,温度降至 165℃排出。各换热器均采用垂直方式布置。

1.2.2 汽水流程

余热锅炉的水循环方式为强制循环,其工艺流程见图 1。由制水工艺输送过来的软化水(20℃)首先进入补水加热器进行预热,温度上升至 95℃,成为给水,进入除氧器。完成除氧过程后温度上升到 101℃,由给水泵泵出依次进入省煤器、蒸发器和汽包。水蒸气在过热器中温度上升到 275℃,形成过热蒸汽。值得一提的是热水炉不参与蒸汽循环,它有独立的外部循环,主要用来供给冬季采暖用热水,其出口温度为 95℃,工作压力 0.69 MPa。

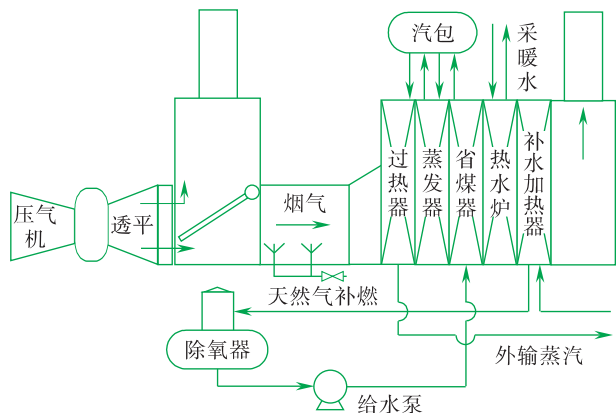


图 1 余热锅炉工艺流程

2 余热锅炉节能效果评价

对节能效果的综合评价指标是节能率 ϵ ，它是反映节能程度的重要指标，是衡量节能效果的重要标准^[1]。余热锅炉的节能率可用公式(1)求出。

$$\epsilon = \frac{\Delta P}{P_0} \quad (1)$$

式中： ΔP —代表余热锅炉回收热功率，kW；

P_0 —代表系统总消耗热功率，kW。

已知燃机额定功率为 $P_t = 1.35 \times 10^4$ kW，热效率 $\eta_0 = 34.5\%$ 。则单位时间内燃机消耗的热功率可用公式(2)算出。

$$P_0 = \frac{P_t}{\eta_0} \quad (2)$$

计算得出： $P_0 = 3.91 \times 10^4$ kW。

对使用余热锅炉后回收的热功率进行计算。在燃机额定功率下，根据每小时流过燃机压气机的质量流量和每小时燃机的天然气消耗量可计算出每小时燃机尾气排放的总质量，见公式(3)。

$$q_{m, \text{烟气}} = 3600 \times \left(q_{m, \text{空气}} + \frac{P_t \rho_{\text{天然气}}}{\eta_0 Q_{\text{net}, \text{天然气}}} \right) \quad (3)$$

式中： $q_{m, \text{烟气}}$ 、 $q_{m, \text{空气}}$ —分别是烟气和空气的质量流量，其中 $q_{m, \text{空气}} = 44.7$ kg/s；

$\rho_{\text{天然气}}$ —天然气的密度，kg/Nm³；

$Q_{\text{net}, \text{天然气}}$ —天然气低位发热量，kJ/Nm³；

得出：烟气质量流量 $q_{m, \text{烟气}} = 1.64 \times 10^5$ kg/h。

测定烟气密度可知 $\rho_{\text{烟气}} = 1.274$ kg/Nm³，则烟气体积流量 $q_{v, \text{烟气}} = 1.29 \times 10^5$ Nm³/h。已知流经压气机的空气约有 25% 进入燃烧室参与燃烧且认为燃烧充分，其余的约 75% 作为冷却用气流用于对动力涡轮进行冷却和对各个轴承实施气封。天然气中不含硫，无 SO_x 排放。根据质量守恒定律可得出烟气中

主要气体成分及体积比情况，结果见表 1。

表 1 烟气中主要气体成分及体积比情况

气体	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂
体积比/%	3.24	15.18	75.18	6.38

已知燃气排烟温度为 486℃，余热锅炉排烟温度为 165℃。根据表 1，气体分别在 486℃ 和 165℃ 温度下的焓值及混合气体的焓计算公式^[2] 见公式(4)。

$$H = \sum_{i=1}^n c_{\theta} v_i \quad (4)$$

式中： c_{θ} —气体在 θ 温度下的焓值，kJ/Nm³；

v_i —气体的体积，Nm³。

参考上述气体在 486℃ 和 165℃ 下的焓值^[3]，计算得出烟气的焓值为： $h_{\text{烟气}, 165} = 220.09$ kJ/Nm³， $h_{\text{烟气}, 486} = 668.30$ kJ/Nm³。

根据公式：

$$\Delta P = q_{v, \text{烟气}} \eta_{\text{锅炉}} (h_{\text{烟气}, 486} - h_{\text{烟气}, 165}) / 3600 \quad (5)$$

式中： $\eta_{\text{锅炉}}$ —为锅炉热回收率，按设计取 70%。

计算得出：余热锅炉可回收热功率为 $\Delta P = 1.13 \times 10^4$ kW，带入公式(1)可得出节能率 $\epsilon = 28.75\%$ 。由计算结果可以看出余热锅炉回收的热功率非常可观，占燃机消耗热功率的近三分之一的热能得到有效回收利用，若考虑到燃机的热效率，则热电联供的热效率高达 $\eta_1 = 63.25\%$ 。

3 余热锅炉投运前后对比分析

轮南工业片区共有热用户 8 家，供热需求共计 1.9×10^4 kW。在余热锅炉投产之前，整个轮南片区有大小锅炉房共 5 座，各式锅炉或换热装置共 18 台，多数直接使用天然气作为燃料，用于工业生产和生活用热，供热能力已无法满足热用户的需求。由于建成的年代不一，使得整个供热系统混乱而分散，加之供热管网的阻力不平衡，严重影响了整体的供热效果。这些供热设备多直接使用天然气作为燃料，且设备老化严重，热效率低下，运行和维护成本较高。另外提供的蒸汽得不到有效的冷凝回水，对水资源也造成浪费。余热锅炉投运前后供热情况对比见表 2。

轮南燃机电站余热锅炉投运的 6 年多时间里，带来的益处显而易见：

◆ 单台锅炉最高回收的热功率为 1.13×10^4 kW/h，理论上两台锅炉运行完全可以满足轮南工业片区的用热需求。实际上，根据近几年运行情况，即使在冬季供

热需求高峰期,两台锅炉也可以轻松满足轮南工业片区全部热用户的需要,且不需要投用锅炉补燃装置。

表 2 余热锅炉投运前后供热情况对比

项目	投运前	投运后
锅炉数量/台	14	2
换热器数量/台	4	2
供热需求/kW	1.96×10^4	—
供热能力/kW	1.49×10^4	2.25×10^4
需要各式机泵数量/台	22	6
各式机泵总耗功/kW	251	154
冷凝水回收/(t/h)	—	20.25

◆ 余热锅炉的投运将轮南片区热负荷合理转移和分配,使得周边小锅炉房处于备用状态,既从整体上降低了供热的人力和经济成本,也大幅降低了整个片区供热对天然气资源的消耗。

◆ 小型锅炉的退出运行,从根本上降低了对大气的污染物排放。从燃机的尾气分析可以看出,对环境的影响主要以 CO₂ 为主,而小型锅炉燃烧的不充分性对环境的污染是可以预见的。

◆ 与余热锅炉同时建成的一体化的供热管网使得供热不均的现象得到有效改善,同时也解决了冷凝水回收的问题,减少了对水资源的浪费。

◆ 余热锅炉启停速度快,负荷调整快捷,对变负荷适应性强,且完全由 DCS 控制,自动化程度高,2 台锅炉三人即可满足运行要求。人力成本优势明显。余热锅炉投运前后经济性数据统计见表 3。

表 3 余热锅炉投运前后经济性数据统计

项目	投运前	投运后
机组热效率/%	34.5	63.25
机组排烟温度/℃	486	165
节能率/%	—	28.75
单台锅炉热回收量/(kJ/h)	—	4.051×10^7
单台锅炉年减少天然气消耗/Nm ³	—	5.22×10^6
单台锅炉年减少水资源消耗/t	—	2×10^4
单台锅炉年节约天然气成本/万元	—	678.79
单台锅炉年节约水资源成本/万元	—	120
锅炉年创造经济效益/万元	—	1400

4 余热锅炉经济效益评价

轮南燃机电站余热锅炉节省设备投资和运行费用,减少了环境污染,提高了能源利用率,节约能源,降低供热成本。

◆ 回收烟气余热 以单台锅炉为例,回收的热量为 4.051×10^7 kJ/h,相当于燃烧 1192 Nm³/h 高品质天然气所发出的热量。若余热锅炉全年平均热负荷按最大出力的 50% 进行计算,则单台锅炉可节约天然气 522.15 万 m³/a。以天然气 1.3 元/m³ 计,则相当于节约成本 678.79 万元/a。

◆ 提高了整体热效率 燃机的热效率为 34.5%,余热锅炉的投用使得整体热效率上升到 63.25%,天然气的热能得到了充分有效利用。

◆ 降低了对环境的热污染 燃机的排烟温度由 486℃ 降低到 165℃,显著降低了对大气的热污染。

◆ 创造了经济效益 以蒸汽按 200 元/t 进行计算,蒸汽产量 7×10^4 t/a,则相当于创造经济效益 1400 万元/a。

◆ 减少了水资源消耗 以合格冷凝回水 4×10^4 t/a 计算,软化水制水总成本 30 元/t,则可节约成本 120 万元/a。

◆ 占地面积小 余热锅炉与燃机布置紧凑,平均每个工作单元占地面积不到 800 m²,节约了用地成本。

5 结束语

综上所述,塔里木油田公司轮南燃机电站余热锅炉的投运,不仅节约了大量的人力和天然气成本,同时提高了燃机热效率,降低了燃气发电机组尾气排放对环境的污染,减少了水资源的浪费,充分体现了塔里木油田公司节能减排、保护环境、建设绿色油田的管理理念。

参考文献

[1] 邓寿禄. 锅炉烟气余热不同用途的热分析模型及节能评价指标的计算方法[J]. 节能, 2002, 12: 10-12.
[2] 沈维道, 蒋智敏, 童钧耕. 工程热力学(第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
[3] 冯俊凯, 沈幼庭, 杨瑞昌. 锅炉原理及计算(第三版)[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

(收稿日期 2011-07-03)

(编辑 袁立凡)