

车用生物燃气工程范例余热定量评估及可利用性分析

张佳^{1,2,3,4,5}, 邢涛^{3,4,5}, 孙永明^{3,4,5*}, 孔晓英^{3,4,5},
康溪辉^{3,4,5}, 吕鹏梅^{3,4,5}, 王春龙^{1,2}, 李金平^{1,2}

(1. 兰州理工大学西部能源与环境研究中心, 兰州 730050; 2. 甘肃省生物质能与太阳能互补供能系统重点实验室, 兰州 730050; 3. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 4. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640; 5. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640)

摘要: 针对车用生物燃气工程能耗高、余热利用率低的问题, 该文以国内 4 个典型工程为基础, 构建了产气规模为 1 万 m³/d 的示例工程, 并对其进行了余热分析。分析结果显示, 此类工程用能量大, 占总产能的 30.01%~36.44%; 余热利用率低, 只有部分贫液余热得以回收; 系统余热主要由脱碳塔顶气余热、脱碳贫液余热、压缩机余热、沼液余热和锅炉尾气余热 5 部分组成, 其多为低品位余热、量大稳定。余热计算表明, 在最冷月和最热月系统余热潜力分别为 5.87×10⁴、4.79×10⁴ MJ/d, 最大节能潜力分别为 74.81%和 73.92%, 节能潜力降序排列为沼液余热>贫液余热>塔顶气余热>压缩机余热>锅炉余热。余热可利用性分析认为工程余热可利用性较高, 回收价值较大。

关键词: 燃气; 热能; 生物质; 余热分析; 余热计算; 节能潜力

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.17.031

中图分类号: TK11

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-17-0232-07

张佳, 邢涛, 孙永明, 孔晓英, 康溪辉, 吕鹏梅, 王春龙, 李金平. 车用生物燃气工程范例余热定量评估及可利用性分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 232-238. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.17.031 http://www.tcsae.org
Zhang Jia, Xing Tao, Sun Yongming, Kong Xiaoying, Kang Xihui, Lü Pengmei, Wang Chunlong, Li Jinping. Quantitative estimation and availability analysis of waste heat from vehicle biogas plant[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(17): 232-238. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.17.031 http://www.tcsae.org

0 引言

车用生物燃气, 是指有机废弃物厌氧发酵产生的粗沼气经净化、提纯、压缩达到车用标准的生物燃气, 具有无污染、可再生和经济效益高等优点^[1-2]。近年来, 中国有机废弃物排放量增长迅速, 资源化利用需求紧迫。与此同时, 天然气等清洁能源需求逐年增长, 天然气缺口较大。车用生物燃气工程在处理废弃物的同时, 可产生清洁能源生物天然气, 已引起各界的重视^[3-5]。沼气发展“十三五”规划指出制备生物天然气是解决中国废弃物处理和资源化利用问题的关键, 计划新建规模化生物天然气项目 172 个^[6]。车用生物燃气工程的发展在一定程度上解决了许多地区的能源、环境及社会问题, 但其运行过程仍存在系统能耗高和运行成本高的问题, 提高工程余热利用率可有效减少系统用能及成本的投入^[7-9]。

车用生物燃气工程一般规模较大, 日产气在 1 万 m³

以上, 工程的运行需消耗大量的热能, 伴随也将产生许多的余热, 与其他沼气工程相比, 车用生物燃气工程余热更多更稳定^[10-11]。目前, 已有学者对沼气工程余热进行分析计算; Zhang Xiaojing 等^[12]通过将沼气生产系统和沼气净化系统的热量进行集成, 得出回收余热可满足沼气生产系统 64%~100%的热需求, 沼气净产气率提高 5.3%~17.4%。花镜等^[13]分析回收瑞典 Alviksgarden 养猪场沼气工程沼液 50%的热量, 可满足工程 44.44%的热需求, 每年增产沼气 5.5×10⁴ m³。相关研究表明, 生物燃气工程余热潜力大, 提高系统余热利用率对工程节能降耗、降低成本和增强系统稳定性具有重要的意义。但在已有研究中, 针对整个车用生物燃气工程进行余热分析的文献较少。本文以国内 4 个典型车用生物燃气工程为基础, 构建了产气规模为 1 万 m³/d 的示例工程, 通过对其进行余热和需热进行统计, 计算出系统余热潜力和节能潜力, 根据余热特点, 对系统余热进行可利用性评价, 最后, 结合需热和余热的特点为工程余热利用提供建议。

1 研究方法

1.1 车用生物燃气工程调研

车用生物燃气工程 A 位于山东, 日处理混合原料 700 t, 日产沼气 7 万 m³, 车用生物燃气 4.2 万 m³/d。工程采用主要技术包括混合原料厌氧发酵、中温厌氧发酵技术、湿法催化脱硫、膜法脱碳、沼液沼渣制肥、四级压

收稿日期: 2017-04-12 修订日期: 2017-08-21

基金项目: 国家科技支撑(2015BAD21B03); 国家“863”计划课题(2014AA052801); 广东省科技计划项目(2015B020215011); 中科院技术服务网络计划(KFJ-Ew-STS-138)

作者简介: 张佳, 主要从事余热利用方向研究。兰州 兰州理工大学西部能源与环境研究中心, 730050。Email: 527111124@qq.com

*通信作者: 孙永明, 博士, 研究员, 主要从事生物质生化转化研究。广州中国科学院广州能源研究所, 510640。Email: sunym@ms.giec.ac.cn

缩技术等，主要技术指标包括进料浓度为 8%，消化温度为 37℃，沼气中 CH₄ 浓度为 60%，车用生物燃气中 CH₄ 浓度>97%。工程调研可知，该工程主要余热包括沼液余热和压缩机余热。

车用生物燃气工程 B 位于海南，日处理混合原料 500 t，日产沼气 3 万 m³，车用生物燃气 1.65 万 m³/d。工程采用主要技术包括混合原料厌氧发酵、中温厌氧发酵技术、干法脱硫、高压水洗法脱碳、沼液沼渣制肥、五级压缩技术、锅炉增温等，主要技术指标包括进料浓度为 10%，消化温度为 37℃，沼气中 CH₄ 浓度为 55%，车用生物燃气中 CH₄ 浓度>96%。该工程主要余热包括沼液余热、压缩机余热和锅炉尾气余热。

车用生物燃气工程 C 位于山东，日处理有机废水 2 万 m³，日产沼气 5 万 m³，其中 3 万 m³ 沼气发电，2 万 m³ 沼气制备 1.26 万 m³ 车用生物燃气。工程采用主要技术包括中温厌氧发酵、湿法催化脱硫、醇胺法脱碳、四级压缩技术、发电余热和燃气锅炉增温等，主要技术指标包括进料浓度为 8%，消化温度为 37℃，COD 去除率>90%，沼气中 CH₄ 浓度为 63%，车用生物燃气中 CH₄ 浓度>97%。该工程主要余热包括沼液余热、脱碳塔顶气余热、脱碳贫液余热、压缩机余热、发电烟气余热、发电缸套水余热和锅炉尾气余热。

车用生物燃气工程 D 位于甘肃，日处理混合原料 1 000 t，日产沼气 4 万 m³，车用生物燃气 2.4 万 m³/d。采用的主要技术包括高温厌氧发酵、生物脱硫、醇胺法脱碳、沼液沼渣制肥、四级压缩技术、锅炉增温等，主要技术指标为进料浓度为 10%，消化温度为 55℃，沼气中 CH₄ 浓度为 60%，车用生物燃气中 CH₄ 浓度>97%。该工程主要余热包括沼液余热、脱碳塔顶气余热、脱碳贫液余热、压缩机余热、锅炉尾气余热。

分析 A、B、C、D 4 个典型工程可知，系统余热主

要由沼液余热、塔顶气余热、贫液余热、压缩机余热和锅炉尾气余热 5 部分组成，以此为基础建立日产气为 1 万 m³ 的工程模型。

1.2 车用生物燃气工程范例构建

该系统模型位于山东，最冷月室外平均温度为-5℃，最热月室外平均温度 25℃；其发酵液最冷月平均温度为 15℃，最热月平均温度为 25℃，数据来源于工程 A 和 C。预处理模块数据来源于工程 A 和 B，通过搅拌等机械预处理方式处理混合原料 120 t，混合原料的总固体含量 (TS) 为 20%，匀浆调节后发酵液 TS 为 10%。厌氧发酵模块数据来源于工程 A 和 D，预处理后的发酵液被加热到 55℃ 进行高温厌氧发酵，日产沼气 1 万 m³，其中 8 000 m³ 制备车用生物燃气 4 800 m³，2 000 m³ 用于供热，4 个 2 500 m³ 厌氧发酵罐，其材料采用搪瓷钢板，导热系数 λ₁ 为 0.047 W/(m²·℃)，保温层采用苯板，导热系数 λ₂ 为 1.51 W/(m²·℃)。净化提纯模块数据来源于工程 C，粗沼气中 CH₄ 浓度为 60%，净化提纯后 CH₄ 浓度高于 97%，8 000 m³ 粗沼气经储气柜稳压后，首先进行湿法催化脱硫并干燥，其次进行醇胺法脱碳，吸收 CO₂ 温度为 40℃，解吸 CO₂ 温度为 120℃，乙醇胺溶液流量为 8.9 m³/h，塔顶气温度为 98℃。压缩制气模块数据来源于工程 C，采用四级压缩将气体压缩至 25 MPa，压缩机冷却水进出口温度分别为 30 和 40℃。沼液沼渣后处理模块数据来源于工程 A，沼液制作叶面肥，沼渣制作生物肥，沼液温度 55℃。增温保温模块数据来源于工程 D，主要通过锅炉供给，日消耗沼气 2 000 m³，产生烟气流量为 625 m³/h，烟气温度为 180℃。

系统余热主要包含脱碳塔顶气余热、贫液余热、压缩机冷却水余热、沼液余热和锅炉尾气余热，系统需热主要包含发酵液升温需热、维持高温发酵需热和脱碳解吸需热。其系统流程图如图 1 所示。

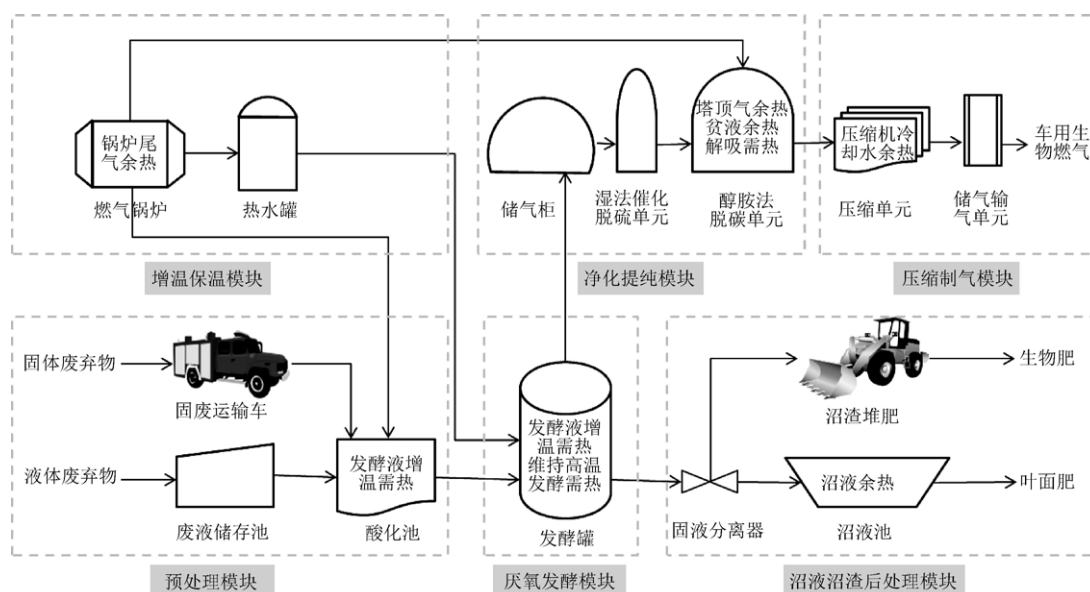


图 1 车用生物燃气工程系统流程图

Fig.1 Systemic flow diagram of vehicle biogas plant

2 结果与分析

2.1 需热资源分析

1) 发酵液需热计算公式为

$$Q_A = C_A \cdot G_A (t_A - t'_A) / (1 - \eta_A) \quad (1)$$

式中 Q_A 为发酵液需热, MJ/d; C_A 为发酵液比热, kJ/(kg·°C); G_A 为发酵液质量流量, kg/h; t_A 为发酵液终温, °C; t'_A 为发酵液初温, °C; η_A 为发酵液增温过程热损失, 取值 20%^[14-15]; 下同。

其中 C_A 计算公式^[12]为

$$C_A = 837 + 3349(1 - T_S) \quad (2)$$

式中 T_S 为发酵液总固体含量。

2) 热损失需热计算公式^[16-18]为

$$Q_B = Q_{B_1} + Q_{B_2} + Q_{B_3} + Q_{B_4} \quad (3)$$

式中 Q_B 为热损失需热, Q_{B_1} 为发酵罐热损失, Q_{B_2} 为水分

蒸发热损失, Q_{B_3} 为沼气带走热损失, Q_{B_4} 为管路热损失, 单位均为 MJ/d; 下同。

3) 醇胺法脱碳需热计算公式^[19]为

$$Q_C = (G_3 \cdot h_3 + G_4 \cdot h_4 - G_2 \cdot h_2 - G_1 \cdot h_1) / (1 - \eta_C) \quad (4)$$

式中 Q_C 为醇胺法脱碳需热, MJ/d; G_1 为进入吸收塔富液流量, MJ/d; G_2 为塔补液流量, MJ/d; G_3 为出吸收塔贫液流量, MJ/d; G_4 为塔顶气流量, MJ/d; h_1 为进入吸收塔富液比焓, kJ/kg; h_2 为塔补液比焓, kJ/kg; h_3 为出吸收塔贫液比焓, kJ/kg; h_4 为塔顶气比焓, kJ/kg; η_C 为脱碳增温热损失, 取 20%^[20]; 下同。

4) 系统总需热计算公式为

$$Q_r = Q_A + Q_B + Q_C \quad (5)$$

式中 Q_r 系统总需热量, MJ/d; 下同。

计算结果如表 1 所示, 其中在最冷月和最热月系统总需热分别为 7.85×10^4 和 6.48×10^4 MJ/d。

表 1 系统需热

Table 1 Heat requirement of system

需热阶段 Heat requirement stage	需热量 Heat requirement load/(MJ·d ⁻¹)	消耗沼气体积 Biogas consumption/(m ³ ·d ⁻¹)	需热特点 Heat requirement traits
发酵液增温 Warming of biogas slurry	4.62×10 ⁴ (最冷月) 3.47×10 ⁴ (最热月)	2 145(最冷月) 1 609(最热月)	介质具有黏滞性, 应注意防结垢、防堵塞、防受热不均; 此外需热量随季节和环境温度改变而改变 ^[15]
热损失 Heat loss	9.24×10 ³ (最冷月) 6.93×10 ³ (最热月)	429(最冷月) 322(最热月)	增强保温措施、减小罐体的体积及管道的长度均可有效减小需热, 需热量随季节和环境变化而改变 ^[18]
脱碳 Decarburization	2.30×10 ⁴	1 070	脱碳需消耗蒸汽来加热, 需热品质高, 需热量不随季节和环境变化 ^[20]
总需热 Total heat requirement	6.48×10 ⁴ (最冷月) 7.85×10 ⁴ (最热月)	3 001(最冷月) 3 644(最热月)	需热用能占沼气总产能的 30.01%~36.44%, 其中维持高温发酵需热占总需热的 64.35%~70.64%, 结果与王丽丽对北大荒牛业大型沼气工程热平衡计算一致, 其加热的热耗占总产能的 17%~30% ^[21] 。

注: 沼气热值为 21.54 MJ。

Note: The heat value of biogas is 21.54 MJ.

2.2 余热资源分析

2.2.1 余热资源统计分析

余热资源统计的主要信息包括余热来源、余热介质

及其特性、温度、流量和余热特点等, 系统余热资源统计结果如表 2。

表 2 系统余热

Table 2 Waste heat of system

余热来源 Waste heat source	介质 Medium	余热温度 Temperature of waste heat/°C	余热流量 Flow of waste heat/(m ³ ·h ⁻¹)	余热特点 Waste heat traits
塔顶气 Stripper top gas	混合气	98	643	塔顶气余热主要产生于解吸塔顶端出口, 介质弱酸性, 热源稳定, 末端环节
贫液 Poor liquid	醇胺溶液	120/69	8.9	贫液余热产生于解吸塔下端出口, 贫液换热器出口, 介质弱碱性, 热源稳定, 中间环节
压缩机 Compressor	冷却水	40	2.7	冷却水余热主要来自于压缩机排气冷却水, 热源稳定, 品位低, 末端环节
沼液 Biogas slurry	沼液	55	38	沼液余热产生于排放到沼液储池的沼液, 介质黏滞性, 热源稳定, 品位低, 末端环节
锅炉尾气 Boiler exhaust gas	烟气	180	625	锅炉尾气余热产生于锅炉出烟口, 热源稳定, 末端环节

注: 脱碳单元与压缩单元每天运行 14 h, 发酵液每隔 3 h 进 1 h 料, 增温保温单元 24 h 运行。

Note: Decarburization unit and compression unit run 14 h per day, biogas slurry is pumped for 1 h every 3 h, warming and heat insulation unit runs 24 h per day.

2.2.2 余热潜力及节能潜力计算

由国标 GB/T 1028-2000 知^[22], 余热潜力的计算方法为

$$Q_y = C_y \cdot G_y (t_y - t'_y) \quad (6)$$

式中 Q_y 为介质的余热潜力, kJ/d; C_y 为介质的比热, kJ/(kg·°C); G_y 为介质的质量流量, kg/d; t_y 为介质的温度, °C; t'_y 为下限温度, °C; 下同。

系统总余热潜力计算如下

$$Q_p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (7)$$

式中 Q_p 为总余热潜力, Q_1 为塔顶气余热, Q_2 为贫液余热, Q_3 为压缩机余热, Q_4 为沼液余热, Q_5 为锅炉余热, 单位均为 kJ/d。

余热节能潜力的计算方法为

$$\eta_y = Q_y / Q_r \quad (8)$$

式中 η_y 为余热节能潜力, 其中 $y=1, 2, 3 \dots n$, n 为自然数。余热潜力计算结果如表 3 所示。

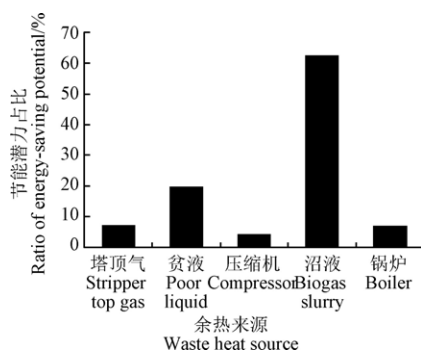
表 3 余热潜力计算结果

Table 3 Calculation result of waste heat potential

余热来源 Waste heat source	温度 Temperature/°C	下限温度 Lowest temperature/°C	比热 Specific heat capacity/ (kJ·(kg·°C) ⁻¹)	密度 Density/ (kg·m ⁻³)	流量 Flow/ (m ³ ·h ⁻¹)	余热量 Waste heat quantity/(MJ·d ⁻¹)
塔顶气 Stripper top gas	98	60 ^[24]	12.1 ^[23-24]	1	643	4.14×10 ⁴
贫液 Poor liquid	69	40	3.2 ^[23-24]	1 000	8.9	1.15×10 ⁴
压缩机 Compressor	40	15(最冷月) 25(最热月)	4.2	1 000	2.7	3.97×10 ³ (最冷月) 2.38×10 ³ (最热月)
沼液 Biogas slurry	55	15(最冷月) 25(最热月)	4.02 ^[12]	1 000	38	3.67×10 ⁴ (最冷月) 2.75×10 ⁴ (最热月)
锅炉尾气 Boiler exhaust gas	180	60 ^[25]	1.12 ^[25]	1.2	625	2.42×10 ³

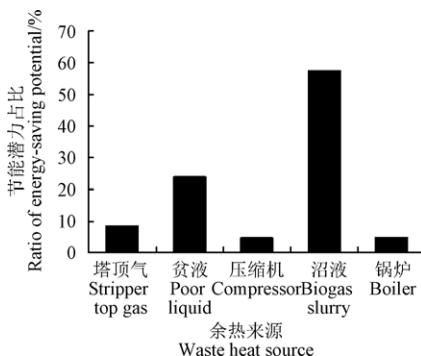
计算得最冷月和最热月总余热潜力 Q_p 分别为 5.87×10^4 和 4.79×10^4 MJ/d。

由余热节能潜力计算得，在最冷月和最热月，系统最大节能潜力 η_p 分别为 74.81%、73.92%；塔顶气余热节能潜力 η_1 分别为 5.27%、6.39%；贫液余热节能潜力 η_2 分别为 14.65%、17.75%；压缩机节能潜力 η_3 分别为 3.08%、3.67%；沼液余热节能潜力 η_4 分别为 46.75%、42.44%；锅炉余热节能潜力 η_5 分别为 5.06%、3.73%。5 部分余热潜力占比如图 2 所示。



a. 最冷月余热节能潜力占比

a. Ratio of energy-saving potential of waste heat in coldest month



b. 最热月余热节能潜力占比

b. Ratio of energy-saving potential of waste heat in hottest month

图 2 余热节能潜力占比

Fig.2 Ratio of energy-saving potential of waste heat

由图 2 可知，沼液余热节能潜力最大，占总余热的 50%以上，应重点回收，同济大学裴晓梅利用热泵技术回收沼液余热，结果表明沼液余热节能潜力可达 70%，揭示了沼液余热回收巨大价值和可行性^[26]。贫液余热次之，占总余热的 20%左右，余热价值较大。塔顶气余热、压缩机冷却水余热、锅炉尾气余热虽然所占比例相对较小，

但其均位于系统末端，冷却水与锅炉尾气余热利用技术较成熟，其余热仍有一定回收价值。北京化工大学张克舫对年产 100 万 t CO₂ 的醇胺法脱碳系统进行能量计算，得出其贫液和塔顶气余热分别为 7.42×10^6 和 5.58×10^6 MJ/d，并分析了其利用途径，贫液余热可以通过扩大贫富液换热器的面积得到更多的回收，塔顶气余热可通过第二类吸收式热泵加热解吸塔内富液^[23]。Kostowsk 通过计算验证了回收车用生物燃气加气站压缩机余热回收的可行性，并对系统余热利用进行优化，优化后增强了系统的稳定性^[27]。Lee 等对比分析了冷凝式余热锅炉的热效率，结果显示冷凝式余热锅炉可以把烟气温度降到 50~60 °C，比普通燃气锅炉热效率高 7.04%^[28]。系统余热节能潜力按大小降序排列为：沼液余热>贫液余热>塔顶气余热>压缩机余热>锅炉余热。

2.3 余热可利用性分析及建议

2.3.1 余热可利用性

1) 塔顶气余热

塔顶气余热的介质主要为 CO₂ 和水蒸汽，具有弱酸性，温度为 98 °C，余热节能潜力为 5.27%~6.39%，该余热产生于解吸塔顶出口，属于末端环节，98 °C 塔顶气可用来加热物料，与系统需热匹配，余热回收价值一般，可利用性较高。对于塔顶气余热，可利用热交换、热泵技术和余热制冷回收余热，考虑到系统需热和传输距离，建议利用换热器加热低温富液或利用热泵生产蒸汽回用于系统自身。

2) 贫液余热

贫液余热的介质为醇胺溶液，具有弱碱性，温度为 69 °C，余热节能潜力为 14.65%~17.75%，该余热产生于贫富液换热器的出口，属于中间环节，69 °C 的贫液仍可用来加热低温富液，与系统匹配，余热回收价值较高，可利用性较高。对于贫液余热，可利用的技术包括热交换和热泵技术，考虑余热的特点和经济性，建议利用换热器加热低温醇胺富液。

3) 压缩机冷却水余热

压缩机冷却水余热的介质为冷却水，温度为 40 °C，余热节能潜力 3.67%~5.06%，该余热产生于压缩机系统末端，属于末端环节，40 °C 的冷却水与系统需热不匹配，余热有一定回收价值，可利用性一般。压缩机排气冷却水余热，虽品质较低，但数量较大，建议利用热泵生产供暖或生活热水。

4) 沼液余热

沼液余热的介质为沼液, 具有黏滞性, 温度为 55 °C, 余热节能潜力为 42.44%~46.75%, 该余热产生于固液分离末端, 属于末端环节, 与需热匹配可用来加热发酵液, 回收价值高, 余热可利用性较高。沼液余热可利用热交换或热泵技术进行热回收, 建议用换热器或热泵加热低温发酵液。

5) 锅炉尾气余热

锅炉余热的介质为烟气, 具有弱酸性, 温度为 180 °C, 余热节能潜力为 3.08%~3.73%, 该余热产生于锅炉排气口, 属于末端环节, 可用来加热原料, 余热有一定回收价值, 可利用性较高。锅炉尾气余热温度高、余热利用技术成熟, 可利用的技术有热交换、热泵技术和余热制冷, 考虑到系统需热, 建议直接通过换热器生产蒸汽或热水回用于系统。

2.3.2 余热可利用评价及建议

系统余热可利用性可采用五星级体系评价, 评价指标包括: 余热介质, 余热温度, 余热数量, 中间环节或末端环节, 是否与系统需热匹配。

余热可利用性判别指标体系: 1) 余热介质是否存在黏滞性、腐蚀性、酸性, 存在为“—”, 不存在为“★”; 2) 余热温度是否高于沼液温度, 低于沼液温度为“—”, 高于沼液温度为“★”; 3) 余热数量是否大于总余热的 10%, 小于为“—”, 大于为“★”; 4) 余热产生于中间环节为“—”, 产生于末端环节为“★”; 5) 与需热不匹配为“—”, 与需热匹配为“★”。系统总余热的可利用性将通过 5 个指标的平均“★”数判定。

如表 4 所示, 系统余热可利用性较高, 回收价值较大。系统余热利用建议如图 3。

表 4 余热可利用性评价
Table 4 Availability evaluation of waste heat

余热来源 Waste heat source	介质及其特点 Medium and its trait	温度 Temperature	数量 Quantity	中间/末端环节 Middle/Extremity link	是否与需热匹配 Whether it matches heat requirement	可利用性评价 Availability evaluation
塔顶气 Stripper top gas	—	★	—	★	★	★★★★
贫液 Poor liquid	—	★	★	—	★	★★★★
压缩机 Compressor	★	—	—	★	—	★★
沼液 Biogas slurry	—	—	★	★	★	★★★★
锅炉尾气 Boiler exhaust gas	—	★	—	★	★	★★★★
总余热 Total waste heat						★★★★

注: “★”代表优势, “—”代表劣势; 五星级代表极高, 四颗星代表高, 三颗星代表较高, 两颗星代表一般, 一颗星代表低。
Note: “★” represent advantage, “—” represent disadvantage, five stars represent extremely high, four stars represent high, three stars represent relatively high, two stars represent common, one star represents low.

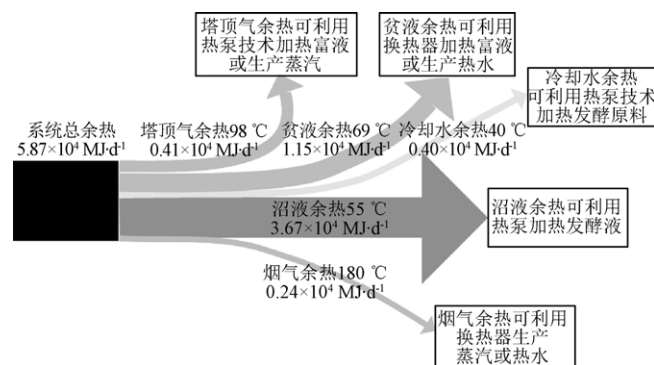


图 3 余热潜在利用途径

Fig.3 Potential utilization pathway of waste heat

3 结论与展望

1) 该车用生物燃气工程需热量占工程总产能的 30.01%~36.44%, 用能较多; 余热利用率低, 只有部分贫液余热得以回收; 系统余热主要由脱碳塔顶气余热、贫液余热、压缩机排气冷却水余热、沼液余热和锅炉尾气余热五部分组成。

2) 系统最冷月和最热月总余热潜力分别为 5.87×10^4 MJ/d、 4.79×10^4 MJ/d, 分别占总需热的 74.8%和 73.9%。其中沼液和贫液余热节能潜力较大, 约占总节能潜力的 80%左右。

3) 余热可利用性分析指出系统余热可利用性较高, 回收价值较大。建议塔顶气余热利用热泵技术生产蒸汽或热水, 贫液余热利用换热器加热富液, 压缩机冷却水余热升级生产热水, 沼液余热利用高效换热器加热发酵液, 锅炉余热利用换热器或热管生产蒸汽。

当前系统余热潜力大, 但余热利用效率低, 重要原因是余热品位较低, 开发低品位余热利用技术是下一步研究的重点。另外, 系统存在多种余热和需热, 如何将系统多种余热和需热相互匹配, 从自身减少加热公用工程量和冷却工程量仍有待进一步研究。

[参 考 文 献]

[1] 李铭. 南宁市生物质天然气工程民用化战略分析及研究[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
Li Ming. The Strategic Analysis and Research for Civilian Biomethane Project in Nanning[D]. Nanning: Guangxi University, 2012. (in Chinese with English abstract)

[2] Shailey Singhal, Shilpi Agarwal, Shefali Arora, et al. Upgrading techniques for transformation of biogas to bio-CNG: A review[J]. International Journal of Energy Research, 2017(13): 1-13.

[3] 郑戈, 张全国. 沼气提纯生物天然气技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 1-8.
Zheng Ge, Zhang Quanguo. Review on biogas upgrading technologies for producing biomethane[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of

- the CSAE), 2013, 29(17): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [4] 程序, 崔宗均, 朱万斌. 呼之欲出的中国生物天然气战略性新兴产业[J]. 天然气工业, 2013(9): 141-148.
Chen Xu, Cui Zongjun, Zhu Wanbin. The upcoming bio-natural gas in China: A strategic emerging industry[J]. Natural gas industry, 2013(9): 141-148. (in Chinese with English abstract)
- [5] 方鹤. 沼气提纯制取生物天然气发展前景分析[J]. 河南科技, 2015(14): 105-106.
Fang Ge. Discussion on the prospects of bio-natural gas preparation by methane purification[J]. Henan Science & Technology, 2015(14): 105-106. (in Chinese with English abstract)
- [6] 国家发展和改革委员会. 全国农村沼气发展“十三五”规划[R]. 2017.
- [7] 李伟, 吴树彪, Hamidou Bah, 等. 沼气工程高效稳定运行技术现状及展望[J]. 农业机械学报, 2015(7): 187-196, 202.
Li Wei, Wu Shubiao, Hamidou Bah, et al. Status analysis and development prospect of biogas engineering technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2015(7): 187-196, 202. (in Chinese with English abstract)
- [8] 程序, 崔宗均, 朱万斌. 论另类非常规天然气: 生物天然气的开发[J]. 天然气工业, 2013, 33(1): 137-144.
Chen Xu, Cui Zongjun, Zhu Wanbin. On the tapping on bio-natural gas, A special unconventional natural gas[J]. Natural gas industry, 2013, 33(1): 137-144. (in Chinese with English abstract)
- [9] Van der Meijden C M, Vreugdenhil B J, Rabou L, et al. Production of Bio-Methane from Woody Biomass using the MILENA Gasification Technology[C]//International Bioenergy (Shanghai) Exhibition and Asian Bioenergy Conference 2015. 2015 (1): 61-67.
- [10] 梁素钰, 王述洋, 李二平, 等. 沼气制取车用天然气级燃料系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 210-213.
Liang Suyu, Wang Shuyang, Li Erping, et al. Biogas refining system for obtaining vehicle fuel similar to natural gas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(6): 210-213. (in Chinese with English abstract)
- [11] 庞云芝, 李秀金. 中国沼气产业化途径与关键技术[J]. 农业工程学报, 2006, 22 (增刊 1): 53-57.
Pang Yunzhi, Li Xiujin. Future development of biogas industrialization and key technologies in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(supp. 1): 53-57. (in Chinese with English abstract)
- [12] Zhang Xiaojing, Yan Jinying, Li Hailong, et al. Investigation of thermal integration between biogas production and upgrading[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 102: 131-139.
- [13] 花镜, 滕子言, 陆小华, 等. 沼液余热回收对高温发酵沼气工程净产气率的影响[J]. 化工学报, 2014(5): 1888-1892.
Hua Jing, Teng Ziyang, Lu Xiaohua, et al. Effect of waste heat recovery on net biogas yield in thermophilic biogas plants[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2014(5): 1888-1892. (in Chinese with English abstract)
- [14] Han Ruiping, Hagos, Kiroso Ji Xiaoyan, et al. Review on heat-utilization processes and heat-exchange equipment in biogas engineering[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2016, 8(3): 032701.
- [15] 韩敬一. 沼液回热回质对恒温沼气生产系统性能影响的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
Han Jingyi. Performance Study on the Impact of Heat and Mass Recycling of Biogas Slurry in Thermostatic Biogas Production System[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [16] 刘建禹, 陈泽兴, 李文涛. 厌氧发酵反应器一维稳态传热模型的建立与验证[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 217-222.
Liu Jianyu, Chen Zexing, Li Wentao. Development and verification of one-dimensional model of steady-state heat transfer for anaerobic fermentation reactor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(17): 217-222. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王丽丽, 王忠江, 卢化伟. 基于系统动力学的北方大型沼气发电系统热平衡分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27 (增刊 1): 26-31.
Wang Lili, Wang Zhongjiang, Lu Huawei. Thermal balance analysis of northern large-scale biogas generating system based on system dynamics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(supp.1): 26-31. (in Chinese with English abstract)
- [18] 寇巍, 张欢, 孙玉辉, 等. 寒冷地区沼气工程增温保温能量效益分析[J]. 太阳能学报, 2015(3): 708-713.
Kou Wei, Zhang Huan, Sun Yuhui, et al. Energy efficiency analysis of insulation and warming for biogas engineering in cold area[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2015(3): 708-713. (in Chinese with English abstract)
- [19] Lars Erik Øi, Terje Bråthen, Christian Berg, et al. Optimization of configurations for amine based CO₂ absorption using Aspen HYSYS[J]. Energy Procedia, 2014, 51: 224-233. (in Chinese with English abstract)
- [20] Young Cheol Park, Jong Seop Lee, Jong Ho Moon, et al. Performance comparison of aqueous MEA and AMP solutions for biogas upgrading[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2017: 1-7.
- [21] 王丽丽. 沼气产业化基本理论与大中型沼气工程资源配置优化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
Wang Lili. Research on the Basic Theory of Biogas Industrialization and Resources Deployment Optimization of the Large and Medium-sized Biogas Project[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [22] 国家质量技术监督局. 工业余热术语、分类、等级及余热资源量计算方法: GB/T 1028-2000[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004: 3.
- [23] 张克舫. 醇胺吸收法燃煤电厂 CO₂ 捕集系统能量分析及优化[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
Zhang Kefang. Energy Analysis and Optimization of MEA-absorption CO₂ Capture Systems for Coal-fired Power Plants[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [24] 赵旭. 活化 MDEA 法沼气脱碳工艺模拟与优化[D]. 天津: 天津大学, 2014.
Zhao Xu. Simulation and Optimization of Biogas Decarbonization by Activated MDEA Process[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese with English abstract)

- [25] 范勇, 王晓鑫. 燃气锅炉烟气余热回收利用技术研究[J]. 工程技术: 全文版, 2016(11): 00233.
Fan Yong, Wang Xiaoxin. Research on technologies for the recovery of the flue gas waste heat in gas boilers[J]. Engineering technology, 2016(11): 00233. (in Chinese with English abstract)
- [26] 裴晓梅, 石惠娴, 朱洪光, 等. 太阳能-沼液余热式热泵高温厌氧发酵加温系统[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012(2): 292-296.
Pei Xiaomei, Shi Huixian, Zhu Hongguang, et al. Heating system of high temperature biogas digester by solar energy and methane liquid heat recovery heat pump[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012(2): 292-296. (in Chinese with English abstract)
- [27] Wojciech J. Kostowski, Jacek Kalina, Paweł Bargiel, et al. Energy and exergy recovery in a natural gas compressor station: A technical and economic analysis[J]. Energy Conversion & Management, 2015, 104: 17-31.
- [28] Lee C E, Yu B, Lee S. An analysis of the thermodynamic efficiency for exhaust gas recirculation-condensed water recirculation-waste heat recovery condensing boilers (EGR-CWR-WHR CB)[J]. Energy, 2015, 86(1): 267-275.

Quantitative estimation and availability analysis of waste heat from vehicle biogas plant

Zhang Jia^{1,2,3,4,5}, Xing Tao^{3,4,5}, Sun Yongming^{3,4,5*}, Kong Xiaoying^{3,4,5},
Kang Xihui^{3,4,5}, Lü Pengmei^{3,4,5}, Wang Chunlong^{1,2}, Li Jinping^{1,2}

(1. Western Energy and Environment Research Center of China, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Key Laboratory of Complementary Energy System of Biomass and Solar Energy, Lanzhou 730050, China;

3. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

4. CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou 510640, China;

5. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Vehicle biogas, the product deriving from the organic waste anaerobic digestion accompanying with the purification and compression process, has the advantages of higher energy efficiency, environmentally friendliness, sustainability, and so on. The vehicle biogas plant has aroused attention from all walks of life and owned a broad prospect, because it can not only dispose organic waste, but also produce clean vehicle biogas. However, there were still several problems in its operation process, such as high operating costs, high energy consumption and low utilization rate of waste heat. In order to solve these problems, this paper establishes a model of vehicle biogas plant which produces 10 000 m³ biogas daily. We firstly introduce the general situation of this model and calculate the potential of waste heat. What's more, the availability of waste heat is evaluated. Finally, combined with the requirement of heat, the suggestion of the waste heat utilization is put forward. Results of analysis show that this plant needs a lot of thermal energy, approximately accounting for 30.01%-36.44% of biogas energy. Moreover, merely recycling a part of the CO₂-poor MEA liquid waste heat after decarburization results in low utilization rate of waste heat. It also reveals that the main parts of the waste heat in the system are made up of 5 types, i.e. waste heat from stripper top gas for decarburization, CO₂-poor MEA liquid waste heat after decarburization, waste heat of cooling water from compressor, waste heat in biogas slurry and waste heat of boiler exhaust gas. Besides, the low-grade waste heat has the characteristics of enormous quantity and stabilization. The main parts of heat required include the heat of the fermentation liquid, the heat of maintaining high-temperature anaerobic digestion and the heat of decarburization. The calculation of requirement of heat shows that the quantity of total heat required is 7.85×10⁴ MJ/d in the coldest month, and 6.48×10⁴ MJ/d in the hottest month. The calculation of waste heat indicates that the potential of total waste heat is respectively 5.87×10⁴ MJ/d in the coldest month, and 4.79×10⁴ MJ/d in the hottest month. The corresponding maximum energy-saving rate is 74.81% and 73.92%, respectively. The energy-saving potential of each part of waste heat in descending order of quantity is: waste heat of biogas slurry > waste heat of CO₂-poor MEA liquid after decarburization > waste heat of stripper top gas for decarburization > waste heat of cooling water from compressor > waste heat of boiler exhaust gas. Additionally, the analysis of waste heat proves that waste heat from this project can be more effectively utilized and preferably collected. Based on the analysis above, we propose some suggestions about the utilization of waste heat: 1) It is recommended that the waste heat of stripper top gas is collected to drive heat pump rather than cycle in system. 2) Waste heat of CO₂-poor MEA liquid can be used to warm the low-temperature CO₂-rich MEA liquid via the heat exchanger. 3) We recommend the waste heat of compressor cooling water is adopted to produce hot water by the heat pump, which will be regarded as domestic hot water or heating hot water. 4) Waste heat of biogas slurry can be used to heat low-temperature fermentation liquid by heat exchanger. 5) Waste heat of boiler exhaust gas can produce steam by heat exchanger, which is applied into system itself.

Keywords: gas; thermal energy; biomass; analysis of waste heat; calculation of waste heat; potential of energy-saving