沼气发酵罐热负荷特性研究与排料余热回收装置设计

张帅兵 任绳凤 王子伟

(天津城建大学 能源与安全工程学院,天津 300384)

摘要:针对天津市某养殖场沼气工程 基于热平衡模型 模拟分析了沼气发酵罐热负荷特性 发现发酵罐罐体传热负荷和加热发酵料液负荷是沼气生产过程中主要负荷组成部分,而其中加热发酵料液负荷占到了沼气工程总热负荷的 87.5%~90.8% 约为发酵罐罐体传热负荷的8倍。为减少发酵罐排料造成的热量损失,设计了1套沼气发酵罐排料 余热回收装置,并对其余热回收效率进行模拟计算。结果表明:该装置在春季余热回收量为1472.3~2216.5 MJ,夏 季为747.4~993.5 MJ 秋季为1515.7~2069.3 MJ,冬季为2526.3~2707.7 MJ。全年节能率波动范围在25.36%~ 48.46% 在冬季其节能率仍能达到30%以上,有效减少了排料的热量损失。

关键词:发酵罐加热系统;数值模拟;热负荷特性;余热回收;余热回收效率

DOI: 10. 13205/j. hjgc. 201706033

RESEARCH ON HEAT LOAD CHARACTERISTICS OF BIOGAS FERMENTATION TANK AND DESIGN OF WASTE HEAT RECOVERY DEVICE FOR DISCHARGE OF METHANE FERMENTATION TANK

ZHANG Shuai-bing , REN Sheng-feng , WANG Zi-wei

(School of Energy and Safety Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: Based on the heat balance model , the heat load characteristics of the fermentation tank were simulated and analyzed in a farm biogas project in Tianjin. Results showed that the heat transfer load of fermentation tank and the fermentation liquid heating load was the main load in biogas project which was about eight times of the heat transfer load of fermentation tank. In order to reduce the heat loss caused by the discharge of fermentation tank , a set of waste heat recovery device for biogas fermentation tank was designed , and its waste heat recovery efficiency was simulated. Results showed that the device heat recovery rate was 1 472. 3 ~ 2 216. 5 MJ in spring , 747. 4 ~ 993. 5 MJ in summer , 1 515. 7 ~ 2 069. 3 MJ in autumn , and 2 526. 3 ~ 2 707. 7 MJ in winter , and annual energy saving rate was 25. $36\% \sim 48.46\%$. In winter the energy saving rate could still reach more than 30% , effectively reducing the heat loss of the discharge.

Keywords: fermentation tank heating system; numerical simulation; thermal load characteristics; waste heat recovery; heat recovery efficiency

0 引 言

随着沼气技术不断发展 沼气工程的规模化已成 为未来发展的趋势。沼气生产过程中 温度是影响沼 气发酵产气率的关键因素^[14]。为保证沼气的高效生 产 大量国内外学者对发酵罐的加热系统进行了研 究^[59]。赵金辉等^[10]采用太阳能和沼气锅炉并联系 统联合加热沼气池 理论上可解决北方寒冷地区冬季

* 天津市科技支撑计划项目(13ZCZDNC0140000);国家自然科学基金 资助项目(51506144)。

收稿日期: 2016 - 12 - 25

沼气池无法正常使用的问题; 寇魏等^[11] 构建了1 套 太阳能发电余热中温厌氧发酵增温系统 将沼气发电 机组的发电余热与太阳能热水系统的热量进行回收, 可解决发电余热浪费及沼气工程增温问题; 花镜 等^[12]研究了高温发酵的容积产气率和余热回收对沼 气工程净产气率的影响,在沼气工程中增加余热回 收,可将沼气净产气率从 82% 提高至 90%。

目前国内常规沼气工程对发酵过程中排料所带 走的热量很少采取有效的回收方法 排料过程带走沼 气工程加热系统提供的大多数热量 造成了大量的热 量损失。为此,针对天津市某养殖场沼气工程,本文 对其加热系统进行模拟研究,设计了1套发酵罐排料 余热回收装置,并对其余热回收效率进行研究分析, 旨在为北方沼气工程排料余热回收系统的设计提供 参考依据。

1 发酵罐加热系统分析

1.1 发酵系统介绍

以天津某养殖场沼气工程为实验对象,该工程 沼气发酵罐有效容积为1000 m³,发酵料液为奶牛 场清洗牛粪和牛尿液的混合污水,日处理污水量为 100 t,牛粪含水率为65%,配料液浓度为8%,发酵 温度为35℃。发酵罐直径9.8 m,高度13.2 m。 发酵过程进料周期为1 d,水力停留周期为15 d,进 料量为70 m³/d。

1.2 发酵罐热平衡分析

沼气发酵罐传热过程可从热量平衡角度来分析。 发酵罐的热量损失包括:发酵原料升温耗热量、罐体 传热量、排出水蒸气以及排出沼气带走的热量^[13-4]。 加热沼气发酵罐所需总热量计算公式如下:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \tag{1}$$

式中: Q 为加热沼气发酵罐所需总热量 ,MJ/d; Q_1 为 加热发酵料液的耗热量 ,MJ/d; Q_2 为发酵罐罐体传 热量 ,MJ/d; Q_3 为排出水蒸气带走的热量 ,MJ/d; Q_4 为排出沼气带走的热量 ,MJ/d。

1.2.1 加热发酵料液耗热量

加热发酵料液耗热量是加热发酵料液从进料温 度到发酵温度所消耗的热量,其计算公式如下:

$$Q_{1} = \frac{G \times c \times (T_{D} - T_{c})}{1000}$$
 (2)

式中: *G* 为每日进入发酵罐内的粪污量 ,kg/d; *T*_D 为 发酵罐内厌氧发酵温度 , \mathbb{C} ; *T_c* 为进料温度 , \mathbb{C} ; *c* 为 混合污水比热容 , $kJ/(kg \cdot \mathbb{C})$ 。常用沼气发酵料液中 发酵原料固体浓度为 8% ~10% ,水是发酵料液的主 要组成部分 ,发酵料液比热容计算公式如下^[15]:

$$c = 4.17(1 - 0.00812T_s)$$
 (3)
式中: T_s 为发酵料液含固率。

1.2.2 发酵罐罐体热量损失

发酵罐罐体的热量损失包括罐顶热量损失、罐壁 热量损失、罐底热量损失,其总热量损失计算如 式(4)所示:

$$Q_2 = \sum_{i=T}^{D} F_{gi} k_{gi} (T_D - T_0) \times 1.2$$
 (4)

式中: T_0 为池外介质(空气或土壤) 温度, \mathbb{C} ; F_{gi} 为 发酵罐顶、罐壁及罐底散热面积, m^2 ; k_{gi} 为罐盖、罐 壁、罐底的传热系数, $MJ/(m^2 \cdot \mathbb{C})$ 。

1.2.3 水分蒸发热量损失

水分蒸发热量损失是由于排出沼气伴随的水蒸 气排出导致的 其值由排出沼气的水蒸气含量,对应 发酵温度下水的汽化潜热值、发酵罐有效容积以及系 统的容积产气率等参数共同决定^[16],具体计算方法 如下:

$$Q_{3} = W_{w} \left[H_{w} + c_{w} (T_{D} - t_{a}) \right]$$
 (5)

式中: W_w 为沼气流携带的水蒸气的质量流量 ,kg/d, 计算如公式(6) 所示; H_w 为水蒸汽在发酵温度下的 汽化潜热值 ,MJ/kg ,当温度为 35 ℃时取 2.42; c_w 为 水蒸气的比热容 ,kJ/(kg •℃) ,此处取 1.886 kJ/ (kg•℃); t_w 为外界空气温度 , C_w 。

$$W_{w} = \frac{0.804(v \cdot \gamma) X_{w}}{f(1 - X_{w})}$$
(6)

式中: v 为发酵罐有效容积 ,m³; γ 为沼气的体积产 量 $kg/(m^3 \cdot d)$; f 为沼气体积占排出沼气体积的比 例 ,此处取 65%; X_x 为沼气中所含的水分子份数 ,计 算如式(7) 所示:

$$X_{\rm w} = 1.27 \times 10^6 \exp\left(\frac{-5520}{T_D + 273}\right)$$
(7)

1.2.4 沼气排出带走的热量损失

沼气的主要成分为 CH_4 和 CO_2 ,所以沼气排出带 走的显热损失主要为 CH_4 和 CO_2 二者的显热之和, 计算式见式(8):

$$Q_{4} = \frac{\left(1676 + 1772 \frac{1-f}{f}\right)(v \cdot \gamma)(t - t_{a})}{10^{6}} \quad (8)$$

1.3 发酵罐热负荷特性模拟结果与分析

根据上述计算公式利用能耗模拟软件 EnergyPlus 对沼气发酵罐热量负荷特性进行模拟计 算,发现沼气和水蒸气带走的热量非常少,可以忽略。 本文主要针对发酵罐体传热负荷和加热发酵料液热 负荷(将加热后的发酵料液全部排出,此时加热发酵 料液热负荷等于排料热负荷)进行研究分析,结果如 图1和图2所示。

从图 1 /图 2 可以看出:发酵罐罐体传热负荷和 加热发酵料液负荷是沼气生产过程中主要的负荷组 成部分 ,其中加热发酵料液负荷最大 ,占沼气工程总 加热负荷的 87.5% ~90.8% ,约为发酵罐罐体传热 负荷的 8 倍 ,并在 4 月和 10 月达到峰值。如发酵罐







的排料余热能够被回收利用,对沼气工程的节能减排 意义重大。

2 发酵罐排料余热回收装置的设计

2.1 余热回收装置的设计结构与参数

发酵工艺为连续性进料,但实际过程中并不是时 刻都在进料,每天只有某一段时间持续进料。排料余 热资源是一种间歇供应的余热资源,因此余热回收装 置结构应结合该特点单独设计。设计原则如下:1) 结构简单,对制作工艺要求不高,造价低;2)操作方 便,运行能耗低;3)耐腐蚀,方便清洗,具有过滤功 能;4)有较高的换热效率。

针对以上需求提出一种排料余热回收装置,其结构竖向剖面如图3所示。

该余热回收装置形式为同轴式换热器,外壁附有 保温材料,内水箱、筛网均固定在支架上。装置中换 热部分由排料水箱和配料水箱 E 组成,排料水箱 D 和配料水箱均为圆柱形。余热回收装置中不设置水 泵等循环设备,排料与配料水之间依靠自然对流进行 换热。热料液从发酵罐内排出后,由入口 A 经过滤 器 B 过滤后进入换热水箱 D,然后通入配料自来水进



行换热。换热结束后,料液通过F排出做进一步处 理。加热后的水由G进入配料箱进行配料,不足的 热量由蓄热水箱进行补充。本沼气工程日进料 70 m³ 根据进料量对换热器尺寸进行设计计算,得出 换热水箱 D 直径为4.46 m,高为4.46 m,体积为 70 m³;配料水箱直径为5.2 m,高为5.2 m,体积为 110 m³;外层橡塑保温材料厚度为50 mm。

2.2 换热数学模型

排料与配料自来水之间的换热属于自然对流换 热过程 根据热平衡方程、牛顿冷却定律、自然对流微 分方程式和傅立叶导热定律可得换热方程如下:

$$\frac{Q}{\tau} = \phi_1 + \phi_2 = \int_0^{35-10} h_1 A_1 d\Delta t_1 + \int_{t_2 - t_{\infty}}^{t_1 - t_{\infty}} h_2 A_2 d\Delta t_2$$
(9)

$$h = \frac{\lambda cp r^{n}}{l} \left(\frac{g a_{v} l^{3}}{v}\right)^{n} \Delta t^{n} \qquad (10)$$

$$\phi_1 = A_1 \frac{\lambda c p r^n}{l} \left(\frac{g a_v l^3}{v}\right)^n \int_0^{35-10} \Delta t^n d\Delta t \quad (11)$$

式中: Q 为发酵料液提供的热量 J; ϕ_1 为料液和水的换 热量 W; ϕ_2 为发酵装置向环境的散热量 W; τ 为换热器 换热时间 s; Δt 为换热温差 C; l 为定性尺寸 内水箱高 度 m; $A_1 \ A_2$ 为内、外水箱外表面积 m^2 ; $c \ n$ 为公式系 数 不同温差范围内 c 和 n 的取值如表 1 所示^[17]。

表1 不同工况下公式系数取值

 Table 1 Formula coefficient value under different

 working conditions

worning conditions		
n	с	流态
1/3	0.11	湍流
0.39	0.0282	过度
1 /4	0. 59	层流
	n 1/3 0.39 1/4	n c 1/3 0. 11 0. 39 0. 0282 1/4 0. 59

3 排料余热回收装置换热结果与分析

利用 Fluent 软件模拟排料余热回收装置的换热 过程 图 4 为选取发酵料液温度为 35 ℃、配料水温为 10 ℃、环境温度为 -0.5 ℃时(冬季典型工况下)的 模拟换热效果。可以看出:此时换热器内部温度场分 布较为均匀,换热已经充分进行,配料水平均温度为 24.9 ℃,料液平均温度为 25.6 ℃,回收热量 2 706.62 MJ。结合其他不同工况下的换热效果,发 现该排料余热回收装置换热效果良好,能够有效对排 料热量进行回收。





3.1 热回收量与换热后配料水温

利用 Fluent 软件模拟计算了排料余热回收装置 不同季节下的余热回收量和该装置换热后配料水温 度的上升幅度。

从图 5 可以看出: 余热回收装置余热回收量在 12 月到次年 2 月呈先增加后减小的趋势,波动范围 为2 526.3~2 707.7 MJ,1 月的平均余热回收量最高 但配料水平均温度最低。经过换热后配料水的平均 温度先下降后升高,其温度波动范围为 25.72~ 26.77 ℃,温升幅度为 15.72~16.77 ℃。温差是传 热的动力,换热温差越大,余热回收效果越好。

从图 6 可以看出: 余热回收装置余热回收量在夏 季 6—8 月呈先减小后增加的趋势,波动范围在 747.4~993.5 MJ 6 月的平均余热回收量最高,1 月 的配料水平均温度最低,与余热回收量的变化规律相 反,这一点同冬季一致。经过换热后配料水的平均温 度先下降后升高再下降,波动范围在 31.59~ 32.44 ℃,温升幅度为 6.59~7.44 ℃。

从图 7 和图 8 可以看出: 余热回收装置余热回收量 在春、秋两季存在较大的波动,这与气候的变化一致。







春季余热回收量从 3—5 月随时间的推移而减少 波动 范围为 1 472.3~2 216.5 MJ 3 月的平均余热回收量最 大 而经过换热后配料平均水温随时间的推移而呈上升 趋势 配料水换热后温度波动范围在 27.4~29.9 ℃ 温 升幅度为 12.4~14.9 ℃。秋季余热回收量从 9—11 月 随时间的推移而增加 余热回收量波动范围为 1 515.7~ 2 069.3 MJ 经过换热后配料平均水温随时间的推移而 呈下降趋势 ,配料水换热后温度波动范围在 26.5~ 29.8 ℃ 温升幅度为11.5~14.8 ℃。

对比全年排料余热回收量的数据:冬、夏两季的 排料余热回收量波动较小,两个季节的平均余热回收





量约差3倍;春、秋两季的排料余热回收量波动较大, 两季的平均余热回收量相差较小;冬季余热回收量最 多春、秋季节次之,夏季余热回收量最少。

3.2 排料余热回收装置节能分析

将回收的热量占沼气工程所需总热负荷的百分 比定义为余热回收装置的节能率。图9为排料余热 装置的全年节能率。该余热回收装置的全年节能率 波动范围为 25.36% ~48.46% ,全年的平均节能率 约为 35% ,冬季节能率仍能达到 30%。由此可见 ,通 过在北方沼气工程中加入排料余热回收装置能够提







4 结 论

通过能耗模拟软件 EnergyPlus 分析了沼气发酵罐的热量负荷特性 在此基础上为减少发酵罐排料的热量 损失 设计了1套排料余热回收装置 并用 Fluent 软件 对其余热回收效率行了模拟分析 所得结论如下:

 1)发酵罐罐体传热负荷和加热发酵料液负荷是 沼气生产过程中主要的负荷组成部分,加热发酵料液 负荷占沼气工程总热负荷的87.5%~90.8%,约为 发酵罐体传热负荷的8倍,发酵罐的排料中含有大量 的热量可以进行回收。

2) 排料余热回收装置中排料与配料水能够进行
 充分换热,经过换热后装置内部温度场分布较为均
 匀,全年配料水温平均能够升高10 ℃以上。

3) 通过排料余热回收装置回收的发酵罐排料余 热量在春季为1472.3~2216.5 MJ ,夏季为747.4~ 993.5 MJ ,秋季为1515.7~2069.3 MJ ,冬季为 2526.3~2707.7 MJ ,其全年的节能率波动范围为 25.36%~48.46%,平均节能率约为35%。

参考文献

- [1] 丁羽.太阳能加热沼气反应装置的设计及参数选择[J]. 农机 化研究 2008(8):69-71.
- [2] 常婧,任绳凤,李宪莉. 沼气增温与控制系统的设计与仿真[J]. 环境工程学报 2016,10(4):1998-2002.
- [3] 刘建禹 樊美婷,刘科. 高寒地区沼气酵料液加热增温装置传热
 特性[J]. 农业工程学报 2011 27(2):298-301.
- [4] 孟成林,李荣平,李秀金.用于污泥厌氧消化的温室-太阳能水器组合增温系统[J].农业工程学报,2009 25(9):210-214. (下转第 174 页)

重金属稳定的关键;煤基活性炭相比其他两种生物 炭,对重金属有更强的稳定效果。

2)磷矿粉+煤基活性炭复合稳定剂对土壤重金属的稳定效率高于单一处理,且两者具有协同增效作用。磷矿粉+5%活性炭稳定7d后,Pb、Zn、Cu、Cd的稳定效率可达75.85%、61.03%、52.80%、49.92%,DTPA提取态分别降低了59.85%、64.19%、42.80%、66.20%,PBET有效态分别降低了35.31%、18.70%、28.98%、22.26%,有效削弱了土壤重金属的生物有效性。

3) 形态分级实验表明,磷矿粉+煤基活性炭复 合处理稳定化效应要优于单一磷矿粉,对重金属形态 转换影响更大。稳定处理使污染土壤中的重金属的 酸可提取态均有所减少,转化为可还原态、可氧化态、 残渣态等难以分解转移的形态。

参考文献

- [1] 夏来坤 郭天财 康国章 等. 土壤重金属污染与修复技术研究 进展[J]. 河南农业科学 2005(5):88-92.
- [2] 岳聪 汪群慧 袁丽 等. TCLP 法评价铅锌尾矿库土壤重金属污染: 浸提剂的选择及其与重金属形态的关系 [J]. 北京大学学报. 自然科学版 2015 51(1):109-115.
- [3] 郭观林,周启星,李秀颖.重金属污染土壤原位化学固定修复研 究进展[J].应用生态学报 2005,16(10):1990-1996.
- [4] 杨剑虹,王成林,代亨林.土壤农化分析与环境监测[M].北京: 中国大地出版社 2008.
- [5] Zhou J M ,Dang Z ,Cai M F ,et al. Soil heavy metal pollution around the Dabaoshan mine , Guangdong Province , China [J]. Pedosphere , 2007 ,17(5): 588-594.
- [6] Intawongse M , Dean J R. Use of the physiologically-based

(上接第165页)

- [5] 裴晓梅,石惠娴,朱洪光.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),2012,40 (2):292-296.
- [6] 杨萌. 严寒地区太阳能 土壤源热泵联合加热沼气池的模拟 研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.
- [7] Lu Yong , Tian Ye , Lu Haowei , et al. Study of solar heated biogas fermentation system with a phase change thermal storage device
 [J]. Applied Thermal Engineering 2015 88:418-424.
- [8] Su Yuan, Tian Rui, Yang Xiao-Hong. Research and analysis of solar heating biogas fermentation system [J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 11:1386-1391.
- [9] 焦有宙 杜双力.太阳能热管沼气发酵加热系统研究[D].河 南:河南农业大学 2013.
- [10] 赵金辉,谭羽非,白莉. 寒区太阳能沼气锅炉联合增温沼气池 的设计[J]. 中国沼气 2009 27(3):34-35.
- [11] 寇巍 郑磊 曲静霞 等. 太阳能与发电余热复合沼气增温系统

extraction test to assess the oral bioaccessibility of metals in vegetable plants grown in contaminated soil [J]. Environmental Pollution , 2008 ,152(1):60-72.

- [7] 刘甜田 .何滨 ,王亚韩 ,等. 改进 BCR 法在活性污泥样品重金属 形态分析中的应用[J]. 分析试验室 2007 26(12):17-20.
- [8] 罗远恒,顾雪元,吴永贵,等. 钝化剂对农田土壤镉污染的原位 钝化修复效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 890-897.
- [9] 吴烈善 曾冬梅 莫小荣 , . 不同钝化剂对重金属污染土壤稳 定化效应的研究[J]. 环境科学, 2015, 36(1): 309-313.
- [10] 殷飞,汪海娟,李燕燕,等.不同钝化剂对重金属复合污染土壤 的修复效应研究[J].农业环境科学学报,2015,34(3):438-448.
- [11] 王碧玲,谢正苗,孙叶芳,等.磷肥对铅锌矿污染土壤中铅毒的 修复作用[J].环境科学学报 2005 25(9):1189-1194.
- [12] 丁华毅. 生物炭的环境吸附行为及在土壤重金属镉污染治理中的应用[D]. 厦门: 厦门大学 2014.
- [13] 张文杰 蒋建国 李德安 等.吸附材料对钒矿污染土壤重金属的稳定化效果[J].中国环境科学 2016 36(5):1500-1505.
- [14] 杨宝滋. 表面改性活性炭对铬污染土壤的稳定化研究[D]. 武 汉: 武汉科技大学 2015.
- [15] 何忠俊 梁社往,洪常青,等. 土壤环境质量标准研究现状及展 望[J]. 云南农业大学学报, 2004, 19(6):700-704.
- [16] Ramachandran V, D Souza T J. Plant uptake of cadmium, zinc, and manganese in soils amended with sewage sludge and city compost [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1998 β1(3):347-354.
- [17] 莫小荣 吴烈善,王云,等.复合材料7对砷污染土壤稳定化处 理及机理研究[J].环境科学学报 2014 37(3):1115-1121.

第一作者:何绪文(1964 -),男,博士,教授,主要研究方向为水处理、 土壤污染控制、大气污染控制等。hjinghua@vip.sina.com

设计[J]. 农业工程学报 2013 29(24):211-217.

- [12] 花镜,滕子言,陆小华. 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 65(5):1888-1992.
- [13] 惠娴,王韬,朱洪光. 地源热泵式沼气池加温系统[J]. 农业 工程学报,2010 26 (2): 268-273.
- [14] 王丽丽 杨印生,王忠江.北方大型沼气工程加热保温系统优化[J].吉林大学学报(工学版),2011,41(4):1184-1188.
- [15] 王丽丽 杨印生. 沼气产业基本理论与大中型沼气工程资源配 置优化研究[D]. 吉林: 吉林大学,2012.
- [16] 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,2011,17(1):33-34.
- [17] 张全国. 燃烧理论及其应用[M]. 郑州:河南科技出版社, 1993: 15-20.

通信作者: 张帅兵(1992 -) , 男, 硕士, 主要从事建筑节能与新能源应用。1169925470@ qq. com