

青岛某污水厂对沼气热电联产预估模型的分析

李淑夏
(乌兰察布市园林服务中心)

摘要：通过介绍青岛某污水厂污泥厌氧消化与沼气热电联产系统，对该污水厂 2022 年全年的运行数据进行分析与整理，得到污水厂平均污泥产率与产气率分别为 79m^3 污泥 / 104m^3 污水、 8.5m^3 沼气 / m^3 污泥，同时针对沼气热电联产系统建立了相应的数学模型，模型在该污水厂的准确性与可行性利用污水厂实际运行数据进行了验证，证明了此数学模型可以用于估算污水厂在一定沼气体量下的热电联产系统运行情况。

关键词：污泥厌氧消化；沼气热电联产；参数；数学模型

0 工程介绍

该污水处理厂位于山东省青岛市，于 1993 年建成，为青岛市兴建的第一座污水处理厂；2010 年，对其进行了改造扩建，设计日处理规模扩大为 16 万 t，实际处理量在 14.5 万 t/d；出水水质达到国家一级 B 标准，处理工艺由以前的 AB 法改为现在的 MSBR 法；2015 年初，污水厂正式启动污泥厌氧消化与热电联产系统，污泥进行一级中温厌氧消化，温度控制在 $35\sim 38^\circ\text{C}$ 之间，污泥有效停留时间为 20 天；四座圆柱形消化池直径均为 28m，

深度为 19.3m，体积为 10335m^3 ，设计日进泥量为 500m^3 ，实际运行时污泥只能满足三座消化池；沼气发电机组共有四台，采用某集团生产的额定功率为 500kW、转速为 1000r/min、发电效率为 0.35 的机组，发电机组的烟气部分或全部通过烟道式余热锅炉产生热水，内燃机的缸套冷却水则通过管壳换热器与外循环水进行换热；污水厂还配有两台额定热功率为 2.8MW 的沼气热水锅炉，只有在循环热水温度较低时才启用。该污水厂污泥厌氧消化与热电联产系统工艺流程如图 1 所示。

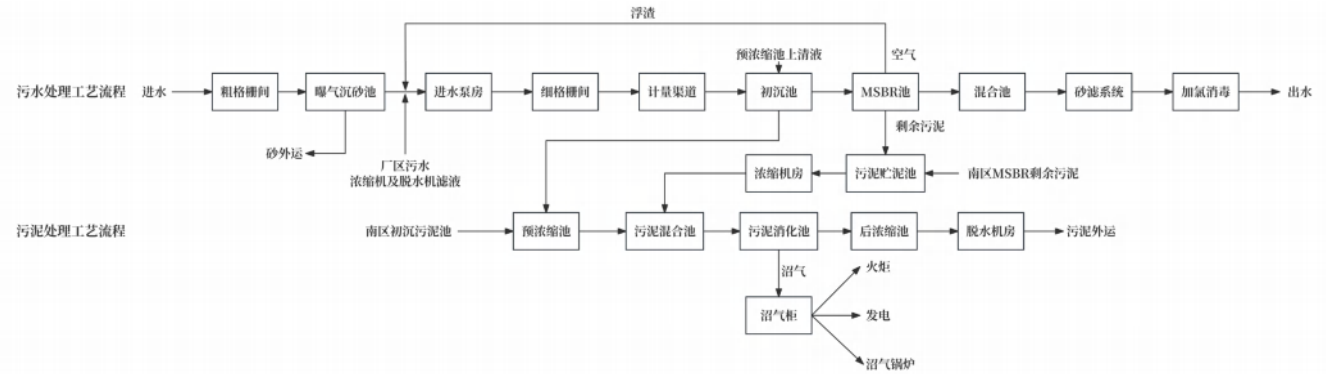


图 1 污泥厌氧消化与沼气热电联产工艺流程图

1 数据分析

污泥中温消化的时间在 15~20 天之间，因此，以 15 天为一个周期对该污水厂全年污水量、污泥量以及沼气的运行数据进行划分，则全年 24 个周期数据变化趋势如图 2、图 3 所示。

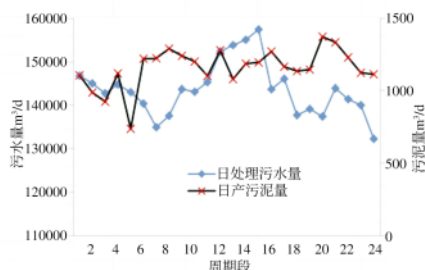


图 2 日处理污水量与日产污泥量的变化曲线

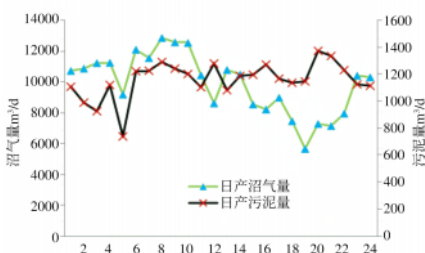


图 3 日消化污泥量与日产沼气的变化曲线

从图中可以看出，污水量、污泥量与沼气体积之间并不成正比例变化，污水量与污泥量的变化主要与人们的生活习惯、饮食、气候有关，在夏季，雨水与生活用水增多，污水量多，但人们饮食清淡，污水中有机成分减少，所以污泥量减少；冬季则与夏季恰好相反，污水量减少，人们饮食高热量高、高蛋白食物较多，以至于污泥量较夏天多^[1]。

由于图 2、图 3 的变化曲线可知，污泥量与污水量、沼气体积与污泥量之间的数量关系全年是不固定的，相关资料显示，我国城市污水厂的污泥产量为每 104m³ 污水产含水率 96% 的污泥 23~70m³，平均则为 35.9m³ 污泥/104m³ 污水，而该污水厂在同样含水率的情况下最高为 190.4m³ 污泥/104m³ 污水，最低为 100.1m³ 污泥/104m³ 污水，平均污泥产率为 79m³ 污

泥/104m³ 污水，产率高于国家平均值^[2-3]，如图 4 所示。单位污泥产气量的变化主要是夏季环境温度高，微生物活性高，降解能力就高，所以在未进入消化罐前，已有部分沼气产生，并散发到空气中，从而进入消化池内的污泥微生物减少，产气量自然下降；冬季大部分微生物储存在泥量，在进入消化池后随温度的增加开始分解产沼气，有助于污泥厌氧消化，产生更多的沼气。

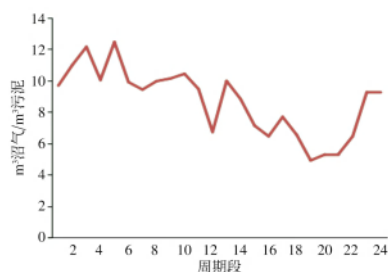


图 4 全年产气率变化

通过对大部分北方污水厂的污泥厌氧消化数据进行分析，得到这些污水处理厂的沼气率为 4~14m³ 沼气/m³ 污泥，平均为 7.5m³ 沼气/m³ 污泥（含水率为 96%）^[4]，该污水厂在不同周期段内污泥产气率有变化，最高为 12m³ 沼气/m³ 污泥，最低为 5m³ 沼气/m³ 污泥，平均为 8.5m³ 沼气/m³ 污泥，可见，该污水厂整体产气率要略高于大部分污水厂。

2 数学模型的建立

据相关资料显示，全国污水处理厂很多，建有污泥厌氧发酵与热电联产系统的污水厂也有一部分，但真正运行该系统的却寥寥无几，不是运转半途终止，就是因为不了解系统启动后的运转情况，干脆不启动系统^[5]。该污水厂污泥厌氧发酵系统启动至今已有将近两年时间，不仅未出过故障，而且运转平稳和良好，这很大一部分原因在于他们能对系统进行及时的预测与调节，因此，本文通过污水厂全年运行数据的详细分析，找出了各个变量相互间的依赖关系，建

立了一个简易的数学模型，该模型可以对估算污水厂污泥厌氧发酵与热电联产系统的运转情况起到一定参考作用，其计算流程如图 5 所示。

图 5 所示流程的主要计算说明为输入一定的沼气量 L ，设定单位污泥产气量 c 、新鲜污泥温度 T 、厌氧消化温度 T_1 、测试沼气甲烷含量 a 以及选定发电

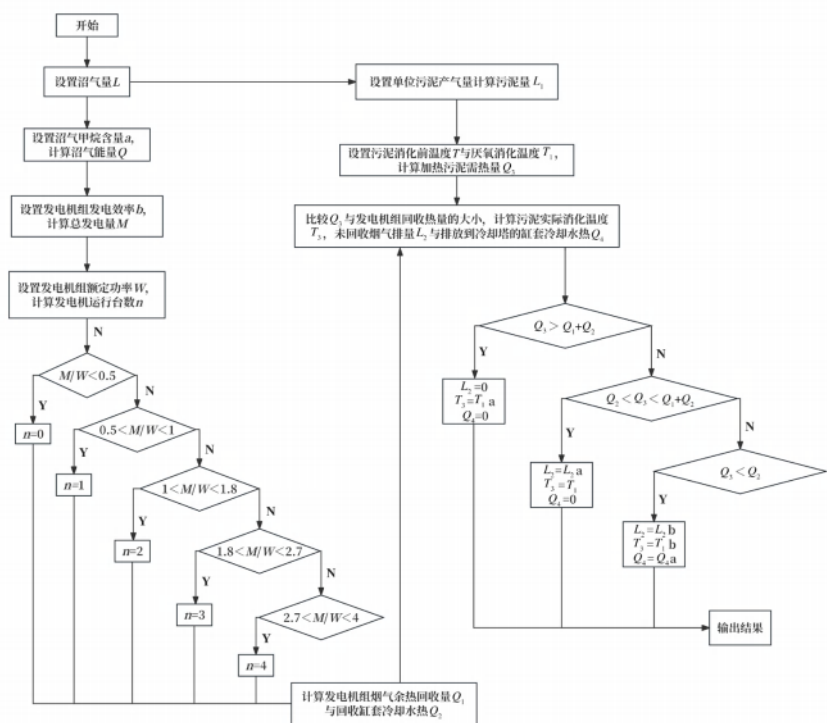


图 5 数学模型计算流程图

机组，然后通过 MATLAB 平台上进行数学模型的计算，便可得到与沼气热电联产系统运行相关的污泥量 L_1 、加热污泥量所需热量 Q_3 、发电机组的最佳运行台数 n 、烟气热量 Q_1 与缸套冷却水热 Q_2 的利用效率以及污泥实际消化温度 T_2 等参数。

该污水厂污泥厌氧消化数据虽然全年均有波动，但是，根据新鲜污泥温度、环境日平均温度、环境日最高温度以及单位污泥产沼气量、沼气中甲烷含量等影响因素，可以进一步把 2022 全年运行数据大致划分为四个阶段，其中 4 月 1 日~6 月 15 日为第一个阶段，6 月 16 日~9 月 30 日为第二个阶段，10 月 1 日~11 月 15 日为第三个阶段，11 月 16 日~3 月 31 日为第四个阶段。将每个阶段再次分为三部分，则每个阶段的运行参数为

该阶段一、三部分的平均值，见表 1。

表 1 每个阶段运行参数值

阶段	沼气量 m ³ /d	新鲜污泥 温度℃	平均 气温℃	平均最高 气温℃	单位污泥产 沼气 m ³	沼气中甲烷 含量百分比%	厌氧消化 温度℃
一	11900	18	17	20	10	59	38
二	9000	23	25	29	7.8	53	38
三	7500	21	16	19	5	58	38
四	10500	11	4	8	10.5	53	38

利用污水厂每个阶段第二部分的实际运行测试数据，与表 1 中所设参数以及运用数学模型计算出的系统运行情况进行对比，验证参数与模型的准确性以及偏差产生的原因，偏差在 -10%~20% 内均认为合理。

对于第一阶段，选取 5 月份 1~10 日的实际运行数据与数学模型计算数据进行对比，计算得到污泥温度偏差为 +1℃，发电量的计算数据与实际测试数据的偏差

如图 6 所示，图中展示了偏差随着沼气中甲烷含量的变化而变化的趋势。

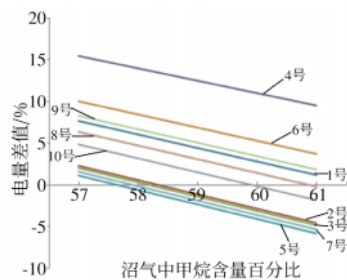


图 6 计算电量与实际电量的差值百分比随沼气中甲烷含量变化而变化的趋势图

由图 6 可知，沼气中甲烷含量为 59% 时，计算电量与实际数据的平均偏差为 2%，发电机组运行负荷与烟气热量随沼气中甲烷含量的变化趋势与电量相同，它们与实际运行数据的偏差分别为 1%、4%，并且随着沼气中甲烷含量这一参数的变化，偏差有增有减，可见，该参数对整个系统的电量和余热量有较大影响；图 7 则分别展示了计算污泥量、未回收烟气热量与实际数据的变化趋势，污泥量的偏差波动较小，最大仅为 15%，模型计算的未进行回收利用的烟气热量与实际运行偏差较大，这主要与污泥温度、沼气甲烷含量、污泥需热量等均有关，该偏差属于累计偏差，因此波动较大，综上所述，所有参数偏差均在允许范围内，因此，阶段一的设定参数与数学模型在该

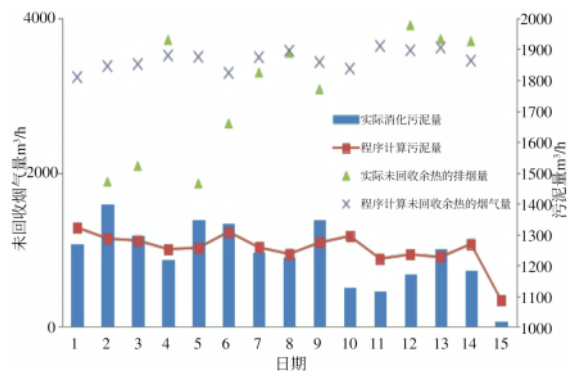


图 7 计算污泥量、未回收余热烟气量与实际数据对比

阶段可行，准确性较高。同理，对其余三个阶段运用同样的方法分别选取 8 月 5~15 日、10 月 16~25 日、1 月 25 日~2 月 5 日的实际测试数据与模型计算数据进行对比分析，得到偏差均在合理范围内，为了进一步验证该数学模型及所设参数的可行性，在两台发电机运行的情况下，又对该污水厂 2023 年 3 月份与 6 月份的运行数据进行了测试，见表 2、表 3。

表 2 该污水厂实际运行数据

分类	时间	沼气体量 m³/d	发电量 kWh/d	污泥 温度℃	发电机组 运行负荷%	沼气中甲 烷含量%
实际运行数据	3 月上旬	9145	18905	12	79	61
	3 月下旬	12057	20839	15	87	51
	6 月上旬	10396	21015	20	88	59
	6 月下旬	8579	17867	22	74	61
分类	时间	烟气热 kW	污泥量 m³/d	消化 温度℃	单位污泥 产气量 m³	污泥未回收直 接排放的烟气 量 L ₂ (m³/h)
实际运行数据	3 月上旬	458	734	38	12	2030
	3 月下旬	515	1217	36	10	0
	6 月上旬	510	1098	38	9	1978
	6 月下旬	433	1275	38	7	1020

表 3 该污水厂模型计算数据

分类	时间	沼气体量 m³/d	发电量 kWh/d	污泥 温度℃	发电机组 运行负荷%	沼气中甲 烷含量%
计算运行数据	3 月上旬	9145	19416	11	81	61
	3 月下旬	12057	21402	11	89	51
	6 月上旬	10396	21348	18	89	59
	6 月下旬	8579	18214	23	76	61
分类	时间	烟气热 kW	污泥量 m³/d	消化 温度℃	单位污泥 产气量 m³	污泥未回收直 接排放的烟气 量 L ₂ (m³/h)
计算运行数据	3 月上旬	461	871	38	11	2030
	3 月下旬	518	1148	33	11	0
	6 月上旬	508	1040	38	10	1649
	6 月下旬	461	1100	38	8	2714

因为3月份属于第四段,6月份属于第二阶段,下旬属于第三阶段,因此,用模型计算时,相应参数值取表1数据,则计算结果与实际运行的偏差如图8、图9所示。

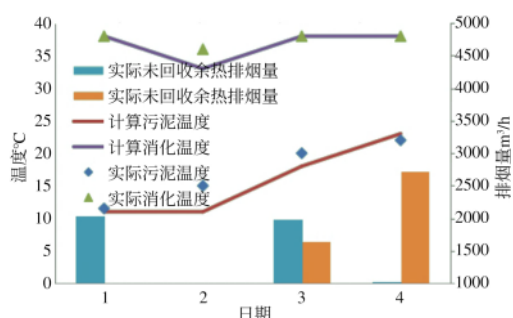


图8 计算数据与实际数据对比

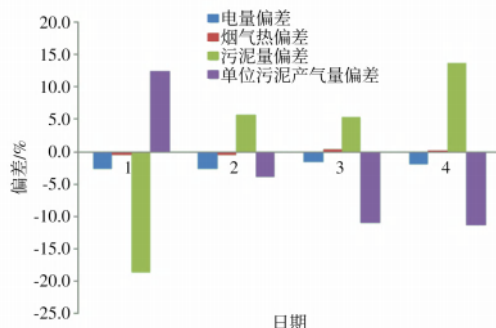


图9 计算数据与实际数据偏差百分比

两图中,横坐标1~4点分别代表3月上旬数据、3月下旬数据、6月上旬数据、6月下旬数据;从图8中可以看到,计算污泥温度与实际污泥温度最多偏差3℃,经查询资料发现,2023年气温上半年气温较2022年高。因此,造成了污泥温度的升高;消化温度受外界因素影响不大,因此偏差较小;图9中单位污泥产气量设定值与实际值略有偏差,这主要与泥质中的有机物含量有关,由于该参数的影响,所以造成计算污泥量与实际污泥量产生了较大偏差,但偏差最多为20%,并未影响到系统的整体运行,其他参数的模型计算值与实际值偏差较小。综上所述,通过不同年份中相同阶段的实际运行与模型计算数据的分析对

比,得到两者虽有偏差,但均在合理范围内,除去偏差影响因素,模型计算数据以及设定参数基本与实际值基本吻合,因此,该模型以及所设参数可以运用于该污水厂对沼气热电联产系统运行情况的预估,并能起到较强的参考作用。

3 结束语

本文通过对污水厂污泥进行厌氧消化与沼气热电联产系统的测试与数据分析,主要得到以下结论:

①该污水厂污水量、污泥量与沼气的三者之间并不是正比例变化,该污水厂平均污泥产率与产气率分别为79m³污泥/104m³污水、8.5m³沼气/m³污泥,均高于我国平均水平;②将全年分为四个阶段,对每个阶段进行新鲜污泥温度、沼气甲烷含量、单位污泥产气量等参数的设定,并建立可以用于预估污水厂沼气热电联产系统运行情况的数学模型;③利用污水厂实际运行数据对所建数学模型与每个阶段的设定参数值进行验证,结果表明,利用所设参数值以及数学模型计算出来的沼气热电联产系统运行情况与实际情况较为接近,偏差在-10%~20%之间,属于合理范围,因此,所建数学模型在该污水厂具有可行性。

参考文献

- [1] 齐浩然,尹明山,唐兆国,等.城镇污水处理厂节能减碳实现路径与技术探讨[J].净水技术,2023,42(10):16-27,53.
- [2] 夏雪,邵钱祺,曹悦,等.不同处理模式下污泥厌氧消化的能源回收与碳排放分析[J].环境工程,2023,41(7):1-7,13.

(下转第56页)

(上接第 51 页)

- [3] 于晓凤, 周恩泽, 丁雪峰, 等. 基于 TRNSYS 的污水厂沼气热电联产系统优化分析和性能评价 [J]. 太阳能学报, 2021, 42 (10) : 324-330.
- [4] 范秀磊, 袁博, 李学强, 等. 青岛麦岛污水处理厂污泥消化及热电联产运行管理经验 [J]. 中国给水排水, 2020, 36 (2) : 22-25.
- [5] 崔濡川, 周恩泽, 刘杰. 符合能量梯级利用原则的污水厂污泥沼气热电联产系统研究 [J]. 中国沼气, 2018, 36 (6) : 79-84.

(收稿日期：2023-12-19)