

不同种类畜禽粪污沼气产气量优化计算方法

殷仁豪, 卢海勇, 龚春景
(上海电力设计院有限公司, 上海 200025)

摘要: 近年来国家层面出台了多项鼓励和支持沼气工程发展的政策。在实际沼气工程项目设计过程中, 沼气产气量计算的准确性尤为重要, 关系到一系列主辅设备的选型及项目整体经济性。目前常用的几种沼气产气量计算方法存在一些不足之处, 与实际工程项目存在一定偏差。针对实际工程中存在部分参数无法收集、部分推荐参数取值范围广导致计算误差放大、实际工程运行条件与理论计算存在差异等问题, 提出了优化思路。同时, 充分考虑了不同种类畜禽的单只生物粪污排放量、粪污含固率、固体物质产气率、产气速率、养殖方式、清粪工艺、清粪周期、发酵周期等因素产生的影响, 并通过厌氧发酵时长与产气量之间的关系、自然发酵时长与产气量之间的关系、养殖规模与粪污总固体含量之间的关系等进行分析后, 提出优化后的沼气产气量计算模型。最后, 利用实际工程数据对优化后的计算模型进行了校验, 结果显示优化后的计算模型计算结果与实际工程非常接近, 误差率较低, 值得应用推广。

关键词: 畜禽粪污; 含固率; 沼气工程; 产气量计算

中图分类号: S216.4; X713 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-1166(2023)03-0091-06

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2023030091

Optimization Calculation Method of Biogas Production from Different Kinds of Livestock and Poultry Manure / YIN Renhao, LU Haiyong, GONG Chunjing / (Shanghai Electric Power Design Institute Co Ltd, Shanghai 200025, China)

Abstract: In recent years, the state has issued a number of policies to encourage and support the development of biogas projects. In the actual design process of biogas project, the accuracy of biogas production calculation is particularly important, which is related to the selection of a series of main and auxiliary equipment and the overall economy of the project. However, there are some deficiencies in several commonly used calculation methods of biogas production, and there is a certain deviation from the actual project. In view of the problems that some parameters cannot be collected in the actual project, the calculation error is enlarged due to the wide range of coefficient values, and there are differences between the actual project operation conditions and the theoretical calculation, the optimization idea is put forward. At the same time, the effects of single biological fecal sewage discharge, fecal sewage solid content, solid matter gas production rate, gas production rate, breeding mode, fecal cleaning process, fecal cleaning cycle, fermentation cycle and other factors of different kinds of livestock and poultry are fully considered. After analyzing the relationship between anaerobic fermentation duration and gas production, natural fermentation duration and gas production, and the relationship between breeding scale and total solid content of fecal sewage, the optimized calculation model of biogas production is put forward. Finally, the optimized calculation model is verified by using the actual engineering data. The results show that the calculation results of the optimized calculation model are very close to the actual engineering, and the error rate is low, which is worthy of application and popularization.

Key words: livestock manure; solid content; biogas engineering; gas production calculation

随着我国养殖业的不断发展壮大, 每年产生的畜禽粪污总量巨大, 急需加快推进畜禽养殖废弃物处理和资源化利用。近年来国家层面相继出台了

《关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见》、《全国畜禽粪污资源化利用整县推进项目工作方案》、《关于促进生物天然气产业化发展的指导意见

收稿日期: 2022-05-03 **修回日期:** 2022-11-30

作者简介: 殷仁豪(1987-), 男, 汉族, 上海人, 高级工程师, 主要从事生物质热化学转化、发电、清洁供暖等方面的规划、咨询、设计、研究等工作, E-mail: yinrh@sepd.com.cn

见》等一系列政策鼓励和支持畜禽粪污资源化利用,并给出了生物天然气发展目标,到2025年年产量超过100亿立方米,到2030年超过200亿立方米。在技术路线上,明确提出了生物天然气是以农作物秸秆、畜禽粪污、餐厨垃圾、农副产品加工废水等各类城乡有机废弃物为原料,经厌氧发酵和净化提纯产生的绿色低碳清洁可再生的天然气,同时厌氧发酵过程中产生的沼渣沼液可生产有机肥。由此可见,畜禽粪污厌氧发酵技术将成为未来畜禽粪污资源化利用的主要技术路线。

沼气产气量对于整个沼气工程的设计、投资、运行都非常重要,设计过程中沼气产气量计算的准确性会影响到生物天然气产量、厌氧发酵罐的容积设计、储气罐的容积设计、净化设备处理规模的设计、发电装机设计、投资规模以及项目的收益。然而现行沼气相关规范中给出的沼气产气量计算方法,存在一些问题,如取值范围较为宽泛,对于大型沼气工程而言在计算沼气产气量时会放大误差,造成计算结果与实际沼气产气量偏差较大等。本文针对目前常用的几种沼气产气量计算方法进行分析讨论,并在此基础上充分考虑不同种类畜禽的单只生物粪污排放量、粪污含固率、固体物质产气率、产气速率、养殖方式、清粪工艺、清粪周期、发酵周期等因素产生的影响,提出优化后的沼气产气量计算模型,并利用文献数据和实际工程数据对模型进行校验。

表1 《大中型沼气工程技术规范》TS产气率

 $(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$

猪粪	鸡粪	牛粪	麦秸	稻草	玉米秸	高粱秸
0.3~0.35	0.35~0.4	0.25~0.3	0.32~0.33	0.3~0.31	0.33~0.35	0.386

表2 《沼气工程技术规范 第1部分:工程设计》TS产气率

 $(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$

猪粪	鸡粪	奶牛粪	玉米秸秆	小麦秸秆	水稻秸秆	有机废水
0.3~0.35	0.32~0.4	0.17~0.27	0.4~0.5	0.32~0.35	0.29~0.31	0.35~0.4

1.2 沼气产气量 VS 计算方法

VS指的是挥发性固体,是指总固体中的有机组分。挥发性固体常用%表示。相比于用TS含量计算沼气产气量,用VS含量计算沼气产气量更为精确。这是因为TS含量包括了不会产生沼气的无机物,由于不清楚无机物的含量,可能会给沼气产气量的计算带来误差。VS算法常见于一些文献资料中,在现行规范中并未给出利用VS含量计算沼气产气量的计算方法及VS产气率取值范围。利用

1 工程设计中存在的问题

目前在沼气工程项目设计中,常用的有3种计算方法,分别是TS算法,VS算法和COD算法。但是在实际沼气工程项目的设计过程中,发现上述3种计算方法在使用时均存在一些不足之处,设计值与实际情况存在偏差。

1.1 沼气产气量 TS 计算方法

TS指的是发酵原料中的总固体,又称干物质,包括可溶性固体和不可溶性固体,总固体含量一般用%表示。利用TS含量计算沼气产量是目前最为常用的方法,其计算公式如下:

$$q = WSY_p \quad (1)$$

式中: q 为沼气产量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; W 为发酵原料, $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$; S 为发酵原料总固体含量(TS),%; Y_p 为原料TS产气率, $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

《大中型沼气工程技术规范》和《沼气工程技术规范 第1部分:工程设计》分别给出了范围相近的不同种类原料的TS产气率取值范围,如表1和表2所示^[1-2]。该产气率的数据来源于《沼气技术手册》(四川科学技术出版社,1990年9月第一版),采用的发酵温度为35℃,发酵周期为秸秆90d、粪便60d。但是需要指出的是,在实际沼气工程中,原料的发酵时间不可能达到秸秆90d、粪便60d。因此,该产气率数据与实际工程会存在一定的偏差。

VS含量计算甲烷产量的计算公式下:

$$q_{\text{CH}_4} = WSY_{\text{VS}} \quad (2)$$

式中: q_{CH_4} 为甲烷产量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; W 为发酵原料, $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$; S 为发酵原料挥发性固体含量(VS),%; Y_{VS} 为原料VS产气率, $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

需要注意的是,在中大型沼气工程中,难以获得VS产气率,如采用VS算法时,由于粪污总量非常大,一旦VS产甲烷率取值不当,会引起误差放大,最终计算出的沼气产气量与实际偏差较大。

1.3 沼气产气量 COD 计算方法

化学需氧量可以较为准确地反映样品中有机物的含量。对于不同种类畜禽粪污的 COD 含量可参

表3 《畜禽养殖业污染治理工程技术规范》COD 含量取值范围

猪粪(干清粪)	猪粪(水冲粪)	肉牛(干清粪)	奶牛(干清粪)	蛋鸡(水冲粪)
2500 ~ 2770	15600 ~ 46800	887	6000 ~ 25000	2740 ~ 10500

($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

利用 COD 计算沼气产量是一种较为精确的计算方法,但是该方法也存在两个问题,其一,受各种条件限制,实际大中型沼气工程中难以获得实际的 COD 参数,需要采用参考值。而《大中型沼气工程技术规范》给出不同种类畜禽粪污的 COD 取值范围宽泛,如猪粪(水冲粪) COD 含量为 15600 ~ 46800 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最大值是最小值的 3 倍,在大型沼气工程沼气产气量计算时,由于粪污总量非常大,一旦取值不当会导致计算过程引起的误差放大,最终计算出的沼气产气量与实际偏差较大。其二, COD 计算沼气产量是纯理论计算,对于实际工程而言由于各种影响因素造成沼气产量与计算值有着较大的差距。

1.4 工程设计中沼气产气量计算存在的其他问题

除上述计算方法中存在的问题外,在实际工程设计中往往还会遇到以下问题:

(1) 在计算沼气产气量时,除了 TS 产气率、VS 产气率和 COD 含量外,粪污量也是影响沼气产气量计算准确性的重要因素。在所给出的几种计算方法中,一般都把粪污量默认为是已知值,而实际情况是粪污量往往并非通过测试计量手段得到,而是根据养殖规模估算得到,通过 1 只猪、1 只鸡、1 头牛的粪污量估算整个项目的粪污总量,容易产生误差放大的问题。此外,不同地区,不同养殖方式的畜禽粪污量及其 TS、VS 和 COD 含量都是不同的。因此,只有采用较为准确的方法估算单只畜禽的粪污排放量才能避免计算几十万只畜禽粪污总量时误差被放大。

(2) 应当充分考虑清粪周期对沼气产气量的影响。粪污在进入厌氧罐进行厌氧发酵前在环境温度下发酵所释放的沼气,在计算沼气产气量时需将此部分扣除。此外,也应充分考虑畜禽粪污在厌氧发酵罐中的发酵时长与产气量之间的关系。与理论计算不同,在实际工程中,整个发酵过程受到发酵时长的限制,导致排出的沼液沼渣中仍会存在未发酵完全的物质,在计算沼气产气量时这部分物质所对应的沼气产气量也应当被扣除。

考《畜禽养殖业污染治理工程技术规范》中给出的 COD 含量范围进行取值^[3],如表 3 所示。

(3) 在使用 TS 或 VS 或 COD 计算法时,可以发现需要收集两个重要的数据粪污总量和 TS 含量(或 VS 含量或 COD 含量)。粪污总量需要在猪场通过安装计量装置获得,TS 含量(或 VS 含量或 COD 含量)需要通过取样化验的方法获得。但是,在畜禽养殖过程中不同季节畜禽粪污产生的总量以及 TS 含量(或 VS 含量或 COD 含量)会有所不同,如不同季节猪的食量、冲洗水量等引起畜禽粪污总量以及 TS 含量(或 VS 含量或 COD 含量)的差异。

2 算法优化原则和建模思路

2.1 优化原则

针对现有几种沼气产气量计算方法存在的问题及关键影响因素,本文在现有沼气产气量计算方法的基础上通过以下原则进行深入优化:

(1) 考虑到 VS 计算法和 COD 计算法给出不同种类畜禽粪污的 VS 产甲烷率和 COD 含量取值范围宽泛,容易造成计算误差放大。因此,拟采用 TS 计算法作为主要的计算方法并对此计算方法加以优化,VS 计算法和 COD 计算法在有较为准确的工程和文献数据支撑的前提下作为辅助计算方法对 TS 计算法进行横向验证。

(2) 通过中温发酵过程中沼气产气量与发酵时长的对应关系,确定设计发酵周期内的沼气产气量。

(3) 通过环境温度下沼气产气量与发酵天数的对应关系,确定原料进入发酵罐前在环境温度下发酵所释放的沼气。

(4) 通过收集文献资料,经过统计分析后确定不同畜禽的单只粪污产量。

(5) 无法收集到的数据以猪粪为基准进行折算,具体折算方法参考文献和规范资料。

(6) 通过收集实验数据和已建工程的运行资料,确定沼气中的甲烷含量。

(7) 所有使用的参数采用年均值,避免受到季节影响。

(8) 通过其他计算方法和已建成项目的运行数

据进行比较验证。

2.2 建模思路

(1) 建立原料单位含固量原料中温厌氧发酵理论总产气量计算方法;

(2) 建立原料单位含固量原料中温厌氧发酵时长与理论总产气量的函数关系;

(3) 建立原料单位含固量原料环境温度下自然发酵时长与产气量的函数关系;

(4) 建立养殖规模与粪污含固总量之间的函数关系;

(5) 确定无相关资料的参数折算方法;

(6) 确定沼气中的甲烷含量;

(7) 耦合上述计算方法和函数关系形成沼气产气量优化计算方法。

3 沼气产气量优化计算模型

3.1 理论总产气量

本文基于 TS 计算方法开展优化,考虑到《大中型沼气工程技术规范》的数据来源于《沼气技术手册》,采用的发酵温度为 35℃,发酵周期为秸秆 90 天、粪便 60 天。该数据具有以下特点: 1) 该规范所采用的发酵温度为中温厌氧发酵所处温度范围; 2) 该规范中数据所采用的发酵周期长,可认为原料已发酵完全; 3) 该规范给出的 TS 产气率取值范围较为狭窄,取值偏差引起的误差小。因此,优化模型中,各种原料中温厌氧发酵的 TS 产气率按《大中型沼气工程技术规范》给出的 TS 产率取值范围的平均值用于理论总产气量计算。

3.2 中温厌氧发酵时长与理论总产气量的函数关系

《中国畜禽养殖场与轻工业沼气技术指南》一书和《沼气工程建设手册》一书均给出了不同原料发酵时间与产气速率的关系,两书给出的数据相同^[4-5]。以猪粪为例,猪粪产气完全需要发酵 60 天,但发酵 20 天时,沼气转化率就能达到 86.3%,此时发酵罐的规模只需完全发酵的 1/3,尽管此时发酵并不完全,但从发酵罐的投资来看能够节省 2/3,从经济性角度出发,发酵 20 天优于发酵 60 天。利用两本书中给出的数据,经多项式拟合后,得到各种原料发酵时间与产气速率之间的函数关系,进而得到发酵罐内停留天数修正因子 y ,如公式(1)所示,其中 x 为发酵罐内停留天数。最终修正公式如下。

$$q = WSY_p \times y \quad (4)$$

式中: q 为沼气产量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; W 为发酵原料, $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$; S 为发酵原料总固体含量(TS), %; Y_p 为原料 TS 产气率, $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$; y 为发酵罐内停留天数修正因子, %。

表 4 各种原料发酵时间与产气速率的最优多项式回归方程

原料种类	多项式拟合 ($X = \text{天数}, Y = \text{修正因子}$)
猪粪	$y = 0.0003x^3 - 0.0492x^2 + 2.6643x + 51.774$
人粪	$y = 0.0017x^3 - 0.2210x^2 + 9.3775x - 32.358$
马粪	$y = 0.0004x^3 - 0.0565x^2 + 3.0457x + 38.587$
牛粪	$y = 0.0017x^3 - 0.2119x^2 + 8.9993x - 35.606$
玉米秸秆	$y = 0.0006x^3 - 0.0766x^2 + 3.3397x + 49.643$
麦秸	$y = 0.0006x^3 - 0.0916x^2 + 4.7008x + 9.6264$
稻草	$y = 0.0005x^3 - 0.0807x^2 + 4.4183x + 9.3925$
青草	$y = 0.0009x^3 - 0.1111x^2 + 4.4744x + 40.677$

3.3 环境温度下自然发酵时长与产气量的函数关系

畜禽粪污在进入厌氧发酵罐前通常处于集粪池、运粪车粪污罐和粪污管道中,这些设施设备的温度条件为室温,集粪池为有氧环境,运粪车粪污罐和粪污管道基本属于厌氧环境。由于目前未能获得与该条件完全一致的实验数据,且运输时间较短,因此畜禽粪污在运输过程中释放的沼气暂时按室温下有氧条件下的产气特性计算,待有进一步研究数据后再做进一步修正。

魏荣荣^[6]等对 4 种不同温度条件下猪粪的产气特性进行了实验研究,包括室温(平均 15℃)、20℃、35℃和 55℃,反应物 TS 浓度为 6.6%,反应物总量为 25.5 kg,41 d 的累计产气量。该文献中,室温条件下猪粪厌氧发酵累计产气量曲线接近一条直线。研究小组通过一元回归法对该曲线进行拟合,得到室温条件下猪粪厌氧发酵时间与累计产气量的正比例函数关系,并在此基础上以单位干物质质量为基准进行折算,得到室温条件下干物质产气率为 $4.16 \times 10^{-3} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。刘荣厚^[7]等在室温下也得到了猪粪厌氧发酵累计产气量曲线接近一条直线的类似结论。此外,按平均值考虑实际清粪周期的影响(如清粪周期为 7 d,第 1 天的粪污在室温下自然发酵了 7 d,第 7 天的粪污在室温下自然发酵了 0 d),最终得到室温条件下沼气产气量计算公式如下:

$$q_s = KWS \times \frac{d}{2} \quad (5)$$

式中: q_s 为粪污总量对应的进入发酵罐前储存

运输过程中自然散发沼气体积, m^3 ; K 为室温(平均 15°C) 条件下干物质产气率, $m^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 取 4.16×10^{-3} ; W 为发酵原料, $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$; S 为发酵原料总固体含量(TS), %; d 为清粪周期, d。

3.4 养殖规模与粪污总固体含量之间的函数关系

工程项目收资过程中, 如果能够获得粪污总量和 TS 含量则可以直接利用 TS 计算法计算沼气产量。然而实际收资过程中仅仅能够获得准确的养殖规模, 难以获得准确的粪污总量和 TS 含量这两个参数。本文采用单只畜禽粪污总固体量 S_0 和养殖规模的方法推算规模化养殖场粪污的总固体量, 该方法可以在畜禽养殖场粪污总量及粪污 TS 含量均未知的情况下, 通过养殖规模 M 计算出粪污中的总固体量(即 TS 计算法中 W 和 S 均未知时), 计算出沼气产量, 如公式(6)和公式(7)所示。该方法将 TS 计算法中 W 和 S 两个未知数用 S_0 一个未知数取代, 能够提高计算精度, 而 S_0 取值的准确性将直接决定产气率计算的准确性。

$$q = WSY_p \quad (6)$$

$$q = MS_0Y_p \quad (7)$$

式中: q 为沼气产量, $m^3 \cdot \text{d}^{-1}$; W 为发酵原料, $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$; S 为发酵原料总固体含量(TS), %; Y_p 为原料 TS 产气率, $m^3 \cdot \text{kg}^{-1}$; M 为养殖规模, 只; S_0 为单只畜禽粪污总固体量, $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1} \text{只}^{-1}$ 。

3.4.1 单只育肥猪粪污总固体量

此处以育肥猪为例, 根据对文献资料的整理, 将单只育肥猪的粪污总固体量总结如表 5 所示。

表 5 单只育肥猪粪污总固体量 ($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$)

名称	单只育肥猪总固体量
按《中国畜禽养殖场与轻工业沼气技术指南》猪场规模与粪污量关系	0.40
按《沼气工程建设手册》单只育肥猪数据	0.36
按《中国畜禽养殖场与轻工业沼气技术指南》单只育肥猪数据	0.42

从上表中可以发现, 单只育肥猪的粪污总固体量在 $0.36 \sim 0.42 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间。其中, 按《沼气工程建设手册》计算得到的 $0.36 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$, 此方法仅考虑了粪便含固量, 未考虑尿液中的含固量, 因此取值偏小; 按《中国畜禽养殖场与轻工业沼气技术指南》给出的 $0.42 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 考虑了尿液中的含固量, 但是对比《全国污染源普查畜禽养殖业源产排污系数手册》

中的粪便量($1.41 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$), 《指南》中单只育肥猪的粪便量取值偏大($1.75 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$), 推测可能的原因是《指南》中采用了日龄为 135 天的育肥猪粪便量, 《规模猪场建设》^[8]给出的一只育肥猪 168 ~ 175 d 的成长周期, 135 天日龄的育肥猪体重比猪场内所有育肥猪(0 ~ 175 d) 的平均体重大, 产生的粪便量也比平均值大。综合考虑上述因素, 考虑大型养殖场在整个养殖过程中存在分批育肥猪的成长, 因为采用生产周期的平均值, 即本文在计算时拟采用 $0.39 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ 作为单只育肥猪的粪污总固体量。

3.4.2 其他种类畜禽粪污折算方法

在没有详细数据的情况下, 本文暂时按照《畜禽养殖业污染物排放标准》^[9], 将不同种类畜禽折算至猪当量, 具体折算方法如下: 按 1 头奶牛折算为 10 头猪、1 头肉牛折算为 5 头猪、3 只羊折算至 1 只猪、30 只蛋鸡折算为 1 只猪、60 只肉鸡折算为 1 只猪、20 只鸭鹅折算为 1 只猪。

3.5 沼气中的甲烷含量

根据上述计算方法, 仅仅能够得到沼气的产量, 但是无法得知沼气中的甲烷含量。沼气中的甲烷含量对于后续的沼气热值计算、沼气内燃机装机规模计算、生物天然气产量计算等都非常重要。此外, VS 计算法和 COD 计算法用于横向比较验证沼气产量时, 也需要根据沼气中的甲烷含量进行折算。魏荣荣^[6]等给出了猪粪在不同发酵时间段内, 中温厌氧发酵条件下沼气中甲烷含量的变化, 实验结果整理如表 6 所示。

表 6 中温厌氧发酵甲烷含量变化

发酵时间/d	甲烷含量/%
9	47.865
13	55.017
18	59.520
22	55.323
27	53.857
31	54.524
36	53.685
41	53.579

研究者指出, 由于实验启动过程有空气存在, 从第 9 天开始的甲烷含量数据为有效数据, 考虑到实际工程中发酵时间一般不会超过 30 d, 因此取 9 ~ 27 d 的甲烷含量平均值作为本计算方法中猪粪中温厌氧发酵甲烷含量取值。经计算, 甲烷含量为

54.32%, 该值与一些实际工程中得到的沼气甲烷含量参考值 55% 较为接近。

3.6 优化计算模型耦合

根据上述各节的优化, 耦合后形成最终的沼气产气量优化计算模型, 已知粪污总量和 TS 含量时采用公式 (8), 已知养殖规模时采用公式 (9):

$$Q = (q - q_s) \times y = \left(1 - \frac{k d}{Y_p 2}\right) W S Y_p \times y \quad (8)$$

$$Q = (q - q_s) \times y = \left(1 - \frac{k d}{Y_p 2}\right) M S_0 Y_p \times y \quad (9)$$

式中: Q 为沼气产量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; q 为粪污总量对应的理论沼气产量, $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; q_s 为粪污总量对应的进入发酵罐前储存运输过程中自然散发沼气体积, m^3 ; y 为发酵罐内停留天数修正因子, %; W 为发酵原料, $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$; S 为发酵原料总固体含量 (TS), %; Y_p 为原料 TS 产气率, $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$; k 为室温 (平均 15°C) 条件下干物质产气率, $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 取 4.16×10^{-3} ; M 为养殖规模, 只; S_0 为单只畜禽粪污总固体量, $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1} \text{只}^{-1}$, 育肥猪取 0.39; d 为清粪周期, d。

4 结论

在实际沼气工程项目设计过程中, 沼气产气量计算的准确性尤为重要, 关系到一系列主辅设备的选型及项目整体经济性。然而, 目前常用的几种沼气产气量计算方法存在一些不足之处, 与实际工程项目存在一定偏差。

本文对目前常用的几种沼气产气量计算方法进行了分析, 指出了其中存在的不足, 提出了优化原则和建模思路。在充分考虑了不同种类畜禽的单只生物粪污排放量、粪污含固率、固体物质产气率、产气

速率、养殖方式、清粪工艺、清粪周期、发酵周期等因素产生的影响, 并通过对厌氧发酵时长与产气量之间的关系、自然发酵时长与产气量之间的关系、养殖规模与粪污总固体含量之间的关系等进行分析后, 本文提出了优化后的沼气产气量计算模型, 并利用实际工程数据对优化后的计算模型进行了校验, 结果显示优化后的计算模型计算结果与实际工程非常接近, 误差率较低, 值得应用推广。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 大中型沼气工程技术规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [2] 中华人民共和国农业农村部. 沼气工程技术规范第 1 部分: 工程设计 [S]. 北京: 中国农业出版社, 2019.
- [3] 樊京春, 赵勇强, 秦世平. 中国畜禽养殖场与轻工业沼气技术指南 [M]. 化学工业出版社, 2009.
- [4] 齐岳. 沼气工程建设手册 [M]. 化学工业出版社, 2013.
- [5] 环境保护部. 畜禽养殖业污染治理工程技术规范 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [6] 魏荣荣, 成官文, 罗介均, 等. 不同温度猪粪厌氧发酵甲烷产量和产能实验 [J]. 农机化研究, 2010(4): 170 - 174.
- [7] 刘荣厚, 郝元元, 梅晓岩, 等. 温度对猪粪厌氧发酵沼气产气特性的影响 [G]. // 中国农村生物质能源国际研讨会暨东盟与中日韩生物质能源论坛论文集. 2008: 277 - 283.
- [8] 北京市农林科学院畜牧兽医研究所. 规模猪场建设 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [9] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 畜禽养殖业污染物排放标准 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.