



应用化工

Applied Chemical Industry

ISSN 1671-3206, CN 61-1370/TQ

《应用化工》网络首发论文

题目: 厌氧发酵工程太阳能辅热技术研究进展
作者: 聂发辉, 吴道, 张佳杰, 隆曦孜, 汪楚乔
DOI: 10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20200416.011
网络首发日期: 2020-04-16
引用格式: 聂发辉, 吴道, 张佳杰, 隆曦孜, 汪楚乔. 厌氧发酵工程太阳能辅热技术研究进展. 应用化工. <https://doi.org/10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20200416.011>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

厌氧发酵工程太阳能辅热技术研究进展

聂发辉¹, 吴道¹, 张佳杰¹, 隆曦孜¹, 汪楚乔^{1,2}

1.华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013

2.南通华新环保设备工程有限公司, 江苏 南通 226000

✉通信作者 汪楚乔, 电话 15716121856, 电邮 wangchuqiao@seu.edu.cn

摘要 厌氧发酵技术能有效回收利用有机废弃物中的能量, 而温度是自厌氧发酵技术诞生以来长期困扰厌氧工程的重要难题, 保证厌氧发酵温度才能提升产气量。传统厌氧发酵增温技术存在增温效果不佳或需要消耗燃料造成能量损耗, 甚至污染环境的问题。太阳能是一种非常适合提供厌氧发酵辅热的清洁能源, 大量研究人员对太阳能为厌氧反应器的辅热进行了研究和实践, 但关于厌氧发酵太阳能辅热技术综述文章较少。本文综述了太阳能辅热技术、太阳能蓄热技术等厌氧发酵工艺中的应用及研究进展, 分析了太阳能辅热技术的优势及不足, 针对太阳能的间断性和不稳定性, 太阳能辅热-蓄热联合技术可有效跨时段利用太阳能, 利用相变蓄热技术可将蓄热量提高数倍以上, 太阳能和厌氧发酵技术在不断进步, 但其工程应用还需进一步发展。

关键词 太阳能辅热; 厌氧发酵; 太阳能蓄热; 增温保温; 沼气

中图分类号 TQ 920

文献标志码 A

Research progresses of solar auxiliary heat technology for anaerobic digestion engineering

NIE Fahui¹, WU Dao¹, ZHANG Jiajie¹, LONG Xizi¹, WANG Chuqiao^{1,2}

1.School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Jiangxi, Nanchang 330013, China

2.Nantong huaxin environmental protection equipment engineering co. LTD, Jiangsu, Nantong 226000, China

Abstract Anaerobic fermentation technology can effectively recycle and utilize the energy of organic waste, and temperature has long been an important problem in anaerobic engineering since the birth of anaerobic fermentation technology, to ensure anaerobic fermentation temperature can improve gas production. Traditional anaerobic heating technology has some problems, such as poor heating effect, energy loss caused by fuel consumption and even environmental pollution. Solar energy is a kind of clean energy which is very suitable for providing auxiliary heat of anaerobic fermentation, a large number of researchers have studied and practiced solar energy as auxiliary heat of anaerobic reactor, however, there are few reviews on anaerobic fermentation solar thermal technology. This paper describes the application and research progress of solar auxiliary heat technology, solar thermal storage technology, and analyzes the advantages and disadvantages of solar auxiliary heat technology, solar energy is discontinuous and unstable, solar auxiliary heat storage technology can effectively utilize solar energy across time periods, heat storage can be increased by several times by using phase change heat storage technology, solar energy and anaerobic fermentation technologies are advancing, but their engineering applications need to be further developed.

Key words solar auxiliary heat; anaerobic digestion; solar heat storage; warming heat preservation; marsh gas

0 引言

厌氧发酵是将含有碳水化合物的餐厨垃圾、家禽粪便及含有纤维素的秸秆作为底物, 通过微生物在厌氧条件下的作用, 最终转化成甲烷和氢气等清洁能源^[1-2]。温度是影响厌氧发酵的重要因素, 有

基金项目: 江苏省博士后科研资助计划、国家科技部支持计划项目 (2013BAJ10B12-02)

作者简介: 聂发辉 (1977-), 男 (汉族), 江西南昌, 华东交通大学副教授, 博士, 研究方向: 水污染控制理论与技术, 电话 0791-87046962, 电邮 50124165@qq.com

网络首发时间: 2020-04-16 15:35:46 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1370.TQ.20200416.1529.022.html>

效提高厌氧发酵温度可促进沼气生成,不同的发酵温度对应着不同的发酵温度区^[3]。黄俊翰等^[4]研究发现,不同温度(25、35、45、55℃)条件下厌氧发酵的累计产气量,结果表明35℃累计产气量最高,故中温发酵运用最为广泛。国内外厌氧发酵工程中的传统加热方式常采用电加热、燃煤热水锅炉加热、地源热泵等^[5],其产气效果明显优于常规厌氧发酵,但前者能耗过高、经济性偏低,故亟需寻找更绿色经济的方式代替传统的加热方式。

太阳能技术广受厌氧发酵领域技术人员的青睐。我国作为石油消耗大国,亟需开发新能源来代替传统能源,太阳能辅热厌氧发酵与传统沼气池增温方式相比除了经济性更高外,还绿色环保,具有良好的社会效益^[6-8]。我国的有机固体废弃物量非常巨大,据统计我国每年产生的垃圾达30亿吨,采用厌氧消化技术不仅可以解决垃圾分解问题还能提供能源。而我国的太阳能资源也非常丰富,如西藏地区年平均太阳辐射总量为7000MJ/m²^[9],如能将两者结合既能妥善处理废弃垃圾,又能产生大量清洁能源。

太阳能辅热厌氧发酵技术符合时代绿色发展的主题,本文综述了太阳能辅热厌氧发酵技术在国内外研究的进展以及工程运用上的特点,并简要对比分析与常规厌氧发酵的温度和沼气产量。同时由于太阳能辅热技术具有不稳定性与间歇性的缺点,还对太阳能蓄热技术研究进行了综述,以期为大中型厌氧发酵工程辅热提供技术参考。

1 传统厌氧发酵增温技术

温度是影响厌氧发酵的重要因素之一,合适的温度是厌氧发酵正常进行的前提条件。厌氧发酵增温的实质是将外界热源的热量传递至发酵装置,早期厌氧发酵增温方式常采用架设大棚,燃烧石油、煤炭等化石燃料为沼气池增温,随着电力系统的普及,电热膜、电加热器等电辅热增温方式运用变为广泛,再随着增温技术的进一步发展,沼气发电余热增温及地源热泵等增温技术运用于工程中^[5,10]。

1.1 被动式增温技术

被动式增温技术是厌氧发酵工程中最常用也是最为经济的一类增温方式,一般是通过架设大棚、设置保温层等手段以提高或保持反应器的温度。胡慧珍等^[11]提出在沼气池上搭建钢架大棚,遭遇极端天气时在大棚上覆盖双层尼龙和稻草,处于大棚内部的沼气池其发酵温度能达到18~25℃,而未被大棚覆盖的沼气池池体温度低于10℃,产气效果不佳,大棚内的沼气池产气率可达0.15~0.25 m³ m⁻³ d⁻¹。“四位一体”模式也是我国传统沼气池增温的一种方式,沼气池与日光温室、厕所、猪舍全封闭连在一起,人、畜粪便可为沼气池提供底物,在该模式下沼气池温度提高3~5℃,年产沼气量提高20%~30%^[12],但日光温室常受天气影响,杨世关等^[13]设计“猪-沼-炕”模式可有效避免天气影响,该单元模式以沼气池为纽带连接太阳能猪舍、火炕,火炕为猪舍提供热量,既可满足猪对热量的需求,也可提高沼气池发酵温度,沼气池平均温度超过15℃,产气率为0.14 m³ m⁻³ d⁻¹,但该运用十分受地域限制。

1.2 主动式增温技术

主动式增温技术是通过消耗其它能源如电能、化石能源等产生热量,经过热媒传递至发酵装置。相较于被动式增温技术,主动式增温技术增温效果更明显,且不易受地域限制。

1.2.1 电加热

电加热膜加热原理是电能转换成热能,热量向四周辐射,为周边增温。白莉等^[14]对长春地区的一个体积为8 m³的沼气池采用电热膜加保温层技术为其增温,就是在沼气池的表面覆盖一层电热膜,再往电热膜上敷设一层保温层,冬季室外平均温度为5~10℃,池内温度可达35℃,以每天发酵20 kg有机物计算,平均每天产气量可达15.2 m³,但需要损耗电能3.144 kWh/d。Zeshan等^[15]设计了一套不锈钢倾斜置高温干式厌氧发酵系统,将食物垃圾、绿色垃圾等作为发酵底物,该装置有效容积为0.55 m³,总高度为2.4 m,装置与地面倾斜角约为30°,采用电加热的方式给水箱中的水加热,热水通过水泵作用进入发酵装置进行热量传递,发酵温度可达55℃,沼气量为210~300 L/kgVS。

1.2.2 燃煤热水锅炉加热

燃煤热水锅炉加热是用燃烧煤炭产生的热量给水加温,热水经水泵作用进入厌氧发酵装置来提高发酵温度。邢慧娟等^[16]曾设置 CSTR 型沼气罐的发酵温度为 35℃,采用燃煤热水锅炉加热法为其增温,产气率为 1.3 m³/m³ d,计算出每年煤耗量 79.0 t,水泵耗电 4818 kW h,CO₂排放量为 294473 kg。该增方式虽可提高沼气产量,但会消耗大量煤炭并产生温室气体和有毒气体。

1.2.3 沼气锅炉加热

为减少对不可再生能源的过度消耗,有研究人员将沼气代替煤炭作为燃料获得热水,再经过热水循环为厌氧发酵装置供热^[17]。田蔓等^[18]针对宁夏冬季气温低导致沼气池发酵速度缓慢这一情况,提出采用沼气锅炉辅热沼气池,沼气锅炉可将水加温至 60℃,热水通过聚氨酯发泡保温钢管运送至沼气池,可使沼气池的发酵温度维持在 35℃,沼气每天消耗量 301.20 kg,产生量为 3369.96 kg,该增温方式可大大提高冬季沼气池产气量。

1.2.4 沼气发电余热加热

沼气热电联产工程中采用了沼气发电余热增温技术,该技术充分利用燃气内燃机产生的热量以及发电机组中的余热为发酵装置增温^[17]。李淑夏^[19]在其研究中提到青岛某日处理量 10~20 万吨的污水处理厂中的剩余污泥被四个消化池厌氧发酵处理,消化池中的污泥发酵所产生的沼气储存至沼气罐,待沼气在沼气罐中除硫和稳压后,沼气进入发电机中燃烧发电,发电机中产生的烟气经余热锅炉加热热水,热水经换热器为消化池增温,温度可控制在 35~38℃,消化池日进泥量为 500 m³,在 15 天的消化时间内,沼气产率为 1.125 L/gVS。

1.2.5 地源热泵

地源热泵技术是可再生能源利用技术,地表浅层相当于一个巨大的集热器,收集了接近 50%的太阳能,其浅层热量经逆卡诺循环原理转移。石惠娴等^[20]为解决冬季沼气池因气候影响导致产气量低下这一问题,设计一套地源热泵式沼气池加温系统,该系统加热方式是将使用高密度聚乙烯为材料的埋地管作为地下换热器,埋地管内注入添加防冻剂的纯水作为埋管内循环液,循环水与土壤热量进行热交换之后,启动地源热泵机组,将地下水的热量转移到沼气池中,可将沼气池的发酵温度保持在 30~34℃范围内,在 60 天时,产气率达到 0.6 m³/m³ d。表 1 是以上传统厌氧发酵增温方式关键运行参数。

表1 传统厌氧发酵增温方式关键运行参数
Table 1 Key operating parameters of traditional anaerobic fermentation heating mode

序号	作者	发酵装置	发酵温度 (℃)	产气量 (率)	增温方式	主动式/ 被动式/ 增温	文献来源
1	胡慧珍	沼气池	18~25	0.15~0.25 m ³ /(m ³ ·d)	大棚增温	被动式	[11]
2		沼气池	18~25	提高 20%~30%	“四位一体”模式	被动式	[12]
3	杨世关	沼气池	>15	0.14 m ³ /m ³ ·d	“猪-沼-炕”模式	被动式	[13]
4	白莉	沼气池	35	15.2 m ³ ·d	电加热膜	主动式	[14]
5	Zeshan	斜置高温干式厌氧发酵装置	55	210~300 L/kgVS	电加热	主动式	[15]
6	邢慧娟	CSTR	35	1.3 m ³ /m ³ ·d	燃煤热水锅炉加热	主动式	[16]
7	田蔓	沼气池	60	3068.76 kg/d	沼气锅炉加热	主动式	[18]
8	李淑夏	消化池	35~38	1.125 L/gVS	沼气发电余热加热	主动式	[19]
9	石惠娴	沼气池	30~34	0.6 m ³ /m ³ ·d	地源热泵	主动式	[20]

传统被动式增温技术虽然能在一定程度提高厌氧反应器的发酵温度，但一般都低于中温发酵或高温发酵所需的温度，实际得到的产气率也不太理想。主动式增温技术虽然一定程度上可以提高厌氧发酵温度到中温或者高温范围，产气率也相应提高，但不可避免会造成电能、化石能源的消耗，将高品位的电能等转化为沼气能实际上是不经济的，甚至造成环境污染，寻求经济、清洁的可再生能源代替传统能源用于厌氧发酵增温成为新的研究方向。

2 太阳能辅热技术

太阳能是可再生能源，并取之不尽，用之不竭。我国是拥有太阳能资源十分丰富的国家，据数据显示我国一类地区太阳年辐射量可达到 6680~8400 MJ/m²[21-22],故在利用太阳能资源上我国有得天独厚的优势。太阳能辅热可使厌氧发酵产气过程中温度可控、系统热量损失小、发酵温度普遍高于常规厌氧发酵温度[23]，故太阳能辅热技术具有可行性而且相较传统厌氧发酵增温技术，太阳能辅热技术绿色环保，符合时代的发展。

2.1 被动式太阳能增温技术

被动式太阳能增温技术具有较低的成本及较为简单的构造，适用于中小型沼气池。早在 1985 年，NK Bansal 等[24]将处在印度新德里的两个体积分别为 8m³ 和 85m³ 的沼气池上分别构建太阳能温室，温室的主体结构为网格状，并使用厚度为 25μm 的 PVC 塑料薄膜覆盖，冬季室外温度低于 10℃，处于温室内的沼气池发酵温度可达到 37℃，并与传统沼气池作比较，太阳能温室覆盖下的沼气池发酵温度比传统沼气池发酵温度高 20℃，产气量提高 15%~20%。K.vinoth Kumar 等[25]在印度 Nilgiris 附近村庄研究将塑料作为材料取代原有太阳能温室的砖石材料后的对沼气池的影响，该研究区域的太阳能辐射量为 250~600 W/m²，环境温度为 17℃，实验沼气池的年均温度可达 22.4~26.3℃，产气量为 39.1 kg/d，比传统沼气池沼气年均产气量高 6.5%。

Abid M 等[26]在巴基斯坦构建一套利用太阳能增温厌氧发酵的装置，厌氧发酵罐被椎体支撑而放置于上部，在其下部放置与地面倾斜 45° 的玻璃板，玻璃板旁放有弧形太阳能反射镜，其工作原理

为太阳光透过玻璃板照射到弧形反射镜，被反射境反射至发酵罐底部的热量吸收装置，该装置将吸收的热量传递至发酵罐为其增温，室外某天辐射强度为 5~40 mW/cm²，均温为 16 ℃，发酵罐内部温度可达 20 ℃，将含有牛粪的污水在发酵罐停留发酵两周，沼气产量 3 m³/d。

被动式太阳能增温技术在国内也有相关研究。刘启香等^[27]设计的 CPC 整体式太阳能沼气池，在沼气池池壁上装有黑色涂层的太阳能吸收器，到达吸收器的太阳能被转换成热能，热量再传递给沼气发酵液，在年平均温度为 17 ℃，沼气池的温度可增温至 28 ℃，CPC 沼气池有效收益为 7473.3 W h/day,传统沼气池有效收益为 5746.4 W h/day。该设计结构简单且不需要其它辅助热源，但是混凝土热阻系数高，热传递性能差。王建等^[28]设计的软体沼气池是经过加工高强度的聚合材料制成，外表面放置阳光板，便于沼气池增温。表 2 为被动式太阳能增温方式关键运行参数。

表2 被动式太阳能增温方式关键运行参数
Table 2 Key operating parameters of passive solar heating mode

序号	作者	地域	发酵装置	发酵底物	环境温度(℃)	发酵温度(℃)	加热方式	备注	文献来源
1	NK Bansal	印度新德里	沼气池	污泥	<10	37	太阳能温室	产气量提高15%~20%	[24]
2	K.vinoth Kumar	印度 Nilgiris	沼气池	粪便和污水	17	22.4~26.3	太阳能温室	39.1 kg/d	[25]
3	Abid M	巴基斯坦	UASB	含有牛粪的污水	16	20	太阳能弧形反射镜	3 m ³ /d	[26]
4	刘启香	重庆	沼气池		17	28	太阳能吸收器	1 m ³ /(m ³ ·d)	[27]

2.2 主动式太阳能增温技术

被动式太阳能增温技术运用于厌氧发酵中所对应的装置构造较为简单，该装置获取的太阳能在一定程度上可满足小型沼气池对热量的需求。但针对某些特别寒冷，海拔高等环境恶劣地区或者是大中型沼气池，被动式太阳能增温技术不能满足发酵要求，于是研究学者探索更加有效的获取太阳能的方式。

2.2.1 太阳池增温系统

太阳池由 Kalecsinsky 提出^[29]，是能吸收太阳辐射并具有一定盐浓度梯度的人工池塘，存在盐浓度梯度是为了防止水的对流，太阳池内存在着三个区：上对流区、非对流区、下对流区^[30]。早在 1984 年 Song 等^[31]在北京利用太阳池对消化池增温，其建造了面积为 11m²，深度为 1.2 m 的太阳池，消化池体积为 0.8 m³，消化池在太阳池的加热下，发酵温度从 23 ℃提升至 27 28 ℃，产气量提高到 240%。吴志跃等^[32]在山西构建了一套太阳池辅热厌氧发酵装置，其中太阳池的上对流区为厚度 3~5 cm 淡水，非对流区为厚度 5 cm、浓度 10%的盐水，下对流区为厚度 20 cm、浓度 25%的盐水，发酵装置类型为 CSTR,与未在太阳池辅热下的厌氧装置作对比，太阳池辅热下的厌氧装置发酵温度稳定在 50.12~53.04 ℃，日均产气量 615.8 mL,对照组发酵温度在 19~35 ℃范围波动，日均产气量不足有太阳池增温系统产气量的四分之一。后随着太阳能集热器增温系统的推广，太阳池增温系统逐渐被淘汰。

2.2.2 太阳能集热器增温系统

太阳光照射到地球表面是分散的，太阳能集热器增温系统通过太阳能集热器把分散的太阳光集中在一起，并接受太阳的辐射将热量传递至传热介质（一般是水），热水通过循环泵作用将热量传送至发酵装置中的发酵液，为其增温，太阳能集热器根据其形状、性能等因素可分平板太阳能集热器、真

空管太阳能集热器等^[23,33]。

1)平板太阳能集热器(FPSC)增温系统。FPSC集热原理为太阳辐射透过FPSC盖玻璃板将热量传递给水。Aguilar Alvarez等^[34]建立以太阳能集热器、厌氧发酵装置、人工湿地为一体的有机废弃物处理与利用的系统,太阳能加热系统主要由FPSC、循环泵、热交换器组成,发酵装置为CSTR类型,有效体积为20 m³,将鸡粪和食物垃圾作为发酵底物,在太阳能辅热下发酵温度可达45℃,日产气量为15.10 m³,该系统处理836公斤底物可产生263 MJ能源以及28公斤氮磷肥料。Yuan等^[35]在美国密歇根州设计了一套太阳能增温系统,该系统由太阳能集热器、换热器、厌氧发酵装置组成,该系统将牛粪作为底物,发酵温度从20℃提升至35℃,产气量从0.01 m³提升至0.39 m³。

Axaopoulos等^[36]设计了一套太阳能—沼气池一体化装置,沼气池为地埋式沼气池,其容积为45m³。沼气池上方装有倾斜角为22°的四块FPSC,FPSC与热交换器相连接,可将水的热量传递至CSTR装置,在连续十天运行下,外部环境处于19℃~32℃,沼气池内部平均温度能达到33.2℃,日均甲烷产量达0.64CH₄/m³。

国内对平板太阳能集热器增温系统也有相应的研究。赵铭涛等^[37]在东北地区构建太阳能沼气池系统,该系统中主要含有太阳能集热器、循环水泵、储热水箱、沼气池等,该系统运行的原理为当外界的温度低于15℃时,将循环水泵的阀门打开,水泵将水箱中的热水运送到沼气池的换热盘中,为发酵原料增温。当环境温度处于5~22℃,沼气池经太阳能集热器增温后最高温度可达30℃,可见其增温效果明显。

2)真空管太阳能集热器(GVTSC)增温系统。真空管太阳能集热器在生活中运用较为广泛,其工作原理为太阳光穿过玻璃真空管后被金属吸收板所吸收,金属吸收板将热量传递至热管真空管,热管真空管再将热量传递至传热介质^[33]。Rong Dai等^[38]在我国华北地区采用带电加热的真空管太阳能集热器增温系统给沼气池增温,该系统中主要含有太阳能集热器、循环水泵、热交换器、水箱等。其中真空管集热器由18根真空管组成,真空管间距为21mm,管直径为58 mm,长度为1.9 m。外界环境温度为12℃,该系统可将发酵温度提升至19~21℃,池容产气率为0.2~0.25 m³/m³ d。胡琥等^[39]针对云南高寒地带设计一套太阳能沼气系统,该系统含有真空管太阳能热水器、循环水泵、换热盘、沼气池等。其通过计算得出当真空管数量分别为18、20、24、30、36,沼气池的温度分别为15.2、16.2、18.9、21.5、26.3℃,该工程采用24管的太阳能集水器,沼气池体积为6m³,发酵温度预计达18.9℃。

2.2.3 太阳能与其他技术组合系统

对于某些大中型沼气池常受到极端天气的影响,靠太阳能单独作为增温系统为沼气池增温无法满足要求,太阳能与其他方式的组合增温技术有效解决这一问题。

1)太阳能集热器+太阳能温室增温系统。太阳能集热器+太阳能温室增温系统在纬度较高地区能有效提高沼气池的温度。Hassanein等^[40]在陕西淳化县平均太阳能辐射为4.5kwh/m²的地区设计了一套冬季沼气池增温系统,该系统主要包含了120 m²的太阳能温室和8台真空管太阳能集热器,并配和使用电加热系统。太阳能集热器由25根真空管组成,倾斜角为36.5℃,太阳能集热器与体积为1.5 m³的水箱相连接。人畜粪便作为发酵底物,沼气池的体积为100 m³,在组合增温系统作用下,在环境温度最低为-15℃时,发酵温度可达11.5-17℃,产气量为12 m³/d。

2)太阳能+热泵增温系统。太阳能增温系统常受到季节、昼夜、天气等因素影响无法实现稳定供热,地源热泵虽可满足一定时间的稳定供热,但运行时间久会造成机组周围土壤温度下降而影响机组性能,因此将两种系统结合以弥补各自的不足^[41]。方琦^[42]等在杭州构建了一套厌氧发酵增温系统,发酵装置为一体化厌氧罐,发酵底物为秸秆经太阳能发酵房发酵后得到的有机质和猪粪。增温系统以地源热泵系统为主,其地下换热井为双U型埋设,太阳能集热系统主要有太阳能集热器、水泵、热水箱。该耦合系统将发酵温度提升至25℃,则总需热量为1984 MJ d⁻¹,相较于传统的VRV空调系统可节电13154.4 kW h。

传统地源热泵加温系统需要在地表打井,地埋管容易受到水文地质的影响。基于以上情况,裴晓

梅等^[43]在上海高校构建了一套太阳能-沼液余热式热泵增温厌氧发酵的系统,系统中主要含有太阳能集热器、热泵、热水箱以及发酵池,发酵池的有效体积为 15 m^3 ,除太阳能集热器放置在楼顶,其它装置布置在地面,该系统工作原理为太阳能热水器被加热的水流进蓄水箱中,热水经泵作用进入发酵池,从发酵池中溢流的发酵液进入余热回收池,该池中的热量给热泵蒸发器环路的工质,继而再被传递至发酵池。该系统能够保证发酵池的温度处于 $48\text{--}52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3) 太阳能+生物质锅炉增温系统 太阳能联合生物质锅炉增温系统相较于生物质锅炉单独增温系统可提高系统效率,增温效果明显。李季成等^[44]针对北方冬季关于大型沼气池增温问题,构建太阳能联合生物质炉增温系统,该系统中主要含有太阳能集热器、太阳能集水相、生物质锅炉等。在白天启动太阳能增温系统,晚上则启动生物质锅炉增温系统,环境温度不断在变化,酸化罐的温度能够稳定在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,在实验期间,每天沼气产量可稳定在 150 m^3 ,该系统可有效满足厌氧发酵装置对热量的需求,也可减少能源的消耗。

4) 太阳能+沼气锅炉增温系统。王思莹等^[45]针对在北方寒冷地区沼气池产气极率低这一情况,构建太阳能联合沼气锅炉增温系统。该系统中主要含有太阳能集水器、循环水泵、水箱、沼气池、沼气锅炉等组成,为使太阳能系统在冬季能正常运行,其中热媒采用防冻液乙二醇,在白天太阳辐射较强时,太阳能系统单独给沼气池增温,当太阳辐射较弱时,启动沼气锅炉加热系统。该系统底物农作物废弃垃圾,沼气池体积为 8 m^3 ,冬季哈尔滨的环境温度最低接近 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$,沼气池在组合系统增温下,最高发酵温度可达到 $22.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,而普通沼气池温度在 $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。尹海文^[46]也做过相似的研究,将太阳能系统与沼气锅炉系统联系为沼气池增温。在组合系统中设定最小辐射强度,当实际太阳辐射强度大于最小辐射强度,启动太阳能系统为沼气池增温,当太阳能系统不能满足沼气池对热量的需求,则需要太阳能+沼气锅炉组合系统为沼气池增温,当实际太阳辐射强度小于最小辐射强度,则只运行沼气锅炉增温系统。沼气池以鸡粪为底物,冬季发酵温度可达到 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$,夏季发酵温度达到 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$,该系统日产气量为 $173\text{ m}^3/\text{d}$ 。

5) 太阳能+空气源热泵+发电余热增温系统。为解决北京地区大中型沼气池加热问题,李金平等^[47]构建了太阳能+空气源热泵+发电余热增温系统,当发酵温度 $\geq 36\text{ }^{\circ}\text{C}$,增温系统不工作,当发酵温度低于 $36\text{ }^{\circ}\text{C}$,增温系统开始运行,由太阳能热水系统、空气源热泵系统、发电余热系统联合加热使得蓄水箱温度达到 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$,开始启动循环泵为发酵罐增温,该系统可将发酵温度维持在 $36\text{--}38\text{ }^{\circ}\text{C}$,该系统为发酵罐平均每月补充热量为 7464.1 MJ 。图 3 是以上主动式太阳能增温运行的关键参数。

表3 主动式太阳能增温方式关键运行参数
Table 3 Key operating parameters of active solar heating mode

序号	作者	实验地区	增温方式	发酵装置	发酵温度 (℃)	发酵装置容积(m³)	备注	文献来源
1	Song kehui	北京	太阳能池增温	消化池	27~28	0.8	产气量提高到240%	[31]
2	吴志跃	山西	太阳能池增温	CSTR	50.12~53.04	0.0628	615.8mL/d	[32]
3	Aguilr Alvarz	印度	太阳能集热器系统增温	CSTR	45	20	15.10m³/d	[34]
4	Yuan Zhong	美国	太阳能集热器系统增温	CSTR	35	0.5	0.39m³/d	[35]
5	Axaopoulos	希腊	太阳能集热器系统增温	沼气池	33.2	45	64m³/d	[36]
6	DAI R	华北	太阳能集热器系统增温	沼气池	19~21	6	0.2~0.25m³/(m³·d)	[38]
7	胡琰	云南	太阳能集热器系统增温	沼气池	18.9	6		[39]
8	Hassan ein	陕西淳化县	太阳能集热器+太阳能温室增温系统增温	沼气池	11.5~17	100	12 m³/d	[40]
9	方琦	杭州	太阳能+热泵增温系统	一体化厌氧罐	25	300	可节电13154.4 kW·h	[42]
10	裴晓梅	上海	太阳能+热泵增温系统	发酵池	48~52	15		[43]
11	李季成	哈尔滨	太阳能+生物质锅炉增温系统	两相厌氧消化装置	34.5~35.5		150 m³/d	[44]
12	王思莹	哈尔滨	太阳能+沼气锅炉增温系统	沼气池	22.4	8		[45]
13	李金平	北京	太阳能+空气源热泵+发电余热增温系统	发酵罐	36~38	350	平均每月补充热量为7464.1 MJ	[47]

2.3 太阳能蓄热技术

太阳能虽然清洁无害，取用方便，但是受季节、地区、天气的影响，其辐射强度在不停地发生变化，因此具有间断性和不稳定性^[48]。Garba 等^[49]研究发现当发酵温度变化超过 5℃会严重影响甲烷菌群的产气性能。故有研究者提出在太阳能增温系统中增加蓄热装置，以保证热量能够稳定地向发酵装置传递，保证厌氧发酵温度尽可能在小范围波动。

太阳能蓄热系统可根据时间分长期蓄热与短期蓄热, 根据温度可划分高温蓄热和低温蓄热, 温度低于 60 °C 为低温蓄热, 相反则为高温蓄热^[50-52]。水箱蓄热是最为常见的一种蓄热方式, 使用起来较为灵活, 具有良好的蓄热和放热性能, 太阳能集热器常与水箱连用。李晓磊等^[53]设计太阳能热泵供暖系统, 采用水箱蓄热, 水箱中的冷水通过换热器获得来自太阳能的热量, 但水箱蓄热也存在着问题, 如太阳辐射不同会导致集热水温变化大, 而且蓄热时间过长会导致热量损失, 难以将厌氧发酵温度维持在中温范围。底冰^[54]等设计了地埋管储热系统, 该系统主要由电加热器、热泵机组、地下换热器、地下蓄热体等组成, 蓄热体从起始温度 16.59 °C 提升至 30.74 °C, 总共蓄入的热量为 6.88 MWh。

本课题组汪楚乔等^[55-56]针对如何提供稳定热源这一问题,在马鞍山市和县地区构建了太阳能-相变蓄热辅热的两相厌氧发酵系统,该系统包含两相厌氧消化系统、太阳能集热系统、供热系统。两相厌氧消化系统主要包括有效体积为 0.85 m³的产气罐和有效体积为 0.8 m³酸化罐,太阳能集热系统主要由真空管集热器、水箱、相变保温装置等组成,供热系统含有有效容积为 1m³的相变蓄热水箱和有效容积为 0.5 m³的中温水箱。当太阳辐射较强天气时,太阳能集热系统可满足厌氧发酵装置对热量的需求,多余的热量可以储存在相变保温层中,同时保证蓄热热水的温度在小范围波动。当太阳辐射强度较弱时,则需光伏系统和蓄热装置中储存热量为厌氧发酵增温。以油菜秸秆、餐厨垃圾、禽畜粪便作为发酵底物,该系统可使厌氧发酵装置保持中温发酵,沼气产量达到 20.48 m³,为采用常规太阳能供热厌氧发酵系统产气量的 1.01 倍,为仅保温无辅热厌氧发酵系统的 5.65 倍。该系统既能充分利用太阳能资源,还能保证发酵系统的稳定性。太阳能-相变蓄热辅热的两相厌氧发酵系统流程图见图 1。

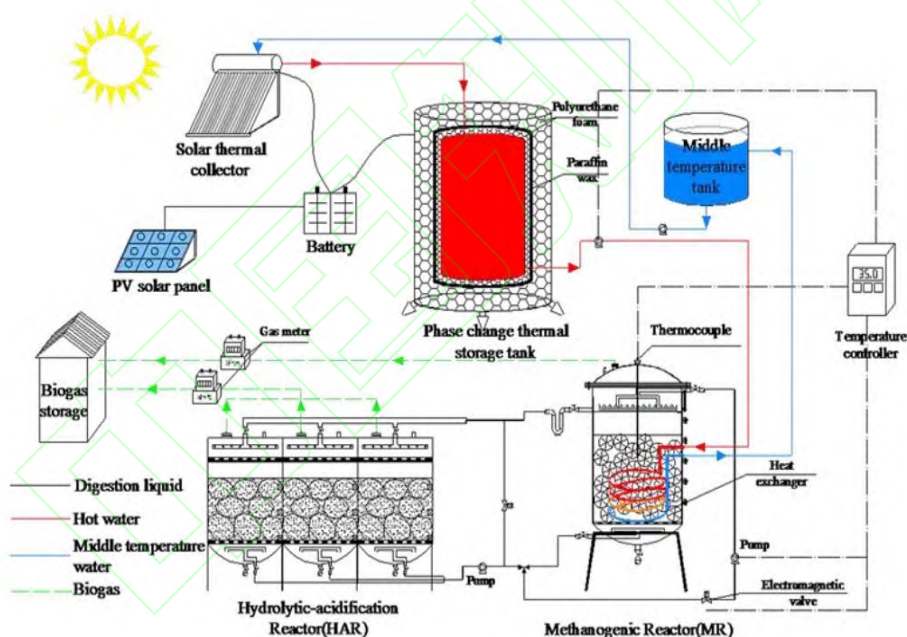
图 1 太阳能-相变蓄热辅热的两相厌氧发酵系统流程图^[53]

Fig.1 Flow chart of two-phase anaerobic fermentation system with solar energy and phase change heat storage and auxiliary heat.

相变蓄热方式可将蓄热量提高数倍以上^[57]，许多研究学者将目光投向相变材料，杨亚星等^[58]在相变蓄热箱中加入泡沫铜，可增加蓄热或放热速率，Purohit. K 等^[59]研制了一种新型的共晶 PCM，优化后的共晶可适用于热量储能大的储能系统，提高热量的利用率。Mishra A K 等^[60]在有机相变材料中加入黑纳米粉末、多壁碳纳米管等可以降低热阻，有助于高效的渗流传热。

3 结语与展望

本文综述了厌氧发酵增温技术的发展历程、技术特点、增温效果等。从传统增温技术中的大棚保温：“四位一体”增温技术到电加热、沼气锅炉、沼气发电余热、热源地泵等增温技术再到太阳能辅

热技术中的太阳能温室、太阳池、太阳能集热器系统、太阳能与其他技术组合系统,再到太阳能蓄热系统,太阳能代表着未来能源发展的方向之一。以下几个方面的分析将对太阳能辅热的厌氧发酵体系发展起到一定建议作用:

1) 传统被动式增温系统的增温效果优于未作处理的厌氧发酵装置,其发酵温度高于环境温度,但其提升幅度不大,难以达到中温发酵的范围,且其构造容易受到地域的限制,传统主动式增温系统可使厌氧发酵装置处于中温发酵甚至是高温发酵,但其需要以消耗大量的能源(电能、煤、沼气等)作为代价,产生大量 CO_2 和有毒气体,经济性与绿色性偏低,故使用清洁能源代替传统能源为厌氧发酵增温是未来发展的方向。

2) 太阳能辅热技术具有低成本、绿色环保、热源稳定等特点,针对一些中小沼气池,太阳能温室、太阳池增温系统、太阳能热水器增温系统等可将厌氧发酵温度提高到中温范围,但对于大型沼气池,单靠太阳能增温系统无法满足大型厌氧发酵工程对热量的需求。

3) 太阳能与其他系统的组合辅热系统一定程度解决了太阳辐射受到季节、天气、昼夜等因素影响,太阳能与其他技术组合系统大都能稳定地提供热源,但装置结构复杂,有些技术如不可避免造成其它能源或沼气的损耗,成本较高,对其他技术与太阳能系统进行匹配以适应厌氧发酵系统,提高整体系统的稳定性是还需进一步研究的课题。

4) 蓄热装置可以削弱太阳能波动性和不稳定性带来的影响,传统水箱蓄热时间过长会导致大量热量散失,难以维持厌氧发酵处于中温范围。近些年提出的相变蓄热对收集的太阳能进行蓄热,成本低廉且能保持厌氧发酵温度在小范围波动,但还处于实验室研究或中试阶段,改进相变蓄热水箱性能的蓄热材料和蓄热系统构造是未来的研究方向。

参考文献

- [1]. 王志鹏, 陈蕾. 微生物电解池强化厌氧发酵的研究进展[J]. 应用化工, 2018, 47(11): 2490-2493.
- [2]. 丁绍兰, 蒋术林, 董凌霄, 等. 预处理对麦秆厌氧发酵产气特性的影响[J]. 陕西科技大学学报, 2019, 37(4): 17-22.
- [3]. 熊昌国, 谢祖琪, 刘建辉, 等. 沼气工程高效升温保温影响因素的试验研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2012, 34(11): 117-124.
- [4]. 黄俊翰, 王红娟, 黄涛, 等. 温度、含盐量以及含油量对餐厨垃圾和污泥联合厌氧发酵的影响[J]. 化工管理, 2018, 483(12): 21-23.
- [5]. 李磊磊, 郭勇, 秦娜娜, 等. 沼气伴热研究进展[J]. 环境工程, 2011, 29(4): 125-129.
- [6]. 魏兆凯, 刘凯, 王晓洲. 沼气池太阳能增温技术研究[J]. 农机化研究, 2009, 31(5): 212-216.
- [7]. 陈文域. 寒冷地区户用沼气池太阳能增温系统[J]. 中国战略新兴产业, 2018, 160(28): 45-46.
- [8]. 王亚静, 张弛, 高春雨, 等. 我国北方地区沼气工程冬季增温保温技术研究进展与展望[J]. 中国沼气, 2017, 35(3): 93-99.
- [9]. 陈爱东, 唐静, 焦忠武. 促进西藏太阳能资源开发利用的财政支持——基于西藏经济发展方式转变的视角[J]. 生态经济, 2013, 269(7): 125-127.
- [10]. 施无名. 厌氧发酵装置增温系统的优化设计与实验研究[D]. 安徽: 安徽农业大学, 2014.
- [11]. 胡惠珍, 刘国强, 叶勇标. 兰溪市冬春季沼气池大棚保温增温增气技术[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(12): 2101-2102.
- [12]. 焦瑞莲. 四位一体温室效益好[J]. 北京农业, 2009, 3(25): 42-43.
- [13]. 杨世关, 张全国, 李刚, 等. 生态果园模式中“猪-沼-炕”单元研究与设计[J]. 中国沼气, 2004, 43(3): 31-34.
- [14]. 白莉, 石岩, 齐子姝. 我国北方农村沼气冬季使用技术研究[J]. 中国沼气, 2008, 25(1): 31-34.
- [15]. Zeshan, Karthikeyan O P, Visvanathan C. Effect of C/N ratio and ammonia-N accumulation in a pilot-scale thermophilic dry anaerobic digester[J]. Bioresource Technology, 2012, 11(3): 294-302.
- [16]. 邢慧娟, 秦朝葵, 张杨竣, 等. 大中型沼气工程热工行为分析[J]. 热科学与技术, 2013, 12(3): 272-276.
- [17]. 耿夏琰. 沼气锅炉低氮燃烧器性能优化及工程应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [18]. 田蔓, 祝爱萍. 宁夏冬季沼气池产气量提高策略[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(3): 355-356.
- [19]. 李淑夏. 基于污泥厌氧发酵多能互补热电联产系统研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2016.
- [20]. 石惠娟, 王韬, 朱洪光, 等. 地源热泵式沼气池加温系统[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 268-273.
- [21]. 杨军, 顾骏强, 施能. 我国总太阳辐射特征、趋势变化和分区[C]. 中国气象中心. 2006 年年会“气候变化及其机理和模拟”分会场论文集. 成都: 中国气象学会, 2006: 1253-1262.
- [22]. 吴其重, 王自发, 崔应杰. 我国近 20 年太阳辐射时空分布状况模式评估[J]. 应用气象学报, 2010, 21(3): 343-351.
- [23]. 黄娟娟. 太阳能增温沼气生产系统的研究现状和发展前景[C]. 中国沼气. 2015 年中国沼气学会学术年会暨中德沼气合作论坛论文集. 广州: 中国沼气学会, 2015: 777-793.
- [24]. Bansal N K, Bhand S C, Ram S, et al. A study of a greenhouse concept on conventional biogas systems for enhancing biogas yield in winter months[J]. International Journal of Energy Research, 1985, 9(2): 119-128.
- [25]. Kumar K V, Bai R K. Solar greenhouse assisted biogas plant in hilly region - A field study[J]. Solar Energy, 2008, 82(10): 911-917.
- [26]. Karimov K S, Abid M. Biogas digester with simple solar heater[J]. Iium Engineering Journal, 2012, 13(2): 109-119.
- [27]. 刘启香, 蒋泰荣, 陈清华. CPC 型整体式太阳能沼气池现场实测增温效果分析[J]. 太阳能学报, 1991, 34(2): 196-

201.

- [28]. 王建, 吴付安, 魏西密. 新型太阳能沼气设备实现畜禽粪污资源化利用[J]. 养殖与饲料, 2018, 23(12): 39-41.
- [29]. Srinivasan J. Solar pond technology[J]. Sadhana, 1993, 18(1):39-55.
- [30]. Velmurugan V, Srithar K. Prospects and scopes of solar pond: A detailed review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(8):2253-2263.
- [31]. Song K H, Shensheng L. Solar pond for heating anaerobic digesters[J]. Advances in Solar Energy Technology, 1988,12(1):1567-1570.
- [32]. 吴志跃, 张敏, 程芳琴, 等. 太阳池辅热下污泥厌氧消化产沼气研究[J]. 山西农业科学, 2016, 44(5): 629-634.
- [33]. 赵丹, 康智勇, 黄凯良, 等. 太阳能集热器研究现状[C]. 工程科技, 第十六届沈阳科学学术年会论文集. 沈阳: 沈阳市科学技术协会, 2019: 737-740.
- [34]. Aguilar Alvarez R E, Roman M B, Kirk D, et al. Technical and economic feasibility of a solar-bio-powered waste utilization and treatment system in Central America[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 18(4):371-379.
- [35]. Zhong Y, Roman M B, Zhong Y, et al. Using anaerobic digestion of organic wastes to biochemically store solar thermal energy[J]. Energy, 2015, 8(3):638-646.
- [36]. Axaopoulos P, Panagakis P, Tsavdaris A, et al. Simulation and experimental performance of a solar-heated anaerobic digester [J], 2001, 70(2): 155-164.
- [37]. 赵铭涛, 刘庆玉, 张文基, 等. 沈阳地区太阳能加热制沼气的试验研究[J]. 可再生能源, 2013, 31(4): 78-80.
- [38]. Dai R, Chun C, Xu Z B, et al. application of solar heating system in biogas production[C]. Chinese Academy of Sciences. Proceedings of ISES Solar World Congress 2007: Solar Energy and Human Settlement. Beijing, 2009:2388-2392.
- [39]. 胡璇, 李显秋, 刘艳慧, 等. 云南高寒冷凉气候地区适用太阳能沼气系统研制及工程实施研究[J]. 云南农业大学学报(社会科学版), 2013, 7(S1): 130-133.
- [40]. Hassanein A A M, Zhang D, Qiu L. Solar water heating model with sun tracking system for increasing biogas production[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(6):256-261.
- [41]. 邹晓锐, 周晋, 邓星勇, 等. 太阳能-地源热泵耦合式热水系统优化匹配研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(5): 1281-1290.
- [42]. 方琦, 虞益江, 徐钢. 太阳能-地能热泵耦合系统在沼气工程厌氧发酵增温中的设计与应用[J]. 浙江农业科学, 2016, 57(11): 1824-1827.
- [43]. 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, 40(2): 292-296.
- [44]. 李季成, 李文哲. 太阳能与生物质锅炉联合加热增温系统的试验研究[J]. 农机化研究, 2014(10): 232-235.
- [45]. 王思莹, 谭羽非. 寒区太阳能和沼气锅炉联合增温系统及试验研究[J]. 节能技术, 2011, 29(4): 364-366.
- [46]. 尹海文. 太阳能联合沼气锅炉加热沼气池模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [47]. 李金平, 刘润, 崔维栋, 等. 北京地区太阳能、空气源热泵、发电余热联合沼气工程增温系统研究[J]. 中国沼气, 2019, 37(2): 62-68.
- [48]. 崔海亭, 袁修干, 侯欣宾. 蓄热技术的研究进展与应用[J]. 化工进展, 2002, 13(1): 23-25.
- [49]. Garba B. Effect of temperature and retention period on biogas production from lignocellulosic material[J]. Renewable Energy, 1996, 9(1-4): 938-941.
- [50]. 李永, 句德胜, 万光宇, 等. 应用于学校建筑的跨季节蓄热太阳能-土壤复合热泵系统运行特性试验研究[J]. 制冷与空调, 2018, 18(9): 54-59.
- [51]. 王艳. 基于埋管管的太阳能季节性蓄热的地下传热数值分析[D]. 济南: 山东建筑大学, 2011.
- [52]. 安玉华, 张喜明, 张春山. 太阳能热泵系统中的蓄热技术[J]. 工业安全与环保, 2011, 37(11): 37-39.
- [53]. 李晓磊. 蓄热水箱联合太阳能热泵供暖系统的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [54]. 底冰, 马重芳, 张广宇. 埋管式土壤储热系统的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(5): 813-816.
- [55]. 汪楚乔. 农村废弃生物质太阳能辅热中温两相厌氧产沼技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [56]. Wang C, Lu Y, Hong F, et al. Two-Phase Anaerobic Digester Combined with Solar Thermal and Phase Change Thermal Storage System in Winter[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(4):4003-4012.
- [57]. 鲍恩财. 装配式日光温室主动蓄热循环系统传热特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [58]. 杨亚星. 泡沫金属对相变蓄热箱强化换热特性研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2018.
- [59]. Purohit K, Murty V V S, Dixit R C, et al. Development of an acetanilide/benzoic acid eutectic phase change material based thermal energy storage unit for a passive water heating system[J]. Bulletin of Materials Science, 2019, 42(3): 119-127.
- [60]. Mishra A K, Lahiri B B, Solomon V, et al. Nano-inclusion aided thermal conductivity enhancement in palmitic acid/di-methyl formamide phase change material for latent heat thermal energy storage[J]. Thermochimica Acta, 2019, 678(12):234-237.