

# 乳制品企业废水生化处理技术-沼气回收利用系统



宿玉钱<sup>1</sup>, 李文涛<sup>1,\*</sup>, 黄华<sup>2</sup>, 曹鹏飞<sup>2</sup>, 郭峰<sup>2</sup>, 张素霞<sup>2</sup>, 南波<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 内蒙古蒙牛乳业 (集团) 股份有限公司, 内蒙古和林格尔 011500

<sup>2</sup> 蒙牛乳业 (马鞍山) 有限公司, 安徽马鞍山 243000

**摘要:** 乳制品行业废水中 98% 属于含乳清洗废水, 废水中主要成分为蛋白质、脂肪、干物质等, 生化性能较好, 乳制品污水处理工艺为水解酸化+厌氧+好养工艺, 一般乳品生产企业废水进水 COD 平均 2000-2500mg/l, 污水处理工艺中厌氧环节可产生大量沼气。早期乳品污水处理设计多数通过火炬直接燃烧排放, 不仅浪费资源, 而且存在生态环境和安全生产风险。本文认为可设计一套沼气回收处理系统和沼气锅炉系统, 实现资源回收利用, 不仅可节约能源, 而且减低企业碳排放总量。本文对蒙牛乳业 (马鞍山) 有限公司污水指标进行分析后, 决定先使用沼气回收系统对厌氧环节产生的气体进行收集, 再采用沼气脱硫装置对气体中的硫进行脱出, 最后进入沼气锅炉燃烧, 并输出蒸汽进行利用。上述处理工艺能够有效利用沼气, 实现节能降耗。

**关键词:** 乳制品废水; 生化处理; 沼气回收利用

**DOI:** [10.57237/j.res.2024.02.001](https://doi.org/10.57237/j.res.2024.02.001)

## Dairy Enterprise Wastewater Biochemical Treatment Technology - Biogas Recycling System

Su Yuqian<sup>1</sup>, Li Wentao<sup>1,\*</sup>, Huang Hua<sup>2</sup>, Cao Pengfei<sup>2</sup>, Guo Feng<sup>2</sup>, Zhang Suxia<sup>2</sup>, Nan Bo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Inner Mongolia Mengniu Dairy (Group) Co., Ltd., Helingheer 011500, China

<sup>2</sup> Mengniu Dairy (Maanshan) Co., Ltd., Maanshan 243000, China

**Abstract:** 98% of the wastewater in the dairy industry belongs to the whey washing wastewater, the main components of the wastewater are protein, fat, dry matter, etc., and the biochemical performance is particularly good. The wastewater treatment process of dairy products is hydrolytic acidification + anaerobic + good nutrition process. In general dairy production enterprises, the average COD of wastewater inlet is 2000-2500mg/l, and the anaerobic part of the wastewater treatment process can produce a large amount of biogas. In the early design of wastewater treatment of dairy products, most of them were discharged by direct combustion of the torch, which not only wastes resources, but also has ecological environment and safety production risks. This paper considers that a set of biogas recovery and treatment system and biogas boiler system can be designed to realize resource recovery and utilization, which can not only save energy, but also reduce the total carbon emission of enterprises. After analyzing the sewage index of Mengniu Dairy (Maanshan) Co., LTD., this paper decided to first collect the gas generated in the anaerobic stage by using biogas recovery system, then use biogas desulfurization device to remove the sulfur in the gas, and finally enter the biogas boiler for combustion and output steam for utilization. The above treatment

\*通信作者: 李文涛, [mnliwentao@163.com](mailto:mnliwentao@163.com)

process can effectively utilize biogas and achieve energy saving and consumption reduction.

**Keywords:** Dairy Wastewater; Biochemical Treatment; Biogas Recycling

## 1 引言

沼气回收利用系统通过收集厌氧环节产生的沼气,新增沼气回收系统、沼气脱硫装置、沼气锅炉系统、通过管道联通,实现沼气回收利用,沼气锅炉燃烧产生蒸汽,反补企业热力系统,不仅实现减排目的,同时节能降耗,响应国家双碳政策。

## 2 乳制品废水特点及危害

乳制品种类繁多,生产工艺不尽相同,其废水也来自于不同方面,一般情况下,乳制品废水水量的一半以上来自于生产过程中可循环使用的冷凝和冷却用水,其他则来自于加工容器、管道、地面清洗水以及员工生活污水,其中清洗废水污染程度较重[1]。乳制品废水为典型的工业废水,通常呈乳黄色,COD 高达 0.8~25g/L, BOD<sub>5</sub> 高达 0.6~1.5g/L [2],虽然二者维持在一个较高的水平,但 BOD<sub>5</sub>/COD 通常大于 0.5,可生化性较好;另外,由于每天上班下班时工人需对设备、加工地面等进行清洗,导致废水水质水量在一天之内波动较大,废水中通常含有蛋白质、乳糖、乳脂肪、洗涤剂成分,乳制品废水作为高浓度有机废水,如果处置不合理,排入水体后导致水体中的溶解氧的大量消耗,严重影响水生动植物的生长,废水中有机氮在缺氧条件下分解产生氨氮,可使水体发臭,严重情况下导致水生生物死亡。

## 3 乳制品废水处理技术研究进展

乳制品废水虽然有机物含量高,但污染程度较轻,处理难度偏低,国内外对于乳制品废水处理技术主要有物化处理技术、生物处理技术以及二者的结合工艺[3]。

### 3.1 物化处理技术

物化法由物理法和化学法组合而成,此种方法主要用来处理废水中以胶体或悬浮物状态存在的污染物质,物化法处理机理复杂,占地面积较小,所需费用较高,目前中国应用较多的为气浮及混凝沉淀。

(1) 气浮处理技术。气浮最早应用于选矿业,自 20 世纪以来气浮技术发展迅速,气浮利用溶解在水中的微气泡在上升过程中粘附污水中的悬浮物质,到达水面形成浮渣从而实现固液分离,气浮在乳制品处理过程中主要去除污水中的乳脂肪和乳蛋白等高分子有机物。周斌彬、帅卿利用气浮-水解酸化-生物接触氧化工艺率为 54%,BOD 去除率为 48%,SS 去除率为 59% [4];龚为进、段学军采用气浮-ABR-生物接触氧化处理某乳制品废水,COD、BOD 去除率分别达到 95%和 98% [5]。

(2) 混凝沉淀。混凝沉淀利用污水中投加的电解质,使污水中的悬浮颗粒脱稳,进一步去除浮渣。混凝效果通常受到多方面的影响,例如混凝剂种类、性质、投加量以及 pH 值等,该处理技术的核心是混凝剂的选择使用,无机絮凝剂硫酸铝以及高分子有机聚丙烯酰胺(PAM)由于投加量少,混凝效果显著,费用低而应用广泛,有实验研究表明,二者结合使用较单独使用时的投加量大大降低,并且 COD、BOD 去除率均在 60%以上[6]。另有学者研究表明,PAM 硫酸铝絮凝法最佳操作条件为 PAM 用量 0.01g/L,硫酸铝用量 0.3g/L, pH 值处于 6~8 之间,污水中污染物质去除效果显著[7]。

### 3.2 生化处理技术

由于乳制品废水可生化性好,污水中的有机物可以以为微生物的生长代谢所用,满足生物处理的条件,并且在工业废水处理领域,生物处理技术应用广泛、技术成熟,该法处理程度高,处理系统具有较强的抗冲击符合能力。

(1) 好氧处理技术。好氧处理技术在生物处理技术领域应用最为广泛,运行管理经验丰富,处理方法主要包括 SBR 法、曝气生物滤池、生物转盘、生物接触氧化等[8]。SBR 利用间歇运行方式,通过控制不同的反应条件来去除污水中的污染物质,对污染物尤其是氮磷去除率高,更加适用于中小水量污水处理工程。国外应用实践表明,在溶解氧质量浓度在 2~3mg/L 之间时,COD 去除率高达 90% [9];在脱氮除磷方面,韩冬妮[10]采用

二级 SBR 处理工艺，达到氨氮的完全氧化，一级反应水利停留时间  $HRT=4d$ ，二级反应停留时间为一级反应的  $1/3$ ，可见二级处理工艺在脱氮除磷方面效果显著，因此需要针对不同废水的水质水量情况确定最佳的运行参数。曝气生物滤池作为一种膜处理工艺开始于 20 世纪 70 年代，该工艺广泛应用于生活污水和工业废水的处理，最大优势在于生物滤除不仅可以对污水进行生物处理而且可以对活性污泥进行截留，其后节省二沉池，减少污水处理设施的占地面积并且简化处理工艺[11]。曝气生物滤池对进水要求严格，通常需要一定程度的预处理，目前该技术在国外应用广泛，在国内处于研究推广阶段。生物接触氧化通过在池内铺设填料，通过对污水进行曝气充氧，污水与填料上的生物膜充分接触，污水中的有机物得以去除。中国在 20 世纪 70 年代开始对生物接触氧化工艺的研究，最早应用于处理生活污水。其所需动力消耗大大低于活性污泥法，汽水比通常只为活性污泥的  $1/4$ ，用电量为活性污泥的  $1/5$ ，目前该法广泛应用于处理制药废水、燃料废水等工业废水，在乳制品处理领域，谭红艳利用气浮-水解酸化-缺氧-生物基础氧化工艺处理乳品废水，出水水质较好，满足《污水综合排放标准》（GB8978-1996）二级标准[12]。

(2) 厌氧处理技术。在乳制品废水处理过程中，厌氧工艺以无需曝气、产生的剩余污泥量少等特点得以广泛应用。在实际应用中主要有上流式厌氧污泥床反应器（UASB）、厌氧附着膜膨胀床（AAFEF），以及水解酸化等。UASB 最早由 Lettinga 在 20 世纪 70 年代研究发明，在厌氧处理技术中，该法的应用达到一半以上，目前国内外对于 UASB 的研究逐渐深入，通过采用不同的预处理技术、改进 UASB 反应器以及优化运行参数，以使出水达到更好的效果。研究表明，通过采用改进反应器的手段与传统处理工艺处理乳制

品废水进行对比，改进系统减少运行费用，降低运行成本[13]；在中国，采用  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右的运行温度， $0.07\text{kgTSS/L}$  污泥接种浓度， $HRT=12\text{h}$  的情况下采用 UASB 处理某乳制品厂废水，出水稳定，效果良好[14]。厌氧附着膜膨胀床（AAFEF）由 Jewell 于 20 世纪 70 年代研制开发，该反应器采用固体填料的流态化技术，载体膨胀率在  $15\%$  左右，通过附着在载体上厌氧微生物来实现污水的净化。近年来对于 AAFEF 的研究逐渐深入并增加，但是实际应用较少，其运行受到温度、微生物载体、污水回流速度等方面的影响。中国有学者对利用 AAFEF 处理乳制品废水的运行参数进行研究，结果表明，采用中温  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，在进水 COD 浓度为  $2500\text{mg/L}$ 、 $HRT=8\text{h}$  的条件下，COD 去除率达到  $80\%$ ，但在反应过程中，需对水体的 pH 值进行调节，才能保证 AAFEF 反应器运行稳定[15]。由于乳制品废水有机物含量高，采用好氧处理技术很容易出现污泥膨胀，并且好氧处理技术需持续曝气增加运行费用，单独采用厌氧处理技术处理时间较长，因此单独采用厌氧、好氧处理工艺很难实现污染物质的高效去除，诸多研究证实，两种工艺结合使用可以去除乳制品废水中大部分污染物质，对于有机物的去除率达到  $90\%$  以上。

4 生化处理沼气基础数据分析

4.1 沼气蒸汽产量分析

本文以蒙牛乳业（马鞍山）有限公司实际生产排放量和长期建设规划的排放量为参考，通过对废水中 COD 含量的测定，可以推算出沼气产生量，再通过沼气热值计算出总能量。最终，由锅炉利用效率和蒸汽蒸发焓值，计算出日蒸汽产量。

表 1 沼气日蒸汽产量分析表

设计值（远期）					标准值（近期）				
	序号	名称	数量	单位		序号	名称	数量	单位
基础数据	1	计算水量	17000.00	$\text{m}^3/\text{d}$	基础数据	1	水量	14000.00	$\text{m}^3/\text{d}$
	2	进水 COD	2500.00	$\text{mg/L}$		2	进水 COD	2000.00	$\text{mg/L}$
	3	厌氧出水 COD	500.00	$\text{mg/L}$		3	厌氧出水 COD	500.00	$\text{mg/L}$
	4	沼气甲烷含量	60.00	%		4	沼气甲烷含量	60.00	%
	5	沼气产量	17000.00	$\text{m}^3/\text{d}$		5	沼气产量	10500.00	$\text{m}^3/\text{d}$
	6	沼汽热值	5000.00	$\text{Kcal}/\text{m}^3$		6	沼汽热值	5000.00	$\text{Kcal}/\text{m}^3$
	7	总能量	85000000.00	$\text{Kcal}/\text{d}$		7	总能量	52500000.00	$\text{Kcal}/\text{d}$
蒸汽	8	蒸气蒸发焓值	663.77	$\text{Kcal}/\text{kg}$	蒸汽	8	蒸气蒸发焓值	663.77	$\text{Kcal}/\text{kg}$
	9	锅炉热效率	90.00	%		9	锅炉热效率	90.00	%
	10	日蒸汽产量	115.25	$\text{t}/\text{d}$		10	日蒸汽产量	71.18	$\text{t}/\text{d}$

4.2 沼气回收社会效益分析

通过沼气的处理及有效利用，按日均计算日产蒸汽约 50t。年环境效益计算如下：

节约天然气量： $50\text{t/d} \times 360\text{d} \times 78\text{m}^3/\text{t}=140.4$  万立方米。

相较于沼气直接燃烧，年  $\text{SO}_2$  减排量： $17432\text{kg/a}$ （沼气流量  $10000\text{m}^3/\text{d}$ ，硫化氢进出口  $2500/50\text{mg/m}^3$ ）。

5 沼气回收利用工艺

厌氧废水沼气利用，沼气预处理后满足锅炉要求，当锅炉等后续沼气使用设备因故检修或停用时，沼气去火炬燃烧。来自厌氧的沼气（ $750\text{m}^3/\text{h}$ ， $\text{H}_2\text{S}$  含量  $2500\text{mg/m}^3$ ），管道输送至生物脱硫塔进行脱硫处理，使  $\text{H}_2\text{S}$  含量降至  $80\text{mg/m}^3$  以下。脱硫废液排放至污水处理好氧池进行进一步处理。脱硫、脱水后的沼气进入气柜储存，使用时经加压风机增压输送到锅炉，锅炉产生的蒸汽输送至主厂区管道。根据沼气柜内沼气存量及沼气锅炉燃烧需要，自动控制加压风机启停及风量调节，并与火炬燃烧系统、加压风机形成联动模式。同时可提供声光信号给锅炉房控制室。多余的沼气设置旁路直接连接沼气火炬燃烧，可以通过气柜柜位控制，高位点火、低位关闭，无需人员值守。

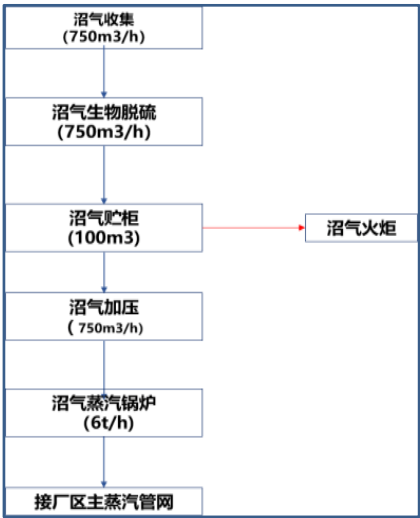


图 1 沼气回收利用工艺图

6 沼气锅炉系统

经过技术革新新增一套沼气锅炉，处理后的沼气直接通过气包输送到沼气锅炉进行利用，利用沼气锅炉燃烧产生蒸汽，将蒸汽输送到工厂锅炉房分气缸并网供应车间进行使用，降低采购蒸汽成本，降低碳排放总量。

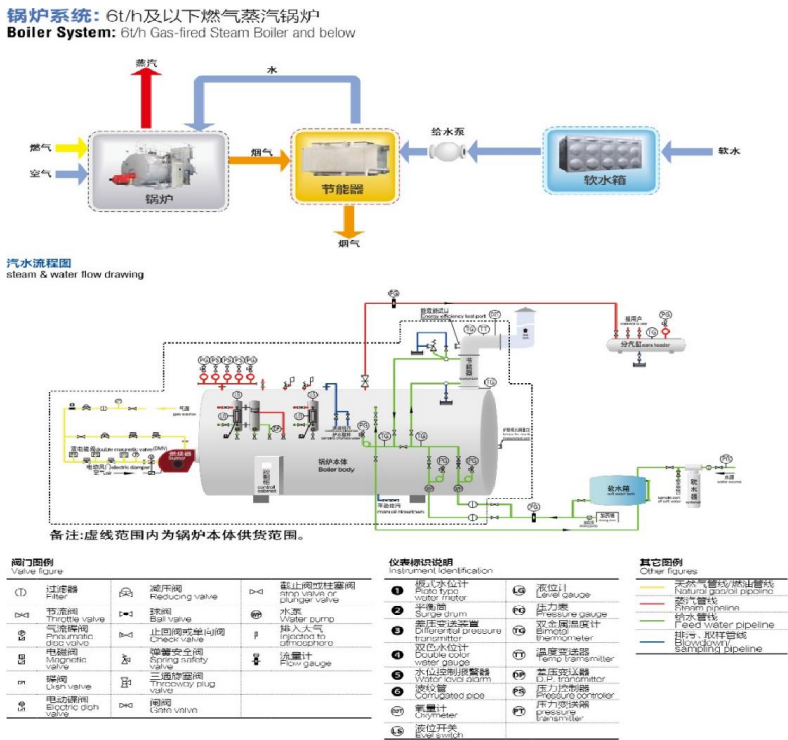


图 2 沼气锅炉设计工艺





图3 沼气锅炉

## 7 系统自动控制原理

气柜的工作状态，主要考虑以下三种工况：

沼气用气与产气平衡，此时沼气压力不变或微小变动，风机鼓气量与排气量平衡；

当用气大于产气，气柜压力下降，风机向夹层中补充压缩空气；

当产气大于用气，气柜压力上升，夹层中的压缩空气相应释放。

系统采用压力传感器监测气柜运行压力，在沼气联动使用的过程中，推荐风机设为常开，已达到最佳的气柜稳压效果。

系统运行信号，例如气柜存储量信号、压力信号、风机运行信号、故障报警信号等，通过 PLC 采集后，统一输出给中控室，以进一步实现对后续沼气用户设备的自动控制。控制系统预留与全厂中控系统通信接口，通信采用工业以太网方式，标准 TCP/IP 协议，SC 接口。

气柜储量监测装置（超声波测距仪）得到的 4-20mA 模拟量信号以及开关位信号，可用于现场气量显示（精确到 0.01m），以及后续沼气用户设备或火炬的自动启停控制，并防止气柜运行可能产生超压或负压。例如，超声波测距仪可提供 3 个（可选 6 个）开关位信号，例如，当柜位达到 90%高位时，自动启动火炬，燃烧多余沼气；当柜位达到 30%低位时，自动关闭一台沼气用户设备；当柜位达到 10%低位时，自动关闭增压风机以及全部沼气用户设备，以防止形成负压。

系统运行信号，例如气柜存储量信号、压力信号、风机运行信号、故障报警信号等，通过现场电控柜采

集后，统一输出给中控室，以进一步实现对后续沼气用户设备的自动控制。

气柜自带一套超压保护装置，以防止气柜意外情况下产生超压，进而保护内膜和外膜。额定保护压力设为 2.5Kpa 或可调。水封中可加入防冻剂，以满足严寒环境使用。

## 8 安全水封技术

气柜自带一套超压保护装置，以防止气柜意外情况下产生超压，进而保护内膜和外膜。额定保护压力设为 2.5Kpa 或可调。水封中可加入防冻剂，以满足严寒环境使用。安全水封自带视镜，以便于用户定期检查水位。

具体技术参数为：接口（DN 300），材质（不锈钢 304），安装（法兰连接）。

## 9 生物脱硫塔

### 9.1 技术概述

沼气脱硫是沼气工程的重点和难点：传统的湿法脱硫工艺，碱液消耗费用巨大；干式脱硫则需要定期更换填料，费时费力且存在危险。Environtec BDS 系列生物脱硫迄今已完成 500 多个工程案例，该技术被证明是沼气脱硫的最佳实践技术。一个典型的案例表明，生物脱硫的综合运行成本低于每立方沼气 2 分钱。

Environtec 通过核心技术进口、塔体和填料国产化的方式，使得生物脱硫的初始投资成本显著下降，进而更加有利于该技术的推广和广泛运用。

### 9.2 技术参数

本套装置通过实验调试，确定了最佳的工艺技术参数，能够保障入塔沼气能够有效脱硫。本装置单套塔体设计处理流量为 750m<sup>3</sup>/h，经过脱硫处理后，可将 H<sub>2</sub>S 浓度从 2500mg/m<sup>3</sup>降低至 80mg/m<sup>3</sup>，处理效率高。此外，本装置对进气的温度压力均要求较低，塔体整体大小和规模适中，能够有效降低污水厂臭气处置的综合运行成本。

入流沼气:

单套塔体处理量:750m<sup>3</sup>/h

H<sub>2</sub>S 浓度 : 2500mg/m<sup>3</sup>

气体温度 : 最低+20℃

沼气压力 : 约 30—40 mbar

净化后沼气:

H<sub>2</sub>S 浓度 : <80mg/m<sup>3</sup>

气体温度 : 约 30-35℃

压降 : 8-12 mbar

脱硫塔塔体 : 1套塔体

塔直径 : 3.0m

塔高度 : 10.5m



图4 脱硫塔工艺参数

## 10 结论

乳制品废水生化性好,废水中含有大量有机物,可以通过生化工艺进行变废为宝,实现生态可持续利用,通过厌氧环节产生大量沼气可回收利用,实现减排降碳,绿色生态发展,为全国乳制品企业提供实践价值。

## 参考文献

- [1] 魏传立,王福林.我国乳制品业的现状和发展研究[J].农机化研究,2010,32(1):241-244.
- [2] 蔡晶,张昊喆.乳品工业废水处理[J].世界环境,2002(5):37-38.
- [3] 洪和琪.乳制品废水处理技术研究进展[J].沈阳大学学报(自然科学版),2016,28(03):203-205.

- [4] 周斌彬,帅卿,黄帽,等.气浮-水解酸化-生物接触氧化工艺处理乳制品废水[J].科技信息,2010(34):352-353.
- [5] 龚为进,段学军.气浮 ABR 生物接触氧化工艺处理乳制品废水[J].工业水处理,2010,30(8):83-85.
- [6] 吴晓,江建荣.积极探索沼气综合利用新途径[J].农家参谋(种业大观),2011,(07).
- [7] 黄庆飞,陈志宏,卢政旗.乳制品生产废水处理探讨[J].企业科技与发展,2018,(06):71-74.
- [8] 张占庭.“厌氧+A/O”替代“气浮+CASS”工艺在乳制品废水处理中的运行与监测分析[D].内蒙古大学,2015.
- [9] 李宏伟,柳世袭,陈小攀等.乳制品废水处理设施改造工程实例[J].广州化工,2015,43(18):131-132+177.
- [10] 韩冬妮.UASB+双级好氧生物工艺处理豆奶制品废水[J].环境科技,2011,24(06):45-47+52.
- [11] 谭红艳.乳制品废水处理工程设计实例分析[J].绿色科技,2014,(04):259-260.
- [12] 晁雷,赵晓光,李晓东等.国内外乳制品工业废水生物处理技术研究进展[J].江苏农业科学,2014,42(01):1-4.
- [13] 刘寅,杜兵,曹建平等.乳制品废水处理工艺选择与工程设计[J].给水排水,2011,47(10):61-64.
- [14] 冼颖锋.乳制品工业废水处理改造工艺[J].广东化工,2017,44(10):157-158.
- [15] 马力.乳制品厂废水特性的研究[J].中国乳品工业,1992,(06):250-252+260.