DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260436

厌氧反应器罐壁结构设计方法的对比与验证

孔祥冰,瞿　芹
[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘　要: 针对厌氧反应器结构设计尚无专用独立规范、长期参照《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》(GB 50341—2014)等跨行业标准存在的适用性问题,对多尺寸厌氧反应器开展结构响应对比分析。通过建立多尺寸有限元模型,采用规范公式与数值分析方法并行计算、对比研究,定量揭示规范设计与数值模拟结果间的差异规律。据此提出兼顾安全性与经济性的两阶段设计方法:以现行规范为基准初步确定罐壁厚度,再建立精细化有限元模型,结合实际工艺荷载开展多工况受力分析与应力评定,对初始方案进行校核优化,可为同类厌氧反应器的安全经济设计提供参考。

关键词: 厌氧反应器;罐体壁厚;设计规范;有限元分析;模型验证
中图分类号: X703　　**文献标志码:** B　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0389-06

Comparison and Verification of Design Methods for Anaerobic Reactor Tank Wall Structures

KONG Xiangbing, QU Qin
[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: In view of the fact that there is no dedicated independent specification for the structural design of anaerobic reactors and the applicability problem of long-term reference to cross-industry standards such as *Design Specification for Vertical Cylindrical Steel Welded Oil Tanks* (GB 50341-2014), a comparative analysis of the structural responses of multi-sized anaerobic reactors is carried out. Through the establishment of multi-scale finite element models, the standard formulas and numerical analysis methods are used for parallel calculation and comparative research to quantitatively reveal the difference patterns between the standard design and the numerical simulation results. A two-stage design method balancing safety and cost-effectiveness is accordingly proposed. The tank wall thickness is preliminarily determined on the basis of current specifications, and then a refined finite element model is established to conduct multi-condition stress analysis and evaluation under actual process loads so as to verify and optimize the initial design scheme, which can provide references for the safe and economical design of similar anaerobic reactors.

Keywords: anaerobic reactor; tank wall thickness; design standard; finite element analysis; model validation

0　引　言

随着有机废弃物资源化与能源化需求的日益迫切,厌氧消化技术已成为环保与可再生能源领域的核心工艺之一[1]。厌氧反应器作为该技术的核心承载设备,其结构安全性、长期耐久性及运行经济性直接关系到整个工程项目的成败。然而,与工艺技术的快速发展相比,厌氧反应器的主体结构设计方法研究却长期滞后,工程实践中长期面临设计规范依据缺失的困境。

目前,已有部分研究关注储罐类结构的力学行为,如立式圆筒形油罐[2-3]、钢筒仓。然而,厌氧反应器内部介质为高腐蚀性[4]、高含水率的发酵料液[5],其结构受力特点与普通储罐或筒仓存在一定差异。现有文献鲜有针对厌氧反应器罐壁设计方法的专门研究,工程实践中往往参考《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》(GB 50341—2014)或《钢筒仓技术规范》(GB 50884—2013)进行近似设计[6]。然而,这两部规范的编制分别针对物理特性迥异的储存介质,直接套用可能导致设计偏差。

为厘清现有规范在厌氧反应器设计中的适用性与局限性,推动基于性能的精细化设计,本研究摒弃对单一规范的依赖,转而采用一种对比与验证的研

收稿日期: 2026-04-22
作者简介: 孔祥冰(1988—),男,硕士,高级工程师,从事结构设计工作。
通信作者: 瞿芹(1986—),女,硕士,高级工程师,从事结构设计工作。电子信箱:quqin@smedi.com

究范式。通过对一系列代表性尺寸的厌氧反应器进行并行计算，系统对比基于GB 50341与GB 50884的规范理论计算结果与高精度有限元数值模拟结果。研究聚焦于核心静载工况，定量揭示不同设计方法在结构响应上的差异及其与结构尺寸的关联规律，从而为厌氧反应器结构设计中规范的科学选用与修正提供理论依据与数据支撑，助力实现安全性与经济性的最优平衡。

1　介质特性与荷载特征

1.1　厌氧反应器介质特性

厌氧反应器作为生物化学转化过程的核心构筑物，其内部介质特性是决定结构荷载模式与设计方法的根本依据。相较于常规储液罐或散料仓，厌氧反应器内介质呈现独特的气-液-固三相混合非牛顿流体特性，以液态为主，介质中存在细小的硬质颗粒，其力学与化学行为高度复杂[7]，厌氧反应器介质均具有强腐蚀性；厌氧消化过程是一个连续的生化反应过程，其液位基本保持恒定，不存在液位剧烈变化引起的、大幅度的、周期性的压力循环[8]。

厌氧反应器内部介质以液态为主，并掺杂细小硬质颗粒，受水质、组分影响，不同项目介质物性存在差异，介质与钢制罐壁间的摩擦系数μ、物料内摩擦角φ不存在通用标准值，精准取值必须通过专项试验测定。受研究条件限制，本文未开展专项试验，参数取值结合行业工程实践、同类厌氧反应器项目运行数据、介质颗粒形态及流态特征等综合研判后估值μ=0.05、φ=1°。介质虽以流动为主，但仍存在一定的固相剪切与摩擦效应，其力学模型介于经典流体静力学与散体力学之间[9]。

1.2　参考规范介质特性

GB 50341基于牛顿流体的静压容器模型，该规范针对的储存介质为石油及其制品，可理想化为不可压缩的牛顿流体。其核心设计假定包括：介质具有流动性，在任何微元体上产生的压力各向同性，法向压力遵循经典的静水压力分布规律，且垂直作用于罐壁；介质与罐壁之间无剪切作用，即摩擦系数$\mu\approx0$，因此不产生切向摩擦力；介质腐蚀性通常较弱，在设计中主要通过统一的腐蚀裕量进行考虑；液位虽可变化，但变化过程缓慢，动力效应可忽略。在此假定下，罐壁主要承受环向拉应力，设计转化为相对简单的薄膜问题，荷载明确且计算理论成熟。

GB 50884基于散体力学理论的筒仓模型，该规范针对谷物、水泥等固体散料。其物理特性由内摩擦角和壁面摩擦系数等参数主导，遵循散体力学规律。核心设计特点为：物料压力具有显著的“拱效应”或“粮仓效应”，导致水平侧压力随深度非线性增加并趋于饱和，而非线性增长[10]；物料与仓壁之间存在竖向摩擦作用，一部分物料重量通过摩擦力传递至仓壁，从而减少了作用在仓底的垂直压力，但同时也对仓壁产生可观的竖向摩擦力与局部弯矩[11]；考虑卸料时的动态流动压力，其值可能显著大于静态压力。因此，筒仓设计不仅需计算环向拉力，还需重点校核仓壁的竖向受压稳定性。

1.3　研究基准与荷载工况设定

对于低矮、中小型的常规厌氧反应器，罐壁厚度主要取决于储料静载，风荷载、地震荷载对壁厚往往不起控制作用，而是控制构造和局部加强。GB 5034对于壁厚设计未考虑地震荷载、风荷载、罐顶荷载的作用，钢材应力控制采用许用应力。为便于与GB 50341的计算结果进行系统性对比，本研究在基于GB 50884的理论计算及相应有限元分析中，荷载组合均统一采用标准组合，且荷载仅计及物料的满液位静态水平压力。该设定旨在剥离其他可变荷载的影响，聚焦于核心储料荷载作用下两种规范方法及数值模型响应的本质差异。

2　基于规范的理论计算与有限元数值模拟

2.1　工程概况

本文选取5个具有代表性的厌氧反应器实际工程案例作为研究对象，对其进行计算和对比分析。厌氧反应器工作压力为常压，厌氧方式均湿式，运行温度为65 ℃，介质密度均1 000 kg/m^3。罐体材质均为Q235B，罐壁腐蚀裕量均为3 mm[12-13]，罐体几何尺寸见表1。

表1　厌氧反应器几何尺寸汇总表

项目	罐壁高度 h_n/m	罐体直径 d_n/m	高径比 h_n/d_n	壁板设计厚度/mm（从下至上）
A	9.8	17	0.58	第1层22，第2层14，第3层12，第4层10，第5~7层8
B	12	17	0.71	第1层22，第2层14，第3层12，第4层10，第5~8层8
C	14	17	0.82	第1层22，第2层14，第3层12，第4~5层10，第6~10层8
D	11	12	0.92	第1层16，第2层10，第3层8，第4~8层6
E	12.3	15	0.82	第1层22，第2层14，第3层12，第4层10，第5~9层8

2.2　基于《钢筒仓技术规范》的罐壁力学模型

基于《钢筒仓技术规范》（GB 50884—2013）[14]的罐壁力学行为遵循散体物料压力理论。筒仓的受力特性依据贮料计算高度 h_n 与内径 d_n 的比值（h_n/d_n）进行划分：当 $h_n/d_n \geq 1.5$ 时为深仓，反之为浅仓。本研究中所有罐体的 h_n/d_n 比值均小于 1.5，属于浅仓范畴。浅仓结构的受力简化模型见图 1。

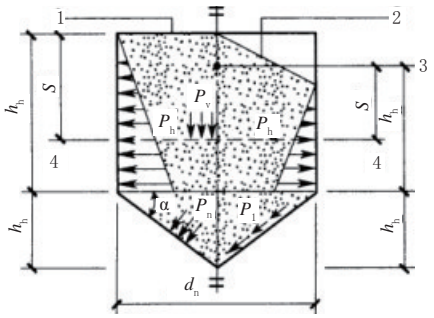


图 1　浅仓受力简图

规范规定，对于浅仓，贮料作用于仓壁单位面积上的水平压力标准值 P_{hk} 在深度 s 处（自贮料顶面或锥体重心起算）的计算公式为：

$$P_{hk} = k \cdot \gamma \cdot S \tag{1}$$

式中：γ 为料的重力密度；k 为侧压力系数。

值得注意的是，规范同时要求，当贮料计算高度大于 10 m 且筒仓内径大于或等于 12 m 时，必须同时考虑深仓压力公式进行校核，并取二者计算结果中的较大值。本研究对象的尺寸普遍满足该条件，因此为保障计算结果安全性，统一采用深仓理论计算贮料的水平压力。深仓压力计算公式如下：

$$P_{hk} = C_h \frac{\gamma \cdot \rho}{\mu}\left(1 - e^{-\mu k s/\rho}\right) \tag{2}$$

式中：ρ 为筒仓水平净截面的水力半径，$\rho = d_n/4$；μ 为料对仓壁的摩擦系数；C_h 为深仓贮料水平压力修正系数。

在确定的水平压力 P_h（1.3 P_{hk}）作用下，罐壁环向薄膜应力可视为轴心受拉构件进行计算，其强度条件为：

$$\sigma_t = \frac{P_h \cdot d_n}{2 \cdot t} \leqslant f \tag{3}$$

式中：σ_t 为罐壁环向应力；t 为罐壁计算厚度；f 为钢材的抗拉强度设计值。式（3）是本研究中校核浅仓罐壁结构强度的核心依据。

2.3　基于《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》的罐壁力学模型

对于罐内液态介质产生的静液压荷载，其罐壁设计需遵循液体静力学原理。本研究参照《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》（GB 50341—2014）[15]进行建模。该规范推荐，对于直径 $D \leqslant 60$ m 的储罐，可采用定点法计算罐壁厚度，该方法原理清晰且适用于本研究中的所有罐体。

定点法基于薄膜理论，认为罐壁主要承受环向应力。在设计条件下，第 i 圈罐壁板计算厚度 t_d 由该圈板底端处的液柱静压力决定，计算公式如下：

$$t_d = \frac{4.9D(H - 0.3)\rho}{[\sigma]_d \varphi} \tag{4}$$

式中：D 为油罐内径，m；H 为计算液位高度，m；指从所计算的那圈罐壁板底端到罐壁包边角钢顶部的高度，或到溢流口下沿（有溢流口时）的高度，或到采取有效措施限定的设计液位高度；P 为液相对密度；$[\sigma]_d$ 为计温度下钢板的许用应力，MPa；φ 为接接头系数，底圈罐壁板取 0.85，其他各圈罐壁板取 0.9。

规范同时要求在试水条件下（即充满水进行测试，ρ=1.0，温度按 20 ℃考虑）进行校核：

$$t_t = \frac{4.9D(H - 0.3)\rho}{[\sigma]_t \varphi} \tag{5}$$

式中：t_t 为试水条件下计算厚度；$[\sigma]_t$ 为 20 ℃时钢板的许用应力。最终设计厚度应取 t_d 与 t_t 中的较大值。

由于本研究中厌氧反应罐的设计运行温度均高于 20 ℃，因此罐壁的厚度控制工况为设计条件，即由式（4）确定。该模型为本研究评估罐体在液态介质作用下的结构适应性提供了理论基础。

2.4　计算结果汇总及对比分析

本章节依据第 2.2 与 2.3 节所述的理论模型，对研究对象（A~E 厌氧反应器）进行了系统计算。各罐体罐壁在满液位工况下的环向应力计算结果汇总于表 2。

根据计算结果对比分析可知，基于 GB 50884 与 GB 50341 所得到的罐壁环向应力沿高度分布规律基本一致，均呈现由顶部向中部递增、随后向罐底下降的趋势。然而，在数值上，依据 GB 50884 计算得到的各点应力普遍低于 GB 50341 的计算结果，这与两部规范所依据的力学理论差异相符。

同直径的 A~C 罐罐壁最大环向应力值见表 3。对比可知：在直径相同而高度递增的 A、B、C 三个项目中，按 GB 50341 计算所得应力较 GB 50884 的增幅分别为 2.24%、7.08% 与 9.15%。这一变化规律进一步印证了《钢筒仓技术规范》的散体力学机理：物料与仓壁间的竖向摩擦作用随料层深度的增加而增强，其对物料重量的“分担”效应亦随之累积，从而导

表2　各厌氧反应器罐壁应力统计表

项目	壁板层数	计算壁厚/mm	GB 50884—2013	GB 50341—2014
			壁板应力/MPa	壁板应力/MPa
A	第7层壁板	5	16.42	9.53
	第6层壁板	5	41.06	37.30
	第5层壁板	5	65.69	65.07
	第4层壁板	7	64.52	66.31
	第3层壁板	9	63.86	67.00
	第2层壁板	11	63.45	67.44
	第1层壁板	19	43.22	49.08
B	第8层壁板	5	24.63	22.21
	第7层壁板	5	49.27	49.98
	第6层壁板	5	73.90	77.75
	第5层壁板	5	98.53	105.51
	第4层壁板	7	87.98	95.20
	第3层壁板	9	82.11	89.47
	第2层壁板	11	78.38	85.82
	第1层壁板	19	51.86	60.35
C	第10层壁板	5	8.21	3.7
	第9层壁板	5	32.84	31.47
	第8层壁板	5	57.48	59.24
	第7层壁板	5	82.11	87.00
	第6层壁板	5	106.74	114.77
	第5层壁板	7	93.84	101.81
	第4层壁板	7	111.44	121.64
	第3层壁板	9	100.36	110.04
	第2层壁板	11	93.31	102.65
	第1层壁板	19	60.50	70.66
D	第8层壁板	3	9.66	4.36
	第7层壁板	3	38.64	37.02
	第6层壁板	3	67.62	69.69
	第5层壁板	3	96.60	102.36
	第4层壁板	3	125.58	135.02
	第3层壁板	5	92.74	100.61
	第2层壁板	7	78.66	85.87
	第1层壁板	13	49.04	56.94
E	第9层壁板	5	7.25	0.25
	第8层壁板	5	28.98	24.42
	第7层壁板	5	50.72	48.59
	第6层壁板	5	72.45	72.77
	第5层壁板	5	94.19	96.94
	第4层壁板	7	82.80	86.51
	第3层壁板	9	76.48	80.71
	第2层壁板	11	72.45	77.03
	第1层壁板	19	47.66	53.95

致水平侧压力随深度增长的趋势逐渐放缓。因此，在相同直径条件下，罐体越高，依据基于流体静压理论的GB 50341所计算的线性增长压力与考虑摩擦松弛效应的GB 50884结果之间的差异越显著。

表3　A~C罐罐壁最大环向应力统计表

项目	罐高/m	直径/m	高径比	GB 50884—2013	GB 50341—2014	应力增幅/(%)
				最大应力/MPa	最大应力/MPa	
A	9.8	17.0	0.6	65.96	67.44	2.24
B	12.0	17.0	0.7	98.53	105.51	7.08
C	14.0	17.0	0.8	111.44	121.64	9.15

2.5　基于有限元法的数值模拟验证与分析

为深入探究厌氧反应器在实际荷载作用下的详细应力分布与力学行为，并验证2.2与2.3节中理论计算的适用性与准确性，本节采用有限元数值模拟方法进行补充分析与对比。本研究采用MIDAS通用有限元分析软件建立了与设计图纸一致的精细化三维模型。

在满液位静态水平荷载作用下，各罐体罐壁环向应力分布云图见图2。

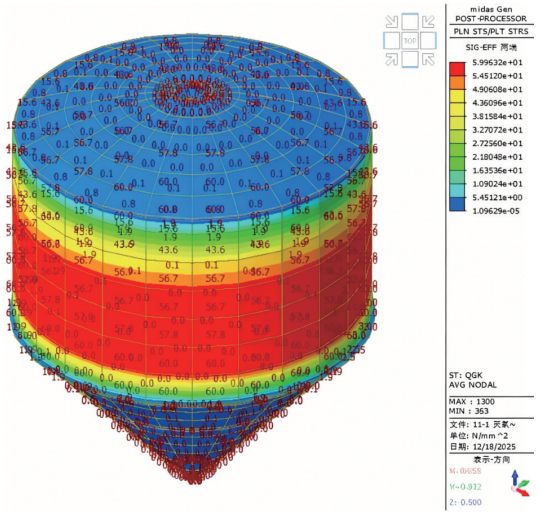
通过对云图的系统性解读，并与2.4节规范理论计算结果进行对比，可得出以下分析：

各项目罐壁环向应力沿高度的分布规律与理论预测一致：应力自罐顶向中部递增，达到峰值后向罐底逐渐下降，且峰值应力出现位置与理论计算高度吻合。值得注意的是，所有项目的罐体罐壁有限元计算应力最大值均低于相应规范理论计算值，这一差异符合工程常规认知，即规范公式基于简化模型与全局安全系数，其结果为包络性设计值；而有限元分析能更精确地反映结构的实际连续性与局部应力状态，通常在非峰值区域给出更经济的应力水平。结果验证了有限元模型的有效性，同时揭示了规范设计所具有的保守性与安全裕度。各厌氧反应器罐壁有限元计算最大应力、基于GB 50884与GB 50341两部规范计算最大环向应力见表4。

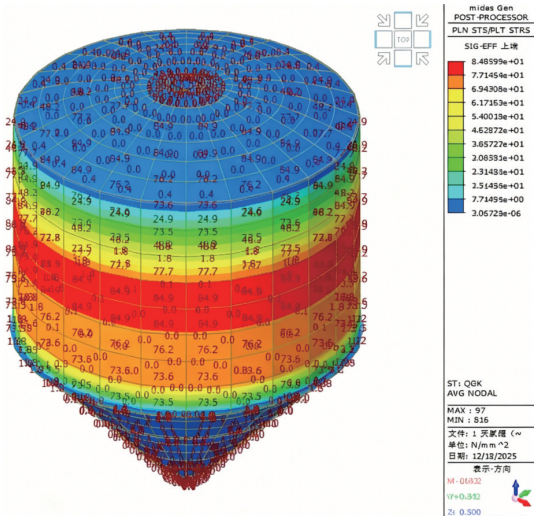
3　结　论

（1）厌氧反应器罐壁在满液位静态水平压力作用下，按照《钢筒仓技术规范》（GB 50884—2013）、《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》（GB 50341—2014）两本规范计算环向应力沿高度的分布规律一致，均为自罐顶向中部递增，达到峰值后向罐底逐渐下降，且峰值应力出现位置也基本一致；

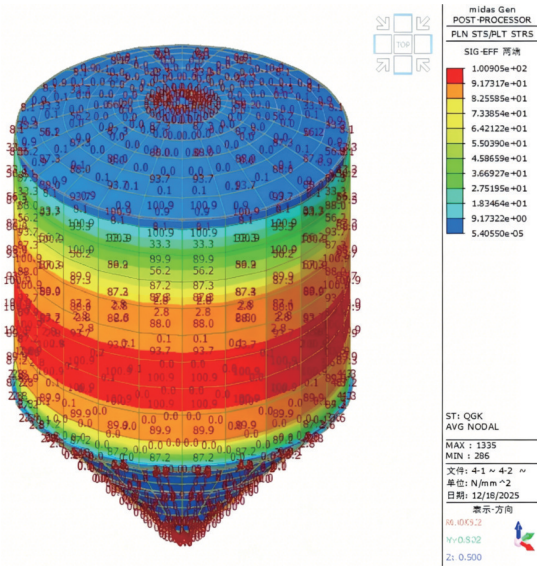
（2）理论对比分析表明，罐体高径比是造成两项规范计算结果出现偏差的核心几何参数。在罐体直径一致的前提下，罐体高度越大，两类计算结果的差值越明显：GB 50341按静水压力线性分布开展计算，



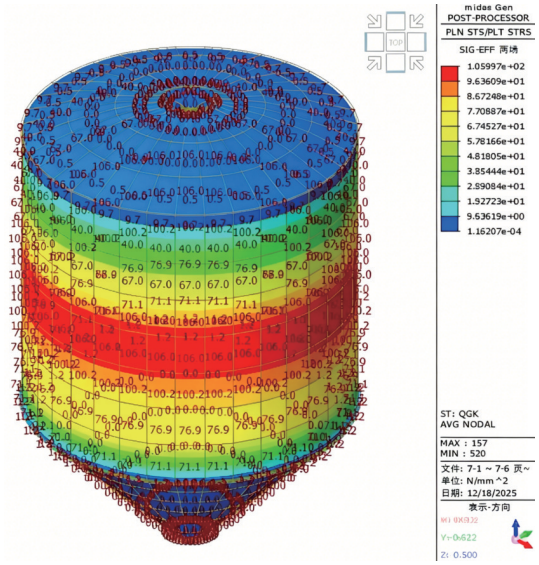
（a）A罐罐壁应力图



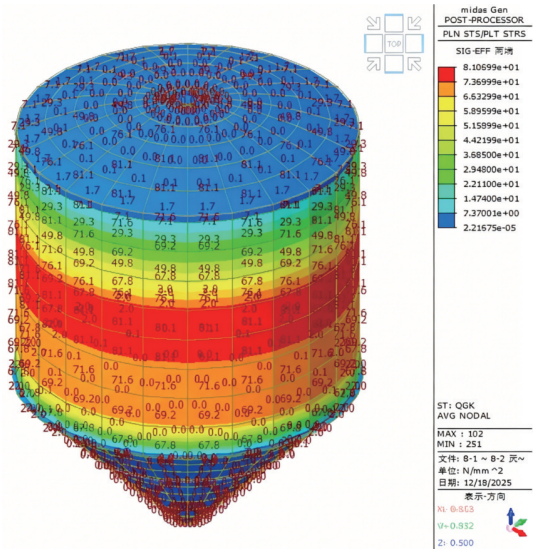
（b）B罐罐壁应力图



（a）C罐罐壁应力图



（b）D罐罐壁应力图



（a）E罐罐壁应力图

图 2　各罐体罐壁环向应力分布云图

而 GB 50884 考虑仓壁摩擦作用带来的“深仓效应”，会产生应力松弛现象。数据显示，当罐体高径比小于 0.6 时，两本规范计算结果基本吻合；高径比增至 0.8 时，计算结果差异接近 10%。因此，当罐体高径

表4　罐壁最大环向应力统计表

项目	有限元最大应力/MPa	GB 50884-2013	GB 50341-2014
		最大应力/MPa	最大应力/MPa
A	60.0	65.96	67.44
B	84.49	98.53	105.51
C	100.90	111.44	121.64
D	106.00	125.58	135.02
E	81.07	94.19	96.94

比大于 0.8 时，采用 GB 50884 计算精度更高，采用 GB 50341 计算则结果偏于保守。

（3）有限元数值模拟结果显示，罐壁环向应力的实际分布形态及峰值应力位置，与前述两本规范的理论预测高度吻合。这从数值计算角度双向验证了：有限元模型在模拟复杂边界与连续体结构方面的可靠性；规范理论模型在预测总体力学行为上的有效性；

（4）对比研究表明，罐壁环向应力的最大值呈现明确的层级关系：GB 50341 计算结果 > GB 50884 计算结果 > 有限元精细分析结果。这一系统性的偏差源于规范公式的简化假定与内置的安全裕度。因此，在厌氧反应器设计中若直接套用任一规范公式确定最终壁厚，将可能导致结构设计偏于保守，材料未能充分发挥强度潜力；

（5）针对目前尚无专用规范的现状，提出一种安全与经济平衡的两阶段设计方法：第一阶段，以 GB 50341—2014 作为基准，计算罐壁初始厚度，确保满足最基本的安全门槛；第二阶段，建立精细化有限元模型，结合实际工艺荷载进行多工况分析与应力评定，对初始设计进行验证与优化。该方法可在保障结构安全的前提下，实现更优的经济性。

参考文献：

[1] 潘翔，张铭，张焦，等. 餐厨垃圾厌氧处理技术研究进展[J]. 广东化工，2024，51(5)：114-115.

[2] 刘贵，吴家祥. 基于API650与GB50341储罐设计标准的几点对比[J]. 石油与化工设备，2021，24(5)：34-38.

[3] Chen Sill, Hu Jiaxin. Finite Element Analysis of Oil-tank Structure and Enhancing Iron Arrangement[C]//The Interna tional Conference on Computers in Machinery Industry, Shanghai, 1992.

[4] 李素娟. 餐厨垃圾处理用厌氧发酵罐的腐蚀失效因素分析[J]. 新型工业化，2022，12(10)：260-263.

[5] 王炯科，汤晓玉，王文国. 餐厨垃圾干式厌氧发酵研究进展[J]. 中国沼气，2021，39(3)：35-41.

[6] 申禄坤，施国中，罗涛. 制焊接沼气发酵罐结构设计计算[J]. 中国沼气，2016，34(3)：63-65.

[7] 李靖，张重，赵国明，等. 基于Fluent流场模拟的半干式连续厌氧发酵反应器的设计及中试试验[J]. 中国沼气，2023，41(1)：59-65.

[8] DG/TJ 08-2423—2023 湿垃圾厌氧消化处理工程技术标准 [S].

[9] 姚鹏，郑晓宇，武京伟，等. 干式厌氧发酵反应器设计研究[J]. 中国沼气，2023，41(2)：76-82.

[10] Janssen. Versuche uber getreidedruck in silozellen[J]. zeitschrift Des. D. Vereines Deutscher Ingenieure, 1895, 39(35): 1045-1049.

[11] Rotter J M. Guide for the Economic Design of Circular Metal Silos [M]. London: Spon Press, 2001.

[12] NB/T 47003.1—2022 常压容器 [S].

[13] GB/T 50393—2017 钢制石油储罐防腐蚀工程技术标准 [S].

[14] GB 50884—2013 钢筒仓技术规范 [S].

[15] GB 50341—2014 立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范 [S].