

倒链式倒装法在大型餐厨垃圾厌氧罐施工中的应用实践

汪雪晴 唐山青 张斌

(长沙中峰环保科技有限公司 湖南 长沙 410000)

摘要: 厌氧消化工艺在餐厨垃圾处理行业应用越来越广泛, 并日趋规模化。厌氧罐施工过程控制是厌氧消化系统施工的重难点。本文通过南方某餐厨垃圾项目 8000m³ 厌氧罐的施工实践, 梳理了中大型厌氧罐采用倒链式倒装法施工的工艺流程和分析计算方法。

关键词: 餐厨垃圾处理; 厌氧罐; 倒链式倒装法; 分析计算

0 引言

餐厨垃圾处理行业经过多年的发展, 已经形成了厌氧发酵处理、进入垃圾发电厂协同焚烧、直接填埋、好氧堆肥、饲料化等常见的处理方式。焚烧和填埋是最传统的处理方式, 处理过程中易产生有害物质, 不能很好地实现垃圾资源化。好氧堆肥能一定程度将餐厨垃圾资源化, 但餐厨垃圾的高盐和高油特性使得堆肥产品的品质较差。餐厨垃圾做饲料, 易造成同源性污染, 自非洲猪瘟爆发以来, 该方式已被禁止。餐厨垃圾厌氧发酵处理具有很好的环境效益和可观的经济效益, 已成为当前主要的餐厨垃圾处理方式。

厌氧罐作为厌氧消化的主要载体, 其施工质量是整个餐厨垃圾处理项目的重点。目前主流的餐厨垃圾厌氧消化罐采用圆筒形焊接拼装罐。焊接拼装罐有两种施工方法: 正装法和倒装法。正装法以罐底为基准, 罐壁板从底部第一圈开始组装, 层层向上直到罐顶安装完成。与此相反, 倒装法虽也是以罐底作为基准, 但却是先将罐顶和顶圈壁板安装完成, 再将已安装的罐顶部分共同顶起(或起吊), 在下面空出的位置组对下一圈壁板, 组焊完成后, 再将罐顶和所有与之相连的壁板向上抬起, 不断重复这个过程, 直到最下面一圈壁板完成安装。

普通立式储罐安装很少采用正装法, 因为正装法的安装工艺决定了其需要搭建脚手架, 施工周期长, 且高空作业具有较大的危险性, 远不如在地面作业安全和方便。倒装法所有的操作都在地面完成, 施工作业范围充裕, 避免了高空作业, 安全性高, 节约了搭建脚手架的材料和工时, 工作效率更高, 因此, 目前储罐安装较普遍采用倒装法。

国内采用倒装法进行钢制立式储罐安装施工常采用导链式安装法、充气顶升法和液顶压升法。导链式安装法在机具设备方面的投资最少, 相对工程成本最低, 整个装置操作简单、安装快捷、节约工期, 施工装置工作

稳定可靠。从工程进度、工程质量、工程成本、安全性等方面综合考虑, 导链式倒装法均有很大优势。

本文依托南方某餐厨垃圾项目的建设过程, 介绍导链式倒装法在大型餐厨垃圾厌氧罐施工过程中的应用实践。

1 厌氧罐整体施工工艺

1.1 主要技术参数

项目选用的电动葫芦型号为 DHP10T, 额定载荷 10t, 标准提升高度 3m, 提升速度 0.09m/min, 电机功率 0.5kW, 电源电压 380V。

厌氧罐高 25m, 直径 22m, 储料空间 8000m³, 总质量约 240t, 单次最大提升质量 195t, 罐壁由 11 圈壁板组焊而成。

1.2 施工方法

1.2.1 桅杆设置

桅杆安装之前, 需先焊接底板, 然后在底板上组对和焊接第一圈侧壁板(从高到低排), 之后安装中心伞架并焊接完顶板。所有侧壁板的组对都是以底板上提前设置好的靠码为基准。顶板上需要开孔, 桅杆焊接在底板上, 并穿越顶板上的预留孔保持直立。桅杆高度主要根据第一圈侧壁板和拱顶的高度来定, 本工程桅杆高度为 4.20m。

桅杆立柱在加固时, 在桅杆顶设置一圈 50 号角钢连接, 角钢与桅杆焊接牢固, 角钢水平拉杆须密闭为整体(一圈), 同时在桅杆一侧(罐体壁板对侧)设置两根 50 号角钢斜撑, 斜撑必须与桅杆上部及罐体底板焊接牢固, 在斜撑及水平拉杆架设前须检查立柱的垂直度, 要求尽量垂直, 如图 1 所示。

电动葫芦安装于桅杆顶端, 其提升力通过胀圈施加到被吊构件上。胀圈通过 25 槽钢对焊制作, 通过弧形样板来检查制作精度。胀圈分为两段, 段与段之间通过 16t 千斤顶连接并胀紧。胀圈上每隔一定距离设置方形

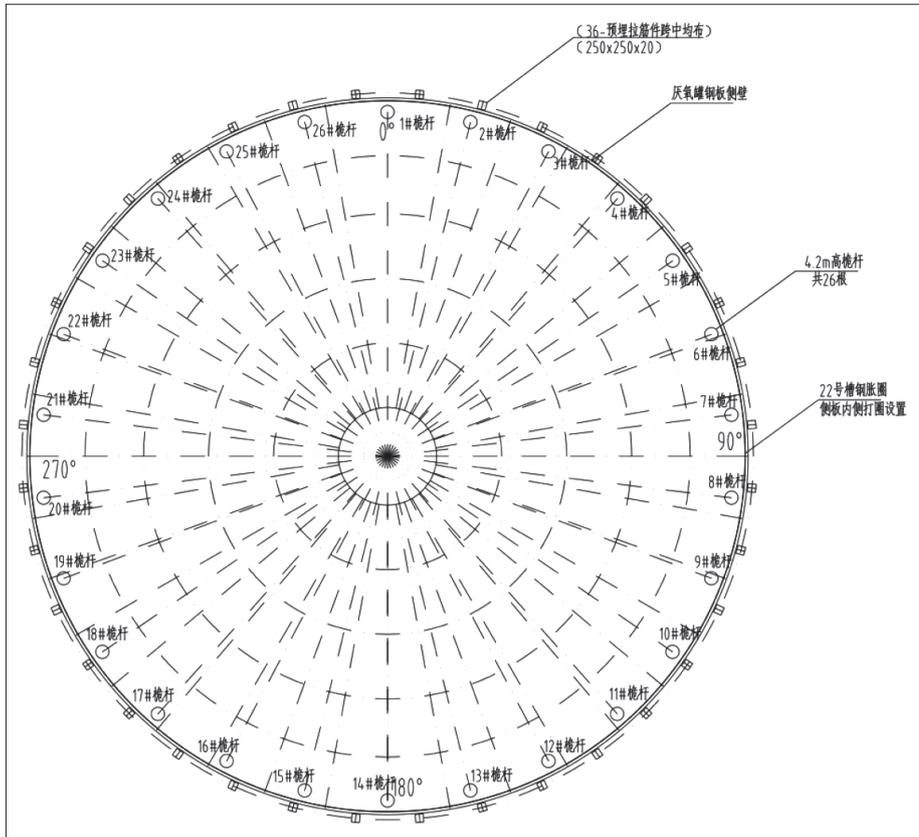


图1 桅杆立柱布置示意图

卡板，卡板与罐体侧壁板通过焊接固定。

1.2.2 顶盖的安装

罐顶盖一般呈球状，分为扇形板和中心板。扇形板几何尺寸大，通常是在胎模具上由多块板拼焊制作。

胎模具呈倒置的球面，将待拼装的顶板吊入模具内，用压梁压紧，先拼焊成扇形大板，然后再装上纵环向加劲肋条，并进行焊接。弓形大板的焊接采用 CO_2 气体保护焊。焊后的扇形大板待完全冷却后，松开压梁，从胎模具上拆下。

顶盖的安装是在罐壁上段第1带壁板已安装焊接的条件下进行的。顶盖安装时，先将中心板安装定位在罐体中部的中心平衡柱顶端上，标高应比原拱高增加50mm，调整固定后，采用对称吊装的方法，将4块扇形大板安装成“十”字状，再依次将各区域内的扇形大板安装到位。搭接缝的装配采用卡夹具连接，点焊固定。对接缝的装配采用直接点焊固定，对接缝须注意预留最后一块扇形板暂不下料，待其余顶板焊接完成后按实际尺寸进行下料制作。

已安装的顶盖的焊接程序为：先焊接扇形大板间的纵向焊缝，再焊接中心板与各扇形大板内沿间的环缝，后焊接扇形大板外沿与罐壁环形角钢圈间的环缝。顶盖的焊接一般采用 CO_2 气体保护焊，纵向缝施焊时宜由多名焊工采用跳焊法对称同时焊接。外沿环缝施焊时宜由

多名焊工均布，同时沿同一方向焊接。

1.2.3 倒链式倒装法施工方法

厌氧罐倒装法安装顺序是：安装底板、罐体的最上圈壁板、包边槽钢、罐顶框撑架，然后在罐内周边均布设置群桅，将上圈及顶盖升高地面（高度要超过下一圈壁板的高度），再组对下一圈壁板，以此类推，直至整个设备完成。

1.2.3.1 倒链式倒装法施工和顶升步骤概述

(1)完成罐底板组对焊接，考虑管壁内外侧进出方便，在储罐壁板位置每间隔一段距离（通常为800mm）点焊360mm槽型钢作为支撑。

(2)围焊储罐最上一圈壁板。

(3)安装中心伞架，顶板立柱处开天窗。

(4)桅杆上安装电动葫芦。

(5)开启电动葫芦提升系统，抬升罐顶与第一圈壁板，在下方的空间位置组焊第二圈壁板，第二圈壁板焊接完成后，将顶板上预留的天窗补齐，如图2所示。

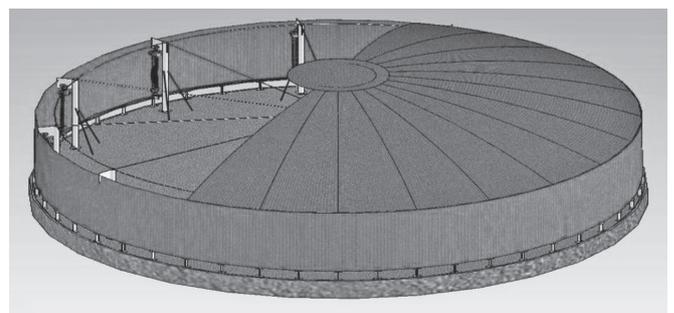


图2 桅杆系统提升示意图

(6)重复这个提升过程，直到各层壁板都完成组焊。

1.2.3.2 提升系统结构说明

桅杆立柱均布于罐壁内侧，其数量和尺寸须通过计算得出，计算过程见2.2。立柱与罐壁之间应留出一定的距离，以确保电动葫芦不与包边角钢干涉。立柱必须确保垂直安装，其与罐底面之间的间隙可以通过插入薄钢板来找平，找平后牢固焊接。为了确保立柱稳定，在其顶部安装2根斜撑，斜撑与罐底面的夹角小于 45° 。立柱顶端吊耳上安装电动葫芦。立柱与立柱之间通过拉杆相连，如此使得所有原本独立的桅杆提升装置组成了一个稳定的整体。

胀圈用 22 号槽钢制作，曲率半径等于储罐的内径以确保较高的贴合度。电动葫芦的吊钩与胀圈上的吊耳（位于葫芦正下方）相连，吊耳不得与罐壁直接焊接，否则提升时电动葫芦的倾角拉力会使罐壁下部受拉产生径向变形。采用龙门夹具将胀圈与罐壁连接，龙门夹具的位置与吊耳要保持合适的距离，距离太近易致罐壁受拉变形，距离太远可能造成胀圈承受过大的扭矩而产生变形。

1.2.3.3 提升注意事项

电动葫芦在提升过程中很难做到完全同步，须安装针对单个葫芦的微调电路，以便在个别葫芦提升速度不同步时实现微调，确保整个提升系统工作平稳，保证提升安全。

每次提升一定高度（通常 1/3 板高）后应停下来检查各个电动葫芦的同步性，确保受力均匀。如出现起升不同步和受力不均的情况，可单独控制滞后的倒链，直到其与其他倒链受力状态相同，调整后重新开始整个系统的同步提升。

2 倒装法顶升桅杆及斜撑承载力计算

本项目厌氧罐现场分带依次倒装顶升的流程，如表所示。

序号	提升重量 (t)	顶升顺序	序号	提升重量 (t)	顶升顺序
1	43	第 1 次顶升	7	115	第 7 次顶升
2	52	第 2 次顶升	8	132	第 8 次顶升
3	60	第 3 次顶升	9	151	第 9 次顶升
4	71	第 4 次顶升	10	173	第 10 次顶升
5	84	第 5 次顶升	11	195	第 11 次顶升
6	99	第 6 次顶升			

由表可知，第 11 次顶升为最危险工况，顶升总重量 = 罐顶板 + 罐壁板 = 195t。

现场共均匀设置 26 台 10t 电动葫芦（型号为 DHP10T），每个吊点理论提升荷载（竖直方向）为 195 ÷ 26 = 7.5t。

2.1 力学模型建立

根据电动葫芦提升结构型式，选取任一立柱组合，建立电动葫芦提升结构近似静力学模型，如图 3 所示。

2.2 结构受力分析

对桅杆顶端（O 点）进行受力分析，如图 3 所示，O 点受到来自罐壁上胀圈吊耳的拉力 N₁，N₁ 可以分解为水平分力 N_{1x} 和竖直分力 N_{1y}，为了平衡水平分力 N_{1x}，斜撑对 O 点提供拉力 N₂，其水平分力 N_{2x} 与 N_{1x} 相互抵消。两竖直分力 N_{1y} 和 N_{2y} 同时作用于桅杆上，使桅杆承压。

根据以上分析可知，桅杆承受压应力，需考察其强度和稳定性；斜撑承受拉应力，需考察其强度。

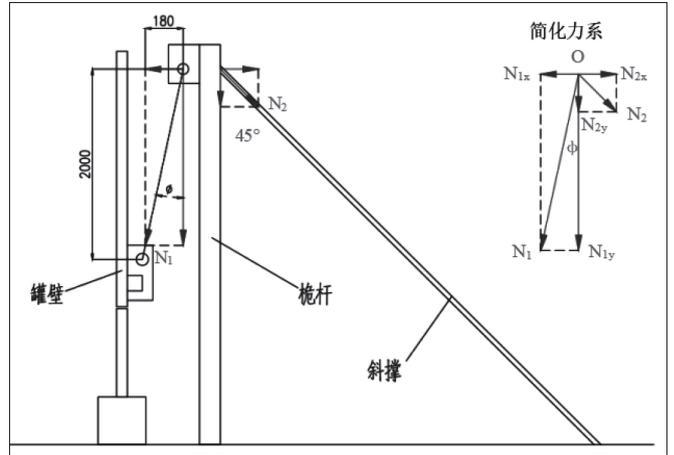


图 3 桅杆受力分析

2.2.1 求夹角 φ

φ 在提升过程中是变化的，由小变大。由受力关系可知，φ 越大，系统的水平分力越大，越不稳定，因此，取顶升的最高位置所处状态进行分析计算最合理。由图 3 中几何关系（对应顶升最高位置）可知：

$$\varphi = \tan^{-1}(180/2000) = 5.14^\circ$$

2.2.2 求竖直分力 N_{1y}

由前面的分析可知，每一个吊点理论需要提供 75kN(7.5t) 的提升力才能完成罐体的第 11 次提升，该提升力在竖直上等于竖直分力 N_{1y}。这是最理想的情况，因是多吊点同步提升，需要考虑不均衡荷载系数 k。一般有：k=1.1 ~ 1.25。本计算取最大值 1.25。则有：

$$N_{1y} = 1.25 \times 75 \text{ kN} = 93.75 \text{ kN}$$

2.2.3 求出其他分力

根据受力分析，有：

$$N_{1x} = \tan(\varphi) \times N_{1y} = 8.43 \text{ kN}$$

$$N_1 = N_{1y} / \cos(5.14^\circ) = 94.13 \text{ kN}$$

$$N_{2x} = N_{1x} = 8.43 \text{ kN}$$

$$N_{2y} = N_{2x} \times \tan(45^\circ) = 8.43 \text{ kN}$$

$$N_2 = N_{2y} / \cos(45^\circ) = 11.92 \text{ kN}$$

桅杆所受压力 F 为竖直分力 N_{1y}、N_{2y} 之和，即

$$F = N_{1y} + N_{2y} = 93.75 + 8.43 = 102.18 \text{ kN}$$

2.2.4 校核桅杆强度

桅杆有两种截面形式，一种为圆形钢管（图 4），一种为双拼工字钢（图 5）。

圆形钢管桅杆截面参数：

截面为 φ 219 × 4mm，材质为 20# 钢，屈服强度 f_y = 245MPa，弹性模量 E = 206GPa，泊松比 ν = 0.3。其截面积 A₁ 为：

$$A_1 = \pi / 4 \times (219^2 - 211^2) = 0.0027 \text{ m}^2$$

桅杆压应力：

$$\sigma_1 = \frac{102.18 \times 10^3}{0.0027} = 37.8 \text{ MPa} < 245 \text{ MPa}$$

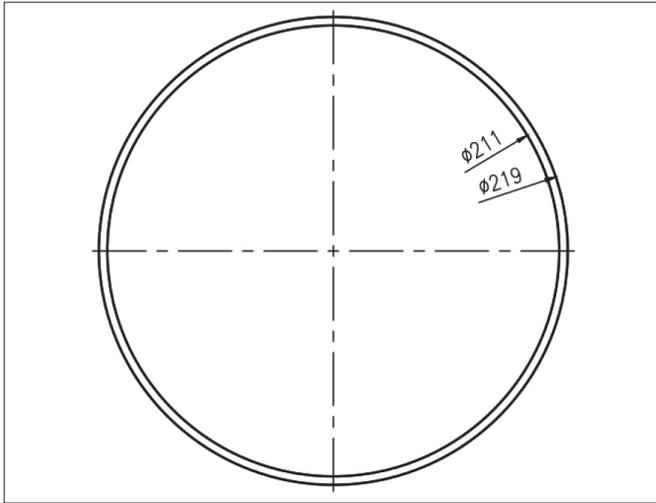


图4 圆形钢管截面

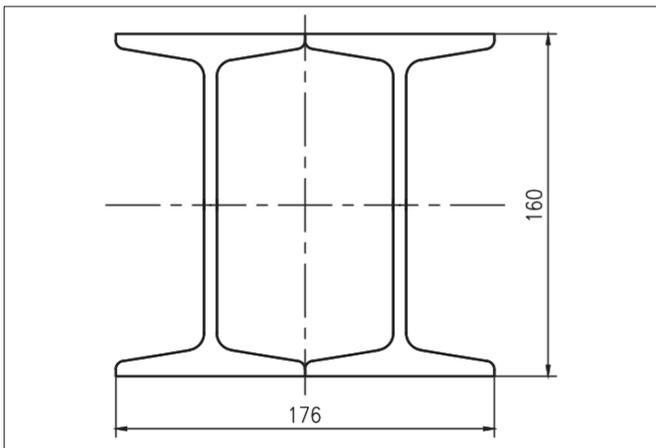


图5 16号双拼工字钢截面

可知,该截面桅杆强度达到要求。

双拼工字钢桅杆截面参数:

截面为两根16号工字钢(160×88)拼合而成,材质为20#钢,屈服强度 $f_y=245\text{MPa}$,弹性模量 $E=206\text{GPa}$,泊松比 $\nu=0.3$ 。

根据标准型钢表,可以查得其截面积为 $A_2=52.2\text{cm}^2=0.00522\text{m}^2$

桅杆压应力:

$$\sigma_2 = \frac{102.18 \times 10^3}{0.00522} = 19.6\text{MPa} < 245\text{MPa}$$

可知,该截面桅杆强度达到要求。

2.2.5 校核斜撑强度

斜撑为50#角钢,屈服强度 $f_y=245\text{MPa}$,弹性模量 $E=206\text{GPa}$,泊松比 $\nu=0.3$ 。其截面积 A_3 查表得:

$$A_3=3.9\text{cm}^2=0.00039\text{m}^2$$

斜撑拉应力:

$$\sigma_3 = \frac{11.92 \times 10^3}{0.00039} = 30.6\text{MPa} < 245\text{MPa}$$

可知,斜撑强度达到要求。

2.2.6 校核桅杆的稳定性

桅杆可简化为一端固定,另一端自由的压杆,其实际长度为4.2m,长度系数 $\mu=2$,故压杆计算长度为: $L_0=2 \times 4.2=8.4\text{m}$

对于圆形钢管桅杆,

惯性矩为:

$$I = \frac{\pi D^4(1-a^4)}{64} = \frac{3.14 \times 219^4 \times (1-(211/219)^4)}{64} = 15616566\text{mm}^4$$

则压杆临界力为:

$$P_{ij} = \frac{\pi^2 EI}{L_0^2} = \frac{3.14^2 \times 210 \times 10^6 \times 15616566 \times 10^{-12}}{8.4^2} = 458.2\text{kN} > 102.18\text{kN}$$

可知,该类截面桅杆稳定性满足要求。

对于双拼工字钢桅杆:

单一截面工字钢的惯性矩查表可知:

$$I'_x=1127\text{cm}^4 \quad I'_y=93\text{cm}^4$$

根据平行移轴公式,可以计算出双拼工字钢的惯性矩为:

$$I_x=1127 \times 2=2254\text{cm}^4$$

$$I_y=(93+4.42 \times 26.1) \times 2=1196.6\text{cm}^4$$

可见y轴对应的截面为危险截面,其临界应力为:

$$P_{ij} = \frac{\pi^2 EI}{L_0^2} = \frac{3.14^2 \times 210 \times 10^6 \times 1196.6 \times 10^{-8}}{8.4^2} = 351.1\text{kN} > 102.18\text{kN}$$

可知,该类截面桅杆稳定性满足要求。

3 结语

本文总结了中大型厌氧罐采用倒链式倒装法施工的工艺流程和计算方法,该法在某餐厨垃圾处理项目8000m³厌氧罐施工中得到了成功的应用。该项目厌氧罐通过了当地质量监督部门的检查,得到了业主的认可。实践证明,本文总结的方法合理有效,值得推广。

参考文献:

- [1] 郑祥,许海朋,范庆文,龙思灵,华栋梁.餐厨垃圾厌氧消化处理技术研究进展[J].现代化工,2022(2):10-14+18.
- [2] 徐至钧,燕一鸣.大型立式圆柱形储液罐制造与安装[M].北京:中国石化出版社,2003.
- [3] 吴长贵,谷波,邓卫国,朱勇昆.大型钢制圆筒式储罐的导链式倒装法施工技术[J].石油化工建设,2010,32(5):42-43+62.

作者简介:汪雪晴(1985.10-),男,汉族,湖南益阳人,硕士,工程师,研究方向:餐厨垃圾处理工艺设计和现场施工管理。