

湖北理工学院
硫酸赢团队

“东华科技-恒逸石化杯”
第十三届全国大学生
化工设计竞赛

# 典型设备设计与设备选型

组员：李力、匡磊、张雨婷、刘玉玲、曹素琴
指导老师：胡燕辉、黄卫东、夏贤友、左小华、屈媛

# 目录

**目录**.....1
第一章 全厂设备概述.....3
第二章 塔设备设计.....4
2.1 塔设备设计依据.....4
2.2 塔设备概述.....4
2.3 塔型选取.....5
2.3.1 板式塔塔板类型的确定.....8
2.3.2 填料塔填料类型的选取.....9
2.4 塔设备详细计算.....11
2.4.1 T0301 设计条件.....11
2.4.2 T0301 结构参数设计.....12
2.4.3 塔体机械强度校核.....28
2.5 设备条件图.....43
第三章 反应器设计.....44
3.1 概述.....44
3.2 设计目标.....44
3.3 工业生产常用反应器介绍.....44
3.4 固定床与流化床.....45
3.4.1 固定床反应器.....45
3.4.2 流化床反应器.....47
3.5 反应器设计过程（R0101 加成制 $VA_c$ 反应器示例）.....48
3.5.1 乙炔选择性加成反应机理.....48
3.5.2 催化剂的选择.....48
3.5.3 反应器型式的确定.....49
3.5.4 固定床反应器设计条件.....49
3.5.5 反应器参数设计.....51
3.6 设备条件图.....60

第四章 换热器的选型设计.....61
4.1 换热器的概述.....61
4.2 选型依据.....63
4.3 工艺条件选择.....63
4.3.1 物流流程的选择.....63
4.3.2 温度.....64
4.3.3 压力.....64
4.3.4 换热管.....65
4.4 选型计算.....67
4.4.1 设计条件的确定.....67
4.4.2 EDR 进行换热器的设计.....69
4.4.3 换热器结构参数的选择.....69
4.4.4 换热器选型结果.....71
4.4.5 换热器设备图.....71
4.5 换热器机械强度校核结果.....72
4.6 换热器 E0107 设备条件图.....91

# 第一章 全厂设备概述

物料衡算后，经过工艺模拟及优化，我们确定出了本项目各设备类型及相关设计参数。本项目最终设计的工艺流程包括反应器 1 台，塔设备 9 台，换热器 16 台，泵 10 台，气液分离器 2 台，大型储罐 33 个，风机 1 个，共计设备 82 台。其中塔设备、反应器以及气液分离器为自行设计的非标设备，我们还对换热器、泵、压缩机、储罐等标准设备做了设备选型，具体整理结果见设备设计选型结果一览表。

# 第二章 塔设备设计

## 2.1 塔设备设计依据

| | |
|---|---|
| 《压力容器》 | GB150-2011 |
| 《固定式压力容器安全技术监察规程》 | TSG 21-2016 |
| 《化工设备基础设计规定》 | HG/T 20643-2012 |
| 《石油化工塔器设计规范》 | SH/T 3098-2011 |
| 《钢制化工容器结构设计规定》 | HG/T 20583-2011 |
| 《塔顶吊柱》 | G/T 21639-2005 |
| 《压力容器封头》 | GB/T 25198-2010 |

## 2.2 塔设备概述

石化行业是国民经济中能耗较高的产业部门，其能耗占工业能耗接近 1/5，占全国总能耗的 14%左右。在目前占有工业能耗接近五分之一的石化行业中，较大的能耗主要来源于化学原料及化学制品制造业能耗、石油天然气开采业能耗、石油加工、炼焦及核燃料加工业能耗、橡胶制品业能耗。而在化工生产中，分离的能耗占主要部分，其中尤以精馏塔在分离设备中占有最大比例，因此，塔设计的好坏与否，对于整个工厂的经济效益有着很重要的作用。塔设备的投资费用占整个工艺设备费用的四分之一左右，塔设备所耗用的钢材料重量在各类工艺设备中所占的比例也较多，例如在年产 250 万吨常压减压炼油装置中耗用的钢材重量占 62.4%，在年产 60-120 万吨催化裂化装置中占 48.9%。因此，塔设备的设计和研究，是我们工作的重点。

在本厂设计中，塔设备初步汇总如表 2-1：

**表 2-1 塔设备汇总**

| 序号 | 塔设备位号 | 塔设备名称 |
|---|---|---|
| 1 | T0201 | 气体吸收塔 |
| 2 | T0202 | 第一吸收塔 |
| 3 | T0203 | 第二洗涤塔 |

| | | |
|---|---|---|
| 4 | T0204 | 脱乙醛塔 |
| 5 | T0205 | 脱萃取塔 |
| 6 | T0301 | 粗分塔 |
| 7 | T0302 | VAc 精制塔 |
| 8 | T0303 | HAc 精制塔 |
| 9 | T0401 | 乙醛加成塔塔 |

## 2.3 塔型选取

精馏塔主要有板式塔和填料塔两种，它们都可以用作蒸馏和吸收等气液传质过程，但两者各有优缺点，要根据具体情况选择。

**表 2-2　精馏塔的主要类型及特点**

| 类　型 | 板 式 塔 | 填 料 塔 |
|---|---|---|
| 结构特点 | 每层板上装配有不同型式的气液接触元件或特殊结构，如筛板、泡罩、浮阀等；塔内设置有多层塔板，进行气液接触 | 塔内设置有多层整砌或乱堆的填料，如拉西环、鲍尔环、鞍型填料等散装填料，格栅、波纹板、脉冲等规整填料；填料为气液接触的基本元件 |
| 操作特点 | 气液逆流逐级接触 | 微分式接触，可采用逆流操作，也可采用并流操作 |
| 设备性能 | 空塔速度（亦即生产能力）高，效率高且稳定；压降大，液气比的适应范围大，持液量大，操作弹性小 | 大尺寸空塔气速较大，小尺寸空塔气速较小；低压时分离效率高，高压时分离效率低，传统填料效率较低，新型乱堆及规整填料效率较高；大尺寸压力降小，小尺寸压力降大；要求液相喷淋量较大，持液量小，操作弹性大 |
| 制造与维修 | 直径在 600mm 以下的塔安装困难，安装程序较简单，检修清理容易，金属材料耗量大 | 新型填料制备复杂，造价高，检修清理困难，可采用非金属材料制造，但安装过程较为困难 |

| | | |
|---|---|---|
| 适用场合 | 处理量大，操作弹性大，带有污垢的物料，多用于传统蒸馏过程 | 处理强腐蚀性，液气比大，真空操作，要求压力降小的物料，多用于吸收等过程 |

类型选择时需要考虑多方面的因素，如物料性质、操作条件、塔设备的性能，以及塔的制造、安装、运转和维修等。对于真空精馏和常压精馏，通常填料塔塔效率优于板式塔，应优先考虑选用填料塔，其原因在于填料充分利用了塔内空间，提供的传质面积很大，使得汽液两相能够充分接触传质。而对于加压精馏，若没有特殊情况，一般不采用填料塔。这是因为填料塔的投资大，耐波动能力差。

同样，吸收过程也分为液膜控制、气膜控制和介于两者之间的共同控制吸收三种类型。气膜控制的吸收与真空精馏相似，应优先考虑选用高效规整填料塔；液膜控制的吸收与加压精馏相似，往往选用板式塔或汽液湍动大、持液量高的散装填料塔; 介于两者之间的，宜采用比表面积大、持液量高、液相湍动大的填料塔，一般多采用散装填料塔。

具体来讲，应着重考虑以下几个方面：

（1）与物性有关的因素

易起泡的物系，如处理量不大时，以选用填料塔为宜。因为填料能使泡沫破裂，在板式塔中则易引起液泛。

具有腐蚀性的介质，可选用填料塔。如必须用板式塔，宜选用结构简单、造价便宜的筛板塔盘、穿流式塔盘或舌形塔盘，以便及时更换。

具有热敏性的物料须减压操作，以防过热引起分解或聚合，故应选用压力降较小的塔型。

粘性较大的物系，可以选用大尺寸填料。板式塔的传质效率太差。

含有悬浮物的物料，应选择液流通道大的塔型，以板式塔为宜。

操作过程中有热效应的系统，用板式塔为宜。

（2）与操作条件有关的因素

若气相传质阻力大，宜采用填料塔。

大的液体负荷，可选用填料塔。

液气比波动的适应性，板式塔优于填料塔。

操作弹性，板式塔较填料塔大，其中以浮阀塔最大，泡罩塔次之。

（3）其他因素

对于多数情况，塔径大于 800mm，宜用板式塔，小于 800mm 时，则可用填料塔。但也有例外，鲍尔环及某些新型规整填料在大塔中的使用效果也可优于板式塔。

一般填料塔比板式塔重。

大塔以板式塔造价较廉。

填料塔用于吸收和解吸过程，可以达到很好的传质效果，它具有通量大、阻力小、传质效率高等性能。因此实际过程中，吸收、解吸和气体洗涤过程绝大多数都使用填料塔。

**考虑本厂实际因素：**

醋酸、醋酸乙烯、丁烯醛等在操作过程中腐蚀性较小。

VAc 高温下极易聚合，设备操作温度不能过高。

操作条件下，物系不起泡且无悬浮物质。

物系分离难度不大。

操作压力在常压附近。

塔类型选取中充分考虑各物系特点等因素，最大化权衡塔的通量、分离效率、操作弹性造价、检修的难易程度等进行塔型的选取，如反应精馏塔在操作过程中有热效应，主体采用板式塔；隔壁塔塔径较大，为保证其较高的传质效率，我们采用高效规整填料；吸收过程如乙炔水洗塔、VAC 水洗塔为均有较大的液体负荷，采用填料塔。

因此，本项目塔设备塔型具体选择结果如表 2-3：

**表 2-3 塔型选择结果**

| 塔设备位号 | 塔设备名称 | 塔型 |
|---|---|---|
| T0201 | 气体吸收塔 | 填料塔 |

| | | |
|---|---|---|
| T0202 | 第一吸收塔 | 填料塔 |
| T0203 | 第二洗涤塔 | 浮阀塔 |
| T0204 | 脱乙醛塔 | 填料塔 |
| T0205 | 脱萃取塔 | 填料塔 |
| T0301 | 粗分塔 | 浮阀塔 |
| T0302 | VAc 精制塔 | 浮阀塔 |
| T0303 | HAc 精制塔 | 浮阀塔 |
| T0401 | 乙醛加成塔 | 填料塔 |

因此，本项目塔设备的类型设计板式塔与填料塔，以下对板式塔塔板类型以及填料塔填料类型的选择做简要说明。

### 2.3.1 板式塔塔板类型的确定

板式塔一般认为用于大型塔是经济合理的，比一般填料塔具有效率高和能力大的优点。板式塔主要有筛板塔、浮阀塔和泡罩塔。板式塔的设计主要是选择塔型、选择流体流动形式、操作状态——鼓泡或喷射态等。其大致比较如下：

**表 2-4 板式塔塔板性能比较**

| 塔盘类型 | 优点 | 缺点 | 适用场合 |
|---|---|---|---|
| 泡罩板 | 较成熟、操作稳定 | 结构复杂、造价高 | 特别容易堵塞的物系 |
| 浮阀板 | 效率高、操作范围宽 | 浮阀易脱落 | 分离要求高、负荷变化大 |
| 筛板 | 结构简单、造价低 | 易堵塞、操作弹性较小 | 分离要求高、塔板数较多 |
| 舌型板 | 结构简单、塔板阻力小 | 操作弹性窄、效率低 | 分离要求较低的闪蒸塔 |
| 浮动喷射板 | 压降小、处理量大 | 浮板易脱落、效率较低 | 分离要求较低的减压塔 |

**表 2-5 塔板性能量化比较**

| 塔板类型 | 生产能力 | 塔板效率 | 操作弹性 | 压降 | 结构 | 成本 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 泡罩板 | 1.0 | 1.0 | 5 | 1 | 复杂 | 1 |
| 浮阀板 | 1.2-1.3 | 1.1-1.2 | 9 | 0.6 | 一般 | 0.7-0.9 |
| 筛板 | 1.2-1.4 | 1.1 | 3 | 0.5 | 简单 | 0.4-0.5 |
| 舌型板 | 1.3-1.5 | 1.1 | 3 | 0.8 | 简单 | 0.5-0.6 |

本设计中板式塔设备处理量较大，液气比波动较大，综合考虑操作弹性的要求，保证生产能力与塔板效率，同时节省成本，本设计中板式塔的塔型以浮阀塔为主。

### 2.3.2 填料塔填料类型的选取

目前填料的种类很多，大致可以分为实体填料与网体填料两大类。按填料的装填方式可分为散装填料和规整填料两大类。其分类情况列于下表：

**表 2-6 常用填料的分类与名称**

| 填料类型 | | | 填料名称 |
|---|---|---|---|
| 散堆填料 | 环形 | 拉西环形 | 拉西环，环，十字环，内螺旋环 |
| | | 开孔环形 | 鲍尔环，改进型鲍尔环，阶梯环 |
| | 鞍形 | | 弧鞍形，矩鞍形，改进矩鞍形 |
| | 环鞍形 | | 金属环矩鞍形，金属双弧形，纳特环 |
| | 其他新型 | | 塑料球形，花环形，麦勒环形 |
| 规整填料 | 波纹型 | 垂直波纹型 | 网波纹型，板波纹型 |
| | | 水平波纹型 | Spraypak，Panapak |
| | 非波纹型 | 珊格形 | Glitsch Grid |
| | | 板片形 | 压延金属板，多孔金属板 |
| | | 绕圈形 | 古德洛形，Hyperfil |

填料的几何特性数据主要包括比表面积、空隙率、填料因子等，是评价填料性能的基本参数。

（1） 比表面积单位体积填料的填料表面积称为比表面积，以 a 表示，其单

位为 $m^2/m^3$。填料的比表面积愈大，所提供的气液传质面积愈大。因此，比表面积是评价填料性能优劣的一个重要指标。

（2） 空隙率单位体积填料中的空隙体积称为空隙率，以 ε 表示，其单位为 m3/m3，或以%表示。填料的空隙率越大，气体通过的能力越大且压降低。因此，空隙率是评价填料性能优劣的又一重要指标。

（3）填料因子填料的比表面积与空隙率三次方的比值，即 $a/\varepsilon^3$，称为填料因子，以 φ 表示，其单位为 1/m。它表示填料的流体力学性能，φ 值越小，表明流动阻力越小。

**表 2-7 塔设备型式**

| 设备位号 | 设备名称 | 塔型 | 填料类型 |
|---|---|---|---|
| T0201 | 气体吸收塔 | 填料塔 | CMR（金属） |
| T0202 | 第一吸收塔 | 浮阀塔 | |
| T0203 | 第二洗涤塔 | 填料塔 | CMR（金属） |
| T0204 | 脱乙醛塔 | 填料塔 | BX |
| T0205 | 脱萃取塔 | 浮阀塔 | |
| T0301 | 粗分塔 | 浮阀塔 | |
| T0302 | VAc 精制塔 | 浮阀塔 | |
| T0303 | HAc 精制塔 | 填料塔 | CMR（金属） |

通常情况下，散堆填料应用于小直径塔，而规整填料因为其规定了气、液流径，改善了气、液分布状况，在低压降下也能提供很大的比表面积和高空隙率使塔的传质性能和生产能力得到大幅提高，且规整填料几乎无放大效应，应用于大直径塔，可以强化传质，降低塔高。综合考虑各类型填料性能、造价及更换成本，对于 T0203、T0205、T0303 三个小直径塔我们选用 CMR 阶梯环填料，其锥形翻边不仅增加了填料的机械强度，而且使填料之间由线接触为主变成以点接触为主，这样不但增加了填料间的空隙，同时成为液体沿填料表面流动的汇集分散点，可以促进液膜的表面更新，有利于传质效率的提高，同时节约成本。对于 T0202VAC 水洗塔，由于 VAC 高温下易聚合，需要降低操作温度且保证塔设备压降不能过

大，而初步计算结果塔径较大，我们选用苏尔寿 BX 型板波纹规整填料。

综上，本设计塔设备塔板类型及填料类型初步结果如表 2-7。

## 2.4 塔设备详细计算（T0301 粗分塔示例）

在本项目粗分塔车间，T0301 粗分塔主要分离脱乙醛后的醋酸、醋酸乙烯、水混合液，实现原料醋酸的循环利用。经上两节说明确定其为浮阀塔。设备设计时，先通过 Aspen Plus 模拟优化得到该塔设备工艺优化参数如设计压力、设计温度、介质组成和流量等并估算塔径；再通过手动计算得到塔体尺寸如塔高、塔径，与软件辅助计算相对应，接着设计溢流装置及塔板布置得到内部塔板结构及尺寸，并借助 Cup-Tower 根据塔内气液流量分布分别对进料板、精馏段、提馏段分别校核，其与手动验算结果相对应；然后借助 SW6-2011 进行了强度校核并完成了设备工艺条件图的绘制。

### 2.4.1 T0301 设计条件

T0301 粗分塔为浮阀塔，根据 Aspen 模拟优化结果，我们得到塔设备设计条件如表 2-8 及表 2-9 所示。

**表 2-8 T0301 设计条件表**

| 操作参数 | 工艺参数 |
|---|---|
| 设计压力/MPa | 常压 |
| 设计温度/℃ | 136.2 |
| 操作介质 | 醋酸、醋酸乙烯、乙醛 |
| 质量流量/（kg/h） | 20298.12 |
| 塔板数 | 46 |
| 加料板位置 | 18 |

**表 2-9 T0301 进出口物流组成**

| | Inlet | Outlet | |
|---|---|---|---|
| 物流编号 | 0312（醋酸乙烯） | 0315（丁烯醛） | 0316（水） |
| 温度/℃ | 20.5 | 56.9 | 99.1 |
| 压力/bar | 2.00 | 1.00 | 1.00 |
| 质量流量（kg/h） | 19790.37 | 13783.60 | 6006.77 |
| 体积流量（$m^3/h$） | 23.51 | 18.31 | 6.59 |
| **组分质量流量（kg/h）** | | | |
| 乙炔 | 13621.92 | 13521.5239 | 100.398442 |
| 水 | 5756.83 | 0.24 | 5756.59 |
| 丁烯醛 | 95.96 | 89.67 | 6.29 |
| 丙酮 | 123.79 | 3.2621e-14 | 123.79 |
| 乙醛 | 186.06 | 169.56 | 16.50 |
| **质量组成** | | | |
| 乙炔 | 97.428 | 0.002 | 0.002 |
| 水 | 1.588 | 0.4130 | 0.3180 |
| 丁烯醛 | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| 乙醛 | 0.002 | 12.3310 | 0.0600 |

## 2.4.2 T0301 结构参数设计

### 2.4.2.1 塔径计算

◆ Aspen Plus 辅助计算

经过 Aspen Plus 模拟及优化，确定精馏塔理论塔板数 54（包括再沸器），进料板为 18，考虑冷凝器及再沸器，2-15 块板为精馏段，16-54 块板为提馏段。我们采用 Aspen Plus 进行精馏塔塔径的初步估算，利用 Tray Sizing 及 Tray Rating 进行设计与校核，其计算过程见

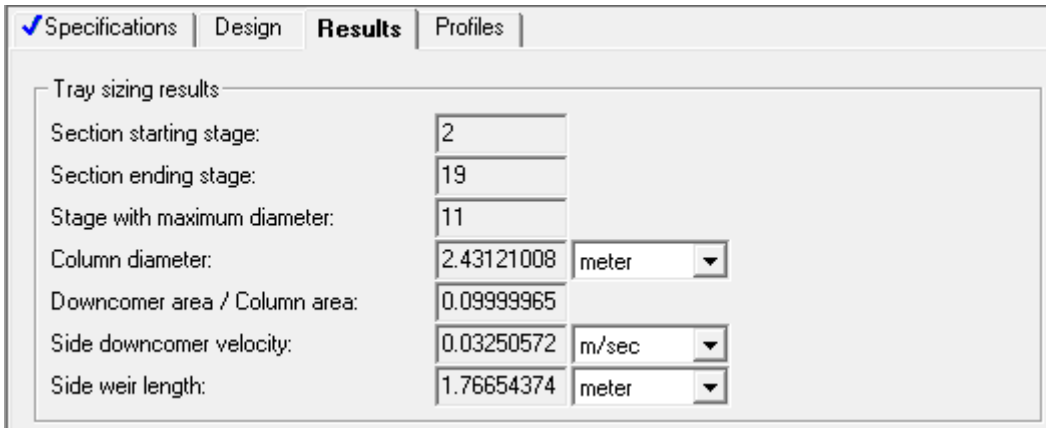



**图 2-1 Tray Sizing 计算结果**

易得，Aspen 初步计算塔径为 2.43m，将计算结果带入 Tray Rating 中得到结果如图 2-2，

| 塔板 | %液泛率 | 总压降 | %降液管持液量 (充气) | 干板压降 | 干板压降（压头损失） | 总压降（压头损失） | 降液管持液量 (充气) | 降液管持液量 (未充气) | %降液管持液量 (未充气) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | bar | | bar | mm | mm | mm | mm | |
| 2 | 77.2127 | 0.0106737 | 34.3014 | 0.00787963 | 93.9868 | 127.314 | 263.835 | 160.403 | 20.8541 |
| 3 | 76.9705 | 0.0106336 | 34.1833 | 0.00783346 | 93.3878 | 126.77 | 262.927 | 159.851 | 20.7824 |
| 4 | 76.6286 | 0.0105961 | 33.9977 | 0.00779066 | 92.6694 | 126.04 | 261.499 | 158.985 | 20.6698 |
| 5 | 76.1198 | 0.0105809 | 33.6871 | 0.00777172 | 91.8251 | 125.016 | 259.11 | 157.54 | 20.4819 |
| 6 | 75.6219 | 0.0106627 | 33.3174 | 0.00785356 | 91.4168 | 124.116 | 256.266 | 155.824 | 20.2588 |
| 7 | 75.6495 | 0.0109177 | 33.1672 | 0.00811682 | 92.5031 | 124.423 | 255.111 | 155.137 | 20.1695 |
| 8 | 76.1718 | 0.0112319 | 33.2923 | 0.00844735 | 94.6082 | 125.795 | 256.073 | 155.733 | 20.2469 |
| 9 | 76.6092 | 0.0114357 | 33.4378 | 0.00866423 | 96.1443 | 126.898 | 257.193 | 156.418 | 20.3361 |
| 10 | 76.7584 | 0.0115139 | 33.4839 | 0.00874711 | 96.6942 | 127.279 | 257.547 | 156.635 | 20.3643 |
| 11 | 76.9316 | 0.0115675 | 33.554 | 0.00880735 | 97.2318 | 127.704 | 258.087 | 156.964 | 20.407 |

**图 2-2 Tray Rating 校核结果**

从设计校核结果可以看出：

（1）每块塔板降液管液位高度/板间距（Downcomer backup/Tray space）均满足溢流型板式塔 0.2~0.5 的要求。

（2）每块塔板降液管停留时间（Downcomer res.time）均大于 4s，满足评分细则要求。

（3）每块塔板的液泛因子（Flooding factor）均介于 0.6~0.85 之间，满足评分细则对板式塔液泛因子的要求。

◆ 手动计算

由 Aspen 模拟得到塔内各板上气液相流量分布，取气液负荷最大的 11 块塔板进行设计计算，其模拟得到结果表 2-10；

**表 2-10 塔板水力学数据**

摘要

| | 值 | 单位 |
|---|---|---|
| 塔盘/填料级数 | 24 | |
| 总高度 | 17.32 | meter |
| 总压头损失 | 2.99586 | meter |
| 总压降 | 0.267894 | bar |
| 塔段数 | 2 | |
| 直径数 | 2 | |
| 塔釜压降 | | bar |

塔段

| | 起始塔板 | 结束塔板 | 直径 | | 塔段高度 | | 内件类型 | 塔盘类型或填料类型 | 段压降 | | %液泛率 | 液泛率最大塔板 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CS-1 | 2 | 11 | 2.95 | meter | 7.1 | meter | TRAY | SIEVE | 0.109814 | bar | 77.2127 | 2 | 查看 |
| CS-2 | 12 | 25 | 3.3 | meter | 10.22 | meter | TRAY | SIEVE | 0.158081 | bar | 83.8357 | 19 | 查看 |

根据流量公式可算塔径，即

$$D = \sqrt{\frac{4V_S}{u\pi}}$$

$$u_{max} = C\sqrt{\frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V}}$$

其中的 C 由$C = C_{20}\left(\frac{\sigma}{20}\right)^{0.2}$计算，$C_{20}$可由史密斯关联图(图 2-3)查得，对应横坐标为

$$\frac{L_h}{V_h}\left(\frac{\rho_L}{\rho_V}\right)^{1/2} = \frac{55.61}{33490.73} \times \left(\frac{764.34}{1.09}\right)^{1/2} = 0.044$$

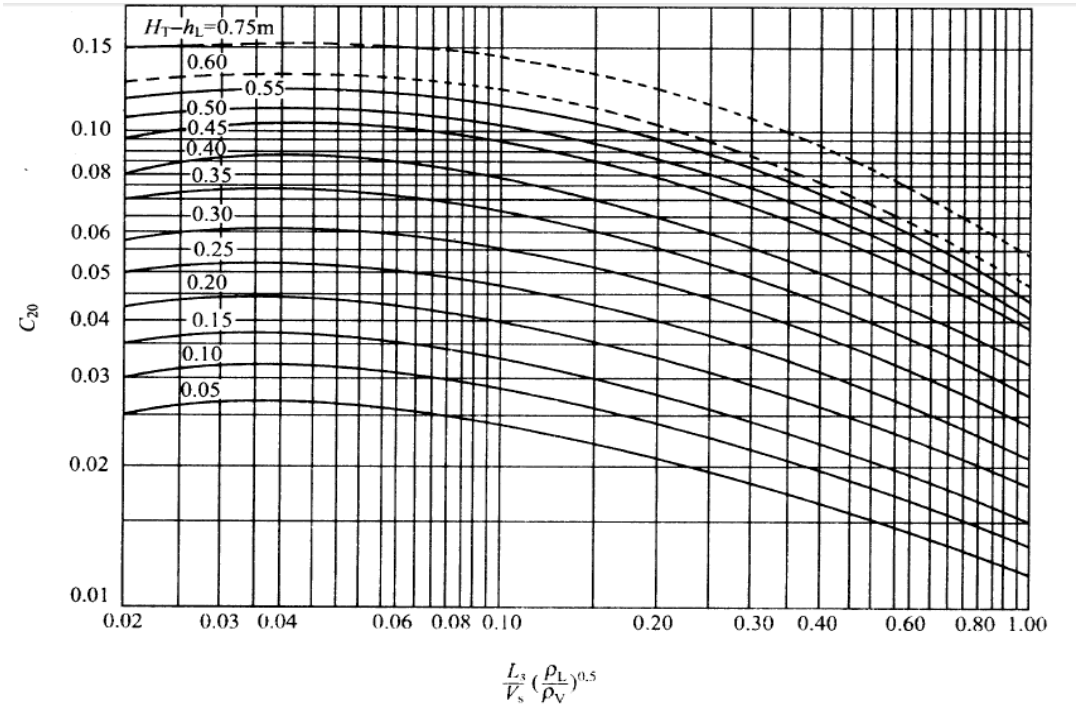


**图 2-3 史密斯关联图**

考虑安装、检修需要，塔板间距取 600mm，板上液层高度 $h_L$=80mm。

查图 2-3 得$C_{20}=0.12$，则

$$C=C_{20}\left(\frac{\sigma_L}{20}\right)^{0.2}=0.12\times\left(\frac{31.89}{20}\right)^{0.2}=0.13$$

$$u_{max}=0.13\sqrt{\frac{764.34-1.09}{1.09}}=3.44\mathrm{m/s}$$

本塔为常压操作且物系不易起泡，取安全系数 0.7，则空塔气速

$$u=0.7u_{max}=0.7\times3.44=2.41m/s$$

所以：

$$D=\sqrt{\frac{4\times33490.73}{3.14\times2.41}}=2.22m$$

按标准塔径圆整后$D=2.4\mathrm{m}$，但我们后来进行校核时，发现此值不能满足液泛要求，因此我们我们重新取塔径为 2.6m 进行计算后，符合要求。

塔截面积为：

$$A_T=0.785D^2=5.307\mathrm{m}^2$$

实际空塔气速为：

$$u=\frac{V_S}{A_T}=\frac{33490.73}{5.307}=1.75m/s$$

确定塔径 2.6m。

### 2.4.2.2 塔高计算

1.实际塔板数 $N_T$

塔效率依据经验算法求算：选用$E_T=0.17-0.616\log\mu_m$公式计算，该式适用于液相粘度为 0.03～1.4cP 的物系，本设计中，物系液相粘度$\mu_m=0.35\mathrm{cP}$在该范围之内。

$$E_T=0.17-0.616\log\mu_m=0.17-0.616\log0.35=0.72$$

因此，

$$N_T = \frac{20-2}{0.72} = 25(\text{块})$$

有效高度：

$$Z = (N_T - 1) \times H_T = (25-1) \times 0.6 = 14.4m$$

2.塔顶空间高度 $H_1$

塔顶空间高度指的是塔顶封头上端到最上一层塔板之间的距离高度。它的作用是为了满足安装塔板和开人孔的需求，也是为了使气体中的液体自由沉降。塔顶的空间高度一般取 1.2~1.5m 以减小塔顶出口气体中的液体夹带量。考虑到本塔常压操作，操作物系不易起泡，气液夹带量小，因此取塔顶空间高度 $H_1$=1.2m。

3.塔底空间高度 $H_2$

塔底部空间高度 Hd 指的是塔底封头上端到最低一层塔板之间的距离高度。塔底空间高度具有贮存槽的作用，塔底釜液最好能在塔底有 10~15min 的储量，以保证塔底料液不至排完。对于塔底产量较大的塔，塔底容量可取小些，取 2~5min 的储量。

由 Aspen 模拟结果可知，釜液出口体积流量为$q_V = 27.81\text{m}^3/\text{h}$，取停留时间 10min，则：

$$H_2 = \frac{q_V \times t}{0.785 \times D^2} = 0.87\text{m}$$

3.裙座高度 $H_3$

塔体内径 Di=2600mm>800mm,筒体高度 14.4m，取裙座壁厚 16mm，选用圆筒形裙座。塔设备常压操作，考虑灌泵液位及再沸器等的安装、检修要求，取裙座高度 $H_3$=6m。

4.封头高度 $H_4$

本塔上下封头均采用椭圆形封头，因此

$$H_4 = 2 \times (h_0 + h_i) = 2 \times (h_0 + D_i/4) = 1.38\text{m}$$

因此，全塔高度为：

$$H = Z + H_1 + H_2 + H_3 + H_4 = 23.85\text{m}$$

### 2.4.2.3 溢流装置设计

★溢流方式选取

参考《化工原理》（夏清）液体负荷与溢流类型的关系如表 2-11：

**表 2-11 液体负荷与溢流类型的关系**

| 塔径 D/mm | 液体流量 $L_h$/（$m^3/h$） | | | |
|---|---|---|---|---|
| | U 形流 | 单溢流 | 双溢流 | 阶梯式双溢流 |
| 1000 | 7 以下 | 45 以下 | | |
| 1400 | 9 以下 | 70 以下 | | |
| 2000 | 11 以下 | 90 以下 | 90~160 | |
| 3000 | 11 以下 | 110 以下 | 110~200 | 200~300 |
| 4000 | 11 以下 | 110 以下 | 110~230 | 230~350 |
| 5000 | 11 以下 | 110 以下 | 110~250 | 250~400 |
| 600 | 11 以下 | 110 以下 | 110~250 | 250~450 |

本塔塔径 2600mm，液体体积流量 55.61 m3/h，故采用单溢流，弓形降液管，不设进口堰。

★溢流装置的设计计算

①堰长 $l_w$

取堰长$l_w = 0.45D = 0.45 \times 2.6 = 1.17m$

②溢流堰高度$h_w$

由$h_w = h_L - h_{ow}$计算，其中$h_L = 80mm$，

选用平直堰，堰上液层高度$h_{ow}$由下式计算：（取液流收缩系数 E=1）

$$h_{ow} = \frac{2.84}{1000} E\left(\frac{L_h}{l_w}\right)^{2/3} = \frac{2.84}{1000} \times 1 \times \left(\frac{55.61}{1.56}\right)^{2/3} = 0.031m = 31mm$$

小于 60mm，说明采用单溢流形式没有问题。

因此 hw=$h_L$-how=80-31=49mm

③弓形降液管宽度$W_d$和截面积$A_f$

由$l_W/D = 0.45$

根据弓形降液管参数图

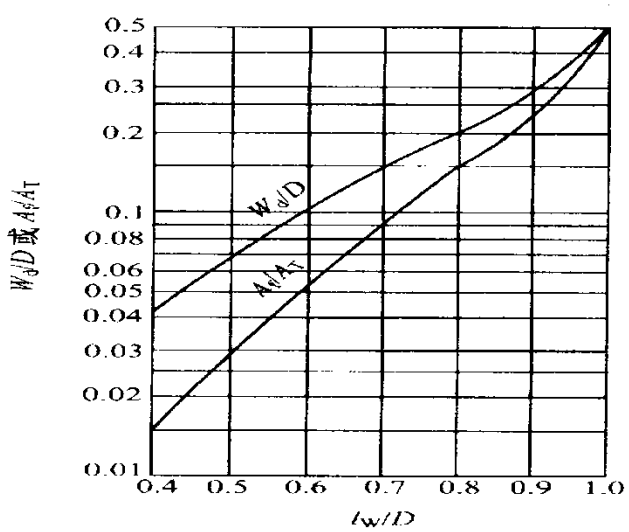



图 2-4 弓形降液管宽度与截面积关系图

查图得：

$$A_f/A_T = 0.021$$

$$W_d/D = 0.053$$

得到降液管截面积$A_f = 011㎡$

降液管宽度$W_d = 0.286㎜$

验算停留时间，即：

$$\theta = \frac{3600A_fH_T}{L_h} = \frac{3600 \times 0.11 \times 0.6}{55.61} = 4.15s$$

停留时间满足不小于 3~5s 的要求

④降液管底隙高度 $h_0$

降液管底隙高度是指降液管下端与塔板间的距离，降液管高度应小于出口堰高度，才能保证降液管底端有良好的液封。

简便计算：

$$h_0 = 37㎜$$

降液管底隙高度一般不小于 20~25mm，否则易于堵塞，或因安装偏差而使液流不畅，造成液泛。

### 2.4.2.4 塔板布置

★塔板分块

本塔直径 2600mm，应采用分块式塔板。塔板分为鼓泡区，溢流区，破沫区，边缘区。

其中破沫区宽度：

$$W_S = 100\text{mm}$$

边缘区宽度取：

$$W_C = 60\text{mm}$$

★开孔区面积计算

对于单溢流塔板：

$$A_a = 2 \times \left[x\sqrt{r^2 - x^2} + \frac{\pi}{180} \times r^2 \arcsin\frac{x}{r}\right]$$

其中：

$$x = \frac{D}{2} - (W_S + W_d) = \frac{2.6}{2} - （0.1 + 0.286） = 0.914\text{m}$$

$$r = \frac{D}{2} - W_c = \frac{3.3}{2} - 0.06 = 1.24m$$

代入数据，得

$$A_a = 2 \times \left[0.914\sqrt{1.24^2 - 0.914^2} + \frac{\pi}{180} \times 1.24^2 \arcsin\frac{0.914}{1.24}\right] = 4.08m^2$$

★浮阀数目与排列

取气体通过阀孔时的动能因数$F_0 = 10$,按下式计算阀孔气速“

$$u_0 = \frac{F_0}{\sqrt{\rho_V}} = \frac{10}{\sqrt{1.09}} = 9.58m/s$$

所以，一块塔板上浮阀数为（取阀孔直径$d_0 = 39\text{mm}$）

$$N = \frac{V_s}{\frac{\pi}{4}d_0^2 u_0} = \frac{33490.73}{0.785 \times 0.039^2 \times 9.58} = 813.3$$

浮阀排列方式采用等腰三角形叉排，取同一横排的孔心距$t = 75\text{mm}$，则可

按下式估算排间距$t'$，即

$$t' = \frac{A_a}{Nt} = \frac{4.08}{813.3 \times 0.075} = 66.9mm$$

考虑到塔的直径比较大，必须采用分块式塔板，而分块式板的支撑与衔接也要占去一部分鼓泡区面积，因此排间距不宜采用 66.9mm，因小于此值，取t′ = 6mm

按t = 75mm，t′ = 65mm，等腰叉排重新排得阀数 N 为：

$$N = \frac{A_a}{t t'} = \frac{4.08}{0.065 \times 0.075} = 836.9$$

使用 CAD 校核阀孔数：

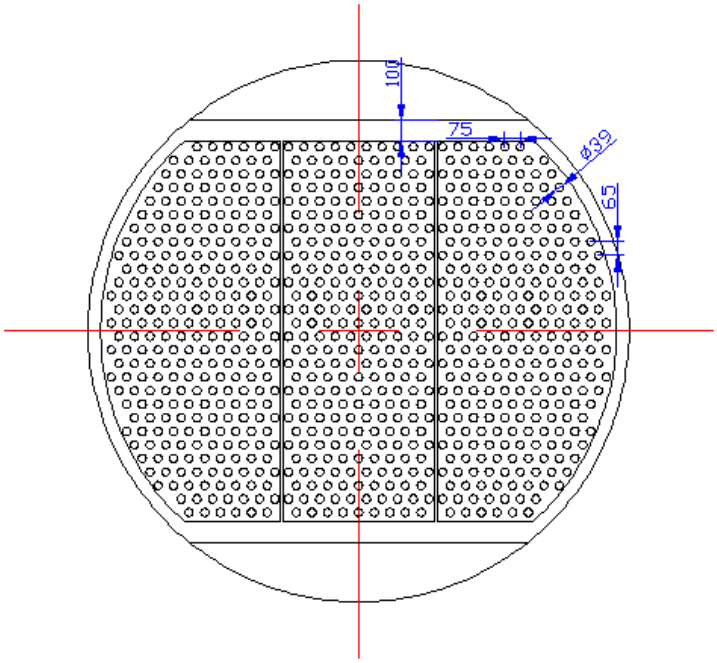



**图 2-5CAD 阀孔校核数**

校核结果为：N = 798

与计算值误差为：

$$\delta = \frac{836.9 - 798}{836.9} \times 100\% = 4.6\% < 5\%$$

说明计算合理，取N = 798

按 N=798 重算孔速及阀孔动能因数：

$$u_0 = \frac{33490.73/3600}{0.785 \times 0.039^2 \times 798} = 9.76 m/s$$

$$F_0 = 9.76 \times \sqrt{1.09} = 10.2$$

阀孔动能因数 $F_0$ 变化不大，仍在 9～12 范围内，设计合理

塔板开孔率为:

$$\frac{u}{u_0}=\frac{1.75}{9.76}\times 100\%=18\%$$

### 2.4.2.5 塔板流体力学验算

◆ 手动验算

（1）气体通过浮阀塔板的压力降

气体通过一层浮阀塔板的压力降应为：

$$h_p=h_c+h_l+h_\sigma$$

①干板阻力

先求临界孔速:

$$u_{oc}=\sqrt[1.825]{\frac{73.1}{\rho_v}}=\sqrt[1.825]{\frac{73.1}{1.09}}=10.02m/s$$

显然

$$u_O<u_{OC}$$

故

$$h_c=19.9\frac{u_O^{0.175}}{\rho_L}=0.038\text{m液柱}$$

②板上充气液层阻力

$$h_l=\varepsilon_0 h_L$$

$\varepsilon_0$是反映板上液层充气程度的因数，称为充气因数，因为液相为水，所以取充气因数$\varepsilon_0=0.5$

$$h_l=\varepsilon_0 h_L=0.5\times 0.08=0.04m\text{液柱}$$

③液体表面张力造成的阻力$h_\sigma$

一般来说，浮阀塔的$h_\sigma$值很小，此处计算时忽略不计。

所以，与气体流经一层浮阀塔板的压力降所相当的液柱高度为

$$h_p=h_c+h_l+h_\sigma=0.038+0.04+0=0.078m\text{液柱}$$

则单板压降

$$\Delta P_p=h_p\rho_L g=0.078\times 764.34\times 9.81=584.9\text{Pa}$$

属于浮阀塔正常值。

（2）液泛

为使液体能由上层塔板稳定地流入下层塔板，降液管内必须维持一定高度的液柱。降液管内的清液层高度$H_d$用来克服相邻两层塔板间的压力降、板上液层阻力和液体流过降液管的阻力。表达为：

$$H_d = h_P + h_L + h_d$$

式中，$h_P = 0.078$m液柱，$h_L = 0.08$m液柱

塔板上不设进口堰，

$$h_d = 0.153\left(\frac{L_h}{l_W h_o}\right)^2 = 0.153\left(\frac{55.61}{3600 \times 1.32 \times 0.04}\right)^2 = 0.013m\text{液柱}$$

所以，

$$H_d = h_P + h_L + h_d = 0.078 + 0.08 + 0.013 = 0.171\text{m液柱}$$

为防止液泛，应保证降液管中泡沫液体总高度不超过上层塔板的出口堰，即

$$H_d \leq \Phi(H_T + h_W)$$

一般物系，取$\Phi = 0.3$，

$$\Phi(H_T + h_W) = 0.3 \times （0.6 + 0.049） = 0.195\text{m液柱} \geq H_d$$

符合防止液泛的要求

（3）雾沫夹带

通常用操作时的空塔气速与发生液泛时的空塔气速的比值作为估算雾沫夹带量的指标。此值即为泛点率。对于大塔，要保证泛点率小于 80%。

分别按以下两式计算泛点率：

$$\text{泛点率} = \frac{V_s\sqrt{\frac{\rho_V}{\rho_L - \rho_V}} + 1.36L_S Z_L}{KC_F A_b} \times 100\%$$

$$\text{泛点率} = \frac{V_s\sqrt{\frac{\rho_V}{\rho_L - \rho_V}}}{0.78KC_F A_T} \times 100\%$$

其中，$Z_L = D - 2W_d = 2.6 - 2 \times 0.286 = 2.028$m

$$A_b = A_T - 2A_f = 5.307 - 2 \times 0.292 = 4.723m^2$$

无泡沫正常系统，$K = 1.0$，$H_T$=0.6，$\rho_V = 1.09\text{kg/m}^3$

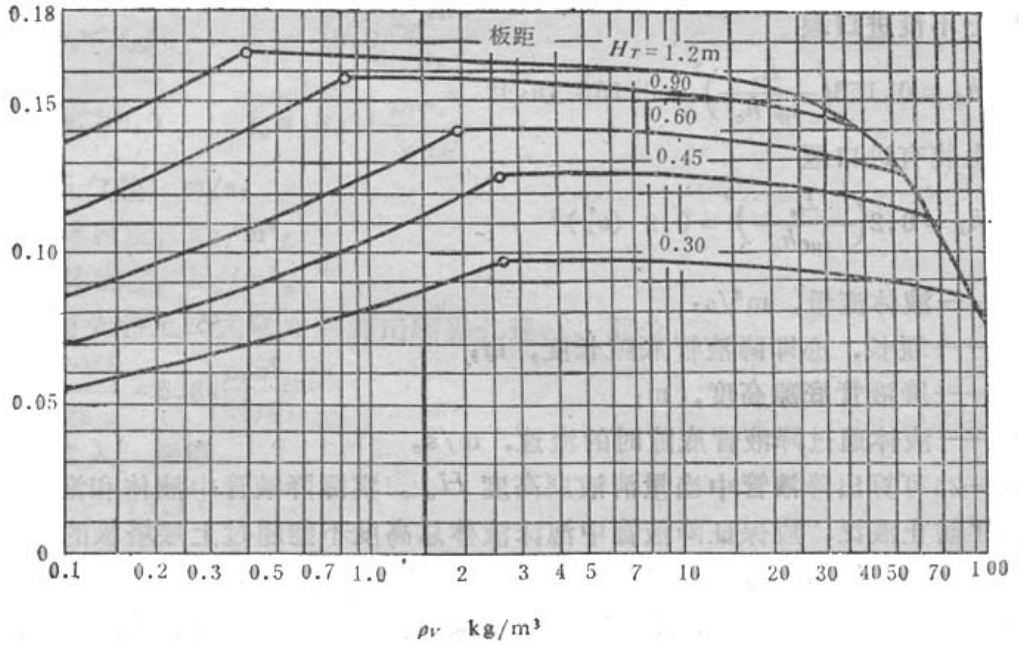



图 2-6 泛点负荷系数图

查图得，泛点负荷系数 $C_F$=0.13,将上述数据代入得：

$$泛点率=\frac{\frac{33490.73}{3600}\sqrt{\frac{1.09}{764.34-1.09}}+1.36\times\frac{55.61}{3600}\times 2.028}{1.0\times 0.13\times 4.723}\times 100\%=64\%$$

$$泛点率=\frac{\frac{33490.73}{3600}\sqrt{\frac{1.09}{764.34-1.09}}}{0.78\times 1.0\times 0.13\times 5.307}\times 100\%=65\%$$

根据以上两条式子算出泛点率都在 80%以下，故雾沫夹带量能够满足要求

（4）漏液

取阀孔动能因数 $F_0$=5,作为控制漏夜量的操作下限。

由

$$V_S=0.785d_0^2Nu_0=0.785\times 0.039^2\times 798\times\frac{5}{\sqrt{1.09}}=4.78\text{m}^3/\text{s}$$

◆ CUP-TOWER 软件辅助校核

使用 cup-tpwer 辅助设计，根据气液流量分布，将全塔分为精馏段、进料板、提馏段分别进行水力学校核，核算结果满足得到塔板负荷性能图：

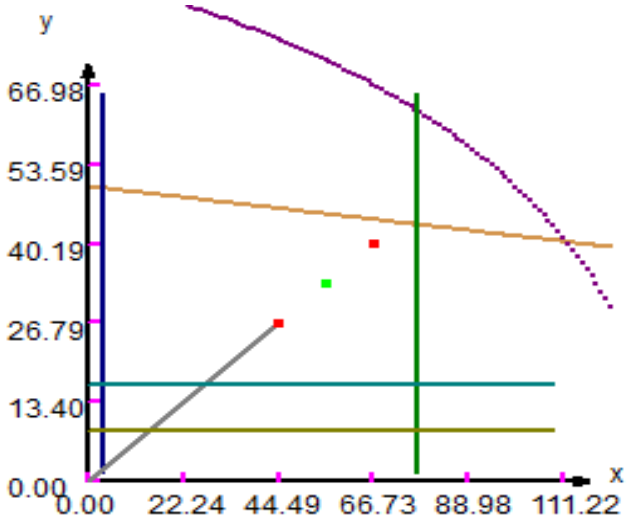



**图 2-78 塔板性能图**

操作弹性为：

$$\frac{40.2}{17.2} = 2.36$$

同时得到本塔相关内件结构及尺寸如表 2-12，2-13，2-14；

**表 2-12 塔板结构参数**

| | 物性 | 值 | 单位 |
|---|---|---|---|
| | 塔盘类型 | SIEVE | |
| | 直径 | 2.95 | meter |
| | 塔盘间距 | 0.71 | meter |
| | 通道数 | 1 | |
| | 孔直径 | 0.0127 | meter |
| | 开孔面积/有效面积 | 0.1 | |
| | 塔板表厚度 | 10 GAUGE | |
| | 塔板表厚度值 | 3.4 | mm |
| | 横截面积 | 6.83493 | sqm |
| | 有效面积 | 5.43429 | sqm |
| | 净面积 | 6.13461 | sqm |

**表 2-13 溢流区尺寸**

| | |
|---|---|
| 降液管面积比，% | 1.51 |
| 堰径比，% | 40.71 |

| | |
|---|---|
| 降液管顶部宽度，m | 0.113 |
| 弯折距离，m | 0.023 |
| 降液管底部宽度，m | 0.0896 |
| 受液盘深度，m | 0.050 |
| 受液盘宽度，m | 0.113 |
| 堰高，m | 0.049 |
| 降液管底隙，m | 0.02 |
| 降液管顶部面积，m2 | 0.080 |
| 降液管底部面积，m2 | 0.057 |
| 顶部堰长，m | 1.059 |
| 底部堰长，m | 0.949 |

**表 2-14 圆形浮阀参数**

| | |
|---|---|
| 浮阀孔径，mm | 39 |
| 单阀重量，g | 33 |

#### 2.4.2.6 接管及开孔设计

（1）接管设计

①塔顶蒸汽接管

取塔顶蒸汽流速$u_v = 20m/s$，根据 Aspen 数据$V_s = 8.32m/s$，则管径为：

$$d_2 = \sqrt{\frac{V}{0.785 \times u}} = 728mm$$

选取 DN=800，为$\emptyset 813 \times 20mm$的热轧无缝钢管。

实际流速：

$$u = \frac{V}{0.785 \times d^2} = \frac{8.32}{0.785 \times 0.773^2} = 17.7m/s$$

②进料管

取进料管液体流速为 1.5m/s，饱和液体进料，液相体积流量为$V_L = 24.11m^3$

/h

则进料管径

$$d_2 = \sqrt{\frac{V}{0.785 \times u}} = 75.4\text{mm}$$

选取 DN=80mm，规格为$\emptyset 89 \times 4\text{mm}$的热轧无缝钢管。

实际流速：

$$u = \frac{V}{0.785 \times d^2} = 1.16\ \text{m/s}$$

③塔底流出管

取釜液流出速率 1.5m/s，根据 Aspen 数据 $V_L$=0.0077m3/s

则管径：

$$d_2 = \sqrt{\frac{V}{0.785 \times u}} = 80.9\text{mm}$$

选取 DN=80，规格为$\emptyset 89 \times 4\text{mm}$的热轧无缝钢管。

实际流速：

$$u = \frac{V}{0.785 \times d^2} = 1.32\ \text{m/s}$$

（2）人孔

塔顶部、中部、塔釜，都要根据制造和检修的需要设置人孔。根据同塔段管口的数量和管口内件形式的不同，确定人孔方位需要考虑的因素也不同。本塔人孔均布置在操作侧，朝向塔的检修预留地，方便塔内件安装检修，不同高度的人孔的方位朝向同一个方向，整齐美观的同时又能使塔顶吊柱兼顾到尽可能多的人孔。

全塔包括塔顶 1 个，塔中 2 个，塔釜 1 个，共计 4 个人孔，第一个人孔高于第一块塔板 750mm，各人孔间距约 9 块理论板的高度。

（3）塔体和封头选材

本塔设备设计压力 0.106Mpa，设计温度 136℃，介质无腐蚀性，选用一般碳钢 Q235B。综合考虑力学性能及制造成本，封头选取标准椭圆形封头。

①筒体

$$\delta = \frac{PD_i}{2[\sigma]^t\varphi - P} = \frac{0.11 \times 2600}{2 \times 110 \times 1 - 0.11} = 1.18mm$$

小于碳素钢和低合金钢最小厚度 3mm，取腐蚀余量 C2=1mm，

考虑常压容器制造、运输、安装时的刚度要求，取名义壁厚：

$$\delta_n = \delta_{min} + C_2 + \Delta = 8mm$$

（$\delta_{min} - \delta > C_1 = 0.3mm$）

②上封头

$$\delta = \frac{PD_i}{2[\sigma]^t\varphi - P} = \frac{0.11 \times 2600}{2 \times 110 \times 1 - 0.11} = 1.18mm$$

对于标准椭圆封头，其最大薄膜应力位于椭球顶点，其厚度可与筒体取一致，以减弱应力集中。因此，取

$$\delta_n = 8mm$$

③下封头

计算过程同上封头，

$$\delta_n = 8mm$$

④裙座

塔体内径 Di=2600mm>800mm,取裙座壁厚 16mm，选用圆筒形裙座。

基础环内径$D_{bi} = (2600 + 2 \times 16) - 0.3 \times 2600 = 1852mm$

基础环外径$D_{b0} = (2600 + 2 \times 16) + 0.3 \times 2600 = 3412mm$

圆整：$D_{bi} = 1852mm$，$D_{b0} = 3412mm$。取裙座高度 6m

根据强度校核结果，选用地脚螺栓公称直径 90mm，一共 16 个。

综上，本塔结构参数相关设计结果如表 2-15：

**表 2-15 塔设备结构设计结果**

| 塔体直径，mm | | 2600 |
|---|---|---|
| 筒体 | 材质 | Q235-B |
| | 长度，mm | 16470 |
| | 壁厚，mm | 8 |
| 裙座 | 材质 | Q235-B |

| | | |
|---|---|---|
| | 高度，mm | 6000 |
| | 壁厚，mm | 16 |
| 上封头 | 材质 | Q235-B |
| | 壁厚，mm | 8 |
| | 直边高度，mm | 40 |
| | 总深度，mm | 690 |
| 下封头 | 材质 | Q235-B |
| | 壁厚，mm | 8 |
| | 直边高度，mm | 40 |
| | 总深度，mm | 690 |
| 地脚螺栓 | 公称直径，mm | 90 |
| | 个数 | 16 |

### 2.4.3 塔体机械强度校核

使用 SW6-2011 强度校核软件进行强度校核、风压载荷、地震载荷。

其中耐压实验类型为液压实验，试验压力 0.28MPa，校核结果合格；茂名基本风压 700N/m$^2$，厂址地震防烈度低于 7 度，校核结果均合格。详细校核结果如下：

| **塔 设 备 校 核** | 计算单位 | **硫酸赢团队** |
|---|---|---|
| 计算条件 | | |
| 塔型 | **板式** | |
| 容器分段数(不包括裙座) | **1** | |
| 压力试验类型 | **液压** | |
| 封头 | 上封头 | 下封头 |
| 材料名称 | **Q235-B** | **Q235-B** |
| 名义厚度(mm) | **8** | **8** |

| 腐蚀裕量(mm) | | 3 | | | 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 焊接接头系数 | | 1 | | | 1 | |
| 封头形状 | | 椭圆形 | | | 椭圆形 | |
| 圆筒 | 设计压力(Mpa) | 设计温度(℃) | 长度(mm) | 名义厚度(mm) | 内径/外径(mm) | 材料名称(即钢号) |
| 1 | 0.1 | 120 | 14400 | 8 | 2600 | Q235-B |
| 圆筒 | 腐蚀裕量(mm) | 纵向焊接接头系数 | 环向焊接接头系数 | 外压计算长度(mm) | 试验压力(立)(Mpa) | 试验压力(卧)(Mpa) |
| 1 | 3 | 1 | 1 | 0 | 0.1306 | 0.278633 |

| 内件及偏心载荷 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 介质密度 | | kg/m³ | 764.34 | | | |
| 塔釜液面离焊接接头的高度 | | mm | 870 | | | |
| 塔板分段数 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 塔板型式 | | 浮阀 | | | | |
| 塔板层数 | | 25 | | | | |
| 每层塔板上积液厚度 | m | 80 | | | | |
| 最高一层塔板高度 | m | 20270 | | | | |
| 最低一层塔板高度 | m | 5870 | | | | |
| 填料分段数 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 填料顶部高度 | m | | | | | |
| 填料底部高度 | m | | | | | |
| 填料密度 | g/m³ | | | | | |
| 集中载荷数 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 集中载荷 | g | | | | | |
| 集中载荷高度 | m | | | | | |
| 集中载荷中心至容器中心线距离 | m | | | | | |
| 塔器附件及基础 | | | | | | |
| 塔器附件质量计算系数 | | **1.2** | 基本风压 | $N/m^2$ | **700** | |
| 基础高度 | m | **4000** | | | | |
| 塔器保温层厚度 | m | **50** | 保温层密度 | $kg/m^3$ | **350** | |
| 裙座防火层厚度 | m | **0** | 防火层密度 | $kg/m^3$ | **0** | |
| 管线保温层厚度 | m | **50** | 最大管线外径 | mm | **350** | |
| 笼式扶梯与最大管线的相对位置 | | **90** | | | | |
| 场地土类型 | | **I** | 场地土粗糙度类别 | | **A** | |
| 地震设防烈度 | | **低于 7 度** | 设计地震分组 | | **第一组** | |
| 地震影响系数最大值αmax | | **3.28545e-66** | 阻尼比 | | **0.01** | |
| 塔器上平台总个数 | | **3** | 平台宽度 | mm | **1000** | |
| 塔器上最高平台高度 | m | **20270** | 塔器上最低平台高度 | mm | **5870** | |
| 裙座 | | | | | | |
| 裙座结构形式 | **圆筒形** | | 裙座底部截面内径 | m | **1900** | |
| 裙座与壳体连接形式 | **对接** | | 裙座高度 | m | **5000** | |
| 裙座材料名称 | **Q235-B** | | 裙座设计温度 | | **40** | |
| 裙座腐蚀裕量 | m | **3** | 裙座名义厚度 | m | **16** | |
| 裙座材料许用应力 | Pa | **115.25** | | | | |
| 裙座与筒体连接段的材 | **Q235-B** | | 裙座与筒体连接段在 | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 料 | | | **111** | | |
| 裙座与筒体连接段长度 | m | **150** | | | |
| 裙座上同一高度处较大孔个数 | | **1** | 裙座较大孔中心高度 | m | **900** |
| 裙座上较大孔引出管内径（或宽度） | m | **86.2** | 裙座上较大孔引出管厚度 | m | **1.4** |
| 裙座上较大孔引出管长度 | m | **100** | | | |
| 地脚螺栓及地脚螺栓座 | | | | | |
| 地脚螺栓材料名称 | | **Q235** | 地脚螺栓材料许用应力 | Pa | **147** |
| 地脚螺栓个数 | | **16** | 地脚螺栓公称直径 | m | **90** |
| 全部筋板块数 | | **16** | 相邻筋板最大外侧间距 | m | **687.442** |
| 筋板内侧间距 | m | **150** | | | |
| 筋板厚度 | m | **28** | 筋板宽度 | m | **220** |
| 盖板类型 | | **分块** | 盖板上地脚螺栓孔直径 | m | **120** |
| 盖板厚度 | m | **46** | 盖板宽度 | m | **280** |
| 垫板 | | **有** | 垫板上地脚螺栓孔直径 | m | **93** |
| 垫板厚度 | m | **30** | 垫板宽度 | m | **160** |
| 基础环板外径 | m | **2246** | 基础环板内径 | m | **1586** |
| 基础环板名义厚度 | m | **40** | | | |

计算结果

容器壳体强度计算

| 元件名称 | 压力设计<br>名义厚度 (mm) | 直立容器校核<br>取用厚度 (mm) | 许用内压 (MPa) | 许用外压 (MPa) |
|---|---|---|---|---|
| 下封头 | **8** | **8** | **0.401** | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 第 1 段圆筒 | **8** | **8** | **0.401** | | |
| 上封头 | **8** | **8** | **0.401** | | |
| 裙座 | | | | | |
| | 名义厚度 (mm) | 取用厚度 (mm) | | | |
| | **16** | **16** | | | |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 风载及地震载荷 | | | | | | |
| 0－0 | A－A | 裙座与筒体连接段 | 1－1(筒体) | 1－1(下封头) | 2－2 | 3－3 |
| 操作质量$m_0 = m_{01} + m_{02} + m_{03} + m_{04} + m_{05} + m_a + m_e$ | | | | | | |
| **43001.8** | **42149.3** | **37845.5** | **37703.4** | **37703.4** | | |
| 最小质量$m_0 = m_{01} + 0.2m_{02} + m_{03} + m_{04} + m_a + m_e$ | | | | | | |
| **22764.3** | **21911.7** | **17607.9** | **17465.8** | **17465.8** | | |
| 压力试验时质量 | | | | | | |
| **111563** | **110711** | **106407** | **24785.2** | **24785.2** | | |
| 风弯矩$M_w^{I-I} = P_i \cdot l_i / 2 + P_{i+1} \cdot (l_i + l_{i+1} / 2) + P_{i+2} \cdot (l_i + l_{i+1} + l_{i+2} / 2) + \ldots$ | | | | | | |
| **8.137e+08** | **7.456e+08** | **4.716e+08** | **4.62e+08** | **4.62e+08** | | |
| Mca(I) $M_{ca}^{I-I} = (2\pi / T_1)^2 Y_{T1} \sum_{k=i}^{n} m_k (h_k - h) \phi_{k1}(h)$ | | | | | | |
| | | | | | | |
| Mca (II) $M_{ca}^{I-I} = (2\pi / T_2)^2 Y_{T2} \sum_{k=i}^{n} m_k (h_k - h) \phi_{k2}(h)$ | | | | | | |
| | | | | | | |
| 顺风向弯矩 $M_{cw}^{I-I}$ (I) | | | | | | |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | |
| 顺风向弯矩 $M_{cw}^{I-I}$ (Ⅱ) | | | | | | |
| | | | | | | |
| 组合风弯矩 $M_{ew}=max(M_w^{I-I},\sqrt{(M_{ca}^{I-I})^2+(M_{cw}^{I-I})^2})$ | | | | | | |
| **8.137e+08** | **7.456e+08** | **4.716e+08** | **4.62e+08** | **4.62e+08** | | |
| 地震弯矩 $M_E^{I-I}=\sum_{k=i}^{n}F_{1k}(h_k-h)$ 注:计及高振型时,此项按 B.24 计算 | | | | | | |
| **0** | **0** | **0** | **0** | **0** | | |
| 偏心弯矩 $M_e=m_e g l_e$ | | | | | | |
| **0** | **0** | **0** | **0** | **0** | | |
| 最大弯矩 $M_{max}=max(M_w^{I-I}+M_e,M_E^{I-I}+0.25M_w^{I-I}+M_e)$<br>需横风向计算时 $M_{max}=max(M_{ew}^{I-I}+M_e,M_E^{I-I}+0.25M_w^{I-I}+M_e)$ | | | | | | |
| **8.137e+08** | **7.456e+08** | **4.716e+08** | **4.62e+08** | **4.62e+08** | | |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 垂直地震力 $F_{vi}=m_i h_i F_v^{0-0}/\sum_{k=1}^{n}m_k h_k(i=1,2,..,n)$ | | | | | | |
| **0** | **0** | **0** | **0** | **0** | | |
| 应力计算 | | | | | | |
| $\sigma_{11}=P_c D_i/4\delta_{ei}$ | | | | | | |
| | | | **13.83** | **13.83** | | |
| $\sigma_{12}=(m_0^{I-I}g\pm F_v^{I-I})/\pi D_i\delta_{ei}$ | | | | | | |
| **5.56** | **5.52** | **4.90** | **9.63** | **9.63** | | |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\sigma_{13}=4M_{max}^{I-I}/\pi D_i^2\delta_{ei}$ | | | | | | |
| **22.60** | **19.95** | **13.10** | **18.52** | **18.52** | | |
| $\sigma_{22}=(m_0^{I-I}g\pm F_v^{I-I})/\pi D_i\delta_{ei}$ | | | | | | |
| | | | **4.46** | **4.46** | | |
| $\sigma_{31}=P_T D_i/4\delta_{ei}$ | | | | | | |
| | | | **18.06** | **18.06** | | |
| $\sigma_{32}=m_T^{I-I}g/\pi D_i\delta_{ei}$ | | | | | | |
| **14.44** | **14.49** | **13.77** | **6.33** | **6.33** | | |
| $\sigma_{33}=4(0.3M_w^{I-I}+M_e)/\pi D_i^2\delta_{ei}$ | | | | | | |
| **6.78** | **5.98** | **3.93** | **5.55** | **5.55** | | |
| $[\sigma]^t$ | | | | | | |
| **115.25** | **115.25** | **111.00** | **111.00** | **111.00** | | |
| B | | | | | | |
| **109.73** | **109.73** | **109.73** | **44.93** | **44.93** | | |
| 组合应力校核 | | | | | | |
| $\sigma_{A1}=\sigma_1-\sigma_2+\sigma_3$(内压),$-\sigma_2+\sigma_3$(外压) | | | | | | |
| | | | **22.71** | **22.71** | | |
| 许用值 | | | | | | |
| | | | **133.20** | **133.20** | | |
| $\sigma_{A2}=\sigma_2+\sigma_3$(内压),$\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3$(外压) | | | | | | |
| **28.16** | **25.46** | **17.99** | **22.98** | **22.98** | | |
| 许用值 | | | | | | |
| **131.68** | **131.68** | **131.68** | **53.91** | **53.91** | | |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\sigma_{A3}=\sigma_1-\sigma_2+\sigma_3$ | | | | | | |
| | | | **17.28** | **17.28** | | |
| 许用值 | | | | | | |
| | | | **211.50** | **211.50** | | |
| $\sigma_{A4}=\sigma_2+\sigma_3$ | | | | | | |
| **21.22** | **20.47** | **17.70** | **11.89** | **11.89** | | |
| 许用值 | | | | | | |
| **109.73** | **109.73** | **109.73** | **44.93** | **53.91** | | |
| $\sigma=(p_T+9.81\rho H_w)(D_i+\delta_{ei})/2\delta_{ei}$ | | | | | | |
| | | | **77.21** | **77.21** | | |
| 许用值 | | | | | | |
| | | | **211.50** | **211.50** | | |
| 校核结果 | | | | | | |
| **合格** | **合格** | **合格** | **合格** | **合格** | | |

注 1:$\sigma_{ij}$ 中 i 和 j 的意义如下

i=1 操作工况　　j=1 设计压力或试验压力下引起的轴向应力（拉）

i=2 检修工况　　j=2 重力及垂直地震力引起的轴向应力（压）

i=3 液压试验工况　　j=3 弯矩引起的轴向应力（拉或压）

[σ]t 设计温度下材料许用应力　　B 设计温度下轴向稳定的应力许用值

注 2:

$\sigma_{A1}$: 轴向最大组合拉应力　　$\sigma_{A2}$: 轴向最大组合压应力

$\sigma_{A3}$: 液压试验时轴向最大组合拉应力　　$\sigma_{A4}$: 液压试验时轴向最大组合压应力

σ: 试验压力引起的周向应力

注 3: 单位如下

质量:kg　　力:N　　弯矩:N·mm　　应力:MPa

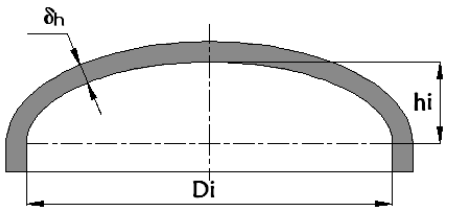
| 计算结果 | | |
|---|---|---|
| 地脚螺栓及地脚螺栓座 | | |
| 基础环板抗弯断面模数$Z_b=\frac{\pi(D_{ob}^4-D_{ib}^4)}{32D_{ob}}$ | $mm^3$ | **8.35749e+08** |
| 基础环板面积$A_b=\frac{\pi(D_{ob}^2-D_{ib}^2)}{4}$ | $mm^2$ | **1.98636e+06** |
| 基础环板计算力矩$max(M_x=C_x\sigma_{bmax}b^2, M_y=C_y\sigma_{bmax}l^2)$ | N·mm | **13975.2** |
| 基础环板需要厚度 | mm | **23.88** |
| 基础环板厚度厚度校核结果 | | **合格** |
| 混凝土地基上最大压应力<br>$\sigma_{b\max}=\begin{cases}M_{\max}^{0-0}/Z_b+(m_0g\pm F_v^{0-0})/A_b\\0.3M_w^{0-0}+M_e)/Z_b+m_{\max}g/A_b\end{cases}$ 中大值 | MPa | **1.19** |
| 地脚螺栓受风载时最大拉应力$\sigma_B=\frac{M_w^{0-0}+M_e}{Z_b}-\frac{m_{\min}g}{A_b}$ | MPa | **0.86** |
| 地脚螺栓受地震载荷时最大拉应力<br>$\sigma_B=\frac{M_E^{0-0}+0.25M_w^{0-0}+M_e}{Z_b}-\frac{m_0g-F_v^{0-0}}{A_b}$ | MPa | **0.03** |
| 地脚螺栓需要的螺纹小径$d_1=\sqrt{\frac{4\sigma_BA_b}{\pi n[\sigma]_{bt}}}+C_2$ | mm | **33.43** |
| 地脚螺栓实际的螺纹小径 | mm | **83.505** |
| 地脚螺栓校核结果 | | **合格** |
| 筋板压应力$\sigma_G=\frac{F}{n_1\delta_Gl_2^{'}}$ | MPa | **24.32** |
| 筋板许用应力 | MPa | **95.18** |
| 筋板校核结果 | | **合格** |
| 盖板最大应力$\sigma_z=\frac{3F_1l_3^{'}}{4(l_2^{'}-d_3)\delta_c^2+(l_4^{'}-d_2)\delta_z^2}$ | MPa | **58.98** |
| 盖板许用应力 | MPa | **147** |
| 盖板校核结果 | | **合格** |
| 裙座与壳体的焊接接头校核 | | |
| 焊接接头截面上的塔器操作质量 | kg | **37703.4** |

| | | |
|---|---|---|
| 焊接接头截面上的最大弯矩 | N·mm | **4.62019e+08** |
| 对接接头校核 | | |
| 对接接头横截面 $\pi D_{it}\delta_{es}$ | $mm^2$ | **75806.6** |
| 对接接头抗弯断面模数 $\pi D_{it}^2\delta_{es}/4$ | $mm^3$ | **3.60081e+07** |
| 对接焊接接头在操作工况下最大拉应力 $\frac{4M_{\max}^{J-J}}{\pi D_{it}^2\delta_{es}}-\frac{m_0^{J-J}g-F_v^{J-J}}{\pi D_{it}\delta_{es}}$ | MPa | **7.93** |
| 对接焊接接头拉应力许可值 | MPa | **79.92** |
| 对接接头拉应力校核结果 | **合格** | |
| 搭接接头校核 | | |
| 搭接接头横截面 $A_w=0.7\pi D_{ot}\delta_{es}$ | $mm^2$ | |
| 搭接接头抗剪断面模数 $Z_w=0.55D_{ot}^2\delta_{es}$ | $mm^3$ | |
| 搭接焊接接头在操作工况下最大剪应力 $\frac{M_{\max}^{J-J}}{Z_w}+\frac{m_0^{J-J}g+F_v^{J-J}}{A_w}$ | MPa | |
| 搭接焊接接头在操作工况下的剪应力许可值 | MPa | |
| 搭接焊接接头在试验工况下最大剪应力 $\frac{0.3M_w^{J-J}+M_e}{Z_w}+\frac{m_{\max}^{J-J}g}{A_w}$ | MPa | |
| 搭接焊接接头在试验工况下的剪应力许可值 | MPa | |
| 搭接接头拉应力校核结果 | | |
| 主要尺寸设计及总体参数计算结果 | | |
| 裙座设计名义厚度 | mm | **16** |
| 容器总容积 | $mm^3$ | **8.14797e+10** |
| 直立容器总高 | mm | **20098** |

| | | |
|---|---|---|
| 壳体和裙座质量 | kg | **12126.6** |
| 附件质量 | kg | **2425.31** |
| 内件质量 | kg | **9149.18** |
| 保温层质量 | kg | **2104.29** |
| 平台及扶梯质量 | kg | **4278.24** |
| 操作时物料质量 | kg | **12918.2** |
| 液压试验时液体质量 | kg | **81479.7** |
| 吊装时空塔质量 | kg | **16381.7** |
| 直立容器的操作质量<br>$m_0 = m_{01} + m_{02} + m_{03} + m_{04} + m_{05} + m_a + m_e$ | kg | **43001.8** |
| 直立容器的最小质量<br>$m_{min} = m_{01} + 0.2m_{02} + m_{03} + m_{04} + m_a + m_e$ | kg | **22764.3** |
| 直立容器的最大质量<br>$m_{max} = m_{01} + m_{02} + m_{03} + m_{04} + m_a + m_w + m_e$ | kg | **111563** |
| 空塔重心至基础环板底截面距离 | mm | **9532.31** |
| 直立容器自振周期 | s | **0.40** |
| 第二振型自振周期 | s | |
| 第三振型自振周期 | s | |
| 临界风速(第一振型) | | |
| 临界风速(第二振型) | | |
| 雷诺系数 | | |
| 设计风速 | | |
| 风载对直立容器总的横推力$\sum P_i$ | N | **76670** |
| 地震载荷对直立容器总的横推力$\sum F_{1K}$ | N | **0** |
| 操作工况下容器顶部最大挠度 | mm | **6.88416** |

| | | |
|---|---|---|
| 容器许用外压 | MPa | |
| 注：内件质量指塔板质量；<br>填料质量计入物料质量；<br>偏心质量计入直立容器的操作质量、最小质量、最大质量中。 | | |

| **上封头校核计算** | 计算单位 | | **硫酸赢团队** |
|---|---|---|---|
| 计算所依据的标准 | | | **GB 150.3-2011** |
| 计算条件 | | | 椭圆封头简图 |
| 计算压力 $P_c$ | **0.10** | MPa | |
| 设计温度 $t$ | **120.00** | ° C | |
| 内径 $D_i$ | **2600.00** | mm | |
| 曲面深度 $h_i$ | **650.00** | mm | |
| 材料 | **Q235-B (板材)** | | |
| 设计温度许用应力$[\sigma]^t$ | **111.00** | MPa | |
| 试验温度许用应力$[\sigma]$ | **116.00** | MPa | |
| 钢板负偏差 $C_1$ | **0.30** | mm | |
| 腐蚀裕量 $C_2$ | **3.00** | mm | |
| 焊接接头系数$\phi$ | **1.00** | | |

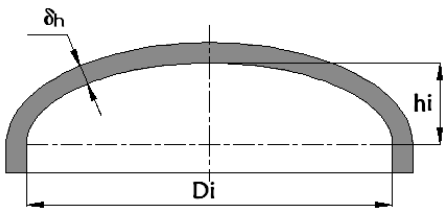



压力试验时应力校核

| | | |
|---|---|---|
| 压力试验类型 | **液压试验** | |
| 试验压力值 | $P_T = 1.25P_c\frac{[\sigma]}{[\sigma]^t} =$ **0.2786** (或由用户输入) | MPa |
| 压力试验允许通过的应力$[\sigma]_t$ | $[\sigma]_T \le 0.90\ \sigma_s =$ **211.50** | MPa |
| 试验压力下封头的 | $\sigma_T = \frac{p_T.(KD_i + 0.5\delta_e)}{2\delta_e.\phi} =$ **77.14** | MPa |

| | | |
|---|---|---|
| 应力 | | |
| 校核条件 | $\sigma_{T\leq}[\sigma]_T$ | |
| 校核结果 | **合格** | |
| 厚度及重量计算 | | |
| 形状系数 | $K=\frac{1}{6}\left[2+\left(\frac{D_i}{2h_i}\right)^2\right]$ **= 1.0000** | |
| 计算厚度 | $\delta_h=\frac{KP_cD_i}{2[\sigma]^t\phi-0.5P_c}$ **= 1.17** | mm |
| 有效厚度 | $\delta_{eh}=\delta_{nh}-C_1-C_2$= **4.70** | mm |
| 最小厚度 | $\delta_{min}$ = **3.90** | mm |
| 名义厚度 | $\delta_{nh}$ = **8.00** | mm |
| 结论 | **满足最小厚度要求** | |
| 重量 | **468.56** | Kg |
| 压力计算 | | |
| 最大允许工作压力 | $[P_w]=\frac{2[\sigma]^t\phi\delta_e}{KD_i+0.5\delta_e}$ **= 0.40095** | MPa |
| 结论 | **合格** | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **下封头校核计算** | | 计算单位 | **硫酸赢团队** |
| 计算所依据的标准 | | | **GB 150.3-2011** |
| 计算条件 | | | 椭圆封头简图 |
| 计算压力 $P_c$ | **0.11** | MPa | |
| 设计温度 $t$ | **120.00** | ° C | |
| 内径 $D_i$ | **2600.00** | mm | |
| 曲面深度 $h_i$ | **650.00** | mm | |
| 材料 | **Q235-B (板材)** | | |



| | | | |
|---|---|---|---|
| 设计温度许用应力$[\sigma]^t$ | **111.00** | MPa | |
| 试验温度许用应力$[\sigma]$ | **116.00** | MPa | |
| 钢板负偏差 $C_1$ | **0.30** | mm | |
| 腐蚀裕量 $C_2$ | **3.00** | mm | |
| 焊接接头系数$\phi$ | **1.00** | | |

| | | |
|---|---|---|
| 压力试验时应力校核 | | |
| 压力试验类型 | **液压试验** | |
| 试验压力值 | $P_T = 1.25P_c\frac{[\sigma]}{[\sigma]^t} =$ **0.2786** (或由用户输入) | MPa |
| 压力试验允许通过的应力$[\sigma]_t$ | $[\sigma]_T \le 0.90\ \sigma_s =$ **211.50** | MPa |
| 试验压力下封头的应力 | $\sigma_T = \frac{p_T.(KD_i + 0.5\delta_e)}{2\delta_e.\phi} =$ **77.14** | MPa |
| 校核条件 | $\sigma_T \le [\sigma]_T$ | |
| 校核结果 | **合格** | |
| 厚度及重量计算 | | |
| 形状系数 | $K = \frac{1}{6}\left[2 + \left(\frac{D_i}{2h_i}\right)^2\right] =$ **1.0000** | |
| 计算厚度 | $\delta_h = \frac{KP_cD_i}{2[\sigma]^t\phi - 0.5P_c} =$ **1.31** | mm |
| 有效厚度 | $\delta_{eh} = \delta_{nh} - C_1 - C_2 =$ **4.70** | mm |
| 最小厚度 | $\delta_{min} =$ **3.90** | mm |
| 名义厚度 | $\delta_{nh} =$ **8.00** | mm |
| 结论 | **满足最小厚度要求** | |
| 重量 | **468.56** | kg |
| 压力计算 | | |

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：

https://d.book118.com/157042145050010033