

福州大学

## 本科生毕业设计（论文）

题 目： 半管夹套反应釜的设计

姓 名： 范翌麟

学 号： 041802108

学 院： 石油化工学院

专 业： 过程装备与控制工程

年 级： 2018 级

校内指导教师： \_\_\_\_\_（签名）

校外指导教师： \_\_\_\_\_（签名）

年    月    日

## 福州大学本科生毕业设计（论文）诚信承诺书

学生姓名	范墨麟	年 级	2018 级	学 号	041802108
所在学院	石油化工学院			所学专业	过程装备与控制工程
毕业设计（论文）	中文：半管夹套反应釜的设计				
题目	外文：Half pipe jacketed reactor				
<div style="text-align: center;"><b>学生承诺</b></div> <p>我承诺在毕业设计（论文）过程中遵守学校有关规定，恪守学术规范，未存在买卖、代写、作假等行为。在本人的毕业设计（论文）中未剽窃、抄袭他人的学术观点、思想和成果，未篡改实验数据。如有违规行为发生我愿承担一切责任，接受学校的处理。</p> <p style="text-align: right;">学生（签名）： 年 月 日</p>					
<div style="text-align: center;"><b>指导教师承诺</b></div> <p>我承诺在指导学生毕业设计（论文）过程中遵守学校有关规定，恪守学术规范，经过本人认真的核查，该同学未存在买卖、代写、作假等行为，毕业设计（论文）中未发现有剽窃、抄袭他人的学术观点、思想和成果的现象，未发现篡改实验数据。</p> <p style="text-align: right;">指导教师（签名）： 年 月 日</p>					

# 半管夹套反应釜的设计

## 摘 要

本设计半管夹套反应釜做为改性沥青的反应容器，是非炼磨改性沥青产品的生产设备中的一个重要设备。非炼磨改性沥青生产过程涉及加热与搅拌，半管夹套反应釜做为有换热功能的机械搅拌反应器，可以用于沥青、溶剂和 SBS 颗粒等原料的混合加热操作。

设计根据福州大学石油化工学院“橇装式改性沥青生产装置”项目中反应罐的一些工艺参数设计的半管夹套反应釜生产能力为每小时 4.436 吨、换热功率达到 350kW、一次装载量为 4.436 吨、总高度（不计电动机）3.39 米、空载自重 1.69 吨、满载总重 7.18 吨。设计介绍了选题来源、主要设备与工艺流程，对反应釜的釜体、半圆管夹套、内盘管、搅拌桨、搅拌轴和保温层进行设计；对半圆管夹套、内盘管和换热介质进行传热计算；对釜体、半圆管夹套和搅拌轴等机械结构进行强度校核；以及轴承、机械密封、机架、支座等零件；导热油加热炉、沥青泵、电动机、减速器、等配件和换热介质导热油的选型。

经过选型、设计和计算，本设计半管夹套反应釜的釜体与半圆管夹套在设计温度及内压下强度校核合格；经计算其在外压和自重作用下不会失稳；釜体开孔采用等面积法计算进行补强，开孔均有接管等补强结构，经计算，无需另行补强；其换热结构半圆管夹套和内盘管满足传热设计要求；其搅拌轴满足转速、扭转变形等限制范围内；其保温层外壁温度和允许最大热损失满足相关标准。

**关键词：**反应釜，半管夹套，改性沥青

# **Design of half pipe jacketed reactor**

## **Abstract**

In this design, the half pipe jacketed reactor, as the reaction vessel of modified asphalt, is an important equipment in the production equipment of non refining and non grinding modified asphalt products. It play a major role in the production process of non refining and non grinding modified asphalt by heating and mixing. As a mechanical stirring reactor with heat exchange function, the half pipe jacketed reactor can be used for the mixing and heating operation of raw materials such as asphalt, solvent and SBS particles. The design is based on some process parameters of the reaction tank in the " *Skid Mounted Modified Asphalt Production Unit* " project of the school of petrochemical industry of Fuzhou University. The production capacity of the half pipe jacketed reactor is 4.436 tons per hour, the heat exchange power is 350kW, the primary loading capacity is 4.436 tons, the total height (excluding the motor) is 3.39 meters, the no-load self weight is 1.69 tons, and the full load total weight is 7.18 tons. The design introduces the source of the topic, main equipment and process flow, and designs the kettle body, half pipe jacket, inner coil, stirring paddle, stirring shaft and thermal insulation layer of the reactor; The heat transfer calculation of half-circular pipe jacket, inner coil and heat exchange medium; Check the strength of mechanical structures such as kettle body, half-circular pipe jacket and mixing shaft; And bearing, mechanical seal, frame, support and other parts; Type selection of heat transfer oil heating furnace, asphalt pump, motor, reducer, and other accessories and heat exchange medium. After type selection, design and calculation, the kettle body and halfcircular pipe jacket of the half pipe jacket reactor in this design are checked to be qualified at the design temperature and internal pressure; After calculation, it will not lose stability under external pressure and self weight; The opening of the kettle body is reinforced by the equal area method and the opening is provided with reinforcement structures such as connecting pipe. After calculation, there is no need for additional reinforcement; Its heat exchange structure, half-circular tube jacket and inner coil tube meet the heat transfer design requirements; The mixing shaft meets the limits of rotating speed and torsional deformation; The outer wall temperature of the insulation layer and the maximum allowable heat loss meet the relevant standards.

**Key words: reactor, half pipe jacket, modified asphalt**

# 目录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 设计依据	1
1.3 设计原则	1
1.4 设计范围	2
1.5 设计规模	2
1.6 说明	2
第 2 章 工艺及设备说明	3
2.1 改性沥青组分及质量指标	3
2.2 溶剂特性	3
2.3 反应釜简介	3
2.3.1 反应釜的基本结构	3
2.3.2 釜体	3
2.3.3 换热元件	4
2.3.4 搅拌器	4
2.4 流程涉及的主要设备	4
2.4.1 反应罐	4
2.4.2 其他设备	4
2.5 工艺流程	5
2.2.1 工艺流程说明	5
2.2.2 装料与卸料	6
2.2.3 系统换热	6
2.2.4 操作工艺说明	6
第 3 章 设计计算说明	7
3.1 物料性质	7
3.1.1 物料参数	7
3.1.2 沥青的性质	7
3.1.3 胶液的性质	7
3.2 物料及其装卸时间计算	7
3.3 反应釜设计	9
3.3.1 主要工艺参数	9

3.3.2 釜体尺寸设计 .....	9
3.3.3 釜体壁厚计算 .....	10
3.3.4 夹套设计计算 .....	15
3.3.5 搅拌器设计与传动装置选型 .....	16
3.3.6 搅拌轴设计计算 .....	20
3.3.7 传热设计计算 .....	22
3.3.8 保温层设计计算 .....	28
3.3.9 开孔补强计算 .....	29
3.3.10 釜体设备支撑结构计算 .....	32
3.4 设计结果汇总 .....	33
结论 .....	35
参考文献 .....	36
附录 A .....	37
附录 B .....	38
附录 C .....	39
致谢 .....	40

## 第 1 章 绪论

### 1.1 引言

本毕业设计根据福州大学自动化研究所和福州大学过程装备与控制工程设计研究所“撬装式改性沥青生产装置”项目（工程号:zks-001）<sup>①</sup>中的部分设计依据、设计原则和工艺参数，对其整套设备中反应罐部分进行设计。

该项目是为满足我国高等级公路建设的需要，由福州市公路局投资建设的“非炼磨式改性沥青生产装置”是针对非炼磨式改性沥青生产专利技术而开发的新装置。装置依据公路建设流动性大的特点，采用撬装式，无需固定厂址。装置建成后由平板载重车运抵公路施工现场，实现就地生产。装置及相关设备占地面积小，经福州市公路局踏勘，认为一般公路干线旁的空地具备装置安放条件<sup>①</sup>。

通过本次设计研究，有助于我们综合运用所学知识，培养我们独立分析和处理专业问题的能力，锻炼文献检索与专业外语能力，完成工程师的基本训练和初步具有从事科学研究的能力<sup>②</sup>。

### 1.2 设计依据

福州大学自动化研究所和福州大学过程装备与控制工程设计研究所“撬装式改性沥青生产装置”项目初步设计说明书（工艺与设备部分）中的部分设计依据、设计原则和工艺参数。

由指导老师提供的本科生毕业设计（论文）任务书<sup>②</sup>、原始数据、设计要求的部分内容和参考数据。

### 1.3 设计原则

依据国家颁发的相关规范和现行标准进行设计。

对于物料、介质的性质和标准中未提及的计算方法等，将参考所标注文献中的方法。

本生产装置主要介质为沥青、溶剂（主要成分为甲苯）、SBS 颗粒和助剂，其中甲苯属于易燃易爆ⅡA 级危险品，且最高工作压力为 0.35MPa，因此本设计半管夹套反应釜属于Ⅰ类压力容器，设计需考虑安全因素<sup>①</sup>。

根据“撬装式改性沥青生产装置”项目初步设计说明书<sup>①</sup>，本装置是为实现“非炼磨式改性沥青生产新型专利技术”的产业化而开发的新型装置。在保证生产安全的同时，还应确保产品性能要求和生产能力要求<sup>①</sup>。

本装置属于撬装式，在保证工艺要求的同时，力求结构简单紧凑，便于运输、操作

和维护<sup>①</sup>。

本装置占地面积小，带有支座，公路建设施工现场基本能满足装置的安装要求。具体地点由施工单位确定<sup>①</sup>。

本撬装装置需用平板车运抵施工现场。但卡车长宽有限制，而且装置高度要受公路运输的高度限制条件。车架允许宽 3300mm，长 12000mm，公路桥梁限高 4500mm，车架高 1000mm<sup>①</sup>，本装置基本满足搬运要求。

## 1.4 设计范围

本设计涉及生产装置与工艺中：

1. 反应釜相关的部分生产工艺流程的设计
2. 生产设备中的反应釜及其组成元件的设计与选型
3. 一些配件与换热介质的选型
4. 反应罐部分的保温层设计

## 1.5 设计规模

改性沥青生产量：4.436t/h

反应罐总加热功率：350KW

反应罐占地面积：8m<sup>2</sup>

## 1.6 说明

本设计只参考“撬装式改性沥青生产装置”项目初步设计说明书<sup>①</sup>中的部分设计依据、设计原则和工艺参数，对其整套设备中反应罐部分进行设计。本设计不涉及其他设备的设计。

根据“撬装式改性沥青生产装置”项目初步设计说明书<sup>①</sup>，本设计不涉及装置必要的土建（平地、装置支座下部支撑）、水源、消防、以及装置外供水、供电等问题。



## 第 2 章 工艺及设备说明

### 2.1 改性沥青组分及质量指标

非炼磨改性沥青产品是采用化学和物理方法，将 SBS 胶以细微颗粒<sup>[1]</sup>均匀地分散到沥青中，从而得到改性沥青产品。JTG F40-2004 公路沥青路面施工技术规范 4.6.8 规定用溶剂法生产改性沥青母体时，挥发性溶剂回收后的残留量不得超过 5%。溶剂在常温、常压下为液体，残留在沥青中，影响沥青的性能，在一定真空度下加热使溶剂挥发，使改性沥青产物中的挥发物含量达到要求<sup>①</sup>。

在本设计中，采用软化点为 65° C 的混合沥青做为基质沥青。

### 2.2 溶剂特性

溶剂主要成分为甲苯，自燃温度为 535℃，闪点 4℃，爆炸下限 1.1%（容积），爆炸上限 7.1%（容积），蒸汽相对比容为 3.18（空气=1）。非极性溶剂，不溶于水。一般无腐蚀性，对碳钢有微腐蚀作用<sup>②</sup>。在真空状态下溶剂沸点降低，在确定搅拌容器的容积时，考虑物料在容器内充装的比例即装料系数，沥青的改性在反应中状态比较平稳，取填充系数小于 0.85(体积)<sup>[2]</sup>。

### 2.3 反应釜简介

#### 2.3.1 反应釜的基本结构

反应釜属于机械搅拌反应器（也称为搅拌釜式反应器）<sup>[2]</sup>，在本设计中，其用于沥青、溶剂(包括助剂)和 SBS 颗粒的混合加热操作。

组成搅拌反应器由搅拌容器和搅拌机两大部分组成。搅拌容器包括筒体和换热盘管、外半圆管夹套等换热元件。搅拌器、搅拌轴及其密封装置、传动装置等统称为搅拌机。其由电机驱动，经减速机带动搅拌轴及安装在轴上的搅拌器。为满足工艺的换热要求，容器上装有半圆管夹套。其作用是改善传热性能<sup>[3]</sup>。容器内设置挡板等内构件<sup>[2][4]</sup>。在搅拌轴下部安装二叶平桨搅拌器。

#### 2.3.2 釜体

釜体作为搅拌容器的作用是为物料反应提供合适的空间。搅拌容器的筒体为圆筒，封头采用标准椭圆形封头。根据工艺需要，容器上装有接管，用以满足进料、出料、排气等要求。为对物料加热，设置外夹套和内盘。上封头顶部焊接法兰，用于搅拌容器与

机架的连接。反应釜设有测温接管，可以使用温度计测量反应物的温度。支座选用支承式支座。

### 2.3.3 换热元件

沥青的改性反应需要维持反应的温度，有传热要求，需要设置换热元件。换热元件选择半圆管夹套和内盘管。半圆管由带材压制而成，螺旋形缠绕在容器筒体的外侧，焊接在反应釜圆筒部分的外壁上，其与容器外壁形成闭的空间<sup>[5][6]</sup>。在此空间内通入导热油，加热釜内介质。半圆管夹套最高适用温度 350℃，最高适用压力 6.4MPa<sup>[2]</sup>。

反应器的热量仅靠半圆管夹套传热换热面积不够，采用螺旋形盘管浸没在沥青中，增大换热面积以达到设计要求。

### 2.3.4 搅拌器

搅拌器又称搅拌桨或搅拌叶轮，是搅拌反应器的关键部件。其功能是提供过程所需要的能量和适宜的流动状态。本设计中搅拌机安装在中心位置。

为减少釜内气体进入桨叶被吸到液体中从而降低混合效果。在容器内壁面均匀安装 4 块挡板，其宽度为容器直径的 1/12 至 1/10<sup>[2]</sup>。

考虑到物料黏度、搅拌容器容积的大小、功耗、且用于到液—液系避免分离、达到罐的温度均一等目的，选用桨式搅拌器<sup>[2]</sup>。桨式搅拌器结构简单，叶片用扁钢制成，用螺栓固定在搅拌轴上，叶片数为 2 片，叶片形式为平直叶式。桨式搅拌器的转速一般为 20 至 100r/min，最高黏度为 20Pa·s<sup>[2]</sup>。用于本次设计符合要求。

## 2.4 流程涉及的主要设备

本设计设计反应罐（即半管夹套反应釜），其余设备及其涉及的工艺流程参考“橇装式改性沥青生产装置”项目初步设计说明书中的内容，在本设计中仅略作阐述。

### 2.4.1 反应罐

反应罐直径 2100mm，罐体高 2230mm，罐体支腿高 400mm。反应罐带外半管夹套、内盘管和保温层，半管夹套内通导热油，釜体装有安全阀等，搅拌器设置二叶平桨。搅拌轴上端设置角接触球轴承，驱动电机放置在罐顶部，并装有齿轮减速器。搅拌轴采用双端面密封。

### 2.4.2 其他设备

#### 2.4.2.1 基质沥青计量罐

加设基质沥青计量罐，以缩短加热时间。便于对即将加载的沥青进行预热。基质沥

青计量罐带外保温层。物料通过基质沥青计量罐送至预热器加热<sup>①</sup>。

#### 2.4.2.2 胶液制备罐

胶液制备罐主要用于溶剂、SBS 和助剂的混合与互溶<sup>①</sup>。罐体带夹套和保温层，夹套内通导热油，罐内设有搅拌桨。与基质沥青计量罐的情况相同，搅拌轴设底轴承，电机置于罐顶部，并装有减速器。搅拌轴密封为填料密封结构。搅拌桨同反应罐相同，采用桨式搅拌器<sup>①</sup>。

#### 2.4.2.3 溶剂回收罐

位于基质沥青计量罐和换热器下游的两个溶剂回收罐的尺寸和结构不相同。其中一个溶剂回收罐带夹套，夹套内通冷却水，夹套外设有保温层，顶部设置平衡管线<sup>①</sup>。

另一个溶剂回收罐不带夹套，罐外只设保温层<sup>①</sup>。两个溶剂回收罐内的溶剂通过压缩空气输送至溶剂胶液计量罐<sup>①</sup>。

#### 2.4.2.4 溶剂胶液计量罐

溶剂胶液计量罐主要用于溶剂称重和储存，按常压容器设计<sup>①</sup>。

#### 2.4.2.5 冷凝器

反应罐下游设有两个溶剂蒸汽冷凝器，其为列管式换热器<sup>①</sup>。从反应罐出来的溶剂蒸汽温度较高，与反应罐相连的冷凝器设计为浮头式，管程走常温冷却水，壳程走溶剂蒸汽。

第二个冷凝器为固定管板式，其中壳程走溶剂蒸汽，管程走冷却水<sup>①</sup>。冷凝器的连接管线上设置截止阀<sup>①</sup>。

#### 2.4.2.6 预热器

为满足设计要求的生产时，需要缩短装置中物料的加热时间、增大换热面积。反应罐和基质沥青计量罐本身的换热面积有限，不能满足换热要求，需加设基质沥青计量罐和预热器<sup>①</sup>。反应罐和基质沥青计量罐共用一个预热器。预热器为立式布置<sup>①</sup>。

## 2.5 工艺流程

### 2.2.1 工艺流程说明

本设计仅对反应罐涉及的工艺进行设计，其余设备及其涉及的工艺流程同“橇装式改性沥青生产装置”项目初步设计说明书中的内容，在本设计中仅略作阐述。

本装置工艺流程可完成溶剂、沥青、SBS、助剂的装料，改性沥青卸料，改性沥青制备，抽真空等作业工序。

## 2.2.2 装料与卸料

沥青泵送基质沥青经过基质沥青计量罐计量后送至反应罐。再将胶液由胶液制备罐经预热后送至反应罐。二者在反应罐搅拌混合加热进行反应。过程中溶剂蒸发产生的蒸汽由真空泵经排气孔抽吸至冷凝器，冷凝后进入溶剂回收罐。反应生成的改性沥青产品通过出料口由压缩空气压送排出。

## 2.2.3 系统换热

用导热油对反应罐中物料加热；用冷却水对溶剂蒸汽进行分级冷凝。

由于沥青处理量较大，而装置高度有限，反应罐换热面积不能满足换热要求，需要对沥青进行预热，设置一基质沥青预热器，通过沥青泵将沥青及其混合物送至预热器，经过预热器加热后送至反应罐。

溶剂从反应罐蒸发出来后，进行冷凝回收。其蒸汽为过热蒸汽，采用分级冷凝。其中，第一个冷凝器用温水进行冷却，第二个冷凝器用冷却水冷却，冷凝液进入回收罐<sup>①</sup>。

## 2.2.4 操作工艺说明

因物料挥发、在管路内输送造成的热量和质量损失较小，并且需在一定程度上简化计算。故在本设计中忽略物料挥发、在管路内输送造成的热量和质量损失和其他因素等造成的各种损失。

用压缩空气将溶剂送至溶剂计量罐，量取 1114kg 溶剂，然后由压缩空气压送至胶液制备罐。将 600kgSBS 颗粒加入胶液制备罐中，并开启胶液制备罐的搅拌机进行搅拌，同时进行加热，待 SBS 基本溶解后，加入 20kg 助剂并在胶液制备罐中继续搅拌，等待送入反应罐。

将 3.760 吨沥青通过齿轮泵输送到基质沥青计量罐，计量后经预热器加热至 120℃后进入反应罐中，同时将胶液制备罐中共计 1.734 吨胶液在胶液制备罐中加热至 120℃后加到反应罐中与 3.760 吨沥青混合。关闭进料口阀门，启动搅拌机、导热油炉和导热油泵。反应罐将混合后的物料由 120℃加热至 230℃，同时搅拌桨将 SBS 胶均匀地分散到沥青中。过程中启动真空泵，保持容器压强为-0.1MPa（表压），将溶剂蒸发产生的蒸汽排出并送至冷凝器。待沥青中的剩余溶剂即残留挥发物含量小于 1.0%时。关闭真空泵，使反应罐内压力增至常压，关闭搅拌机，开启空气压缩机，使反应釜内压力达到 0.35MPa（表压），同时打开出料口阀门，反应罐中的成品改性沥青开始卸料，打开成品沥青储罐入口阀门使成品改性沥青由压缩空气输送至成品沥青储罐中暂存，或直接运至施工现场进行使用。同时将泵切换给基质沥青计量罐加料，进入下一个循环操作。

## 第 3 章 设计计算说明

### 3.1 物料性质

#### 3.1.1 物料参数

一次加载沥青质量 $m_{l1}=3760\text{kg}$

沥青和胶液混合, 沥青初始温度 $t'_2=120^\circ\text{C}$ , 沥青加热结束温度 $t''_2=230^\circ\text{C}$ ;

胶液质量 1734kg

胶液组成: 1114kg 溶剂 (甲苯)、600kgSBS、20kg 助剂 (改性硫磺、白油、抗氧剂、悬浮助剂、增塑剂等<sup>④</sup>) 共 1734kg;

#### 3.1.2 沥青的性质

沥青软化点  $65^\circ\text{C}$ 、初始温度  $120^\circ\text{C}$ 、加热结束温度  $230^\circ\text{C}$ ;

可得平均温度  $175^\circ\text{C}$ ;

由文献<sup>[7]</sup>表 1 知软化点为  $65^\circ\text{C}$  的沥青在初始温度  $120^\circ\text{C}$  下的黏度为  $0.39\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;

在  $169^\circ\text{C}$  下黏度为  $0.015\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、在  $181.5^\circ\text{C}$  下黏度为  $0.012\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;

由内插法得平均温度  $175^\circ\text{C}$  下黏度  $0.0136\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;

由文献<sup>[7]</sup>图 2 知软化点为  $65^\circ\text{C}$  的沥青在平均温度  $175^\circ\text{C}$  下的密度为  $1.18\text{g}/\text{cm}^3$ ;

由文献<sup>[8]</sup>表 2-2 知 SBS 改性沥青  $25^\circ\text{C}$  密度  $1.034\text{g}/\text{cm}^3$

由于沥青的密度受温度影响较小, 为简化计算, 在计算中忽略温度对沥青密度的影响, 沥青密度视为常数, 使用上述密度进行计算。

#### 3.1.3 胶液的性质

其中甲苯密度  $867\text{kg}/\text{m}^3$ 、SBS 密度<sup>⑤</sup> $0.97\text{--}1.01\text{g}/\text{cm}^3$ 取  $1\text{g}/\text{cm}^3$ 、助剂质量较小, 其密度按 SBS 密度近似取  $1\text{g}/\text{cm}^3$ , 误差较小。

### 3.2 物料及其装卸时间计算

#### (1) 物料量计算

一次加载沥青质量 $m_{l1}=3760\text{kg}$ , 其体积 $V_{\text{沥青}}$

$$\begin{aligned} V_{\text{沥青}} &= \frac{m_{\text{沥青}}}{\rho_{\text{沥青}}} \\ &= \frac{3760\text{kg}}{1.18\text{g}/\text{cm}^3} = 3.1864\text{m}^3 \end{aligned}$$

胶液质量 $m_{胶液}=1734\text{kg}$ ，则沥青与胶液总质量 $m_{总0}$

$$\begin{aligned} m_{总0} &= m_{l1} + m_{胶液} \\ &= 3760 + 1734 = 5494\text{kg} \end{aligned}$$

甲苯体积 $V_{甲苯}$

$$\begin{aligned} V_{甲苯} &= \frac{m_{甲苯}}{\rho_{甲苯}} \\ &= \frac{1114\text{kg}}{867\text{kg}/\text{m}^3} = 1.2849\text{m}^3 \end{aligned}$$

胶液中溶质为 SBS 与助剂，其总体积 $V_{溶质}$

$$\begin{aligned} V_{溶质} &= \frac{m_{溶质}}{\rho_{溶质}} \\ &= \frac{620\text{kg}}{1\text{g}/\text{cm}^3} = 0.62\text{m}^3 \end{aligned}$$

混合后未充分搅拌时最大总体积 $V_{总}$

$$\begin{aligned} V_{总} &= V_{沥青} + V_{甲苯} + V_{溶质} \\ &= 3.1864 + 1.2849 + 0.62 = 5.0913\text{m}^3 \end{aligned}$$

挥发性溶剂(即甲苯)残余量为 5%，则溶剂蒸发后最大总质量 $m_{总1}$

$$\begin{aligned} m_{总1} &= 5\%m_{甲苯} + m_{溶质} + m_{l1} \\ &= 5\% \times 1114 + 620 + 3760 = 4435.7\text{kg} \end{aligned}$$

其可认为成品改性沥青的质量，即 $m_{改性沥青} = m_{总1}$

则成品沥青的体积 $V_{改性沥青}$

$$\begin{aligned} V_{改性沥青} &= \frac{m_{改性沥青}}{\rho_{改性沥青}} \\ &= \frac{4435.7\text{kg}}{1.034\text{g}/\text{cm}^3} = 4.2898\text{m}^3 \end{aligned}$$

生产流程时间分配

生产周期为 1h，产量为 4.436t/h

选用 YCB30-0.6 齿轮泵<sup>®</sup>，出口直径  $\Phi 70$ 、流量 $V_{s泵}=30\text{m}^3/\text{h}$

其加料时间 $t_{加料}$

$$\begin{aligned} t_{加料} &= \frac{m_{l1}}{V_{s泵}} \\ &= \frac{3.1864\text{m}^3}{30\text{m}^3/\text{h}} = 0.106\text{h} = 6.4\text{min} \end{aligned}$$

设计要求气送为 0.35MPa，安全阀定压 0.33MPa，安全阀选择 A48C150C 4N6 0.33MPa。  
使用压缩空气排出成品改性沥青，选择深圳云斯特科技有限公司生产 TG-680×3-90L 压缩

机，其压力可调节为 0.35MPa，功率为 2040W，排气量为 580L/min，本设计采用两台压缩机并联。

忽略压缩空气过程中温度变化和析水等影响，文献<sup>[9]</sup>中式 2-27，可简化为下式计算卸料时间 $t_{卸料}$

$$t_{卸料} = \frac{P_{气送} V_{实际}}{2P_0 V_{s压缩机}} \quad (3.1)$$

$$= \frac{0.35 \times 6.5096}{2 \times 0.1013 \times 0.58} = 19.4min$$

进料管和出料管同齿轮泵出口直径相同，接管取  $\phi 76 \times 3$

选用法兰 DN 65-PN 2.5 PL FF II Q235A GB/T9119-2010 进行连接。

### 3.3 反应釜设计

#### 3.3.1 主要工艺参数

设计压力：罐内：-0.10MPa (0.35Mpa 气送)

夹套：0.33MPa

设计温度：罐内：230℃、夹套：300℃

充装系数： $\leq 0.8$

搅拌轴转速：50rpm

轴封：双端面机械密封

#### 3.3.2 釜体尺寸设计

原始数据规定反应釜充装系数 $\leq 0.8$ ，则反应釜理论最小容积 $V_{min}$

$$V_{min} = \frac{V_{总}}{充装系数}$$

$$= \frac{5.0913}{0.8} = 6.3642m^3$$

反应釜内径取 $D_i = 2100mm$

参考 GBT 25198-2010 压力容器封头附录 C 中的表 C.1，选用

标准椭圆形封头 EHA 2100×8-Q345R GB/T 25198-2010

其公称直径等于反应釜内径，即

公称直径 $D_i = 2100mm$ 、总深度 $H_{封头} = 565mm$ 、内表面积 $S_{封头} = 5.4443m^2$ 、容积 $V_{封头} = 1.3508m^3$

其圆筒高度 $H_{圆筒}$

$$H_{\text{圆筒}} = \frac{V_{\text{总}} - 2 \times V_{\text{封头}}}{\pi D^2 / 4}$$

$$= \frac{6.3642 - 2 \times 1.3508}{3.1416 \times 2.1^2 / 4} = 1.0575m$$

$$\text{取 } H_{\text{圆筒}} = 1.1m$$

圆筒部分侧面积 $S_{\text{筒体}}$

$$S_{\text{筒体}} = \pi D H$$

$$= 3.1416 \times 2.1 \times 1.1 = 7.2571m^2$$

容器总高度 $H_{\text{总}}$

$$H_{\text{总}} = H_{\text{圆筒}} + 2 \times H_{\text{深度}}$$

$$= 1.1 + 2 \times 0.565 = 2.23m$$

总高径比为

$$\frac{H_{\text{总}}}{D_i} = \frac{2.23}{2.1} = 1.062$$

实际总容积 $V_{\text{实际}}$

$$V_{\text{实际}} = 2 \times V_{\text{封头}} + V_{\text{圆筒}}$$

$$= 2 \times 1.3508 + 1.1 \times \frac{3.1416 \times 2.1^2}{4} = 6.5096m^3$$

实际充装系数为

$$\frac{V_{\text{总}}}{V_{\text{实际}}} = \frac{5.1903}{6.5096} = 0.78 \leq 0.8$$

符合设计要求

### 3.3.3 釜体壁厚计算

#### 3.3.3.1 选材性质及相关规定

HG/T20582-2020-2.3.1 规定容器圆筒和封头部分的名义厚度和有效厚度按照不带半圆管夹套时的同一容器，根据计算压力，应按现行国家标准 GB/T 150.3《压力容器第3部分：设计》的相关章节确定。

反应釜材料选择 Q345R，假设厚度在 3 至 16mm 范围内。查 GB150.2 表 2 和表 B.1 知厚度 3 至 16mm 钢板在 300℃ 下

$$\text{许用应力} [\sigma]^t = 153MPa$$

$$\text{屈服强度 } R_{el} = 230MPa$$

$$\text{弹性模量 } E = 1.69 \times 10^5 MPa$$

文献<sup>[2]</sup>提到壳体元件规定了不包括腐蚀裕量的碳素钢、低合金钢制容器最小厚度为



3mm; GB/T713《锅炉和压力容器用钢板》和 GB/T3531《低温压力容器用钢板》中列举的压力容器专用钢板的厚度负偏差按 GB/T709 中的 B 类要求, 即 Q345R 钢板的负偏差 $C_1$

$$C_1 = 0.30mm$$

对于碳素钢, 腐蚀裕量应不小于  $1mm^{[2]}$ , 取反应釜壁、封头以及接管的腐蚀裕量 $C_2$

$$C_2 = 1mm$$

气送 0.35MPa 即反应釜最大工作压力 0.35MPa(表压)

反应釜最小工作压力-0.1MPa(表压)

筒体纵缝、筒体等厚封头采用局部探伤全熔透的单面焊, 根据文献<sup>[2]</sup>表 4-3 取焊接接头系数为 $\varphi = 0.85^{[2]}$

### 3.3.3.2 壁厚计算

(1) 反应釜受内压时计算壁厚

工作压力为 0.35MPa 时为内压圆筒

实际填充物料最大体积 $V_{总}=5.0913m^3$

物料最大填充高度(忽略搅拌器、搅拌轴、换热管所占体积)  $h_{物料}$

$$\begin{aligned} h_{物料} &= \frac{V_{总} - V_{封头}}{\pi D^2} \times 4 + H_{封头} \\ &= \frac{5.0913 - 1.3508}{3.1416 \times 2.1^2} = 1.645m \end{aligned}$$

圆筒与上椭圆封头焊缝高度 $h_{上焊缝}$

$$\begin{aligned} h_{上焊缝} &= h_{封头} + h_{圆筒} \\ &= 0.565 + 1.1 = 1.665m \leq h_{物料} \end{aligned}$$

物料液面未达到圆筒与上椭圆封头焊缝处

取计算压力等于容器底部最大压力(忽略搅拌时沥青对反应釜壁产生的压力)即

$$\begin{aligned} P_c &= P_{max} = P + \rho g h_{物料} \\ &= 0.35 + 1.034 \times 103 \times 9.81 \times 1.645 = 0.3667MPa \end{aligned}$$

$$P_c \leq 0.4[\sigma]^t \varphi = 0.4 \times 153 \times 0.85 = 52.02MPa$$

满足 GB150.3-2011 压力容器 3.3 公式适用范围

根据 GB150.3-2011 式 3-1 和式 5-1 计算圆筒计算厚度与椭圆封头计算厚度

圆筒计算厚度 $\delta$

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{P_c D_i}{2[\sigma]^t \varphi - P_c} \\ &= \frac{0.3667 \times 2100}{2 \times 153 \times 0.85 - 0.3667} = 2.965mm \end{aligned} \quad (3.2)$$

选用标准椭圆封头

查 GB 150.3-2011 表 5-1 得

标准椭圆封头  $K = 1$

椭圆封头计算厚度  $\delta_h$

$$\begin{aligned}\delta_h &= \frac{K P_c D_i}{2[\sigma]^t \varphi - 0.5 P_c} \\ &= \frac{1 \times 0.3667 \times 2100}{2 \times 153 \times 0.85 - 0.5 \times 0.3667} = 2.963 \text{ mm}\end{aligned}\quad (3.3)$$

初步选取圆筒有效壁厚  $\delta_e = 6.5 \text{ mm}$

(2) 反应釜受外压时计算壁厚

反应釜工作压力为  $-0.1 \text{ MPa}$  时为外压容器，承受外压的容器设计压力定义与内压容器相同，但取值方法不同。确定外压容器设计压力时，应考虑在正常工作情况下可能出现的最大内外压力差；当装有安全阀时，设计压力取 1.25 倍最大内外压力差或  $0.1 \text{ MPa}$  两者中的较小值。

对于本设计，根据 HG/T20582-2020-2.3.1 规定半圆管夹套容器的容器圆筒和封头部分的名义厚度和有效厚度按照不带半圆管夹套时的同一容器进行计算，且容器内装有沥青时，其对反应釜的压力可以抵消部分外压，因此用外压做为的计算压力，计算是安全的。

$$\text{即 } P_c = 0.1 \text{ MPa}$$

圆筒部分

由 EHA 标准椭圆封头形式参数

$$\frac{D_i}{2(H-h)} = 2$$

可得  $h_1$

$$\begin{aligned}h_1 &= H - h = \frac{D_i}{4} \\ &= \frac{2100}{4} = 525 \text{ mm}\end{aligned}$$

根据 GB 150.3-2011 图 4-1 没有加强圈或可做为加强圈的构件时，取圆筒总长度加上每个凸形封头曲面深度的 1/3 做为圆筒的当量长度  $L_e$

$$\begin{aligned}L_e &= H_{\text{圆筒}} + 2 \times \frac{h_1}{3} \\ &= 1100 + 2 \times \frac{525}{3} = 1450 \text{ mm}\end{aligned}\quad (3.4)$$

设筒体有效壁厚  $\delta_e = 6.5 \text{ mm}$  则

$$\begin{aligned}D_0 &= D_i + 2\delta_e \\ &= 2100 + 2 \times 6.5 = 2113 \text{ mm}\end{aligned}$$

$D_0$  为封头外径

$$\frac{L}{D_0} = \frac{1450}{2113} = 0.686$$

$$\frac{D_0}{\delta_e} = \frac{2113}{6.5} = 325 \geq 20$$

根据  $\frac{L}{D_0}$  和  $\frac{D_0}{\delta_e}$ , 由 GB 150.3-2011 图 4-2 或表 4-2 查取外压应变系数  $A$  值

$$A = 1.31 \times 10^{-4}$$

确定外压应力系数  $B$ , 由 GB 150.3-2011 图 4-4 查取外压应力系数  $B$

$$B = 37$$

按 GB 150.3-2011 式 4-2 计算许用外压力

$$\begin{aligned} [P] &= \frac{B}{\frac{D_0}{\delta_e}} \\ &= \frac{37}{325} = 0.117 \text{ MPa} > 0.1 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (3.5)$$

因此假设筒体有效壁厚  $\delta_e = 6.5 \text{ mm}$  合格

综上, 可视为圆筒壁厚计算厚度  $\delta$

$$\begin{aligned} \delta &= \delta_e + C_1 + C_2 \\ &= 6.5 + 0.3 + 1 = 7.8 \text{ mm} \end{aligned}$$

取圆筒和封头圆整后的名义厚度  $\delta_n = 8 \text{ mm}$

则圆筒部分实际有效厚度  $\delta_e$

$$\begin{aligned} \delta_e &= \delta - C_1 - C_2 \\ &= 8 - 0.3 - 1 = 6.7 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3.6)$$

封头部分

根据 GB 150.3-2011 5.3.3 受外压的椭圆形封头椭圆形封头的当量球壳外半径

$$R_0 = K_1 D_0 \quad (3.7)$$

查询 GBT 25198-2010 压力容器封头表 5-2 得标准椭圆形封头  $K_1 = 0.9$

设封头有效壁厚  $\delta_{e\text{封头}} = 3 \text{ mm}$

$$\begin{aligned} R_0 &= K_1 \frac{D_i + 2\delta_e}{2} \\ &= 0.9 \times \frac{2100 + 2 \times 3}{2} = 947.7 \text{ mm} \end{aligned}$$

根据 GB 150.3-2011 式 4-5 计算外压系数  $A$

$$\begin{aligned} A &= \frac{0.125}{\left(\frac{R_0}{\delta_e}\right)} \\ &= \frac{0.125}{1053/3} = 3.5 \times 10^{-4} \end{aligned} \quad (3.8)$$

按照材料 Q345, 查 GB 150.3-2011 表 4-1 可知应查询外压应力系数曲线图 4-4, 由  $A$  值查取  $B$  值

$$B = 40$$

根据 GB 150.3-2011 式 4-6 根据 B 值，计算许用外压力[P]

$$[P] = \frac{B}{\left(\frac{R_0}{\delta_e}\right)} \quad (3.9)$$

$$= \frac{40}{947.7/3} = 0.127MPa \geq 0.1MPa$$

因此取椭圆封头有效壁厚 $\delta_{e封头} = 3mm$ 合格

综上，可视为封头壁厚计算厚度 $\delta_{封头}$

$$\delta_{封头} = \delta_{e封头} + C_1 + C_2$$

$$= 3 + 0.3 + 1 = 4.3mm$$

为选材、制造、焊接环节方便，取封头与筒体名义厚度相同，均为 8mm，即有效壁厚 $\delta_e$

$$\delta_e = \delta_{封头} - C_1 - C_2$$

$$= 8 - 0.3 - 1 = 6.7mm$$

椭圆封头壁厚校核

根据 GB 150.3-2011 规定  $D_i/2h_i \leq 2$  的椭圆形封头的有效厚度应不小于封头内直径的 0.15%， $D_i/2h_i > 2$  的椭圆形封头的有效厚度应不小于封头内直径的 0.30%。但当确定封头厚度时已考虑内压下的弹性失稳问题，可不受此限制。

该椭圆封头

$$\frac{D_i}{2h_i} = \frac{2100}{(2 \times 565)} = 1.8584 \leq 2$$

其有效厚度与封头内直径的比值

$$\frac{\delta_e}{D_i} = \frac{6.7}{2100} \times 100\% = 0.319\% \geq 0.15\%$$

根据 GB 150.3-2011 式 5-3 椭圆封头的最大允许工作压力(内压)  $[p_w]$

$$[p_w] = \frac{2[\sigma]^t \varphi \delta_{ch}}{KD_i + 0.5\delta_{ch}} \quad (3.10)$$

$$= \frac{2 \times 153 \times 0.85 \times 6.7}{1 \times 2100 + 0.5 \times 6.7}$$

$$= 0.829MPa \geq \text{设计压力 } 0.35MPa$$

椭圆封头有效厚度 $\delta_{e封头} = 6.7mm$ 合格

综上，取圆筒和封头圆整后的名义厚度 $\delta_n = 8mm$

符合要求

### 3.3.3.3 耐压试验

容器中存在甲苯为易燃易爆气体，且容器工作需要较高的真空度，因此，需要对设备进行水压试验。

根据文献<sup>[2]</sup>式 4-94 耐压压试验压力 $p_T$

$$p_T = \eta p \frac{[\sigma]}{[\sigma]^t} \quad (3.11)$$

$$= 1.25 \times 0.35 \times \frac{345}{230} = 0.656 \text{ MPa}$$

$\eta$ —耐压实验压力系数，水压实验取  $\eta = 1.25$

$p$ —设计压力,  $p = 0.35 \text{ MPa}$

$[\sigma]$ —实验温度下材料的许用应力，室温下取  $[\sigma] = 345 \text{ MPa}$

$$0.9 \phi R_{eL} = 0.9 \times 0.85 \times 345 = 263.925 \text{ MPa}$$

根据文献<sup>[2]</sup>式 4-96 可知反应釜筒体试验薄膜应力  $\sigma_T$

$$\sigma_T = \frac{p_T(D_i + \delta_n)}{2\delta_n} \quad (3.12)$$

$$= \frac{0.656 \times (2100 + 8)}{2 \times 8} = 86.428 \text{ MPa} \leq 0.9 \phi R_{eL}$$

符合要求

### 3.3.4 夹套设计计算

设计温度为  $300^\circ\text{C}$ ，选用半圆管夹套。根据 HG/T 20569-2013 机械搅拌设备 B.3.4 半圆管夹套容器应符合 HG/T20582-2020 规定。其中半圆管夹套采用 DN50 的半圆管。其接管选择法兰 DN 40-PN 0.6 PL FF II Q235A GB/T9115.1-2000 其对应管口内径 48.3mm。半圆管夹套在壳体上布置时，其节距根据传热工艺需要和焊接工艺需要确定，和壳体的强度、刚度设计无关。盘管夹套与反应釜壁焊接时需要开坡口，确保焊透<sup>[10]</sup>，而且其连接部位应进行焊后热处理<sup>[11]</sup>。在本次设计中，壳体内介质温度与半管内介质温度相差较小，由此产生的温差应力不大<sup>[12]</sup>。

可忽略轴向载荷时，由文献<sup>[2]</sup>式 2-8 计算圆筒由内压或其他轴向载荷所引起的实际轴向组合拉应力  $\sigma'$

$$\sigma' = \frac{PR}{2t} \quad (3.13)$$

$$= \frac{0.3667 \times 1050}{2 \times 6} = 32.083 \text{ MPa}$$

其中  $P = P_c = 0.3667 \text{ MPa}$

根据 HG/T20582-2020 式 2.3.4 计算半圆管夹套对壳体所引起的轴向弯曲应力  $F$

$$F = 1.5[\sigma]^t - \sigma' \quad (3.14)$$

$$= 1.5 \times 153 - 32.08 = 197.42 \text{ MPa}$$

K 系数计算

由 HG/T20582-2020 表 2.2 查得半圆管夹套直径 DN50，壳体有效厚度为 6mm 时

$$C_1 = -3.6674510\text{E} + 01、C_2 = 1.2306994\text{E} + 01、$$

$$C_3 = 3.5701684\text{E} + 00、C_4 = -7.9516583\text{E} - 01、$$

$$C_5 = 5.8791041\text{E} - 02、C_6 = -1.5365397\text{E} - 03、$$

$$\begin{aligned}
 C_7 = C_8 = C_9 = C_{10} = 0 \\
 K = C_1 + C_2 \left( \frac{D}{25.4} \right)^{0.5} + C_3 \left( \frac{D}{25.4} \right) + C_4 \left( \frac{D}{25.4} \right)^{1.5} + C_5 \left( \frac{D}{25.4} \right)^2 + C_6 \left( \frac{D}{25.4} \right)^{2.5} \\
 + C_7 \left( \frac{D}{25.4} \right)^3 + C_8 \left( \frac{D}{25.4} \right)^{3.5} + C_9 \left( \frac{D}{25.4} \right)^4 + C_{10} \left( \frac{D}{25.4} \right)^{4.5} = 78.99 \text{ MPa}
 \end{aligned} \quad (3.15)$$

半圆管夹套最大允许工作压力 $P'$

$$\begin{aligned}
 P' &= \frac{F}{K} \\
 &= \frac{197.42}{78.99} = 2.499 \text{ MPa} \geq 0.33 \text{ MPa}
 \end{aligned} \quad (3.16)$$

当半圆管夹套最小厚度不超过半圆管内半径的一般或容器的设计压力不超过  $0.385[\sigma]_1^t$ ，半圆管夹套的最小厚度按照 HG/T20582-2020 式 2.3.4 计算：

$$T = \frac{p_1 r}{0.85[\sigma]_1^t - 0.6p_1} \quad (3.17)$$

$p_1$  半圆管夹套设计压力 MPa,  $p_1 = 0.33 \text{ MPa}$

$[\sigma]_1^t$  夹套材料在设计温度下许用应力  $[\sigma]_1^t = 153 \text{ MPa}$

设圆管有效壁厚为  $\delta_{e\text{夹套}} = 1.5 \text{ mm}$

半圆管夹套内半径  $r = 24.25 \text{ mm}$

半圆管夹套的最小厚度按式 (3.3.28) 计算得

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{p_1 r}{0.85[\sigma]_1^t - 0.6p_1} \\
 &= \frac{0.33 \times 24.25}{0.85 \times 153 - 0.6 \times 0.33} = 0.0616 \leq 1.5 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

符合要求。

考虑钢板负偏差  $C_1 = 0.3 \text{ mm}$ ，腐蚀裕量  $C_2 = 1 \text{ mm}$

半圆管夹套计算厚度  $T_{\text{计算}}$

$$\begin{aligned}
 T_{\text{计算}} &= \delta_e + C_1 + C_2 \\
 &= 1.5 + 0.3 + 1 = 2.8 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

碳素钢容器壁厚最小为 3mm

综上，经圆整，取半圆管壁厚名义壁厚  $\delta_{nt} = 3 \text{ mm}$

符合设计要求。

则半圆管夹套质量  $m_{\text{夹套}}$

$$\begin{aligned}
 m_{\text{夹套}} &= \rho V_{\text{夹套}} = \frac{\rho \pi^2 D N D_i \delta_{nt}}{2} \\
 &= \frac{7850 \times 3.1416^2 \times 0.05 \times 2100 \times 0.003}{2} \\
 &= 158.63 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

### 3.3.5 搅拌器设计与传动装置选型

#### 3.3.5.1 搅拌器设计与搅拌功率计算

为增强传热效率，搅拌器输入流体的能量应主要用于流体循环流动，用桨式搅拌器<sup>[2]</sup>。参考文献<sup>[13]</sup>1.2.3 搅拌器表 3-1-1 其常用尺寸 $n = 1 \sim 100 \text{r/min}$ 、 $v = 1.0 \sim 5.0 \text{m/s}$ 、常用介质黏度范围小于 $2 \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

根据 HG/T 3796.3-2005 桨式搅拌器，参考 PCJ 1400 平直叶可拆桨式搅拌器，其桨厚度为 14mm、许用扭矩  $3802 \text{N} \cdot \text{m}$ 、重量为 52kg。上述标准桨重量较大，为减轻重量，搅拌桨根据文献<sup>[13]</sup>进行设计计算，其工作扭矩远低于许用扭矩，因此搅拌桨强度无须另行校核。

根据文献<sup>[7]</sup>表 3-1-4 工艺类别为传热，桨式搅拌器建议尺寸

$$\frac{D_i}{d} = 1.25 \sim 2$$

$$\frac{h_{\text{物料}}}{d} = 0.2 \sim 2$$

根据文献<sup>[13]</sup>表 3-1-7 选取轴径 65 的桨式搅拌器，即桨式搅拌器 1400-65

$$\frac{D_i}{d} = \frac{2100}{400} = 1.5$$

$$\frac{d}{D_i} = \frac{1400}{2100} = 0.667$$

$$\frac{h_{\text{物料}}}{d} = \frac{1645}{1400} = 1.175$$

搅拌桨高度为 $b = 150 \text{mm}$

$$\frac{b}{d} = \frac{150}{1400} = 0.107$$

搅拌桨厚度为 7mm

均在建议尺寸内

根据文献<sup>[7]</sup>1.4.1 当搅拌容器直径 $D_i > 1 \text{m}$ 时， $Z_b = 4 \sim 6$ 个，当挡板数 $Z_b = 4$ 时，已满足全挡板条件。

挡板采用 10 号钢，其与反应釜壁连接采用角接双面焊。反应釜正常工作时，沥青对挡板作用在焊缝处造成的剪切力远小于焊缝处的许用剪切应力，无须对焊缝处进行强度校核。

根据文献建议，挡板宽度 $W_b = (\frac{1}{12} \sim \frac{1}{10})D_i$ 。挡板宽度取 $W_b = 200 \text{mm}$ ，则

$$\frac{W_b}{D} = \frac{200}{2100} = 0.09$$

搅拌器转速  $50 \text{r/min}$ ，即  $0.833 \text{r/s}$ ，搅拌器末端速度 $v$

$$v = n\pi D$$

$$= 0.833 \times 3.1416 \times 1.4 = 3.665m/s$$

容器内的液体高度 $H_l = 1645$ 未达到最佳高度 $D_i = 2100$

采用单层搅拌器<sup>[7]</sup>。

被搅拌液体的黏度 $\mu = 100 \sim 2500 Pa \cdot s$  (中黏度)，因此  $S_b > 0$ <sup>[7]</sup> 根据文献<sup>[7]</sup>表 3-1-2 取标准值 $S_b = 0.2W_b$

则挡板与与容器内壁的间隙 $S_b$

$$S_b = 0.2W_b \quad (3.18)$$

$$= 0.2 \times 200 = 40mm$$

桨叶与容器底距离 $C = 0.15 - 0.25D_i$ ，取 $C = 525mm$ ，则

$$\frac{C}{D_i} = \frac{525}{2100} = 0.25mm$$

搅拌器浸入搅拌容器内液面下的深度 $S$

$$S = h_{物料} - C - b$$

$$= 1645 - 525 - 140 = 980mm$$

搅拌容器内的最低装液高度不得低于

$$\frac{D_i}{3} = \frac{2100}{3} = 700mm$$

搅拌功率计算

搅拌功率根据参考文献<sup>[13]</sup>第三章相关内容进行计算

取 SBS 改性沥青的密度 $\rho = 1.034g/cm^3$

混合物黏度取基质沥青初始温度  $120^\circ C$  下黏度 $\mu = 0.39 Pa \cdot s$

搅拌器转速 $n$

$$n = 50r/min = 0.8333r/s$$

计算搅拌液体的雷诺准数 $Re$

$$\begin{aligned} Re &= \frac{\rho n d^2}{\mu} \\ &= \frac{1.034 \times 10^3 \times 0.8333 \times 1.4}{0.39} = 3092 \end{aligned} \quad (3.19)$$

根据雷诺数查询文献<sup>[13]</sup>图 3-2-2 得功率准数 $P_0 = 0.3$

校正系数 $k_1$

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{h_{物料}}{d} \\ &= \frac{1645}{1400} = 1.175 \end{aligned} \quad (3.20)$$

校正系数 $k_2 \leq 2$  (用于 1 个搅拌器) 取

$$k_2 = 2$$



校正总系数 $k$

$$\begin{aligned} k &= k_1 k_2 \\ &= 1.175 \times 2 = 2.35 \end{aligned} \quad (3.21)$$

计算搅拌器的搅拌轴功率  $P$

$$\begin{aligned} P &= k P_0 \rho n^3 d^5 \\ &= 2.35 \times 0.3 \times 1034 \times 0.8333^3 \times 1.4^5 \\ &= 2269W \end{aligned} \quad (3.22)$$

### 3.3.5.2 电动机与传动装置选型

电动机选用无锡南洋电机技术有限公司 HK 80M2-2×3 三相异步电动机，其经齿轮组合传动至减速器，其组合后额定功率 3.17KW，额定转速 3000rpm，额定转矩 8Nm，重量 51kg。减速器选用 VEMTE 的 GK57 系列减速器和行星轮传动装置，其组合为双极圆锥-圆柱齿轮减速器，输出端轴径 65mm、可输出最大扭矩 600Nm。联轴器选择

$$\text{LX5 联轴器 } \frac{YA65 \times 142}{YA65 \times 142} \text{ GB/T5014-2017}$$

其公称转矩 3150Nm，许用转速 3450r/min，最宽处直径 220mm，质量为 30kg，符合要求。

根据文献<sup>[13]</sup>中表 3-3-1 可知双级圆锥-圆柱齿轮减速器传动效率  $\eta = 0.94$

则总传动效率

$$\eta_{\text{总}} = \eta_{\text{减速器}} \times \eta_{\text{球轴承}} \times \eta_{\text{联轴器}} \times \eta_{\text{球轴承}} \times \eta_{\text{机械密封}} \quad (3.23)$$

$$= 0.94 \times 0.99 \times 0.99 \times 0.99 \times 0.99 = 0.903$$

所需电动机功率  $P_a$

$$\begin{aligned} P_a &= \frac{P}{\eta_{\text{总}}} \\ &= \frac{2269}{0.903} = 2363W \end{aligned} \quad (3.24)$$

电动机扭矩所需  $T_1$

$$\begin{aligned} T_1 &= 9553 \frac{P}{n \eta_{\text{总}}} \\ &= 9553 \times \frac{2.363}{3000 \times 0.903} = 8.00N \cdot m \end{aligned} \quad (3.25)$$

输出端扭矩所需  $T_2$

$$\begin{aligned} T_2 &= 9553 \frac{P}{n \left( \eta_{\text{总}} / \eta_{\text{减速器}} \right)} \\ &= 9553 \times \frac{2.363}{50 \times 0.96} = 480.08N \cdot m \end{aligned}$$

在减速器和电动机许用范围内。

### 3.3.6 搅拌轴设计计算

#### 3.3.6.1 搅拌轴的力学模型

对搅拌轴的设定为刚性联轴器的可拆轴视为整体轴；搅拌器及轴上的其他零件（附件）的重力、惯性力、流体作用力均作用在零件轴套的中部；轴主要受到扭矩作用，由于搅拌轴与反应釜中心轴线重合，搅拌器上流体的径向力在搅拌过程中被抵消，搅拌轴、固定搅拌轴的螺栓和质量偏心引起的离心力的作用较小，在本次设计中忽略不计。在本次设计中，将搅拌轴简化为悬臂轴模型<sup>[2]</sup>。

搅拌轴设计采用阶梯实心轴，参考文献<sup>[13]</sup>搅拌桨用螺栓固定在搅拌轴末端。其中搅拌桨端轴径 65mm<sup>[13]</sup>、机械密封处轴径 70mm、轴承内圈处轴径 70mm、联轴器处轴径 65mm、总长度为 2260mm。简化为悬臂轴模型后，忽略轴径变化及其造成的应力集中，取搅拌桨端轴径 65mm 做为模型中悬臂梁直径进行计算。

#### 3.3.6.2 机械密封

根据 HG/T21571-95 机械密封选择 MS-2004-070-BkUVFFBkUV，轴径  $d=70$ 、 $D_3(h_6)=176$ 、螺柱孔  $8 \times \phi 18(M16)$ 、机械密封高度  $L_1 \leq 160\text{mm}$

#### 3.3.6.3 机架与轴承

选用 HG/T21566-95 机架 A300-70（单支点机架）公称直径 300，传动轴直径 70、 $D_1(H_8)=320$ 、螺栓孔  $12-\phi 22(M20)$ 、总高  $H=795$ 、安装轴承处高  $H_1=279$ 、轴承与减速器距离  $H_2=620\text{mm}$ 、机架质量  $123\text{kg}$ 。轴承选择 7014C GB/T 292-2007 角接触球轴承。

#### 3.3.6.4 搅拌轴校核

搅拌轴材料采用 10 号碳钢。查 GB150.2 表 B.13 可得泊松比  $\mu_{\text{油}}=0.28$ ，由内插法计算得到碳钢在  $230^\circ\text{C}$  下弹性模量  $E=192.8\text{GPa}$

其剪切弹性模量  $G$

$$\begin{aligned} G &= \mu_{\text{油}} E \\ &= 0.28 \times 196 = 54.88\text{Gpa} \end{aligned} \quad (3.26)$$

(1) 按扭转变形计算搅拌轴的轴径

搅拌轴受转矩和弯矩的联合作用，扭转变形过大会造成轴的震动，使得轴封失效。因此应将轴单位长度最大扭转角  $\gamma$  限制在允许范围内<sup>[2]</sup>。

根据文献<sup>[2]</sup>式 8-3 轴转矩的刚度条件为

$$\gamma = \frac{583.6M_{n\max}}{Gd^4(1-a^4)} \leq [\gamma] \quad (3.27)$$

$[\gamma]$  许用扭转角，对于悬臂梁  $[\gamma] = 0.35^\circ/\text{m}$ ；

$M_{n\max}$  轴传递的最大转矩， $N \cdot m$ ；

根据文献<sup>[2]</sup>式 8-4 搅拌轴的直径  $d$  应大于  $d_{\min}$

$$\begin{aligned}
 d_{min} &= 4.92 \left\{ \frac{M_{n \max}}{[Y]G(1-\alpha^4)} \right\}^{\frac{1}{4}} \\
 &= 4.92 \times \left\{ \frac{480.08}{0.35 \times 5.488 \times 10^{10} \times (1-0^4)} \right\}^{\frac{1}{4}} \\
 &= 61.86 \text{mm} \leq 65 \text{mm}
 \end{aligned} \tag{3.28}$$

(2) 按照临界转速校核搅拌轴直径

当搅拌轴的转速达到轴自振频率时会发生强烈震动，并出现很大弯曲，这个转速成为临界转速<sup>[2]</sup>，记作 $n_c$ 。在靠近临界转速运转时，轴常常因为强烈震动而损坏，或破坏轴封<sup>[2]</sup>。因此工程上要求搅拌轴的工作转速避开临界转速，工作转速低于第一临界转速的轴称为刚性轴，要求 $n \leq 0.7n_c$ <sup>[2]</sup>。

$a$  悬臂轴两支点间的距离等于机架中轴承和减速器轴承间的距离，即

$$a = H_2 = 620 \text{mm}$$

轴末端到轴承处的长度 $l$

$$\begin{aligned}
 l &= h_{\text{反应釜}} - C + H_1 + h_{\text{凸台}} \\
 &= 565 + 565 + 1100 - 525 + 8 + 279 + 8 = 2000 \text{mm}
 \end{aligned}$$

$h_{\text{凸台}}$  为封头上方凸台高度， $h_{\text{凸台}} = 8 \text{mm}$

将搅拌轴简化为具有一个搅拌器的等直径悬臂轴模型。

搅拌轴质量 $M_{\text{轴}}$

$$\begin{aligned}
 M_{\text{轴}} &= \rho V = \rho \frac{\pi d^2}{4} \times l \\
 &= 7.85 \times 103 \times \frac{3.1416 \times 0.0325^2}{4} \times 2 = 13.024 \text{kg}
 \end{aligned}$$

轴的惯性矩圆形对于圆心的惯性矩 $I$

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{\pi d^4}{32} \\
 &= \frac{3.1416 \times 0.065^4}{32} = 1.7525 \times 10^{-6} \text{m}^4
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

根据文献<sup>[2]</sup>式 8-5 计算等效质量 $M_s$

$$\begin{aligned}
 M_s &= \sum_{i=0}^z m_i \left( \frac{l_i}{L_1} \right)^3 = m_{\text{轴}} \frac{L_1}{4} + m_{\text{桨}} \left( \frac{l_{\text{桨}}}{L_1} \right)^3 \\
 &= 13.024 \times \frac{2}{4} + 43.1 \times \left( \frac{1.85}{2} \right)^3 = 40.624 \text{kg}
 \end{aligned} \tag{3.30}$$

查文献<sup>[13]</sup>表 3-1-6 知道桨的质 $m_{\text{桨}} \leq 43.1 \text{kg}$

根据文献<sup>[2]</sup>式 8-5 计算一阶临界转速 $n_{\max}$

$$\begin{aligned}
 n_{max} &= \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{3EI(1-\alpha^4)}{L_1^2(L_1+\alpha)m_s}} \\
 &= \frac{30}{3.1416} \sqrt{\frac{3 \times 196 \times 10^9 \times 1.7525 \times 10^{-6}}{2^2 \times (2+0.62) \times 40.624}} \\
 &= 469.8r/min \\
 n_c &= 50 \frac{r}{min} \leq n_{max}
 \end{aligned} \tag{3.31}$$

按临界转速校核搅拌轴直径合格。

(3) 按强度计算搅拌轴的直径

轴材料的抗拉强度  $R_m = 335 \times 10^6 Pa$

根据文献<sup>[2]</sup>式 8-6 搅拌轴的强度条件是

$$\tau_{max} = \frac{M_{te}}{W_p} \leq [\tau] \tag{3.32}$$

轴材料的许用切应力  $[\tau]$

$$\begin{aligned}
 [\tau] &= \frac{R_m}{16} \\
 &= \frac{335}{16} = 20.9375 \times 10^6 Pa
 \end{aligned} \tag{3.33}$$

空心圆轴的抗扭截面模量  $W_p$

$$\begin{aligned}
 W_p &= \frac{\pi d^3}{16} (1-\alpha^4) \\
 &= \frac{3.1416 \times 0.065^3}{16} (1-0) = 5.3923 \times 10^{-5}
 \end{aligned} \tag{3.34}$$

$\alpha$ —搅拌轴内径与外径的比值,  $\alpha=0$

根据文献<sup>[2]</sup>式 8-7, 搅拌轴的直径  $d$  应不小于  $d_{min}$

$$\begin{aligned}
 d_{min} &= 1.72 \left( \frac{M_{te}}{[\tau](1-\alpha^4)} \right)^{\frac{1}{3}} \\
 &= 1.72 \times \left( \frac{480.08}{20.9375 \times 10^6} \right)^{\frac{1}{3}} = 0.0284 \leq 0.065mm
 \end{aligned} \tag{3.35}$$

综上, 搅拌轴的搅拌桨端轴径取 65mm 合格。

则根据文献<sup>[13]</sup>表 3-1-6 中选择 1400-65 平桨, 其

桨厚  $\delta_{桨} = 14mm$ 、高  $h_{桨} = 140mm$ 、质量  $m_{桨} = 35.29kg$ 。

$$\frac{P}{n} = \frac{2.2}{50} = 0.044 \leq 0.25$$

符合要求。

### 3.3.7 传热设计计算

#### 3.3.7.1 传热功率

换热元件选择半圆管夹套和内盘管。反应器的热量仅靠半圆管夹套传热换热面积不够，采用螺旋形盘管浸没在沥青中，增大换热面积以达到设计要求。根据设计要求，加热功率 350KW。在本次设计中，加热过程中忽略混合过程产生的热量来计算半圆管夹套和内盘管换热的传热系数。导热油与沥青通过夹套与内盘管的换热过程近似按对流传热进行计算<sup>[14][15][16]</sup>。

忽略其他部分热损失，仅保温层计算所得热损失结果计入在内，视为 $Q_{损}$ 。

由 3.3.8 保温层设计可知 $Q_{损}$

$$Q_{损} = 4.2KW$$

则所需加热功率 $Q$

$$Q = 350 + 4.2 = 354.2KW$$

### 3.3.7.2 半圆管夹套设计与传热计算

半管夹套轴向螺距 $D_{夹套螺距} = 80mm$

半圆管夹套在反应釜圆筒壁缠绕圈数 $n = 13$

则半圆管总高 $h_{半管}$

$$\begin{aligned} h_{半管} &= D_{夹套螺距} + n \\ &= 80 \times 13 = 1040mm \end{aligned}$$

半管夹套的传热面积 $A_{夹套}$

$$\begin{aligned} A_{夹套} &= nd_i\pi D_0 \\ &= 13 \times 0.0485 \times 3.1416 \times 2.116 = 4.1913m^2 \end{aligned}$$

沥青入口温度 $120^\circ C$ ，出口温度 $230^\circ C$ ，取沥青平均温度 $175^\circ C$ 下

热导率 $0.699W/(m^2 \cdot K)$ 、黏度 $\mu = 0.0136Pa \cdot s$ 、比热容 $c_p = 1340J/(kg \cdot ^\circ C)$ ，密度 $\rho = 1034kg/m^3$

由式 3.3.18 计算沥青在搅拌器作用下雷诺数 $Re$ <sup>[2]</sup>

$$\begin{aligned} Re &= \frac{\rho_{沥青}nd^2}{\mu} \\ &= \frac{1.034 \times 10^3 \times 0.833 \times 1.4}{0.0136} = 8.867 \times 10^5 \end{aligned}$$

普朗特准数 $Pr$

$$\begin{aligned} Pr &= \frac{c_p\mu}{\lambda_{沥青}} \\ &= \frac{1340 \times 0.0136}{0.699} = 26.072 \end{aligned}$$

沥青侧给热系数 $\alpha_1$

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 0.023 \frac{\lambda}{d} Re^{0.8} Pr^{0.4} \\ &= 0.023 \times \frac{0.699}{2.1} \times (8.867 \times 105)^{0.8} \times 26.07^{0.4} \\ &= 256.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})\end{aligned}\quad (3.36)$$

导热油选用西安利特精细化工有限公司 DY-300 导热油<sup>®</sup>，其 250℃时密度 855kg/m<sup>3</sup>、黏度 0.005 Pa·s、导热系数 0.1073(W/m<sup>2</sup>·K)、比热容 2608 J/kg·K。300℃时密度 822kg/m<sup>3</sup>、黏度 0.0045Pa·s、导热系数 0.1039W/(m<sup>2</sup>·K)、比热容 2782.5J/kg·K。导热油入口温度 T<sub>1</sub>=300℃，设导热油出口温度 T<sub>2</sub> = 285.7℃

导热油平均温度 $t_{\text{平均}}$

$$t_{\text{平均}} = \frac{300 + 285.7}{2} = 292.85 \text{ } ^\circ\text{C}$$

由内插法求得该温度下密度 826.72 kg/m<sup>3</sup>，黏度 0.0045715 Pa·s、导热系数 0.10445 W/(m<sup>2</sup>·K)、比热容 2757.5 J/kg

导热油炉选择常州能源设备总厂有限公司 QXD360 常规型电加热热载体炉<sup>®</sup>，其额定功率 360KW、设计压力 0.9MPa、介质最高温度 320℃、配管连接口径 DN80、热油泵额定流量 40m<sup>3</sup>/h，使用阀门来控制半圆管夹套与内盘管内导热油的流量。

分配半圆管夹套内导热油质量流量

$$m_{s1 \text{ 夹套}} = 1.9 \text{ kg/s}$$

半圆管内导热油流速 $u_{\text{导热油}}$

$$\begin{aligned}u_{\text{导热油}} &= \frac{V}{A} = \frac{\frac{m_{s1}}{\rho}}{\frac{\pi r^2}{2}} \\ &= \frac{\frac{1.91}{826.72}}{\frac{3.1416 \times 0.0235^2}{2}} \\ &= 1.3316 \text{ m/s}\end{aligned}$$

半管夹套当量直径 $d_e$

$$\begin{aligned}d_e &= 4 \times \frac{\text{流通截面积}}{\text{润湿周边}} \\ &= 4 \times \frac{3.1416 \times 0.0235^2}{0.044 + \frac{3.1416 \times 0.044}{2}} \\ &= 0.01436 \text{ m}\end{aligned}\quad (3.37)$$

半圆管夹套内导热油 Re

$$Re = \frac{d u \rho}{\mu} = \frac{0.01436 \times 1.3316 \times 826.72}{0.0045715} = 3457.9$$

半圆管夹套内导热油  $Pr$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} = \frac{2757.5 \times 0.0045715}{0.10445} = 120.69$$

半管夹套侧给热系数  $\alpha_2$

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= 0.023 \frac{\lambda}{d} Re^{0.8} Pr^{0.4} \\ &= 0.023 \times \left( \frac{0.10445}{0.01436} \right) \times 3457.9^{0.8} \times 120.69^{0.4} \\ &= 477.61 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

忽略釜避两侧污垢热阻，Q345 金属热导率  $\lambda = 48 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，则总传热系数  $K$

$$\begin{aligned} K &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \frac{d_2}{d_1} + \frac{b}{\lambda} \frac{d_2}{d_m} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (3.38) \\ &= \frac{1}{\frac{1}{256.2} \times \frac{2.116}{2.100} + \frac{0.008}{48} \times \frac{2.116}{2.108} + \frac{1}{477.61}} \\ &= 161.46 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

平均传热温差  $\Delta t_m$

$$\begin{aligned} \Delta t_m &= \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \left( \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1} \right)} \quad (3.39) \\ &= \frac{(300 - 230) - (285.7 - 120)}{\ln \left( \frac{300 - 230}{285.7 - 120} \right)} = 111.06 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

总传热量  $Q = m_{s1} c_{p1} \Delta t = K A \Delta t_m$

$$\begin{aligned} Q_{\text{夹套}} &= K A \Delta t_m \quad (3.40) \\ &= 161.46 \times 4.1913 \times 111.06 = 7.246 \times 10^4 \text{ W} \end{aligned}$$

计算得出的导热油出口温度  $T_2'$

$$\begin{aligned} T_2' &= T_1 - \frac{Q}{m_{s1} c_{p1}} \quad (3.41) \\ &= 300 - \frac{7.246 \times 10^4}{1.84 \times 2757.5} = 295.7 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

与前面设  $T_2 = 295.7 \text{ } ^\circ\text{C}$  相同。

### 3.3.7.2 内盘管传热

内盘管需换热量  $Q_{\text{盘管}}$

$$\begin{aligned} Q_{\text{盘管}} &= Q_{\text{总}} - Q_{\text{夹套}} \\ &= 3.542 \times 10^5 - 7.246 \times 10^4 = 2.817 \times 10^5 W \end{aligned}$$

选用  $\Phi 60 \times 3\text{mm}$  无缝钢管，材料采用 10 号碳钢，其内径  $d_1 = 54.3\text{mm}$ ，外径  $d_2 = 60.3\text{mm}$ 、壁厚  $b = 3\text{mm}$ ，弯曲中径  $d_3 = 1560\text{mm}$ ，圈数  $n = 8$  高度  $h = 1.2\text{m}$ ，则换热管质量为 135.3kg。为保证换热效率，盘管下部和釜底间的流通面积不宜过小，离底高度需  $> 50\text{mm}$ <sup>[17]</sup>。

忽略换热管连接反应釜外壳的直管部分，则换热管有效换热部分总长  $l_{\text{换热管}}$

$$\begin{aligned} l_{\text{换热管}} &= \sqrt{L^2 + h^2} = \sqrt{(n\pi^2 d_2 d_3)^2 + h^2} \\ &= \sqrt{(8 \times 3.1416^2 \times 0.0603 \times 1.56)^2 + 1.2^2} = 39.23\text{m} \end{aligned}$$

换热管连接反应釜外壳的直管部分中，进口管长  $370\text{mm}$ 、出口管长  $785\text{mm}$ ，则换热管总长  $l_{\text{管总长}}$

$$l_{\text{管总长}} = 39.23 + 0.370 + 0.785 = 44.11\text{m}$$

则换热管有效换热面积  $A_{\text{盘管}}$

$$\begin{aligned} A_{\text{盘管}} &= \pi d l = n \pi^2 d_2 d_3 \\ &= 8 \times 3.1416^2 \times 0.0603 \times 1.56 = 7.524\text{m}^2 \end{aligned}$$

分配导热油质量流量  $m_{s1 \text{ 盘管}} = 7.3\text{kg/s}$

内盘管中导热油流速  $u_{\text{盘管}}$

$$\begin{aligned} u_{\text{盘管}} &= \frac{V}{A} = \frac{\frac{m_{s1}}{\rho}}{\frac{\pi r^2}{2}} \\ &= \frac{\frac{7.3}{826.72}}{\frac{3.1416 \times 0.05403^2}{2}} = 3.8608\text{m/s} \end{aligned}$$

内盘管中导热油雷诺数  $Re$

$$\begin{aligned} Re &= \frac{du\rho}{\mu} \\ &= \frac{0.05403 \times 3.8608 \times 826.72}{0.0045715} = 3.7702 \times 10^5 \end{aligned}$$

内盘管中导热油普朗特准数  $Pr$

$$\begin{aligned} Pr &= \frac{c_p \mu}{\lambda} \\ &= \frac{2757.5 \times 0.0045715}{0.10445} = 120.69 \end{aligned}$$

沥青在反应釜中循环流动，因为搅拌轴，挡板等部件在传热过程中影响较小，其换



热介质沥青的浸湿边界长影响较小，忽略上述因素后，计算可得其当量直径 $d_e = 1.342m$ （推导过程见附录 C）。

沥青侧给热系数 $\alpha_1$

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 0.023 \frac{\lambda}{d} Re^{0.8} Pr^{0.4} \\ &= 0.023 \times \left( \frac{0.699}{1.342} \right) \times (8.8666 \times 10^5)^{0.8} \times 26.072^{0.4} \\ &= 400.98 W/(m^2 \cdot K)\end{aligned}$$

沥青与盘管换热，导热油侧给热系数 $\alpha_2$

$$\begin{aligned}\alpha_2 &= 0.023 \frac{\lambda}{d} Re^{0.8} Pr^{0.4} \\ &= 0.023 \times \left( \frac{0.10445}{0.05403} \right) \times (3.6310 \times 10^5)^{0.8} \times 120.69^{0.4} \\ &= 833.25 W/(m^2 \cdot K)\end{aligned}$$

忽略污垢热阻，10 号碳钢热导率为 $\lambda = 48W/(m \cdot K)$

则沥青与导热油通过内盘管换热的总传热系数 $K$

$$\begin{aligned}K &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \frac{d_2}{d_1} + \frac{b}{\lambda} \frac{d_2}{d_m} + \frac{1}{\alpha_2}} \\ &= \frac{1}{\frac{1}{400.98} \times \frac{0.0603}{0.05403} + \frac{0.003}{48} \times \frac{0.0603}{0.0575} + \frac{1}{833.25}} \\ &= 344.85 W/(m^2 \cdot K)\end{aligned}$$

导热油入口温度 $300^\circ\text{C}$ ，设出口温度 $T_2 = 285.7^\circ\text{C}$

平均传热温差 $\Delta t_m$

$$\begin{aligned}\Delta t_m &= \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \left( \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1} \right)} \\ &= \frac{(300 - 230) - (285.7 - 120)}{\ln \left( \frac{300 - 230}{285.7 - 120} \right)} = 111.06^\circ\text{C}\end{aligned}$$

计算所得总传热量 $Q_{2 \text{ 计算}}$

$$\begin{aligned}Q_{2 \text{ 计算}} &= KA\Delta t_m \\ &= 344.85 \times 7.524 \times 111.06 \\ &= 2.78 \times 10^5 W \geq Q_{\text{盘管}}\end{aligned}$$

导热油在内盘管出口计算温度 $T'_2$

$$\begin{aligned}T'_2 &= T_1 - \frac{Q}{m_{s1} c_{p1}} \\ &= 300 - \frac{2.847 \times 10^5}{7.3 \times 2757.5} = 295.7^\circ\text{C}\end{aligned}$$

导热油总质量流量 $m_s$

$$\begin{aligned} m_s &= m_{s1 \text{ 夹套}} + m_{s1 \text{ 盘管}} \\ &= 1.9 + 7.3 = 9.2 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

导热油体积流量 $V_s$

$$\begin{aligned} V_s &= \frac{m_s}{\rho_{\text{导热油}}} \\ &= \frac{9.2}{826.72} \times 3600 = 40 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

符合导热油炉供热要求。

### 3.3.8 保温层设计计算

#### 3.3.8.2 保温层厚度

釜体外壁为装有导热油的半圆管，忽略导热油温度变化和反应釜壁温度变化，釜体外壁温度按 293℃ 进行计算。根据 GB 50264-2013 工业设备及管道绝热工程设计规范，保温层外壁温度不得高于 50 度。采用单层保温，由于反应釜直径较大，保温层厚度较小，在本设计中简化为平壁热传导进行计算。

保温层平均温度 $t_{\text{保温层}}$

$$t_{\text{保温层}} = \frac{293 + 50}{2} = 171.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

选用硅酸铝纤维制品作为保温层材料，根据 GB50264-2013 选用硅酸铝棉制品板，硅酸铝棉制品板密度 $\rho_{\text{硅酸铝}} = 64 \text{ kg/m}^3$ ，其导热系数如下。

常温即 $\leq 70^{\circ}\text{C}$ 时，导热系数 $\lambda_0 = 0.056 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$

当 $T_m \leq 400^{\circ}\text{C}$ 时，导热系数 $\lambda_1$

$$\lambda_1 = \lambda_0 + \frac{0.0002(T_m - 70)W}{m^2 \cdot K} \quad (3.42)$$

由上式（3.3.66）计算其在平均温度 171.5℃ 下导热系数 $\lambda_1$

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \lambda_0 + 0.0002(T_m - 70) \\ &= 0.056 + 0.0002 \times (171.5 - 70) = 0.0763 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \end{aligned} \quad (3.43)$$

保温层最小厚度 $\delta_t$

$$\begin{aligned} \delta_t &= \frac{\lambda}{\alpha_s} \frac{T_0 - T_s}{T_s - T_a} \\ &= \frac{0.0763}{8.141} \times \frac{293 - 50}{50 - 25} = 0.091 \text{ m} \end{aligned} \quad (3.44)$$

取圆整后保温层厚度 $\delta_t$

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

#### 3.3.8.2 计算热损失

由 GB/T4272-2008 的 6.1.1 知设备表面温度为 573K 时。季节性运行的设备表面最大允许热损失为 272W/m<sup>2</sup>，反应釜直径较大，在本设计中视其为平面单层绝热结构，按照平壁计算热损失，且忽略人孔，进出料口，排气孔，搅拌轴处，热电偶处、起吊结构、支

座处、盘管进出口处保温层面积变化和热量损失。

保温层热损失  $Q_{s3}$

$$Q_{s3} = \frac{T_0 - T_a}{\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_s}} \quad (3.45)$$

$$= \frac{293 - 25}{\frac{0.1}{0.0763} + \frac{1}{8.141}} = 187W/m^2 < 272W/m^2$$

符合标准

反应釜椭圆封头表面积  $S_{\text{封头}} = 5.4443m^2$ ，则封头处保温层表面积  $S_1$

$$S_1 = \left(\frac{2316}{2110}\right)^2 \times 5.4443 = 6.622m^2$$

圆筒部分保温层面积  $S_2$

$$S_2 = \left(\frac{2367.5}{2100}\right)^2 \times 7.2571 = 9.217m^2$$

保温层总面积  $S_{\text{保温层}}$

$$S_{\text{保温层}} = 2S_1 + S_2$$

$$= 2 \times 6.622 + 9.217 = 22.461m^2$$

保温层总热损失  $Q_{\text{损}}$

$$Q_{\text{损}} = Q_s \times S_{\text{保温层}}$$

$$= 187 \times 22.461 = 4200W$$

### 3.3.8.3 保温层总质量

保温层总面积  $S_{\text{保温层}} = 22.461m^2$ ，保温层厚度  $\delta_t = 0.1m$ ，保温层面积较大，视为柱体计算体积，误差较小。

保温层质量  $m_{\text{保温层}}$

$$m_{\text{保温层}} = \rho_{\text{硅酸铝}} S_{\text{保温层}} \delta_t$$

$$= 64 \times 22.461 \times 0.1 = 143.75kg$$

## 3.3.9 开孔补强计算

### 3.3.9.1 开孔

开孔位置包括搅拌轴，进料口（在搅拌过程中充当排气孔），出料口，换热管进出口，热电偶插口，均有接管且接管外径小于或等于 89mm，根据 GB 150.3-2011 可知无需另行补强。其中接管壁厚按 GB 150.3-2011 表 6-1 选择。需要计算补强的开孔只有人孔。补强圈与接管、壳体的焊接结构参见上述标准附录 D 和 JB/T4736。采用该结构补强时，应符合下列规定：

设计压力  $P=0.35\text{MPa} \leq 2.5\text{MPa}$

低合金钢的保证抗拉强度下限值  $R_m < 540\text{MPa}$

补强圈厚度小于或等于  $1.5\delta_n$

壳体名义厚度  $\delta_n \leq 38\text{mm}$

若条件许可，推荐以厚壁接管代替补强圈进行补强，

其  $\frac{\delta_{nt}}{\delta_n}$  在 0.5-2 范围内

### 3.3.9.2 人孔开孔补强

根据 GB 150.3-2011 可知对于圆筒开孔，所需最小补强面积为其截面通过开孔中心点与筒体轴线。对于椭圆封头开孔，该截面通过封头开孔中心点，沿开孔最大尺寸方向，且垂直于壳体表面。对于长圆形  $d_{op}$  取所考虑界面上的尺寸加 2 倍厚度附加量。

根据 HG/T21514-2014 钢制人孔和手孔的类型与技术条件表 2.0.1 选择回转盖板式平焊法兰人孔 B 型人孔，B 型盖轴耳，不带内包边的 XB350 石棉橡胶板。表示为

人孔 I b(NM-XB350)B 450-6 HG/T21516

#### (1) 人孔接管设计计算

人孔接管材料采用 Q345 尺寸规格  $\Phi 480 \times 8$ ，外伸长度 250mm，内伸长度 50mm。

根据 GBT 9119-2010 板式平焊钢制管法兰，人孔接法兰选用

法兰 DN 400-PN 2.5 PL FF II Q235A GB/T9119-2010

去除焊缝等加强作用的影响，人孔接管承受内外压部分长度至少为  $l_{\text{接管}} = 170\text{mm}$

接管承受内压时，圆筒计算厚度  $\delta$

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{P_c D_i}{2[\sigma]^t \varphi - P_c} \\ &= \frac{0.3667 \times 466}{2 \times 153 \times 0.80 - 0.3667} = 0.658\text{mm}\end{aligned}$$

设筒体有效壁厚  $\delta_e = 1.5\text{mm}$  则

$$\begin{aligned}\frac{L}{D_0} &= \frac{170}{480} = 0.354 \\ \frac{D_0}{\delta_e} &= \frac{480}{1.5} = 320 \geq 20\end{aligned}$$

根据  $\frac{L}{D_0}$  和  $\frac{D_0}{\delta_e}$ ，由 GB 150.3-2011 图 4-2 或表 4-2 查取外压应变系数  $A = 6.50 \times 10^{-4}$

确定外压应力系数 B，由 GB 150.3-2011 图 4-4 查取外压应力系数  $B = 70$

按式 4-2 计算许用外压力

$$\begin{aligned}[P] &= \frac{B}{\frac{D_0}{\delta_e}} \\ &= \frac{70}{320} = 0.219\text{MPa} > 0.1\text{MPa}\end{aligned}$$

因此筒体有效壁厚 $\delta_e = 1.5mm$ 合格, 视为接管计算厚度 $\delta_t$

取圆筒圆整后的名义厚度与反应釜封头厚度相同, 即 $\delta_n = 8mm$

则圆筒部分实际有效厚度 $\delta_{et}$

$$\begin{aligned}\delta_{et} &= \delta_{nt} - C_1 - C_2 \\ &= 8 - 0.3 - 1 = 6.7mm\end{aligned}$$

接管内直径加 2 倍厚度附加量 $d_{op}$

$$d_{op} = 480 + 1.3 \times 2 = 482.6mm$$

对开放式接管取 $f_r = 1.0$

开孔位于椭圆形封头中心 80%直径范围内, 根据 GB 150.3-2011 对于圆筒或球壳开孔, 为开孔处的壳体计算厚度。

由 GB 150.3-2011 表 5-2 可知标准椭圆形封头长短轴比值决定的系数 $K_1 = 0.9$

内压容器壳体开孔所需补强面积 $A$

$$\begin{aligned}A &= d_{op}\delta + 2\delta\delta_{et}(1 - f_r) \\ &= 482.6 \times 2.545 + 2 \times 2.545 \times 6.7(1 - 1.0) \\ &= 1262.32mm^2\end{aligned}\quad (3.46)$$

椭圆封头处壳体计算厚度 $\delta$

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{P_c K_1 D_i}{2[\sigma]^t \varphi - 0.5P_c} \\ &= \frac{0.35 \times 0.9 \times 2100}{2 \times 153 \times 0.85 - 0.5 \times 0.35} = 2.545mm\end{aligned}$$

容器承受外压时壳体开孔所需补强面积 $A$

$$\begin{aligned}A &= 0.5[d_{op}\delta + \delta\delta_{et}(1 - f_r)] \\ &= 0.5 \times [482.6 \times 3 + 3 \times 6.7 \times (1 - 1.0)] = 733.95mm^2\end{aligned}\quad (3.47)$$

根据 GB 150.3-2011, 有效宽度 $B$ 按式 6-6 计算, 取二者中较大值

$$B = \begin{cases} 2d_{op} = 2 \times 482.6 = 965.2mm \\ d_{op} + 2\delta_n + 2\delta_{nt} = 482.6 + 2 \times 8 + 2 \times 8 = 514.6mm \end{cases}\quad (3.48)$$

有效高度按式 GB 150.3-2011 式 6-7、6-8 计算, 分别取式中较小值

外伸接管有效补强高度:

$$h_1 = \begin{cases} \sqrt{d_{op}\delta_{nt}} = \sqrt{482.6 \times 8} = 58.38 \\ \text{接管实际外伸出高度} = 200 \end{cases} = 58.28mm\quad (3.49)$$

内伸接管有效补强高度:

$$h_2 = \begin{cases} \sqrt{d_{op}\delta_{nt}} = \sqrt{482.6 \times 8} = 58.38 \\ \text{接管实际内伸出高度} = 0 \end{cases} = 0mm$$

按式 6-10 计算壳体有效厚度减去计算厚度之外的多于面积 $A_1$

$$A_1 = (B - d_{op})(\delta_e - \delta) - 2\delta_{et}(\delta_e - \delta)(1 - f_r)$$

$$= (965.2 - 482.6)(6.7 - 4.3) - 2 \times 6.7 \times (6.7 - 4.3) \times (1 - 1.0) = 1126.08mm^2$$

接管有效厚度减去计算厚度之外的多于面积 $A_2$

$$A_2 = 2h_1(\delta_{et} - \delta_t)f_r + 2h_2(\delta_{et} - C_2)f_r \quad (3.50)$$

$$= 2 \times 58.38 \times (7 - 1.5) \times 1.0 + 0 = 642.18mm^2$$

焊缝有效截面积 $A_3 = 64mm$

在有效补强范围内，可作为补强的截面积按式 6-9 计算  $A_e$ 。

$$A_e = A_1 + A_2 + A_3 \quad (3.51)$$

$$= 1126.08 + 642.18 + 64 = 1832.26mm^2$$

$$A_e \geq A = 1262.32mm^2$$

$A_e \geq A$ 开孔不需另加补强。

### 3.3.10 釜体设备支撑结构计算与选型

盘管支撑结构根据文献<sup>[13]</sup>6.1.8.3 选用碳钢角钢 L65×6，设置三根支柱，用 U 型螺栓固定。其中角钢焊接在釜体的上下封头上。

反应釜实际容积 $V_{实际} = 6.5096m^3$ ，水压试验时釜内水总质量 $m_{水}$

$$m_{水} = \rho_{水} V_{实际}$$

$$= 1000 \times 6.5096 = 6509.6kg$$

反应釜圆筒部分质量 $m_{圆筒}$

$$m_{圆筒} = \rho S_{筒体} \delta_n$$

$$= 7850 \times 7.2571 \times 0.008 = 455.75kg$$

查 GB/T25198-2010 表 B.2 得椭圆封头质量

$$m_{封头} = 455kg、保温层质量m_{保温层} = 143.75kg;$$

机架质量 123kg，电动机质量 51kg，盘管质量 138kg，半管夹套重量 158.63kg，搅拌桨质量 35.29kg。其他元件包括搅拌轴，机械密封，减速器，挡板，轴承，螺栓，热电偶，支撑角钢及其它接管等质量之和  $m_{其他}$  计 200kg，则支座支撑总质量为上述质量之和，即  $m_{总} = 8713kg$ 。

其重力 $Q$

$$Q = m_{总}g$$

$$= 8713 \times 9.81 \div 1000 = 85.47KN$$

参考 NB/T 47065.4-2018 表 3 选 B 型 4 号支撑式支座，选择支座材料为 Q235，记作 NB/T47065.4-2018，支座 B4，h=350， $\delta=10$ ，查表 B.2 知椭圆形风头许用应力在 140MPa 的允许垂直载荷为 391kN，在许用范围内。

设备起吊结构选择 HG/T 21574-2018 吊耳 TPB-2-3.5-16，吊耳焊接在设备顶部距离轴线 500mm 的顶部，其满足起吊需求。

反应釜筒体轴压失稳校核

反应釜危险截面为筒体与下侧封头的接缝处，其上方部分的质量为 1622.42kg 根据文献<sup>[2]</sup>中对称分叉屈曲时的临界应力 $\sigma_{cr}$

$$\begin{aligned}\sigma_{cr} &= 0.605 \frac{Et}{R} \\ &= 0.605 \times \frac{1.69 \times 10^5 \times 8}{2100} = 389.5 \text{Mpa}\end{aligned}\quad (3.52)$$

实际临界应力 $\sigma_{实际}$

$$\begin{aligned}\sigma_{实际} &= 0.2\sigma_{cr} \\ &= 0.2 \times 389.5 = 77.9 \text{Mpa}\end{aligned}\quad (3.53)$$

则其可承载质量 $m_{可承载}$

$$\begin{aligned}m_{可承载} &= \frac{\sigma_{实际} S_{筒体界面}}{g} \\ &= 77.9 \times 106 \times \frac{0.0529}{9.81} \\ &= 4.2 \times 10^5 \text{kg} \geq 1622.42 \text{kg}\end{aligned}$$

不会失稳。

### 3.4 设计结果汇总

名称	单位/标准	值
生产能力	t/h	4.436
加料时间/卸料时间	min	6.4/19.4
进出料管口法兰	GB/T9119-2010	DN65-PN2.5PL FF II Q235A
反应釜材料	GB 150.1-2011	Q345
椭圆封头	GB/T 25198-2010	EHA 2100×8-Q345R
反应釜容积	立方米	6.51
釜体焊接与探伤		局部探伤双面焊
釜体内径	m	2.1
釜体圆筒与封头壁厚	mm	8
反应釜总高（不计电动机）	m	3.39
安全阀		A48C150C 4N6 0.33MPa
半圆管夹套公称直径	mm	50 Q345
半圆管夹套螺距	mm	80

名称	单位/标准	值
半圆管夹套总长	m	85.766
半圆管夹套厚度	mm	3
半圆管夹套接管法兰	GB/T9115.1-2000	DN40-PN0.6PL FF II Q235A
搅拌桨	mm	二叶平桨 1400-65 10 号钢
搅拌桨质量	kg	35.29
搅拌桨高度	mm	150
挡板宽度/容器壁间隙/数量		200/40/4
电动机	无锡南洋电机技术有限公司	HK 80M2-2×3 三相异步
减速器	VEMTE	GK57 系列减速器
机械密封	HG/T 21571-95	MS-2004-070-BkUVFFBkUV
机架	HG/T 21566-95	A300-70
轴承	GB/T 292-2007	7014C
搅拌轴长度	mm	2260
联轴器	GB/T5014-2017	LX5 YA65×142/YA65×142
导热油	西安利特精细化工有限公司	DY-300
导热油流量	立方米/小时	40
导热油出口温度	℃	285.7
内盘管规格		Φ60.3×3×40110 10 号钢
内盘管圈数	圈	8
内盘管弯曲中径	mm	1560
内盘管口法兰	GB/T9119-2010	DN50-PN2.5PL FF I Q235A
保温层材料	GB 50264-2013	用硅酸铝棉制品板
保温层厚度	mm	100
人孔	I b(NM-XB350)B 450-6	HG/T21516
人孔接法兰	GB/T9119-2010	DN400-PN2.5PL FF II Q235A
反应釜空载总质量	kg	1692
反应釜运行总质量	kg	7180
盘管支承结构	碳钢角钢	3×L65×6
支座	NB/T 47065.4-2018	B4 h=350mm δ=10
吊耳	HG/T 21574-2018	TPB-2-3.5-16



## 结论

本设计根据福州大学石油化工学院“橇装式改性沥青生产装置”项目的部分工艺参数设计了其生产设备中的一个重要设备半管夹套反应釜。本设计对反应釜的釜体、半圆管夹套、内盘管、搅拌桨、搅拌轴和保温层进行设计；对半圆管夹套、内盘管和换热介质进行传热计算；对釜体、半圆管夹套和搅拌轴等机械结构进行强度校核；以及轴承、机械密封、机架、支座等零件；导热油加热炉、沥青泵、电动机、减速器、等配件和换热介质导热油的选型。

通过计算与校核，本设计半管夹套反应釜的釜体与半圆管夹套在设计温度及内压下强度校核合格；其在内压，外压和自重作用下不会失稳；釜体开孔采用等面积法无需另行补强；其换热结构半圆管夹套和内盘管满足传热设计要求；其搅拌轴满足转速、扭转变形等限制范围内；其保温层外壁温度和允许最大热损失满足相关标准达到了设计要求和工艺需求。本设计半管夹套反应釜生产能力为每小时 4.436 吨、换热功率达到 350kW、一次装载量为 4.436 吨、总高度（不计电动机）3.39 米、空载自重 1.692 吨、满载总重 8.740 吨。

在本设计中，为简化计算，在部分计算、校核等环节采用近似、估算、经验公式计算等方法，导致计算结果裕量较大，在设计制造环节中可能会出现材料浪费等结果。因此，对于本设计运用的设计方法和数学工具等有待完善，本人能力亦有待提高。

## 参考文献

- [1]敖宁建,王琪等. SBS 改性沥青[J]. 合成橡胶工业, 2003, 26(2): 65-69
- [2]郑津洋,桑芝富等. 过程设备设计[M]. —4 版. —北京: 化学工业出版社, 2015.10
- [3]Joanna Karcz, Fryderyk Strek. Heat transfer in jacketed agitated vessels equipped with non-standard baffles[J]. The Chemical Engineering Journal 1995(58) 135-143
- [4]M. T. Dhotre, Z. V. P. Murthy, N. S Jayakumar. Modeling & dynamic studies of heat transfer cooling of liquid in half-coil jackets[J]. Chemical Engineering Journal 2006(118) 183 - 188
- [5]陈晓宁,魏光亮等. 搅拌反应釜冷却装置一半管夹套的设计与制作[J]. 聚氯乙烯. 2006, 7
- [6]曹伟东. 半管夹套容器制造工艺要点[J]. 石油和化工设备, 2014, 17
- [7]明文雪,尹良明等. 沥青输送泵的选型计算[J]. 轻金属, 2007, 8
- [8]邹玲. 沥青混合料热物性参数研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [9]李云,姜培正等. 过程流体机械[M]. —2 版. —北京: 化学工业出版社, 2008.06
- [10]史建兰,魏志全. 坡口形式对半管夹套焊接温度和残余应力的影响[J]. 焊接学报, 2017, 38(1)
- [11]张凤魁,半圆管夹套保温装置设计和制造中需注意的几个问题[J]. 山东化工, 2013, 42
- [12]赵耿,江可申等. 半管夹套设备设计方法及温差应力讨论[J]. 石油化工设备, 2021, 50(6)
- [13]曲文海等. 压力容器与化工设备实用手册, 下册[M]. —1 版. —北京: 化学工业出版社, 2000.03
- [14]应利诚. 带搅拌反应釜的传热计算[J]. 中国化工贸易, 2017, 2
- [15]谭天恩,窦梅等. 化工原理, 上册[M]. —4 版. —北京: 化学工业出版社, 2013.6
- [16]张俊豪. 反应釜外扣半圆管和内盘管传热系数的计算[J]. 山东化工, 2020, 19
- [17]周俊超,车圆圆等. 基于 CFD 模拟的强放热反应釜盘管空间排布的优化设计[J]. 高校化学工程学报, 2015, 29(1)

## 附录 A 相关标准

1. GB 150.1-2011 压力容器 第1部分通用要求
2. GB 150.2-2011 压力容器 第2部分材料
3. GB 150.3-2011 压力容器 第3部分设计
4. GB 713-2014 锅炉和压力容器用钢板
5. GB 50264-2013 工业设备及管道绝热工程设计规范
7. GB/T 709-2019 热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差
8. GB/T 3274-2017 碳素结构钢和低合金结构钢热轧钢板和钢带
9. GB/T 33509-2017 机械密封通用规范
10. GB/T 151-2014 热交换器
11. GB/T 6556-2016 机械密封的型式、主要尺寸、材料和识别标志
12. GB/T 9119-2010 板式平焊钢制管法兰
13. GB/T 25198-2010 压力容器封头
14. HG/T 20582-2020 钢制化工容器强度计算规范
15. HG/T 20569-2013 机械搅拌设备
16. HG/T 21563-21572-95 搅拌传动装置
17. JB/T 4127.1-2013 机械密封 第1部分技术条件
18. JB/T 4127.2-2013 机械密封 第2部分分类方法
19. JTG F40-2004 公路沥青路面施工技术规范
20. NB/T 47065.1-5-2018 容器支座
21. HG/T 21516-2014 回转盖板式平焊法兰人孔
22. GB/T 810-1988 小圆螺母
23. HG/T 3796.3-2006 桨式搅拌器
24. HG/T 20580-2011 钢制化工容器设计基础规定
25. HG/T 20581-2011 钢制化工容器材料选用规定
26. HG/T 20582-2011 钢制化工容器强度计算规定
27. HG/T 20583-2011 钢制化工容器结构设计规定
28. HG/T 20584-2011 钢制化工容器制造技术要求
29. HG/T 20585-2011 钢制低温压力容器技术规定
30. HG/T 21574-2018 化工设备吊耳设计选用规范
31. GB/T 7714-2015 信息与文献 参考文献著录规则
32. GB/T 6556-2016 机械密封的型式、主要尺寸、材料和识别标志

## 附录 B 参考资料

- ①福州大学自动化研究所和福州大学过程装备与控制工程设计研究所“橇装式改性沥青生产装置”项目(工程号:zks-001)
- ②本科生毕业设计(论文)任务书
- ③福州大学毕业论文改性沥青生产装置设计
- ④助剂组成 <http://www.zxmw.com/fanshui/1250.html>
- ⑤SBS 性质 <https://baike.baidu.com/item/SBS%E6%94%B9%E6%80%A7%E6%B2%A5%E9%9D%92/7163258>
- ⑥上海阳光泵业制造有限公司 YCB 型圆弧齿轮泵\_上海阳光泵业制造有限公司(ygc1b.com)
- ⑦西安利特精细化工有限公司 [http://www.xalite.com/news/?105\\_523.html](http://www.xalite.com/news/?105_523.html)
- ⑧常规型电加热热载体炉 - 常能导热油炉 常州能源设备总厂有限公司(ceef.com.cn)<http://www.zxmw.com/fanshui/1250.html>

## 附录 C 盘管换热沥青侧流动当量直径的推导

盘管高度 1.2m，缠绕 8 圈，缠绕中径为 1.56m，则盘管展开后与水平面有夹角  $\alpha$ ，其两端点向水平面作垂线可得直角三角形。角  $\alpha$  的正切值  $\tan \alpha$

$$\tan \alpha = \frac{1.2}{3.1416 \times 1.56 \times 8} = 0.0306$$

夹角较小时，正切值与正弦值相差不大，忽略微小误差，可视为角  $\alpha$  正弦值  $\sin \alpha = 0.0306$ ，该直角三角形斜边长 39.23m，即为盘管有效长度。

设在沥青中有一理想液面，忽略其中不参与(或影响不大)的换热元件包括挡板，搅拌轴的浸湿周长，计算浸湿内盘管周长时，可视为液面浸湿展开后的内盘管，则浸湿周为椭圆形，其周长  $L$

$$L = \text{圆管法向截面周长} \times \sin \alpha$$

其面积  $S$

$$S = \text{圆管法相截面积} \times \sin \alpha$$

反应釜浸湿周长即为以反应釜内径为直径的圆的周长。

则当量直径  $d_e$

$$d_e = 4 \times \frac{\text{流通截面积}}{\text{润湿周边长}} = \frac{\text{反应釜截面积} - \text{盘管截面积}}{\text{反应釜润湿周边长} + \text{盘管润湿周边长}}$$

## 致谢

镂心<sup>[1]</sup>筹设，织辞<sup>[1]</sup>陈说，万言拙论，终于致谢。文悉童稚之言，无称缜密；作乃疏浅之论，不成器物。结草衔环，饮水思源，不胜受恩，难述以言。

浩浩闽江东入海，巍巍学府立东南<sup>[2]</sup>。读石悟道<sup>①</sup>，幸临闽都福大；筚路蓝缕<sup>②</sup>，一顾<sup>[3]</sup>母校荣光。然吾愚钝，又贪玩物，恍恍四载，乏善可陈。明德至诚，博学远志<sup>③</sup>，余无一能及，实有愧于心。

吾生也有幸，得良师<sup>④</sup>者数几。言传身教，待余若子。切切之恩，洋洋<sup>[4]</sup>樟溪之水；谆谆之诲，峨峨<sup>[4]</sup>旗山之巔。导师<sup>⑤</sup>不以生弩<sup>[5]</sup>鄙<sup>[5]</sup>，数批陋作于更阑。字字察审，句句修缮。无师金玉，此论难完。

恩慈抚鞠<sup>[6]</sup>，托予厚望。容吾潦倒<sup>[7]</sup>，宥余轻狂。咽苦劳形，差忙贫乡。呕沥心血尽，冀求兰桂<sup>[8]</sup>香。宁守百屈而不诉，只愿千里子无忧。恕子无能，负亲所望。学无著论，无以报华夏；业无建树，无以奉晨昏<sup>[9]</sup>。今谋事海沧，待衣锦还乡。

片纸致谢，幸蒙恩于<sup>[9]</sup>所遇<sup>[10]</sup>；落笔百言，是有感于<sup>[9]</sup>今昔。筵<sup>[10]</sup>有聚散，月有圆缺<sup>[11]</sup>，莫惧朝夕<sup>[12]</sup>，来日方长。

五月廿四日于鲤城

注释：①母校石刻。②院训。③校训。④感谢程万里、李学来、施小芳、孙志新、张朱武等老师的悉心教导；感谢伍宇翔、何杰等辅导员的帮助；感谢战琳等老师昔日陪伴。⑤感谢黄云云老师的指导。⑥感谢室友陈国昕、陈纪艺、陈杰航的陪伴与帮助。

### 参考文献

- [1]刘勰文. 情采[?]. 文心雕龙, 南朝: 三十一篇
- [2]佚名. 福州大学甲子校庆致辞[?]. 2019
- [3]刘向. 伯乐相马[?]. 战国策, 西汉末: 燕策二
- [4]吕不韦等. 伯牙鼓琴[?]. 吕氏春秋, 战国: 本味
- [5]诸葛亮. 出师表[?]. 三国
- [6]佚名. 蓼莪[?]. 诗经, 春秋: 小雅
- [7]曹雪芹. 西江月·无故寻仇觅恨[?]. 红楼梦, 清: 第三回
- [8]曹雪芹. 红楼梦[?]. 清: 第一百二十回
- [9]王勃. 滕王阁序[?]. 唐
- [10]王羲之. 兰亭集序[?]. 晋
- [11]苏轼. 水调歌头·明月几时有[?]. 宋神宗熙宁九年
- [12]战琳. 感于不惑之日[?]. 微信朋友圈, 2021-10-09