



中国石油大学
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM BEIJING

工程特色教学资料汇编

学校： 中国石油大学（北京）

院系： 化学工程与环境学院

教师： 曹 睿

日期： 2021 年 2 月

附件十一. 工程特色教学资料汇编

总目录

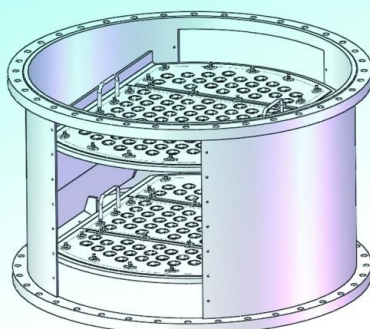
一、“工业规模蒸馏塔段模型平台”	2
二、“工业规模蒸馏塔段标准示范图”	9
三、“3D 虚拟仿真工业塔设备平台”	25
四、课件展示	42
五、学生成果展示	51
六、教改论文展示	65

一、“工业规模蒸馏塔段模型平台”

- 1、“工业规模蒸馏塔段模型平台”一展板
- 2、“工业规模蒸馏塔段模型平台”一正面照
- 3、“工业规模蒸馏塔段模型平台”一侧面照
- 4、“工业规模蒸馏塔段模型平台”一塔板总装配照（安装浮阀）
- 5、“工业规模蒸馏塔段模型平台”一俯视照
- 6、“工业规模蒸馏塔段模型平台”一受液盘正面照
- 7、“工业规模蒸馏塔段模型平台”一 组装塔板正面照（未安装浮阀）
- 8、“工业规模蒸馏塔段模型平台”一弓形板正面照
- 9、“工业规模蒸馏塔段模型平台”一正面照
- 10、“工业规模蒸馏塔段模型平台”一弓形板背面照
- 11、“工业规模蒸馏塔段模型平台”一塔板组装正面照（安装浮阀）

1、“工业规模蒸馏塔段模型平台”一展板

《化工原理课程设计》工业规模蒸馏塔段模型平台 简介



一、《化工原理课程设计》的教学特点

《化工原理课程设计》是《化工原理》教学中最重要的实践环节，“塔盘设计”部分是核心设计内容之一。为了增强学生对现场设备和实际生产过程的了解，对工业塔板建立直接的感性认识，中国石油大学（北京）化工学院结合石油院校的科研和教学专业优势，设计制作了具有工业规模的 $\Phi 1200$ 浮阀塔板模型，完全采用工业结构和尺寸。该模型的建立可以弥补学生对工业设备认识的空白，建立、培养学生的工程概念和解决工程实际问题的能力。

二、工业浮阀塔板模型的特点

模型塔段内设有两类主体塔内件：可拆件和固定件。可拆件为塔盘板，包括通道板、矩形板和弓形板，板上装有浮阀和卡子连接件；固定件包括降液板、溢流堰、受液盘等；此外塔内还设有塔板支撑件（支撑圈、支撑梁）等。

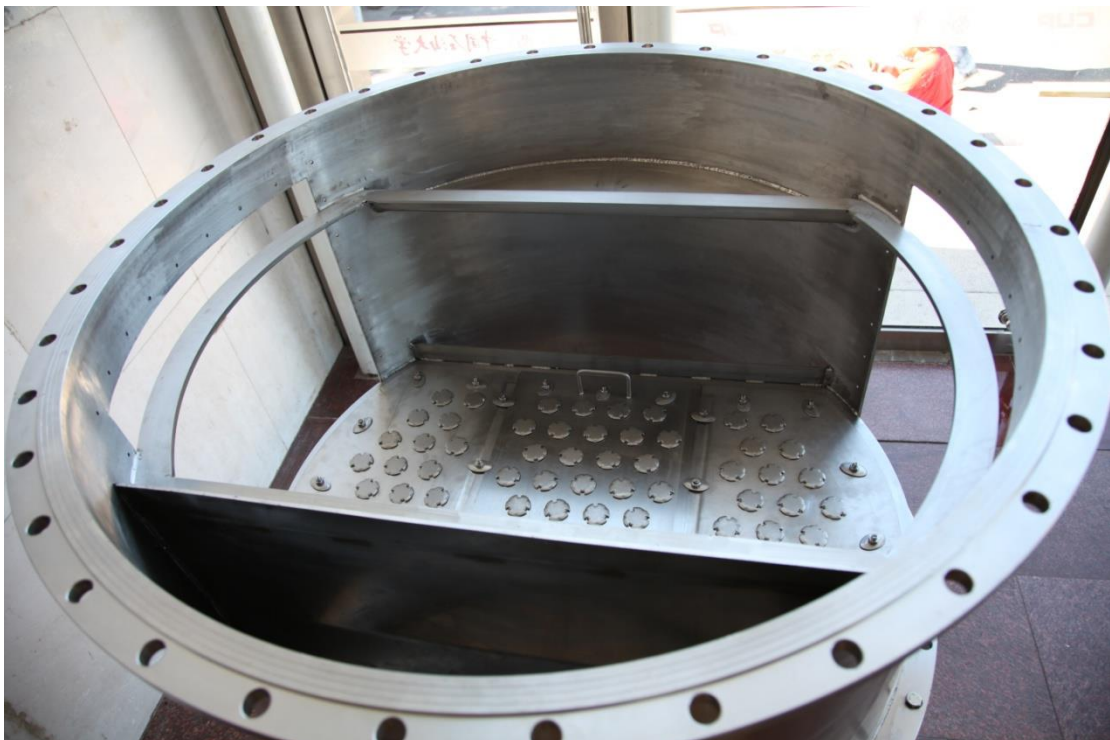
建立该工业模型的作用在于：

- 1、使学生了解塔板及其他内构件的结构、尺寸、以及主要设计参数的意义，如塔径、板间距、堰长、堰高、降液管面积、底隙、开孔率、浮阀排布等；
- 2、通过对塔板块等零部件的拆装演示，使学生了解塔内件安装的工程实施过程；
- 3、模型完全按照工业标准设计，使学生对塔板连接件、支撑件，以及相关机械构件的工程细节获得深入的认识。
- 4、使学生建立“工装一体化”思想，了解工艺、设备并行设计过程。

2、“工业规模蒸馏塔段模型平台”—正面照



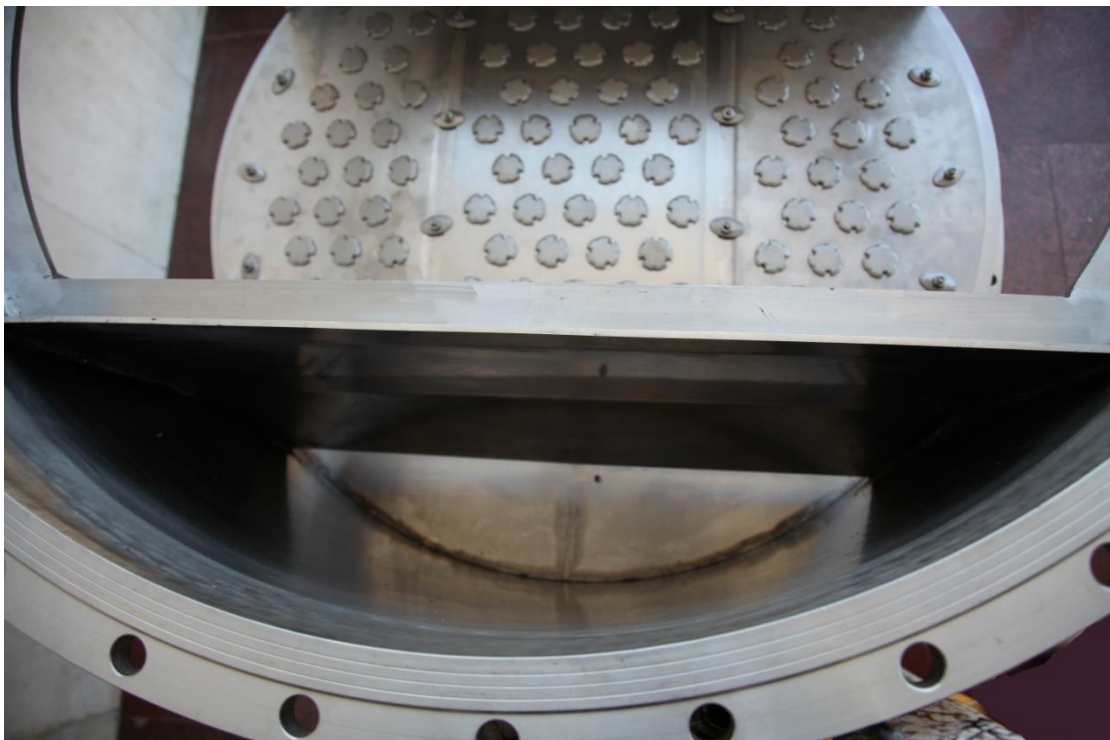
3、“工业规模蒸馏塔段模型平台”—侧面照



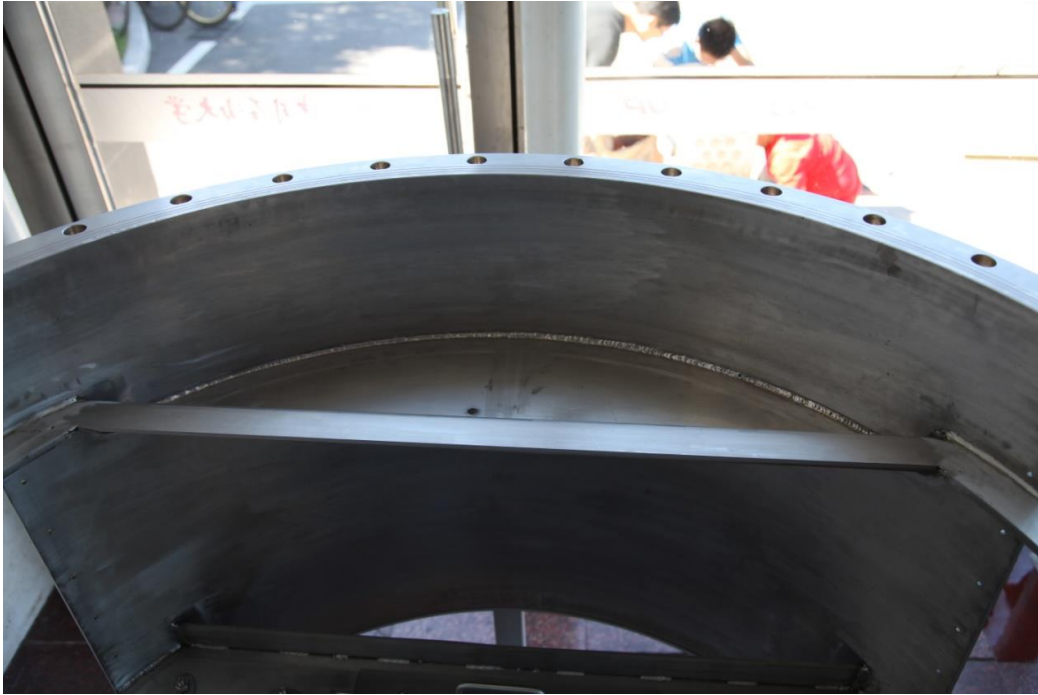
4、“工业规模蒸馏塔段模型平台”—塔板总装配照（安装浮阀）



5、“工业规模蒸馏塔段模型平台”—俯视照



6、“工业规模蒸馏塔段模型平台”—受液盘正面照



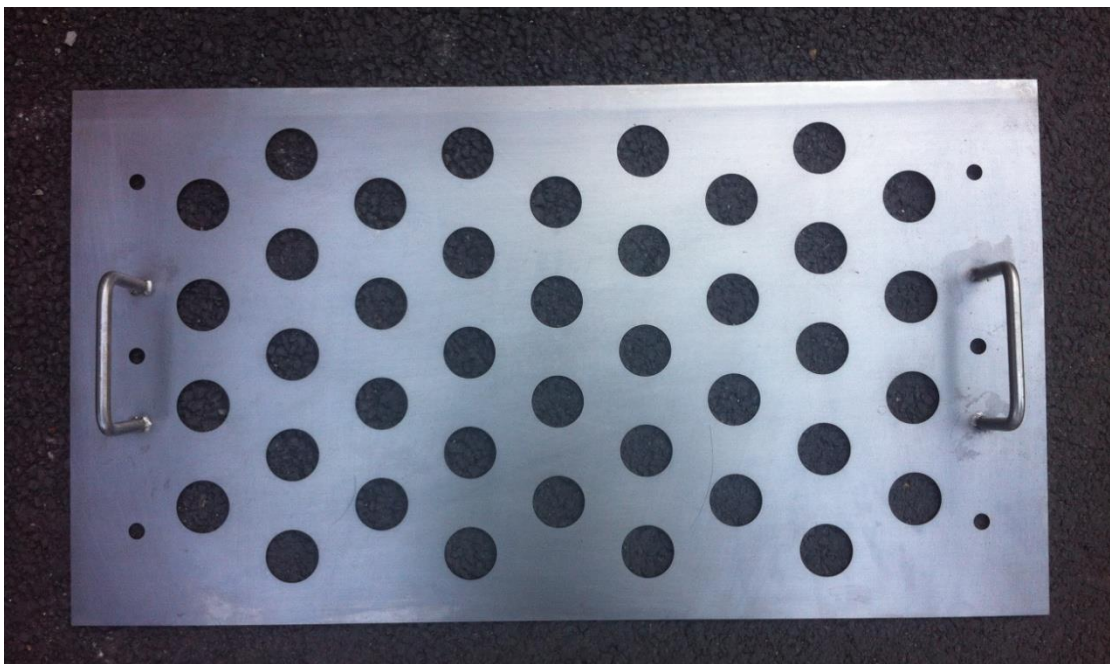
7、“工业规模蒸馏塔段模型平台”— 组装塔板正面照（未安装浮阀）



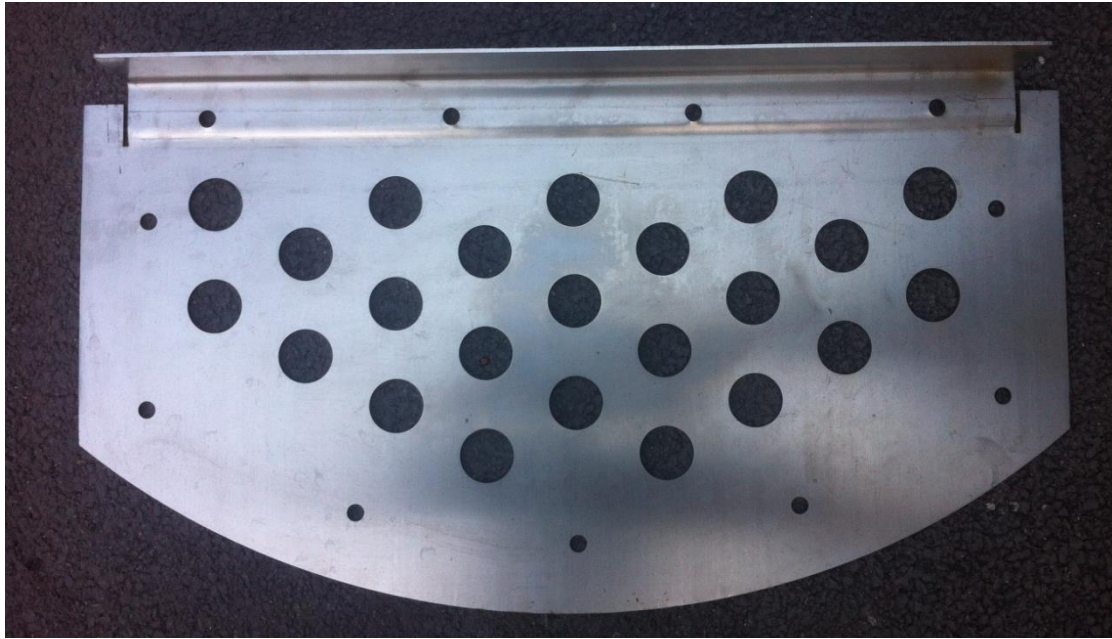
8、“工业规模蒸馏塔段模型平台”—弓形板正面照



9、“工业规模蒸馏塔段模型平台”—正面照



10、“工业规模蒸馏塔段模型平台”—弓形板背面照



11、“工业规模蒸馏塔段模型平台”—塔板组装正面照（安装浮阀）



二、“工业规模蒸馏塔段标准示范图”

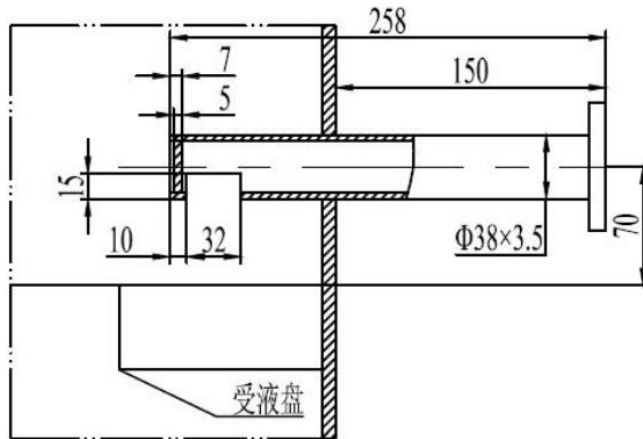
- 1、“工业蒸馏塔标准示范图”（学生教学版）
- 2、“工业蒸馏塔标准示范图”—塔段主视图和俯视图
- 3、“工业蒸馏塔标准示范图”—弓形板、矩形板图
- 4、“工业蒸馏塔标准示范图”—固定件组装主视图和俯视图
- 5、“工业蒸馏塔标准示范图”—降液管、受液盘、溢流堰图
- 6、“工业蒸馏塔标准示范图”—塔段主体法兰主视图和俯视图



1. 总装配图（塔顶回流管）

I-回流管结构图

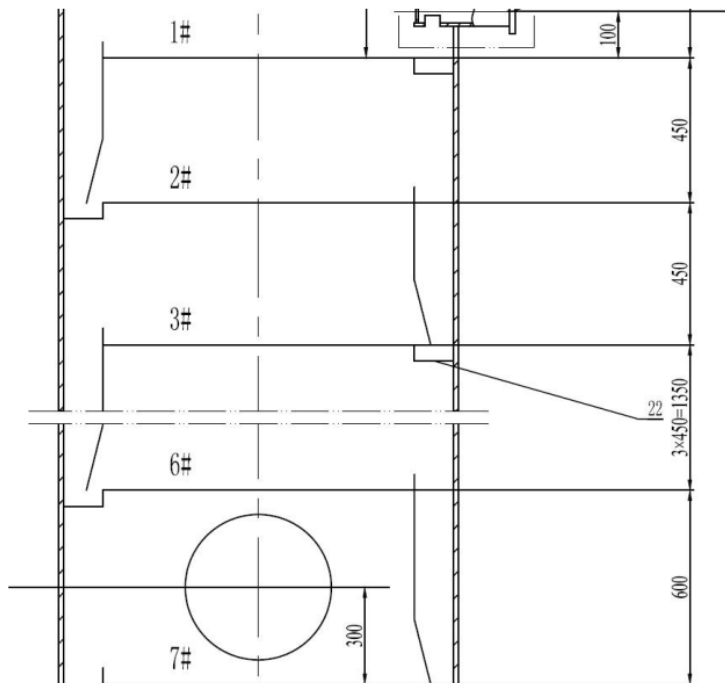
1:5



5



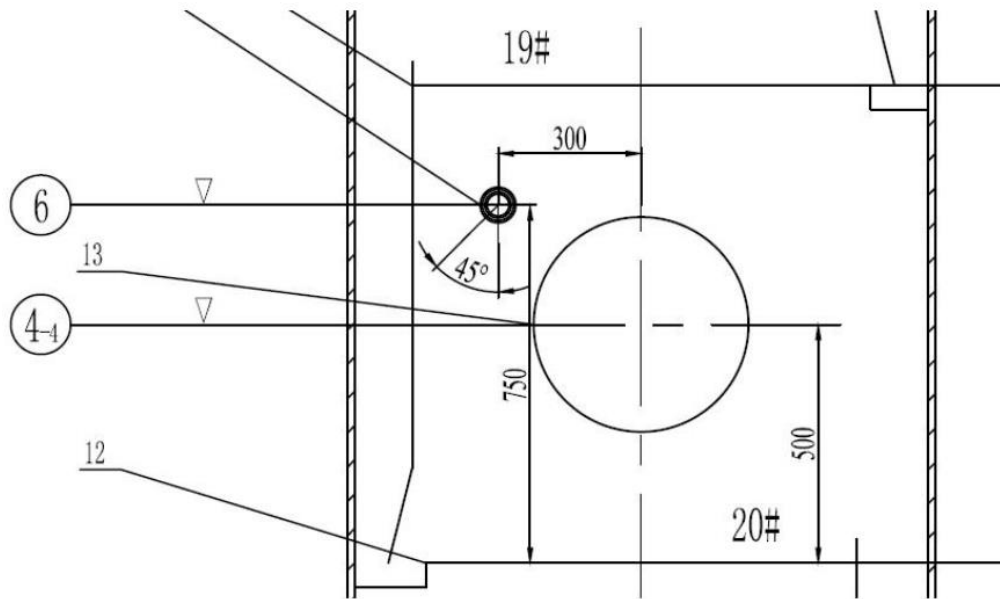
2. 总装配图（省略画法）



6



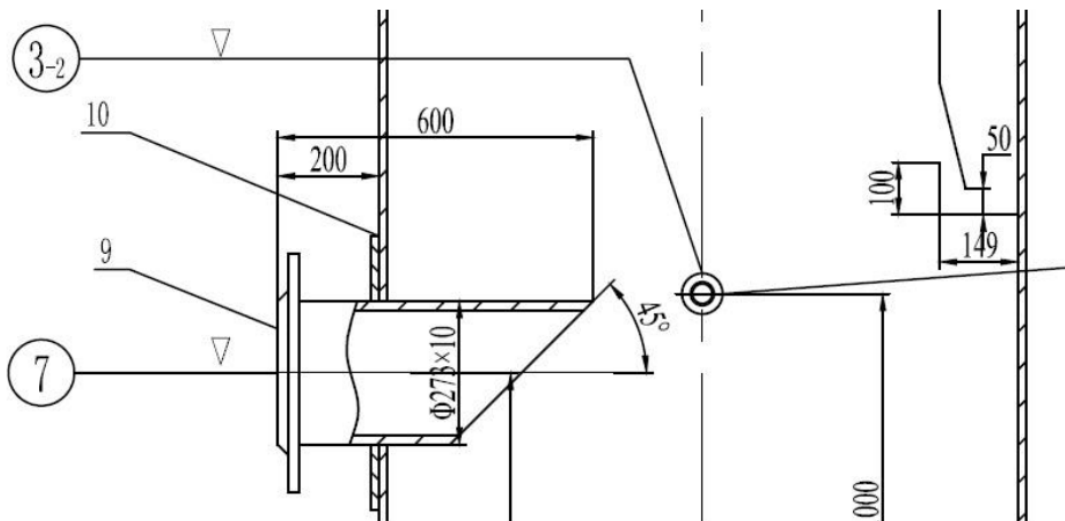
3. 总装塔顶（进料管）



7



4. 总装配图（蒸汽返塔管线）



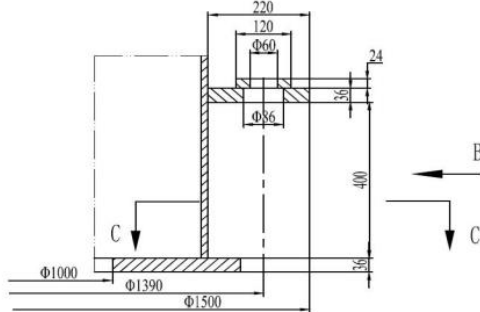
8



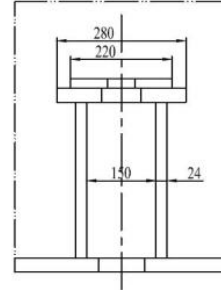
7. 地脚三视图

III-螺栓座结构图

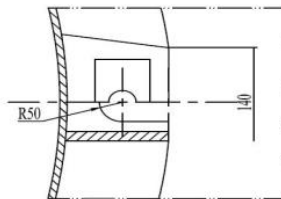
1:5



B向视图



C-C视图



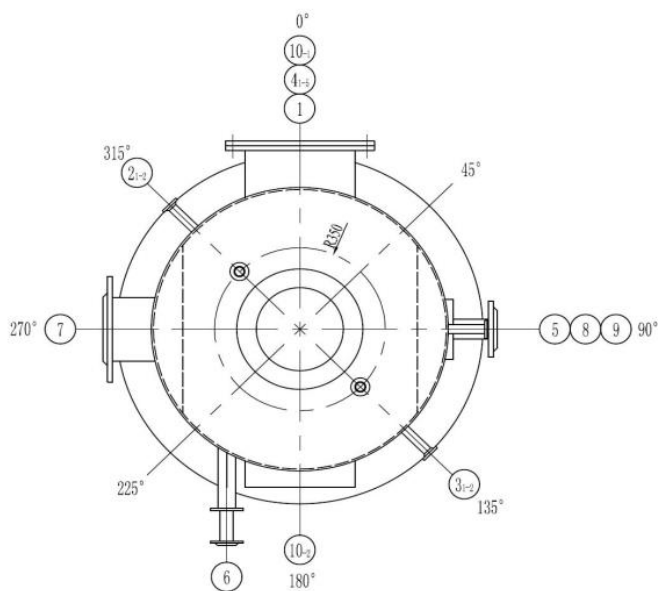
11



8. 管口方位图

管口方位图

1:16



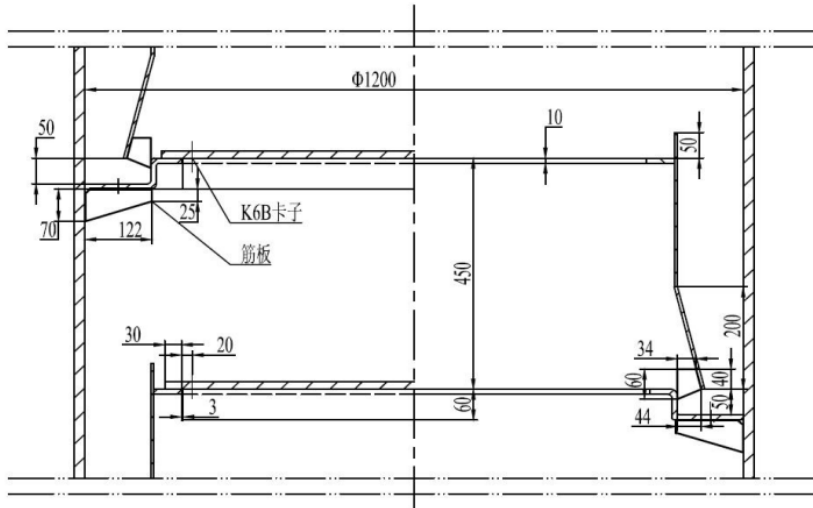
12



9. 塔盘主视图

降液管与受液盘结构图

1:10



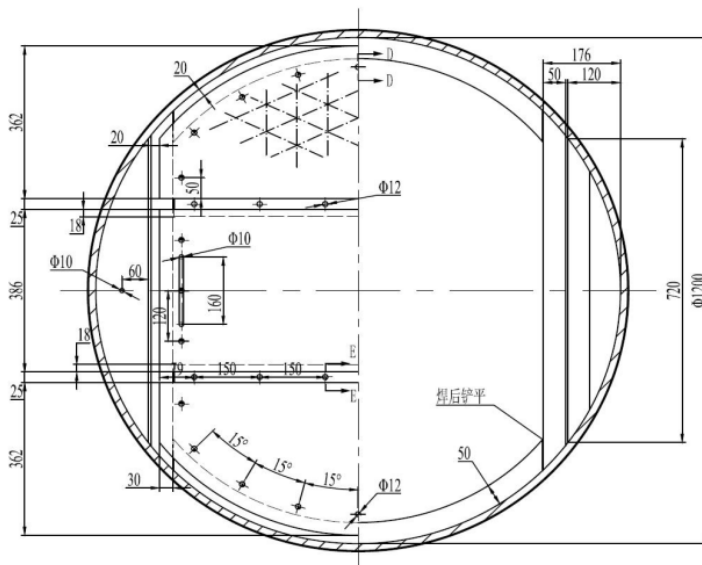
13



10. 塔盘俯视图

塔板安装结构图

1:10



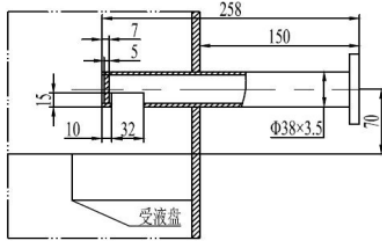
14



11. 回流管和卡子剖视图

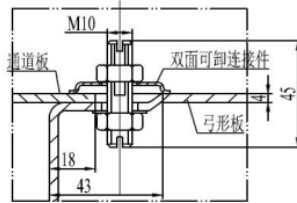
I-回流管结构图

1:5



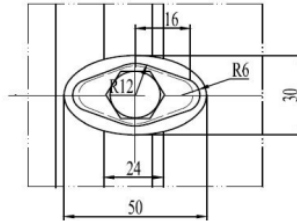
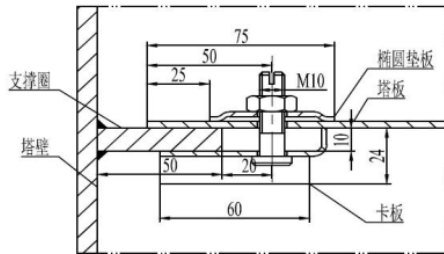
E-E 塔盘间连接结构图

2:1



D-D 塔盘边板与支撑圈的连接结构图

2:1



15



12. 设计参数和

设计参数			
工作压力	0.15MPa	工作温度	120°C
设计压力	0.28MPa	设计温度	150°C
物料名称	乙醇-水混合物	设备容积	16.3152m ³
焊接系数	0.85	腐蚀裕度	3mm
容器类型	I	基本风压值	45kg/m ²
地震烈度	6级	浮阀型号	F1
开口说明			
编号	用途	数量	公称直径/ mm
1	气体出口管	1	336
2 ₁₋₂	温度计测量管	2	31
3 ₁₋₂	压力计测量管	2	31
4 ₁₋₅	人孔	6	450
5	回流管	1	31
6	进料管	1	46
7	塔底蒸气入口管	1	253
8	出料管	1	77
9	通道管	1	240
10 ₁₋₂	裙座人孔	2	450
图例说明			
⊕	配K10B卡子	⊕	配K6B卡子
⊕	配SLB卡子		

27	支撑板	3		Q235-A		
26	通道管	1	Φ256×8 L=128	Q235-A		
25	接管	1	Φ85×4 L=1178	20		
24	补强圈	1	DN85×8-E	Q235-A		
23	接管	1	Φ38×3.5 L=150	20		
22	受液盘	31		Q235-A		
21	接管	1	Φ38×3.5 L=150	20		
20	椭圆形封头	1	EHA1200×8	20R	103	103
19	接管	1	Φ38×3.5 L=150	20		
18	补强圈	1	DN356×8-E	Q235-A		
17	接管	1	Φ356×10 L=200	20		
16	接管	1	Φ38×3.5 L=150	20		
15	塔盘II	25	组合件	Q235-A		
14	接管	1	Φ54×4 L=400	Q235-A		
13	人孔	5	Φ470×12 L=200	Q235-A		
12	塔盘I	5	组合件	Q235-A		
11	筒体	1	DN1200×8 h=14200	Q235-A	3379.6	3379.6
10	补强圈	1	DN273×8-E	Q235-A		
9	接管	1	Φ273×10 L=200	20		
8	接管	1	Φ38×3.5 L=150	20		
7	椭圆封头	1	EHA1200×8	20R	103	103
6	排气孔	4	Φ57×3.5 L=150	Q235-A		
5	裙座圈	1	Φ1200 δ=8 h=2499	Q235-A		
4	裙座人孔	2	Φ466×8 L=150	Q235-A		
3	垫板	12	110×140 δ=18	Q235-A		
2	筋板	24	110×200 δ=12	Q235-A		
1	基础环板	1	Φ1500/Φ1000 δ=18	Q235-A		
编号	名称	数量	规格	材料	单重 kg	重量 kg
金属总重:						
浮阀精馏塔Φ1200×H18463装配图					图号	00
设计			中国石油大学 化学工程学院		比例	1:16
制图					班级	
指导老师					备注	



13. 技术要求

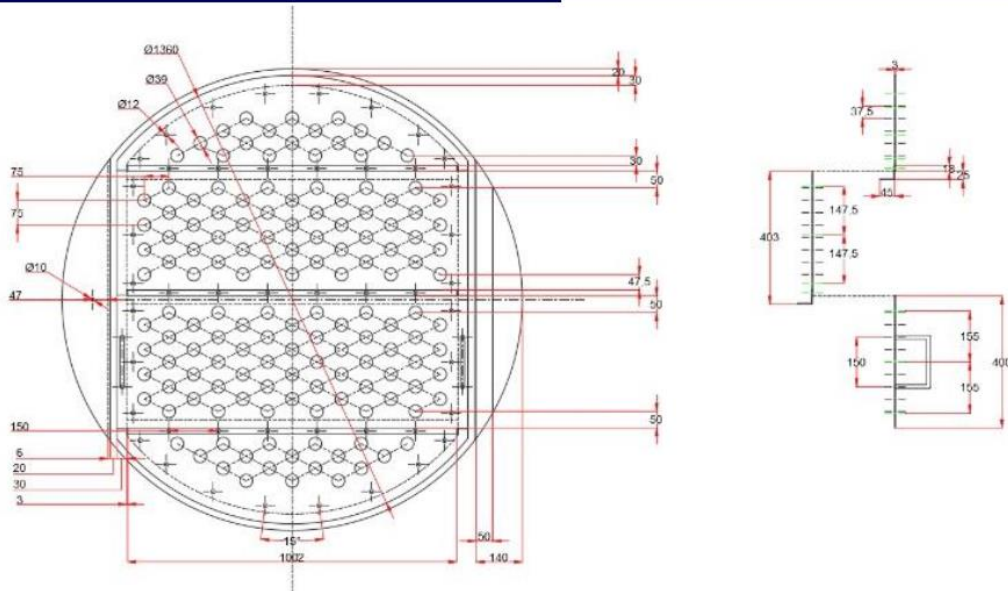
技术要求

1. 本设备按GB150-89, 钢制压力容器, 及国家劳动总局, 压力容器安全监察规程, 进行制造实验和验收。
2. 本设备应按JB/T4709-2000《钢制压力容器焊接规程》进行施焊, 焊缝坡口型式可按GB985-88《气焊、手工电弧焊及气体保护焊焊缝坡口的基本型式和尺寸》和GB986-88《埋弧焊焊缝坡口的基本型式和尺寸》之规定加工。
3. 除注明者外, 所有角焊缝、搭接焊缝之焊脚高度均等于两焊件中较薄者的厚, 且必须连续焊。
4. 焊接接头型式及尺寸除图中注明外, 按GB985-986-80中规定, 角焊缝的腰高按较薄板的厚度, 法兰的焊接按相应法兰标准中的规定。
5. 本设备制造完成后, 应进行整体消除应力热处理。热处理之前应将所有与塔壁相焊的件, 如梯子平台、工艺管线支架的垫板、吊架的垫板、保温支撑圈垫板及焊在塔壁上的固定件、破沫网与塔壁的连接件、保温钉等与塔壁相焊接的连接件, 热处理以后不再施焊, 任何部位的硬度值不得大于HB100。
6. 筒体、封头及其相连接的对接焊缝应进行无损探伤检查, 探伤长度为20%, 射线探伤按GB3323-82规定标准, III级合格。
7. 设备制造完毕后进行液压实验。立试压力4.6khf/cm², 卧试压力7.8kgf/cm²。
8. 裙座螺栓孔中心圆直径公差±3mm, 任意两孔间距公差±3mm。
9. 塔盘的制造, 安装按JB1205-80进行。
10. 管口方位见本图。

17



1. 浮阀塔板排布图 (精馏段)

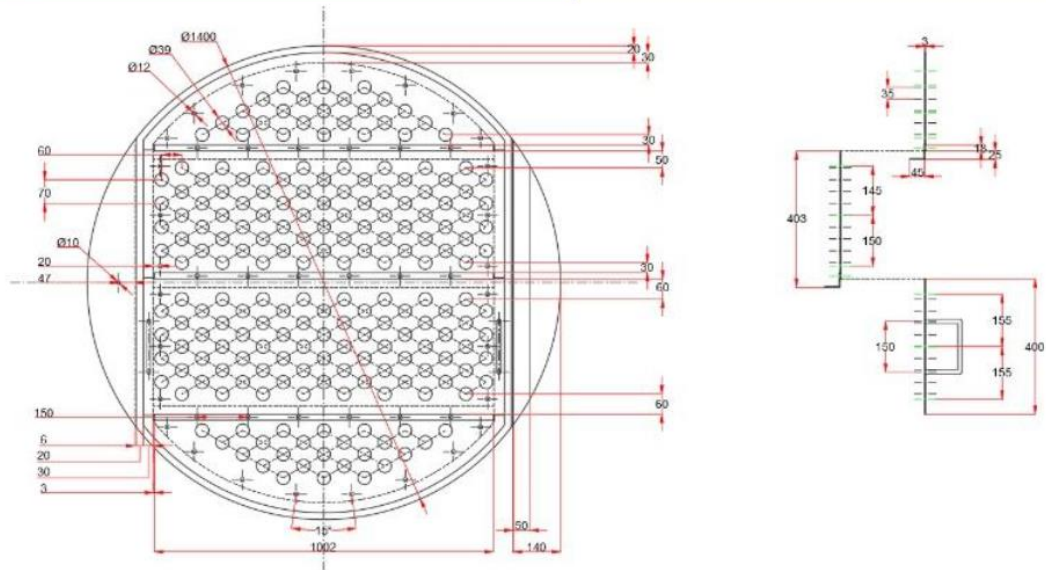


提馏段: 146个

18



2. 浮阀塔板排布图（中间段）

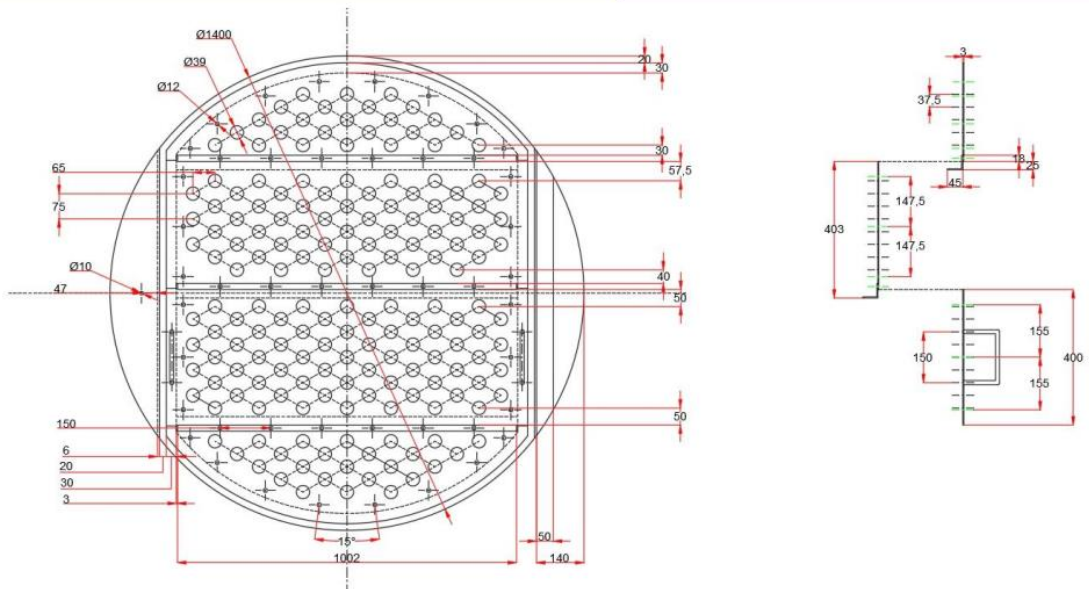


精馏段：202个

19



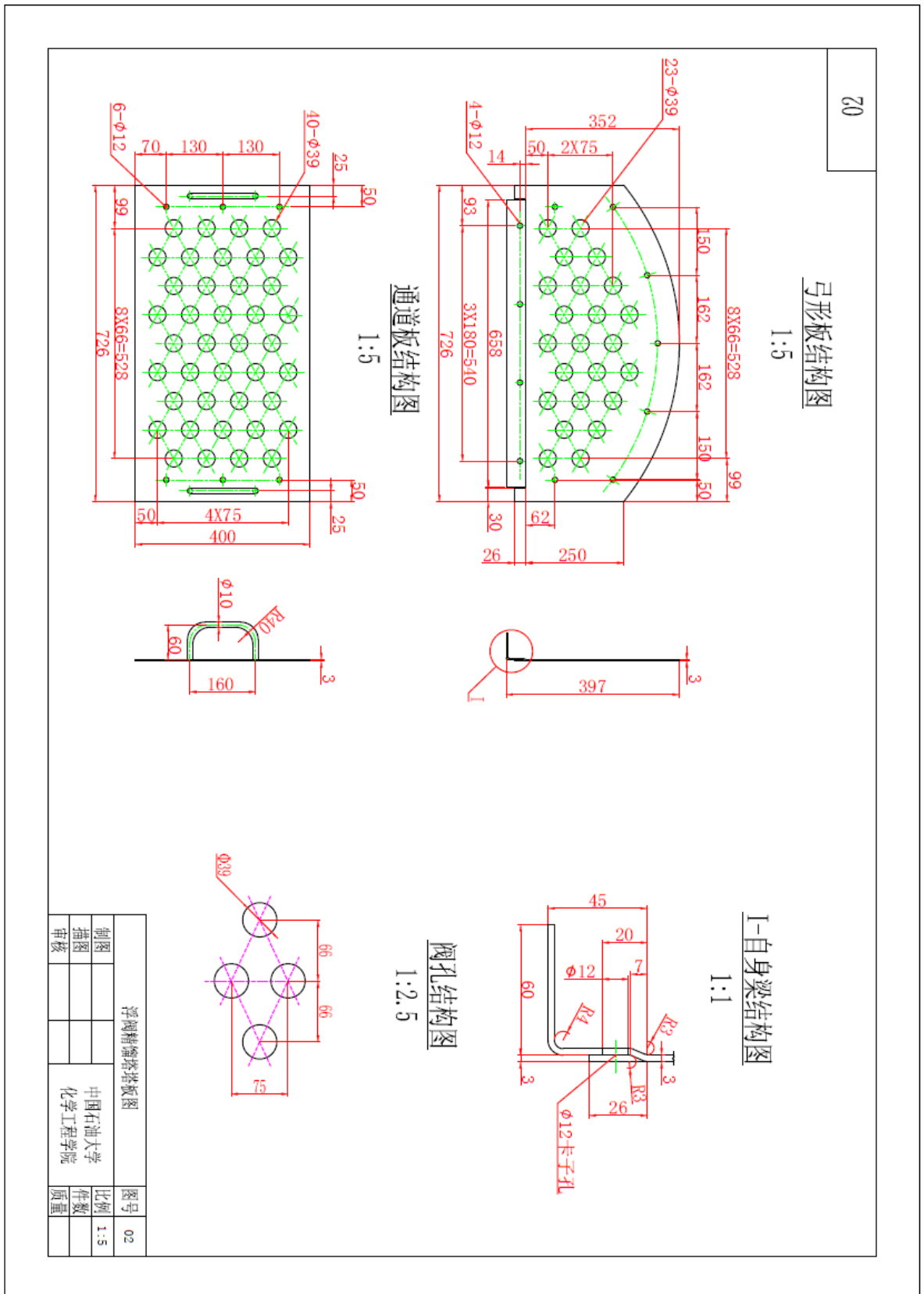
3. 浮阀塔板排布图（提馏段）



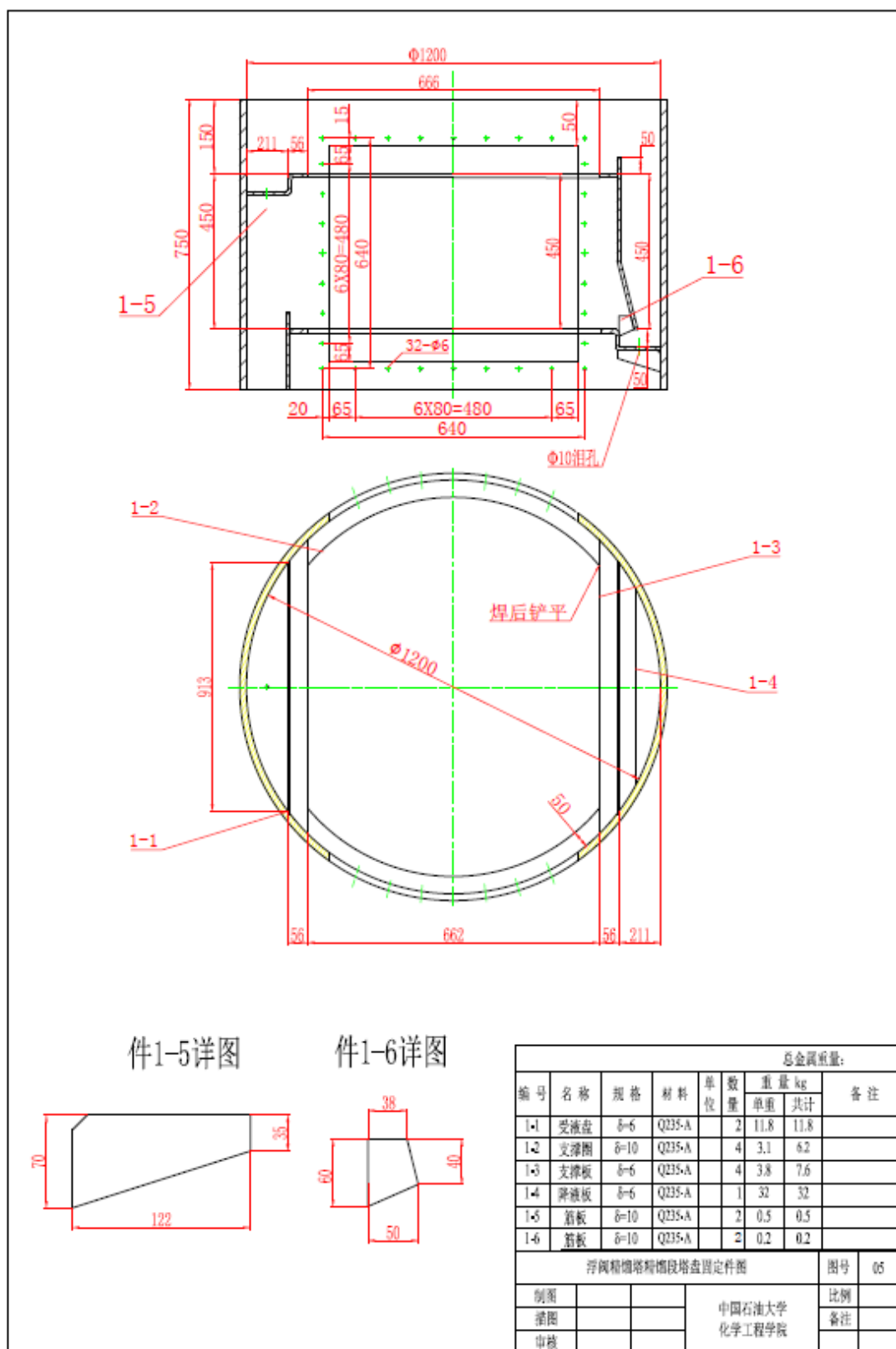
中间段：175个

20

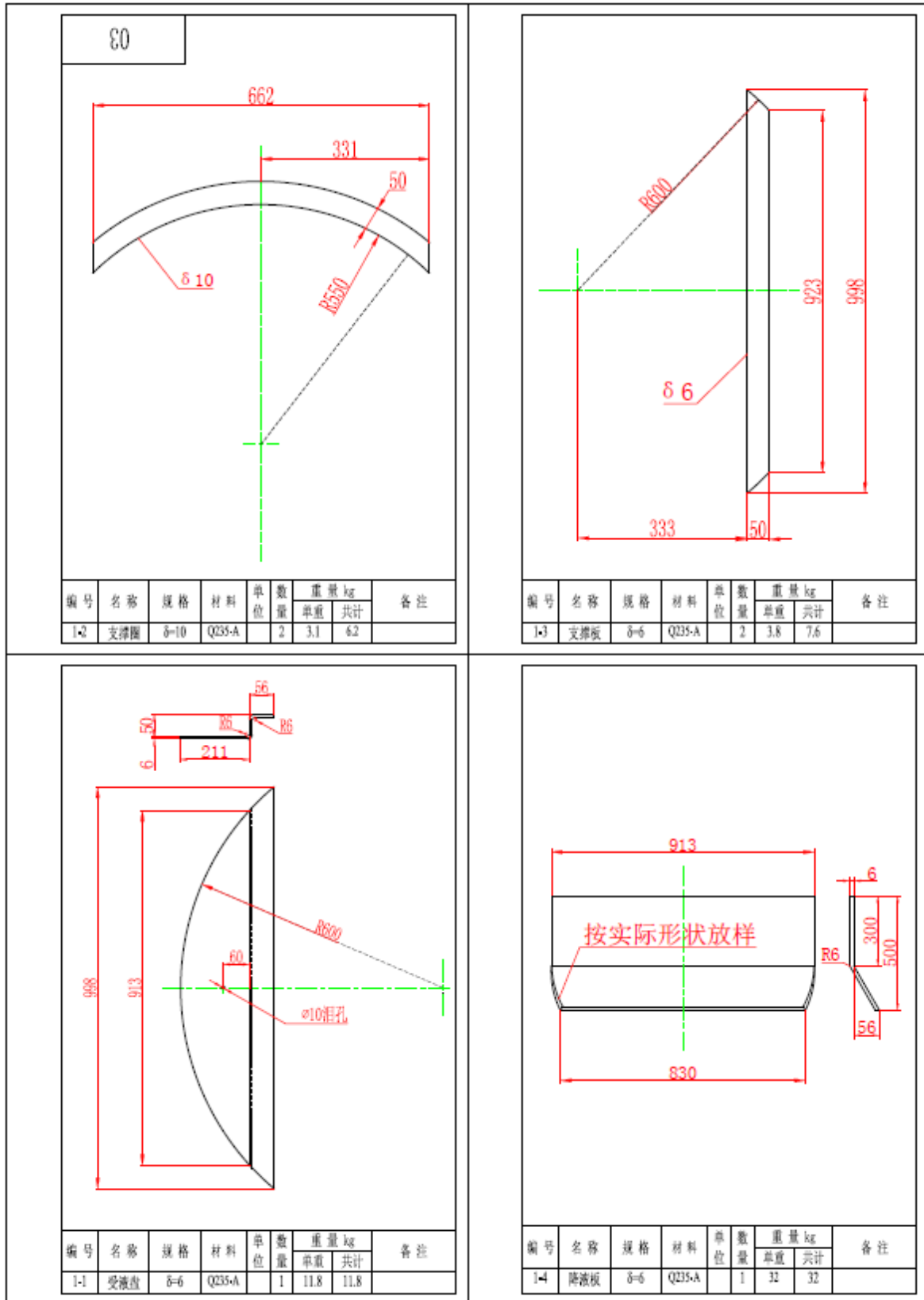
3、“工业蒸馏塔标准示范图”—弓形板、矩形板图



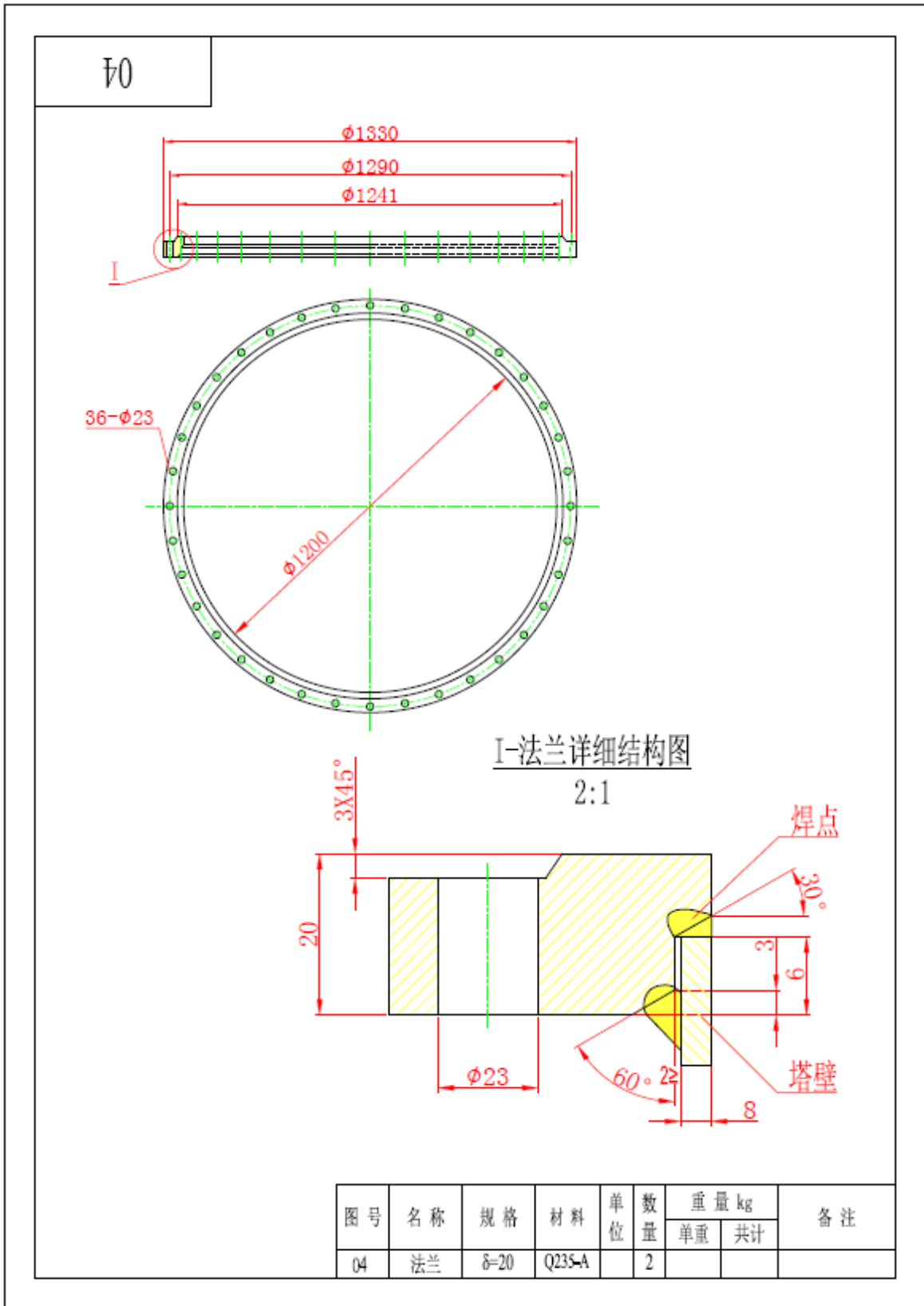
4、“工业蒸馏塔标准示范图”—固定件组装主视图和俯视图



5、“工业蒸馏塔标准示范图”—降液管、受液盘、溢流堰图



6、“工业蒸馏塔标准示范图”一塔段主体法兰主视图和俯视图



三、“3D虚拟仿真工业塔设备平台”

工业规模塔设备的虚拟设计

——SolidWorks 软件在化工仿真中的应用（一）

曹睿，刘金龙，刘艳升，刘梦溪，任洁梅

（中国石油大学（北京），重质油国家重点实验室，北京，102249）

[摘要] 塔设备是应用最广的化工设备，其结构复杂，通常采用非标设计，传统的装备图或实物照片不利于初学者了解塔设备的立体结构和功能。本研究基于 SolidWorks 三维仿真软件建立了具有工业规模的虚拟塔设备模型平台，可以完全按照工业标准实现对塔板传质构件、溢流构件、支撑件和连接件的设计。该模型平台充分展示了机械构件的 3D 精细结构，可以动态显示设备的立体效果，实时再现机械设计全过程，有助于提高对传质设备的认识并强化工程设计能力。

[关键词] 塔设备；SolidWorks 软件；塔内件；虚拟设计；化工仿真

Virtual design of the tower in industrial scale —— the application of SolidWorks in chemical engineering simulation I.

Cao Rui, Liu Jinlong, Liu Yansheng, Liu Mengxi, Ren Jiemei

(State Key laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum, Beijing102249, China)

Abstract: Tower has been considered to be the most widely-used device in chemical engineering. It is usually designed in non-standard criteria for its complicate construction. Traditional drawings and pictures of towers are not applicable for beginners to understand the structures and functions of tower. Based on SolidWorks, a efficient 3D simulation software, the virtual modeling tower platform in industrial scale has been established, which can realize the design of the mass transfer components, overflow components, supports and connectors of trays according to industry standards. It makes full use of the 3D function of mechanical components, can dynamically display the stereoscopic effects of the device, and reproduce the whole process of mechanical design in real time, which helps to improve the understanding of mass transfer equipment and strengthen the engineering design ability in a brand new way.

Key words: tower; SolidWorks; tower components; virtual design; process simulation in chemical engineering.

塔设备是常见的分离设备，其作用是为传质过程提供适宜的场所，在维持一定温度、压力、汽液相流量等条件下，从结构上保证两相之间有充分的接触时间和接触空间，以达到理想的传质、传

作者简介：曹睿（1973—），女，副教授，博士

* 中国石油大学（北京）校级重点教改项目（1. 用 SolidWorks 软件构建“化工传质设备的机械设计模拟平台”；2.《化工原理》课程建设）资助

通讯地址：北京昌平府学路 18 号中国石油大学（北京）化学工程与环境学院

Tel: 010-89733288 (O) 18910287441 (M) E-mail: ctray@cup.edu.cn

热效果^[1]。塔设备在炼油、化工等领域的应用量大而面广，在各炼油装置设备投资比例中，塔设备均占到 15% 以上，有的甚至高达 75%，其设计、放大和过程强化是分离工程领域最核心的研究内容。

塔设备结构复杂，不同于泵、风机、换热器等标准设备，不能按性能指标直接选型，而是需要根据生产任务的处理量、传质效率、操作弹性、压降、体系物性、能耗等具体要求，进行结构设计和水力学校核^[1]。因此，要求设计人员熟悉塔设备结构和设计方法。由于安全性等问题，学生在实习环节中通常看不到工业塔内部，而实验室规模的塔也只是工业装置的“微缩”模型，内构件也与实际工况相去甚远。学生因缺乏感官认识，不易掌握设备的结构和功能。针对这一问题，本文借鉴国外的先进教学经验^[2]，采用 SolidWorks 软件，对工业塔段模型平台进行了仿真设计。该模型平台可以将机械结构直观生动地展示，对塔设备进行着色渲染^[3]，甚至能以动画的形式重现机械结构^[4]，通过与实物照片的联合使用，达到以假乱真的地步，非常适合与机械设备相关的教学环节。

1. SolidWork 仿真技术简介

SolidWorks 软件是基于 Windows 平台开发的一款包括三维机械设计(CAD)、机构运动仿真分析、结构有限元分析(CAE)和计算机辅助制造(CAM)等功能的工程设计分析软件^[5]。SolidWorks 进行虚拟设计时，从几何模型开始，给这些零件模型分配材料属性，定义载荷和约束，采用特定的数值方法将模型离散化，即对模型进行网格划分，将几何体剖分成相对小而形状简单的实体(有限单元)。有限元(FEA 数值)求解器将把各个单元的简单解综合成对整个模型的近似解来得到期望的应力或形变结果，确定分形类型，从而完成数学模型的创建^[5]。

SolidWorks 软件具有直观的用户界面，在造型和装配过程中，可视功能强大，只需单击和拖动零部件，即可检查装配体运动是否正常，以及是否存在碰撞。并且还将结构分析功能嵌入到 CAD 环境中，采用 Simulation 插件可以对零件进行结构和有限元分析，从而评价产品性能并优化设计。SolidWorks 的 API 采用开放式用户设计和数据接口，可用 Visual Basic^[6]、Visual C++^[7]以及其它支持 OLE 技术的语言进行二次开发，还支持 IGES、DXF、DWG、SAT、STEP、STL、ASC、Pradsolid 等格式的转换程序。

SolidWorks 系统有三维建模、运动分析、结构分析以及多种外挂插件等功能模块^[8,9]，可以通过 Circuitworks 模块快捷创建参数化机构和零件模型，通过 SolidWorks Motion 和 SolidWorks Simulation 模块可对机械设计方案进行动态仿真分析，结果以曲线和动画方式显现，实时再现设计意图，使复杂机械问题变得简单、直观和精确，设计人员完全浸入到模拟工程设计状态之中。

2. 工业塔设备虚拟仿真设计平台的建立

“塔设备”的主体设计内容包括工艺计算、塔内件初步设计及水力学校核、全塔机械设计等，其中“塔内件设计”是最核心的内容，其设计对象又可分为以下几部分。

(1) 塔盘板：包括通道板、矩形板(可缺省)和弓形板，板上设置浮阀、筛孔等鼓泡元件，因可拆卸更换，称之为可拆件。塔盘板构成鼓泡区，是实现汽液传质的场所，决定了塔的传质效率。

(2) 溢流装置：包括降液板、溢流堰和受液盘等，通常与塔满焊成为一体，安装后无法更换，

称之为固定件。溢流件虽不具有传质作用，但能保持恒定汽、液流量，是维持正常操作的重要构件。

此外，塔内还有两类辅助构件：

(1) 卡子连接件：用于将塔盘板固定在支撑件上，根据安装位置和结构的不同，可分为 K 型和 SLB 型两类。在设计时要求布局合理，受力均匀。

(2) 塔盘支撑件：包括支撑圈和支撑梁，是塔内的主要受力部件。

本模拟采用 2013 版 SolidWorks 软件，依据实际工业塔建立了四类仿真模型（塔盘板、溢流装置、塔板连接件、塔板支撑件），形成实体造型-虚拟装配-工程图纸的基本设计思路。在实体造型过程中，通过拉伸、旋转、薄壁特征、抽壳、特征阵列以及打孔等操作来实现对各种零件的设计，并通过驱动尺寸和几何关系实现建模的参数化。在装配中实现智能化装配，并进行静态干涉检查以及动态装配的干涉检查和间隙检测，进而搭建起虚拟仿真设计环境。

3. 工业仿真塔的设计效果

3.1 仿真塔的壳体和塔盘设计条件

塔器的壳体机械设计包括塔筒和封头两部分，其材质和壁厚的设计参数与物系、容器直径及其操作温度、压力紧密相关。如壁厚，可根据许用应力值进行计算，然后加上腐蚀余量、加工减薄量和板厚负偏差等项进行修正，最终圆整到设计壁厚。塔筒的材质常用的有碳钢（A3、Q235A、20#、45#）和不锈钢（304#，即 0Cr18Ni9、302#，即 1Cr18Ni9，316L，00Cr17Ni14Mo2）。

工业上对小于 1m 直径的塔常采用主体法兰整装，1m 及 1m 以上的采用分块式塔板，为了便于观察，本模型采用主体法兰连接，塔板完全采用工业结构和尺寸。

塔总截面积等于鼓泡区面积和降液管（或受液盘）区面积之和，当二者之间匹配合理时，既能保证足够的鼓泡区面积，以获得较充分的汽液传质效果，又能确保降液管有足够大的处理能力，不发生淹塔。鼓泡区边缘还要去除与支撑梁和支撑圈搭接的液体分布区、破沫区、边缘区。塔径愈小鼓泡区所占的分率愈小，塔板面积的有效利用率愈低。根据经验和汽、液相负荷确定堰径比 L_w/D ，然后计算降液管面积、出口堰长和降液管宽度^[10]，再根据气速估算开孔率。主要结构参数见表 1。

表 1 仿真塔的主要结构参数

结构	类型	塔径 D, mm	溢流数	降液管宽 W_d, mm	溢流堰长 L_w, mm	板间距 H_T, mm	通道板	弓形板	开孔率 $\Phi, \%$
									精馏段
尺寸	主体法兰	1200	1	211	913	450	1	2	10.05

3.2 溢流装置（固定件）的设计效果

(1) 降液管：单溢流塔常采用弓形降液管，是由降液板和塔壁形成的弓形空腔，降液板上方与出口堰相连，下方与下层塔板间留有底隙，作用是将上层塔板上的液体导流到下层塔板。通常分为垂直式、倾斜式和悬挂式（截断式）三种，因降液管内下方液层的气含率较低，底部清液的体积流量小于上部，常采用倾斜式降液管（见图 1），该结构对应的受液盘面积小，可使鼓泡区面积增大。

降液管虽然不具有传质作用，但决定了塔设备的处理能力。降液板将塔段分为鼓泡区和溢流区，这两部分塔截面积的分配由气、液相流量决定，降液管弦长是设计关键，一般取 0.6~0.8 倍的塔径，

小液量取下限。若降液管面积设计过大，鼓泡区面积就会减小，影响传质，也降低了喷射液泛处理能力。反之，降液管面积过小会造成降液管淹塔。

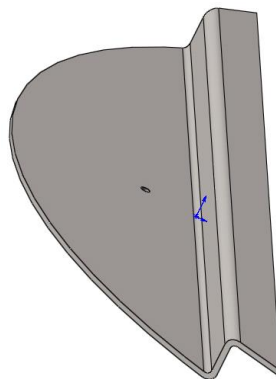
(2) 溢流（出口）堰：溢流堰与降液板上端连为一体，是高出塔板的那部分堰板。常用平口堰（见图 2）、齿形堰和栅栏堰，小液量用齿形堰，栅栏堰还具有挡板作用。为保证降液管液封，使用平型受液盘时还需安装入口堰。堰高决定了液层厚度、塔板压降，对降液管内的液层高也有影响。溢流堰可保证塔板上有一定厚度的液层，使气相通过塔板时与液相充分接触，堰高越高，两相接触时间越长，越有利于传质，但塔板压降也越大。

(3) 受液盘：受液盘安装在降液管下方，有平型和凹型两种，起到液封、缓冲和重新分布的作用。液封能避免气体从降液管向上短路溢出，缓冲可防止降液管流下的液体冲击塔板上的浮阀或筛孔鼓泡区。图 3 所示为凹型受液盘的正面和背面效果图。受液盘中根据规模设有 1~2 个泪孔，在停工过程中避免积液，此外在受液盘下方以及受液盘和降液板下端有支撑筋板，起到机械加强的作用。

(4) 塔板支撑件：图 4 所示为支撑圈和支撑梁，安装后相连，焊后修平，起到支撑和搭载塔盘板的作用。塔板块所用卡子连接件的厚度由支撑圈和支撑梁所决定，支撑圈和支撑梁的常用宽度为 50~100mm、厚度为 10mm，用 K10B 卡子将塔盘板固定。



图 1. 降液板设计效果图



a. 正面

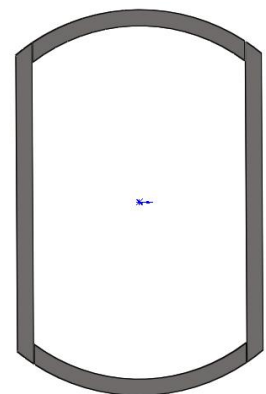
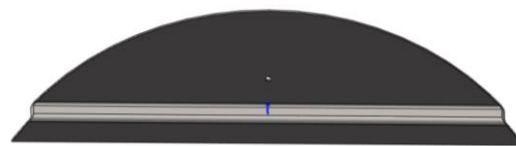


图 4. 支撑件设计效果图



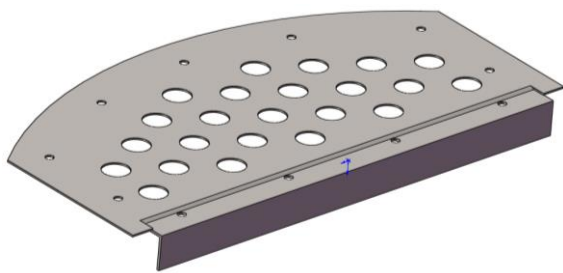
图 2. 溢流堰设计效果图



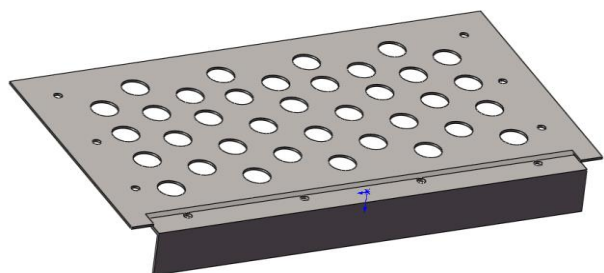
b. 背面

图 3. 受液盘设计效果图

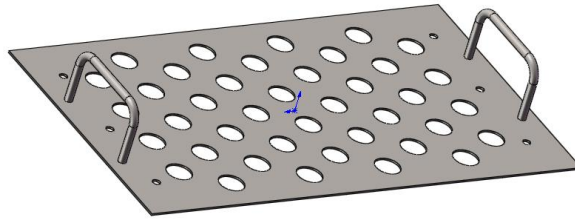
3.3 塔盘板（可拆件）的设计效果



a. 弓形板



b. 矩形板



c. 通道板

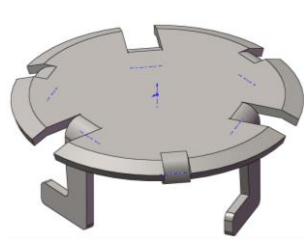
图 5. 塔盘板的 3D 设计效果图

塔盘板：图 5 是 F-1 型圆形浮阀塔板的 3D 设计效果，因人孔的公称直径为 450mm，塔盘板的宽度不能超过 450mm。

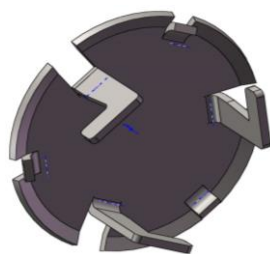
(1) **弓形板**：如图 5a.所示，弓形板一端为弧形平板，另一边为自身梁，自身梁为类似 90° 角铁的支撑结构。因为塔盘板在鼓泡区跨度较大，虽然两侧在支撑梁上固定，但在长度方向上机械强度较差，所以需要自身梁（立筋）增加支撑。自身梁高 45~50mm，与另一块塔盘板的平直边搭接，用 SLB 型卡子固定。自身梁充压成比塔板主体低一块板的厚度，以便两块塔盘板安装后保持水平。为了防止自身梁和支撑梁相碰，自身梁两边向内缩进 33mm，并且设计了 30mm 宽的遮耳以防泄漏。

(2) **矩形板**：如图 5b.所示，矩形板一边为平板，另一边为自身梁，塔板块整体形状为矩形。小塔不设矩形板。从主视图上看，矩形板与通道板的主要区别在于是否带有自身梁和有没有把手。

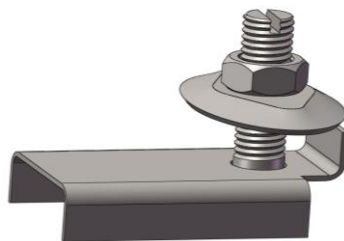
(3) **通道板**：如图 5c.所示，通道板是一块矩形平板，作为塔内材料和工人的通道，通道板上安装有 $\Phi 10\text{mm}$ 圆钢制成的把手。在长度方向上，通道板的两边分别与弓形板或矩形板的自身梁搭接。塔板块的平直边通常与支撑梁、支撑圈或自身梁有一定的重叠。



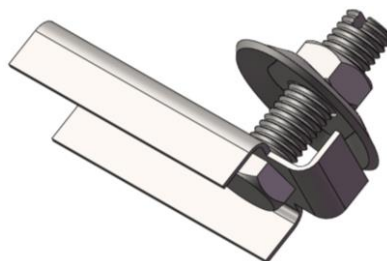
a. 正面



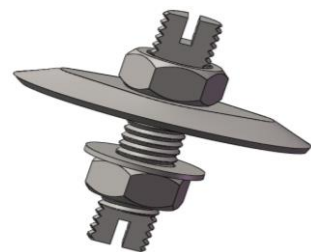
b. 背面



a. 正面



b. 背面



a. 正面



b. 背面

图 6. F-1 型浮阀的 3D 效果图 图 7. K 型卡子的 3D 效果图 图 8. SLB 型卡子的 3D 效果图

3.4 塔板鼓泡元件和塔板连接件的设计效果

(1) 浮阀

浮阀通常分为圆形和条形，最常用的为 F-1 型圆阀，即 Glitsch V1 重盘式浮阀，见图 6。阀片下有三条阀腿，操作时用以限制阀片的最大升程；阀片周边上冲出三个略向下弯的定距片，使阀片在未开启时与塔板间有一定初始开度，防止阀片与塔板粘着和腐蚀。F-1 型浮阀在我国已标准化(JB1118 - 68)，阀片直径为 48mm，阀孔直径为 39mm。分轻阀与重阀两种，轻阀由 1.5mm 厚的薄板冲压而成，阀重约 25~26g；重阀由 2mm 厚的薄板冲压，约 32~34g。轻阀惯性小，压降小，但操作稳定性较差，低气速时漏液严重，影响分离效率，因此常采用重阀，只在处理量大且要求压降很低时（如减压塔）才用轻阀。浮阀最小开度 2.5mm，最大 8.5mm，材料常用 1Cr13Ni9Ti 合金钢。

(2) 卡子连接件

① **K 型卡子**：如图 7 所示，K 型卡子是塔板块与支撑梁和支撑圈的连接件，分为 K10B 和 K6B 两种，常用 1Cr13Ni9Ti 合金钢制造。卡子包括螺母，螺母垫片、卡子垫片、支撑梁卡片、底座和螺栓，K10B 和 K6B 卡子的区别是连接的支撑圈或梁的厚度分别为 10mm 和 6mm。

② **SLB 型卡子**：SLB 型卡子是塔板块自身梁与其他塔板块之间的连接件，见图 8。卡子没有底座，上下都用螺母固定，仅用于自身梁。因螺栓上下都有卡槽，可以在塔板上下同时双向安装。

3.5 塔板鼓泡区的设计效果

塔板块以及浮阀、卡子组装后的鼓泡区效果如图 9 所示，塔板两侧是降液管区和受液盘区。鼓泡区和降液管区之间留有破沫区和液体分布区，目的是为了防止阀孔被塔板下方的支撑梁挡住，缓解降液管来的液体对鼓泡区的冲击，还可以使液体在进入降液管以前气液分离、减少气泡夹带。鼓泡区是塔内的气液传质场所，其面积大小、开孔率、堰长等关键参数的设计效果以及连接件的安装效果都将决定塔设备的操作效果。

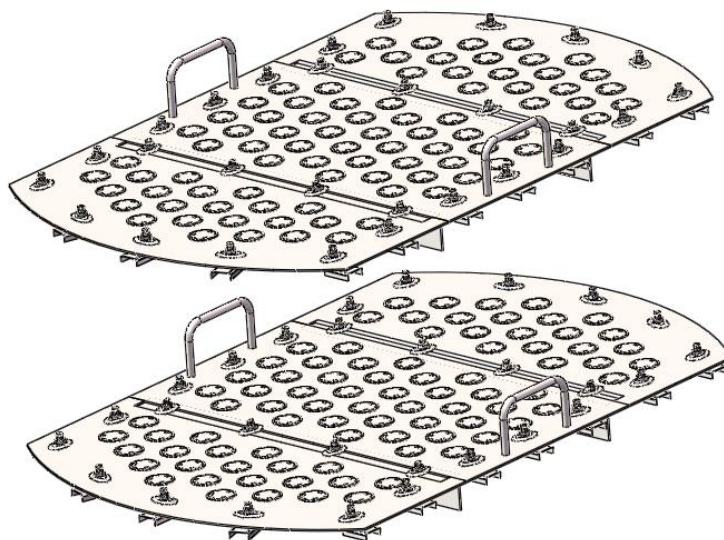


图 9. 塔板鼓泡区的整体组装效果图

3.6 塔设备的筒体、固定件和支撑结构的设计效果

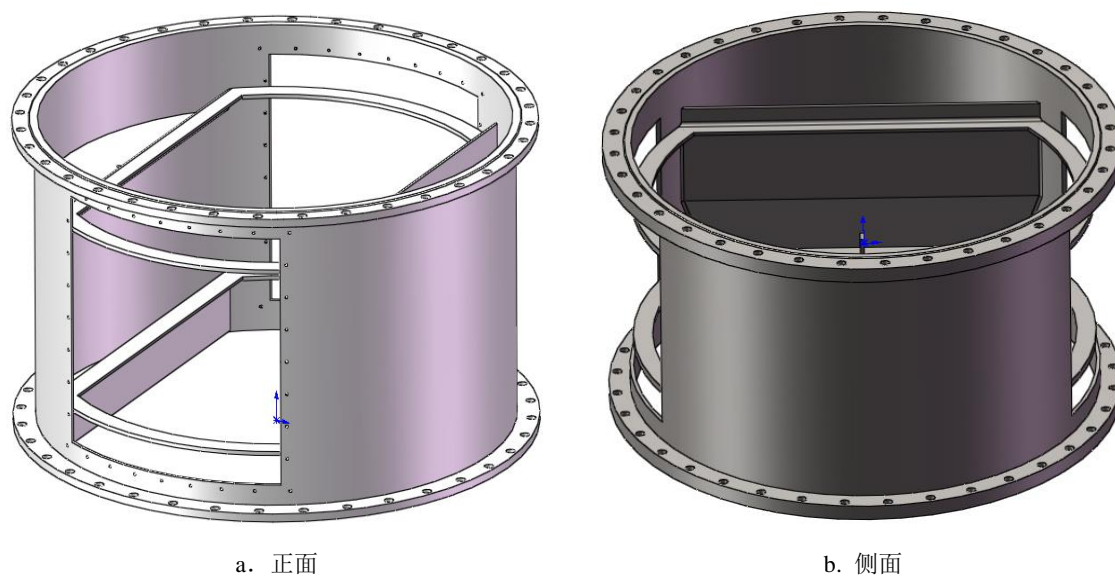


图 10. 安装溢流装置和支撑件的塔段整体效果图

塔器作为常见压力容器，塔筒和封头的设计是化工机械的重要内容。包括塔筒材质和壁厚选取，如图 10 所示，这些参数与工艺体系的种类、容器直径及其操作温度、压力紧密相关。壁厚可根据许用应力值计算，然后加上腐蚀余量、加工减薄量和板厚负偏差等项修正，最终圆整到设计壁厚。塔筒材质常用碳钢（A3、Q235A、20#、45#）和不锈钢（304#，即 0Cr18Ni9、302#，即 1Cr18Ni9，316L，00Cr17Ni14Mo2）。塔段内还安装有降液管、溢流堰、受液盘等固定件，以及支撑梁和支撑圈等支撑结构。上述结构全部满焊在塔体内，与塔的筒体形成一体。为了便于初学者观察塔内件，在塔壁上开有 400mm×400mm 的视窗。

3.7 塔设备的整体设计效果

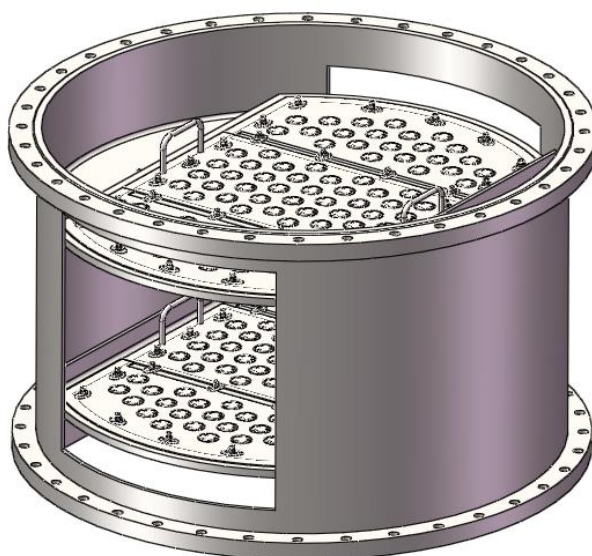


图 21. 塔设备的整体效果图

图 11 将安装有溢流装置、塔盘板、支撑件的仿真塔整体设计效果进行展示。转动塔段，可以通过视窗可以从各个方位观察到具有工业规模的塔设备的构件在塔段内的位置和相互关系。

4. 结束语

使用功能强大的 SolidWorks 软件进行工业塔仿真设计，使初学者不仅了解塔板及其他内构件的结构、尺寸和主要设计参数的意义，对塔板连接件、支撑件以及相关机械构件的工程细节也获得深入的认识，可增强学生对现场设备和实际生产过程的了解，弥补学生对工业设备认识的空白。

同时，SolidWorks 毕竟只是一个设计手段，针对具体设备还需要各个专业教师结合自己的设计内容用 SolidWorks 的工具和语言进行二次开发，这个开发需要一定过程和专业基础的，要全面考虑到课堂、实验、实践教学的兼容性。因此，用 SolidWorks 三维设计软件模拟设备设计应用的教学改革不仅具有紧迫性，完成周期也会比较长，只能按设备的复杂程度和重要性有重点、分阶段的实施。

分离塔设备已经形成了较先进和成熟的工业技术，这样强有力的技术支撑对教学工作也是一个极大的促进，成熟的科研成果与本科教学相互沟通，甚至包括学科交叉和相近学科的移植，一方面使教师保持了在本学科领域的领先地位，活跃的研究思维可以打破固定模式下的教学内容体系，有助于提高教学质量，另一方面也开阔了学生的眼界，必然能激发学生的兴趣，取得满意的教学效果。

参考文献

- [1] Lockett M. J. Distillation tray Fundamentals[M]. Cambridge: Cambridge University Press,1986.
- [2] Yang Y. The Parametric Design and Intelligent Assembly System based on the Secondary Development of SolidWorks[J]. International Conference on Computer Engineering & Technology, 2010, 4: 602-605.
- [3] 陈赛克. SolidWorks 软件在机械原理教学中的应用[J]. 机械研究与应用, 2013, 26(6) : 146-150.
- [4] 江洪, 吉维峰. 运用三维绘图软件 SolidWorks 改革工程图学教学的实践[J]. 工程图学学报, 2004, 1(1): 109-113.
- [5] DS SolidWorks 公司著, 陈超祥, 叶修梓主编. SolidWorks Simulation 基础教程[M] (2010 版). 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [6] 吕晓燕, 贾海英, 张晓钟. 基于 VB 对 SolidWorks 二次开发方法的研究[J]. 机械设计与制造, 2005, 3 :114-116.
- [7] 丁毓峰, 盛步云, 张进军, 李存荣, 杨明忠. 用 Visual C++6.0 开发 Solidworks 三维标准件库[J]. 计算机工程, 2000, 7:52-54.
- [8] 张茂鹏, 陈蔚芳. 基于 SolidWorks 的组合夹具构件自动建模方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2005, 33(2): 56-59.
- [9] 李光耀, 杜娟. 基于参数的 SolidWorks 零件库的开发和实现[J]. 机械设计与制造, 2004, 5: 40-42.
- [10] 兰州石油机械研究所. 现代塔器技术[M] (第 2 版). 北京: 中国石化出版社, 2005.

工业规模塔设备的虚拟拆装演示

——SolidWorks 软件在化工仿真中的应用（二）

曹睿，刘金龙，刘艳升，钟帆，刘梦溪

（中国石油大学（北京），重质油国家重点实验室，北京，102249）

[摘要] 在塔设备教学中，塔内件的拆装演示是一种高效的教学手段，能使学生直观地了解塔内结构，对机械构件之间的匹配关系和工程实施细节获得深入认识。SolidWorks 软件通过建立仿真塔设备模型平台，可以实现 3D 视频教学，特别是内构件的动态拆装演示，可使学生完全浸入到“情景—学习”状态之中，以便深度了解塔设备结构，建立“工艺装备一体化”的思想。此外，仿真还有助于进行多方案对比和错误案例分析，可丰富多元化教学手段，从根本上改变塔设备的传统教学理念。

[关键词] 塔设备；SolidWorks 软件；拆装演示；动态仿真；工艺装备一体化

Virtual assembling and disassembling demonstration of the tower in industrial scale —— the application of SolidWorks in chemical engineering simulation II.

Cao Rui, Liu Jinlong, Liu Yansheng, Zhong Fan, Liu Mengxi

(State Key laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Demonstration plays an active role in imparting the knowledge about tower, which is usually employed as the most effective method to display the assembling and disassembling process of internal components. It enables students to understand the structural of devices intuitively and obtain the specific matching relationships during the implementation processes. Based on SolidWorks, a powerful software, the modeling tower platform has been established, which can perform 3D video teaching in a dynamic way. Therefore, it is convenient for students to comprehend the structure of equipment while assembling and disassembling, thus providing a feasible way to indulge in case study and establish the idea of process-equipment integration. Additionally, simulation technology can be used in error-case analysis and multi-project comparison to enrich the diversified teaching approaches. It abandoned the traditional design patterns and fundamentally improve the teaching quality.

Key words: tower; SolidWorks; assembling and disassembling demonstration; dynamic simulation; process- equipment integration

作者简介: 曹睿（1973—），女，副教授，博士

* 中国石油大学（北京）校级重点教改项目（1. 用 SolidWorks 软件构建“化工传质设备的机械设计模拟平台”；2. 《化工原理》课程建设）资助

通讯地址: 北京昌平府学路 18 号中国石油大学(北京) 化学工程与环境学院

Tel: 010-89733288 (O) 18910287441 (M) **E-mail:** ctray@cup.edu.cn

塔器是重要的传质设备,在《化工原理》课堂教学、实验教学和实践教学等多个环节中都会涉及,在前期工作中已详细介绍过其主要设计内容^[1]。教学中,学生对塔内件的安装和匹配缺乏感性认识是一个普遍存在的问题。因为教学中主要依靠图纸、照片或实验模型等静态资源,很难多方位展示,更无法演示安装、拆卸过程^[2]。这样,就使得教学内容不易实现灵活调整。例如,怎样将新型设备成果补充到教学中去,使学生随时掌握科技前沿;如何针对不同的授课对象,使教学内容具有不同特色。因为工艺专业的学生需重点掌握如何让设备满足工艺要求,达到理想的传质传热效果;机械专业的学生更看重结构、布局安装如何满足力学特征和机械标准;而仪表专业的学生主要着眼于仪器仪表的设置和安装,以满足测量要求。因此,在教学中对设备的动态展示提出了更高的要求。

针对上述问题,国外提倡采用“虚实结合”的手段^[3],通过“三步走”来实现对工业装置的快速认知:一、建立具有工业规模的实物塔段;二、配套建立塔段的标准示范图集;三、用 SolidWorks 软件建立仿真塔,实现多元化设计和 3D 视频教学。本文属于第三部分内容,主要介绍了仿真塔设备在动态拆装演示方面的作用和虚拟结构设计方面的强大功能,并为培养“工装一体化思想”探索一种实用的工程培养模式。

1. SolidWorks 仿真塔设备的装配过程简介

精馏塔装配实际上是将塔内件按照一定的约束关系连接在一起。塔器存在中心对称和轴对称两种对称关系,且多数塔内件规格相同,在自底向上和自顶向下两种方法相结合的基础上,依据标准配合关系和高级配合关系以及塔内件的移动、旋转和复制,就能实现精馏塔的高精度装配^[4]。

如在塔段装配过程中,将塔内件导入到 SolidWorks 中,使用“移动零部件”和“旋转零部件”将各塔内件按顺序放置;选择法兰—垫片—法兰的外圆柱面,使用“同轴心”配合,使两段塔节同轴放置;选择螺栓的外圆柱面和法兰孔眼—垫片孔眼—法兰孔眼—螺母的内圆柱面,使用“同轴心”配合,将螺栓与法兰、垫片、螺母同轴放置,再使螺栓的断面和螺母断面与法兰、垫片孔眼的侧面“重合”配合,就可将法螺栓装配到法兰上,实现塔段的连接^[4]。在实际装配过程中,按照塔内件功能的不同先进行零件装配,然后整体装配,对装配好的精馏塔,还可以在装配环境中修改塔内件。

其次,利用 SolidWorks 自带的 SolidWorks Motion 插件,不仅能生成爆炸动画,展示零件装配关系,还能生成演示动画,将整个塔的装配过程生动地展现给学生^[5,6]。SolidWorks Motion 是基于时间线的界面,因此在选择动画和基本运动模拟类型的基础上,对不同塔内件插入“关键点”——塔内件在不同时刻的不同状态,再对不同“关键点”间的塔内件状态进行插值,便可以生成连续状态,达到动态装配的目的。

此外,动态装配还可以进行后处理^[5]。如将塔内件外观渐隐以显示精馏塔的剖切视图,展示内部结构;通过屏幕捕捉再现塔内件的设计过程;利用灯光控制以及为塔内件着色和添加材质,从而产生丰富的视觉效果,激发学生的学习兴趣。

2. 工业规模塔设备的虚拟安装效果

2.1 溢流装置（固定件）的安装过程

如图 1 所示，降液管、受液盘和溢流堰等溢流装置在设备加工过程中满焊在塔段内，不能随便拆卸，所以在 SolidWorks 中也将其与塔段设置为一体，形成刚性连接。支撑圈和支撑梁等构件采用焊后修平的处理方式，也与塔段形成一体，包括降液板底部和受液盘之间以及受液盘下部的支撑筋板。通过动画可以演示塔段与固定件和支撑件的组装过程。

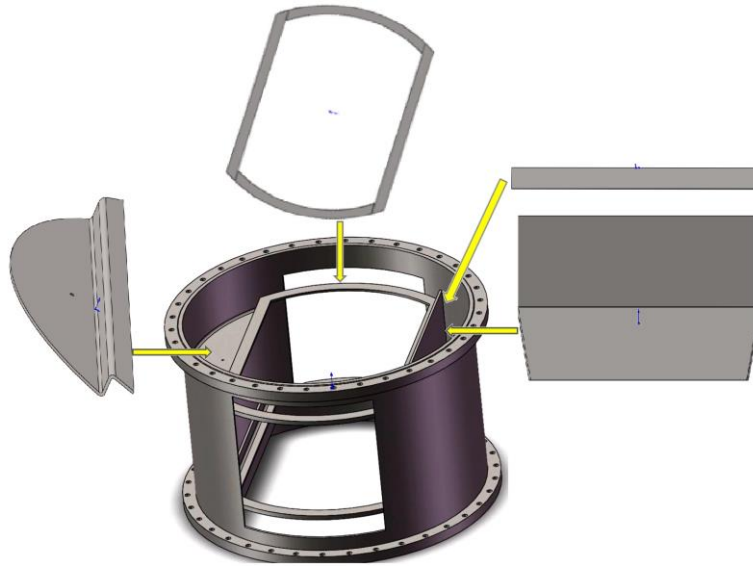


图 1. 溢流装置（固定件）在塔内的安装过程

2.2 浮阀在塔盘板上的安装过程

图 2 展示了浮阀在塔盘板上的安装过程。通过浮阀主视和俯视 3D 效果可先说明 F-1 型圆阀的结构，然后将浮阀随机放置在一个阀孔上，对浮阀和阀孔使用“同轴心”配合，浮阀装入后，动画演示浮阀在升程范围内上下浮动和旋转的效果。由此可以解释说明两点：1) 塔板的真实鼓泡面积（实际气体流通截面）不是阀孔的总截面积，而应该是浮阀上升过程中形成的环隙截面积；2) 圆形浮阀在操作中因长期旋转，可能会因阀腿磨损导致浮阀脱落，由此会伴随非均匀泄漏和效率问题。

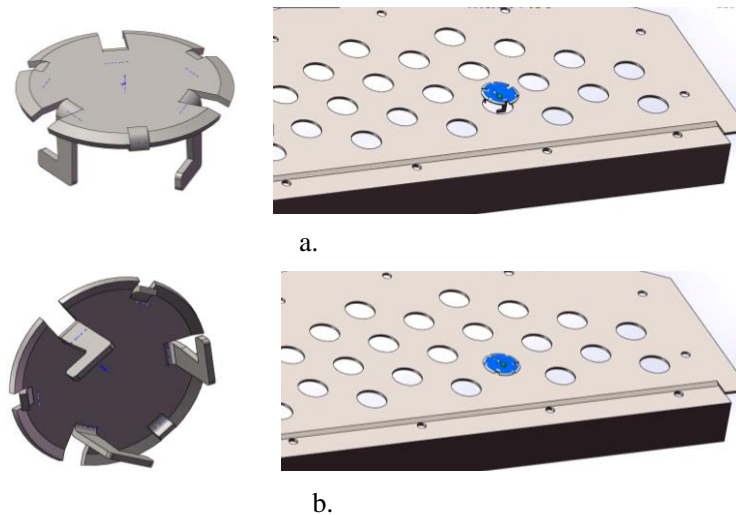


图 2. 浮阀在塔盘板上的安装过程

2.3 卡子连接件的安装过程

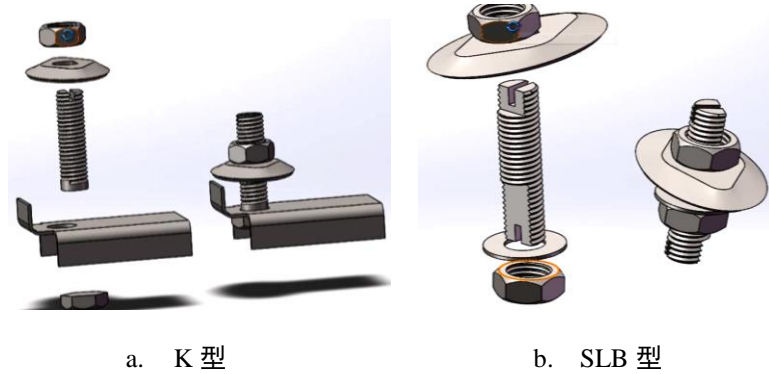


图 3. 单套卡子连接件的组装过程

图 3 展示了单套卡子连接件的组装过程。卡子分为 K 型和 SLB 型两类，K 型带有底座，SLB 卡子没有底座，上下都用螺母固定。安装时对 M10 螺母，M10 螺母垫片、卡子垫片、支撑梁卡片、底座（SLB 型为螺母）和 M10 螺栓，使用“同轴心”配合，整体成为一套组合件。

图 4 展示了卡子组合件在塔盘板上的安装过程，图 5 为安装位置和效果。K 型卡子用于塔板在支撑圈和支撑梁上的固定，卡子螺栓穿过塔盘板上的螺栓孔，“同轴心”配合，阀片和底座将塔盘板和支撑梁（或支撑圈）两层板夹紧；SLB 型卡子用于两块相邻塔盘板的固定，为了增加机械强度，塔盘板通常在一边设置自身梁，卡子穿过梁上螺栓孔，阀片和下方螺母将两块板夹紧，完成安装。

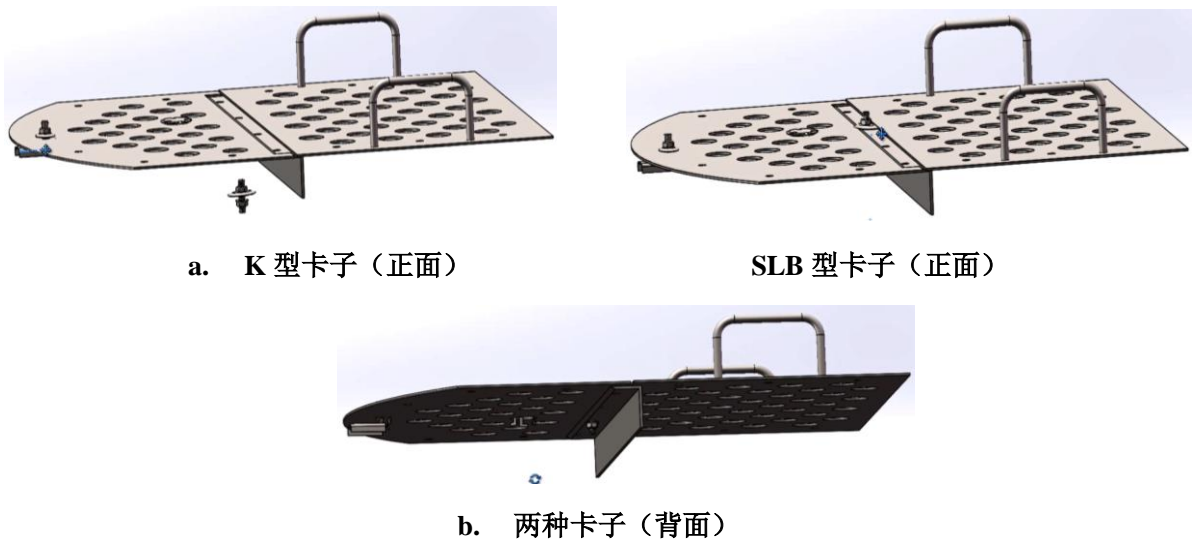


图 4. K 型和 SLB 型卡子组合件在塔盘板上的安装过程

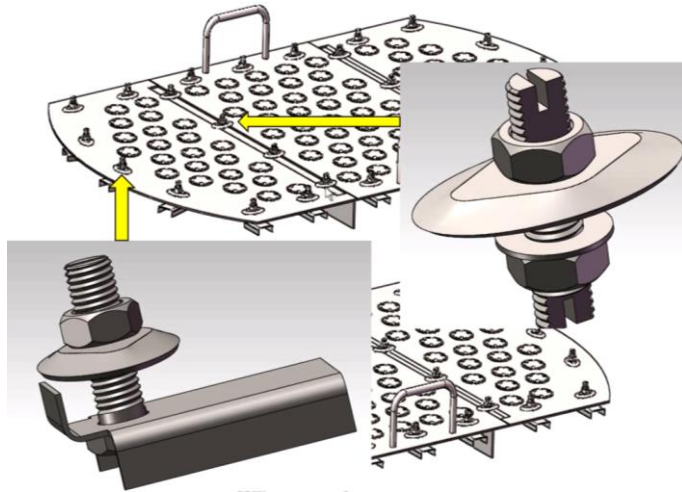
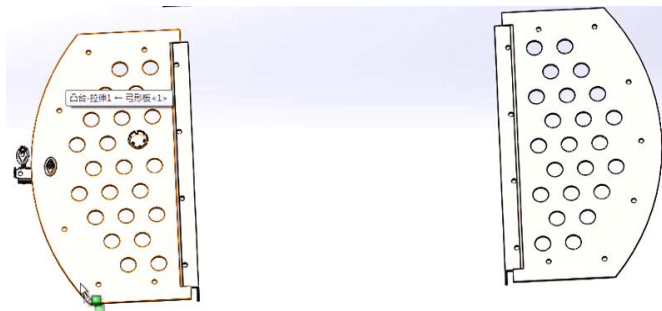


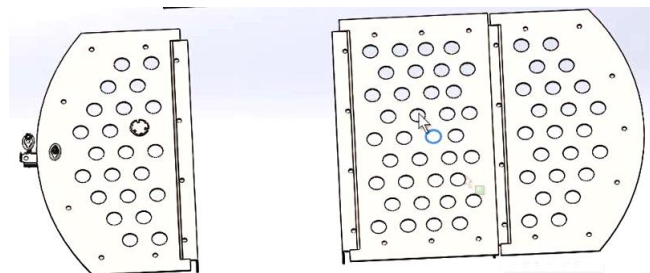
图 5. K 型和 SLB 型卡子组合件在塔盘板上的安装位置

2.4 塔盘板（可拆件）的安装和拆卸过程

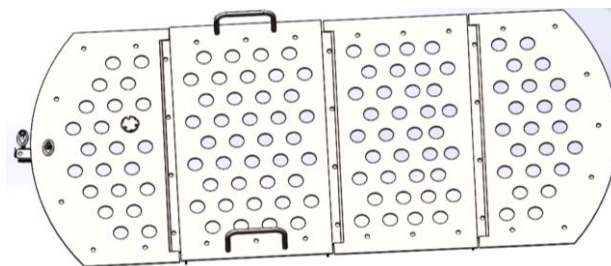
图 6 展示了塔盘板的安装顺序：先在支撑圈和支撑梁上安装两块弓形板，接着是矩形板，最后是通道板，作为工人和物料的通道；拆卸的顺序正好相反，依次为通道板、矩形板和弓形板。



a. 第一步：安装弓形板



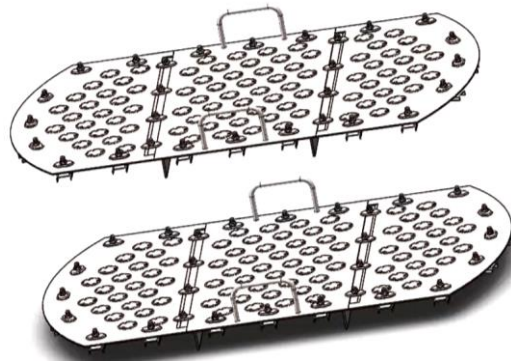
b. 第二步：安装矩形板



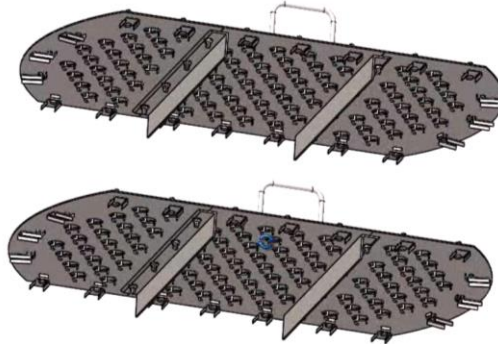
c. 第三步：安装通道板

图 6. 塔盘板在鼓泡区的安装过程

2.4 浮阀塔板的整体组装效果



a. 浮阀塔板的组装效果（正面）



b. 浮阀塔板的组装效果（背面）

图 7. 浮阀塔板的整体组装效果图

图 7 从正面和背面展示了浮阀和卡子组合件在塔盘板上全部组装后的整体效果，可以很好的解释了鼓泡元件和限位元件的设计要求：设计良好的浮阀塔板，从整体上感受不到塔板分块的影响。浮阀排布都很均匀（低开孔率下也不会出现浮阀集中在塔盘板中心的现象），不会受到卡子、支撑结构边缘区的影响；而且用于固定的连接件也均匀排布，在板上以远端固定和近似正三角形排列为宜，不会因局部过密增加设计成本，也不会因过疏降低机械强度。

2.5 塔段的整体组装效果

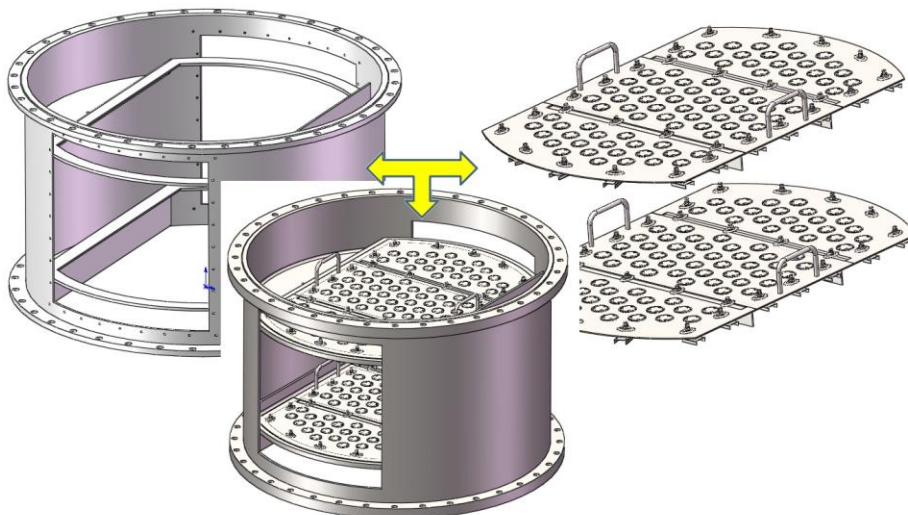


图 8. 塔段的整体安装过程

图 8 展示了将整体组装好的塔盘板用卡子固定在支撑件上的装配过程。移动和旋转零部件将各塔内件按顺序放置；选择塔段法兰的外圆柱面，使用“同轴心”配合，使塔节与塔板同轴放置；再逐一选择螺栓的外圆柱面和法兰孔眼—垫片孔眼—法兰孔眼—螺母的内圆柱面，使用“同轴心”配合，使螺栓的断面和螺母的断面与法兰、垫片孔眼的侧面“重合”配合，实现塔段的连接。

3. 仿真塔设备虚拟安装的教学优势

3.1 进行多方案对比，评价设计效果

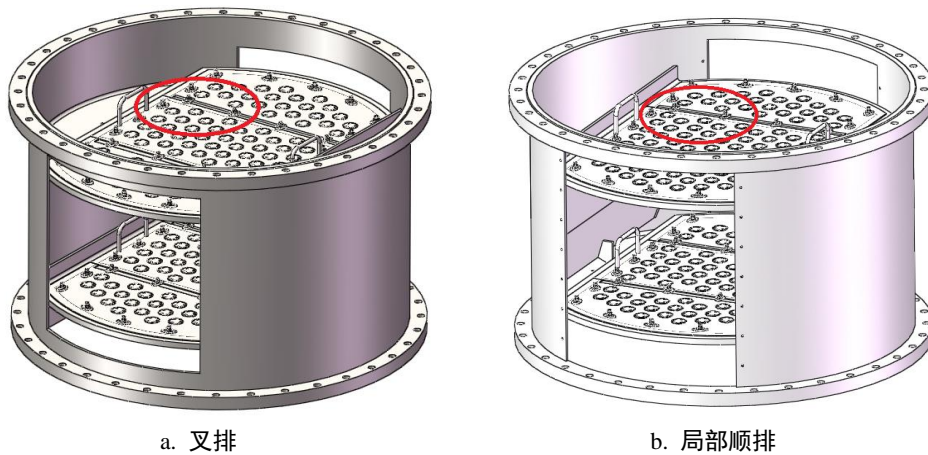


图 9. 塔设备的整体组装对比效果图

仿真塔段还具有超强的对比演示和纠错功能。图 9 所示为正确的设计方式与错误设计方式的对比，图 9a 中浮阀全部采用叉排，而图 9b 通道板上的第一排浮阀与相邻弓形板上的第一排浮阀出现了局部顺排。叉排为三角形排列，而顺排为矩形排列，会降低机械强度、扰乱汽液鼓泡传质。所以通过对比即可发现设计当中的失误，与制作实物模型相比，这在教学中更容易对比和修改。

3.2 获得组合装置的平面效果图

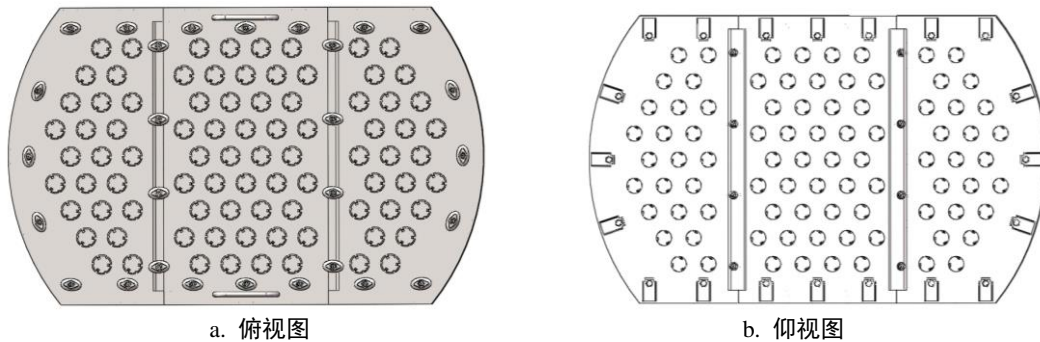


图 10. 塔盘板的整体组装平面效果图

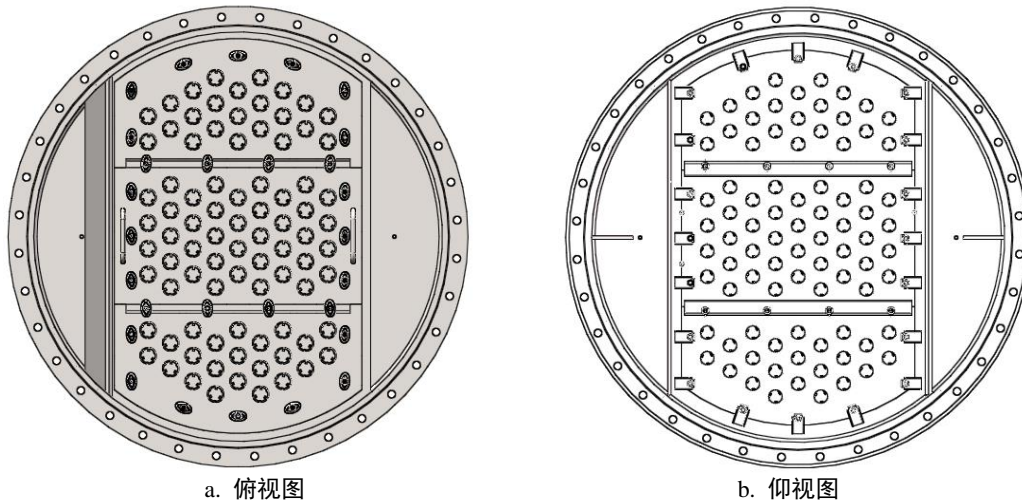


图 11. 塔段的整体组装平面效果图

如图 10 和图 11 所示，将组装后带有溢流装置和塔盘板的塔段旋转到水平面，可以获得装置在俯视或仰视状态下的平面效果，将 3D 视图转化为 2D 平面装置图，使学生将机械制图内容与之结合，实现与装置设计、加工单位和现场安装单位的对接。

3.3 设计细节的动态演示

此外，塔器中有一些设计细节很难用文字表述，但是通过动态演示理解起来就轻松很多。图 12 例举了几种典型情况：图 12a 中弓形板和通道板的自身梁，自身梁比塔盘板主体平面低一块板的高度，以便于两块板在自身梁上搭接后保持水平。图 12b 中自身梁两边遮耳的结构及放大图，自身梁两侧为了不与支撑梁相碰，向内缩进，板面上会形成矩形缺口，所以通常延伸出两个遮耳，避免因缝隙造成液体泄漏。图 12c 中 K 型卡子的竖起支撑板，该支撑板与支撑梁（圈）等厚，通常用 K6B 或 K10B 分别表示与 6mm 或 10mm 厚的支撑圈（梁）连接，由此说明了二者的匹配关系。图 12d 中 F-1 型圆形浮阀的初始开度。类似的结构还有很多，在演示时可以自动涂色或加红圈予以强调。此外，还有一些结构虽然不是主要内构件，但对改善设备机械强度和方便安装起到关键作用，如图 13 中受液盘底部的支撑筋板和降液管底部与受液盘顶部之间的支撑筋板，可以动态演示予以说明和强调。

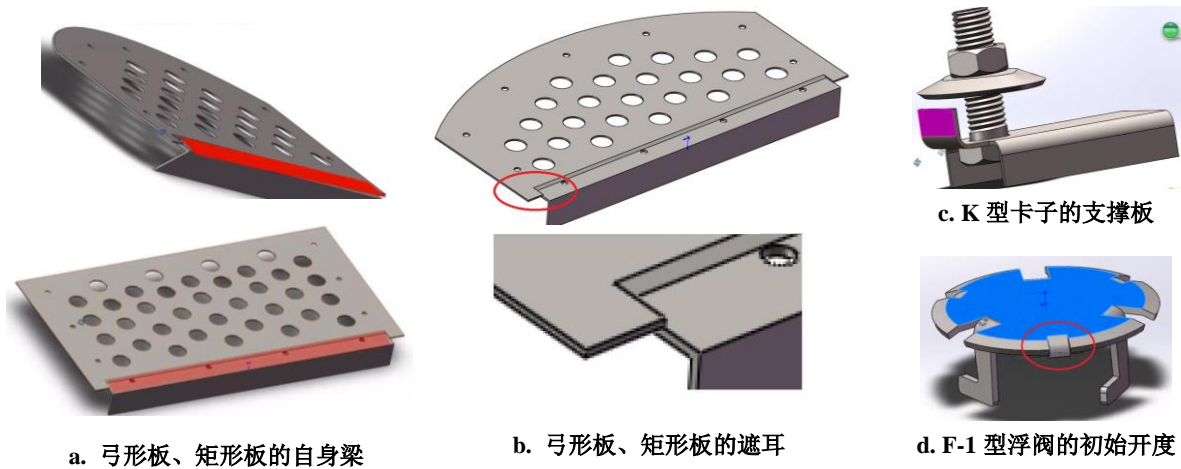


图 12. 塔内件的细节动态展示

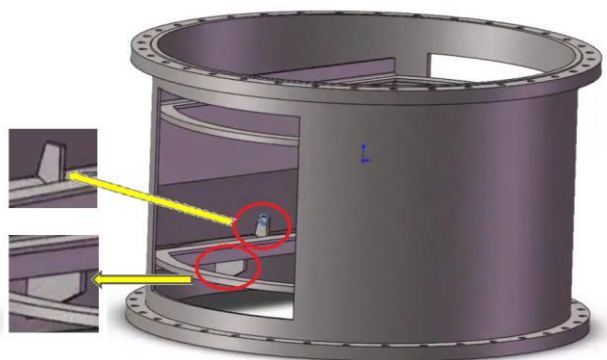


图 13. 支撑筋板的动态安装展示

4. 结束语

采用 SolidWorks 软件建立的仿真塔段装配体，通过三维模型的整体装配和利用相关插件实现的装配流程动态演示，高度还原了塔设备的 3D 原貌，通过着色渲染几乎达到以假乱真的地步，与观看实物模型效果一样，而且轻松便携，容易在课堂教学中使用。同时，虚拟拆装不仅可以强化感官认识、规范设计理念，还可以借助强大的科研支撑补充课堂教学内容，充分体现行业特色。

从对设备的深层次学习来讲，设计过程中可能会考虑多种方案，各种方案的设计和运行会有不同效果，设计人员可针对塔设备的汽液接触传质效果、设备的制造加工、安装施工成本、以及操作费用等进行技术经济性对比，为工程实施提供多种选择，其独具特色之处是可以与错误设计方案对比，强调设计细节，使学生更多地从方便工程实施的角度学习设备性能。

现在普遍提倡学生拓宽知识面，向合理的多元化方向发展。如全国大学生化工设计大赛，对大学生的要求是全方位的，包括项目的可行性分析、工艺计算、流程设计、工程设计以及厂区选址、环评等一系列内容。因此，按照重理论基础、强工程实践能力、高创新潜质的培养路线，引进仿真模拟技术，将有助于形成集创新意识与工程能力于一体的培养模式^[7]。


参考文献

- [1] 曹睿, 刘金龙, 刘艳升, 刘梦溪, 任洁梅. 工业规模塔设备的虚拟设计——SolidWorks 软件在化工仿真中的应用(一). 化工高等教育[J]. In press.
- [2] 郗向儒, 韩锐, 阮静. 基于 SolidWorks 的运动仿真研究[J]. 机械设计, 2004, 21(5): 50-52.
- [3] 朱红波. 基于 Solidworks 的离心泵拆装虚拟教学资源的应用[J]. 新课程(中), 2011, 6: 74-75.
- [4] 付永忠, 基于 Solidworks 的自顶向下装配体设计及运动仿真[J]. 机床与液压, 2006, 7: 224-225.
- [5] DS SolidWorks 公司著, 陈超祥, 叶修梓主编. SolidWorks Simulation 基础教程[M] (2010 版). 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [6] Y Yang. The Parametric Design and Intelligent Assembly System based on the Secondary Development of SolidWorks[J]. International Conference on Computer Engineering & Technology, 2010, 4: 602-605.
- [7] 李正波. Solidworks 教学如何培养学生的创新精神[J]. 科学咨询, 2013, 39: 56-57.

四、课件展示



厚积薄发 开物成务



《化工原理》

工业蒸馏塔段模型平台建设

汇报人：曹睿 副教授

中国石油大学(北京)

中国石油大学(北京) 化工原理课程设计任务书

发给学生: _____(8) 班级: _____

一、题目
设计一连续精馏装置, 用以分离 乙醇-水 混合物

二、原始数据

- 原料: 处理量: (1) 5t/h (2) 3t/h
组成: (1) 50% (mol) (2) 15% (mol)
进料状态: (1) 泡点 (2) 泡点
- 产品要求: 塔顶产品: 85% (mol)
塔底产品: 2.0% (质)
侧线产品: -

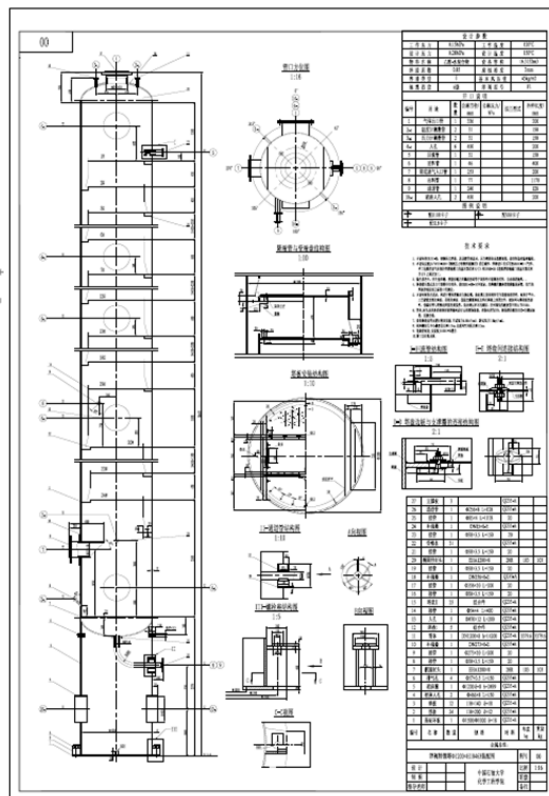
三、计算说明书内容

- 1、流程简图
- 2、工艺计算 (包括物料衡算及热量衡算总表)
- 3、塔板计算
- 4、塔体初步设计
- 5、辅助设备的选用
- 6、计算结果汇总表
- 7、分析与讨论

四、绘图要求

- 1、塔体总图
- 2、塔板总图

五、发出日期: 2017.5.15 完成日期: 2017.6.21



《化工原理课程设计》的专业研究基础

一、《化工原理课程设计》教学团队

《化工原理》教学团队的前身是沈复教授为首的“北京石油学院化学工程与设备教研室”，早期开展的F1型浮阀塔板国产化研究、负荷性能图分析技术、雾沫夹带 $\leq 10\%$ 和泄漏 $\leq 10\%$ 的设计限制等奠定了我国现代蒸馏设计和生产的基础。

自90年代以来，研究团队在多项领域取得显著的研究进展，已经形成了以强化气液传质、分离为基础的高性能蒸馏塔技术、塔设备大型化和故障诊断技术，丰富和完善了全塔负荷性能图分析技术；发展了以气固分离强化为基础的高性能旋风分离器、快分、催化裂化提升管后反应系统等非均相分离的核心技术及装备。这些技术已取得了极为显著的经济效益和市场占有率，极大地推动了高校的产、学、研一条龙的发展新模式。

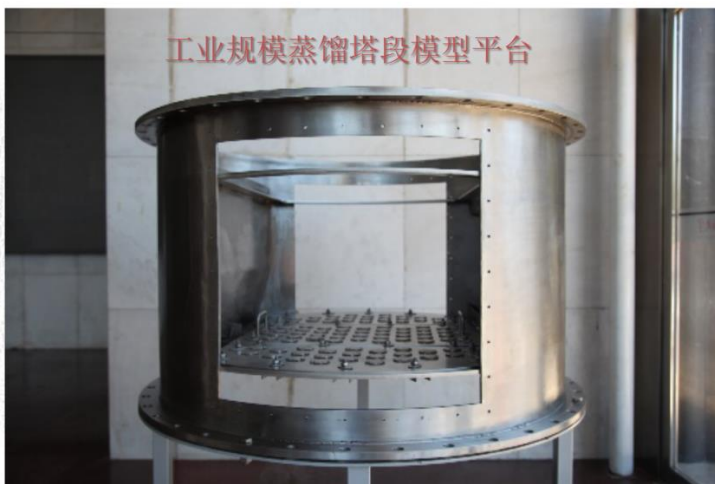
二、团队成员



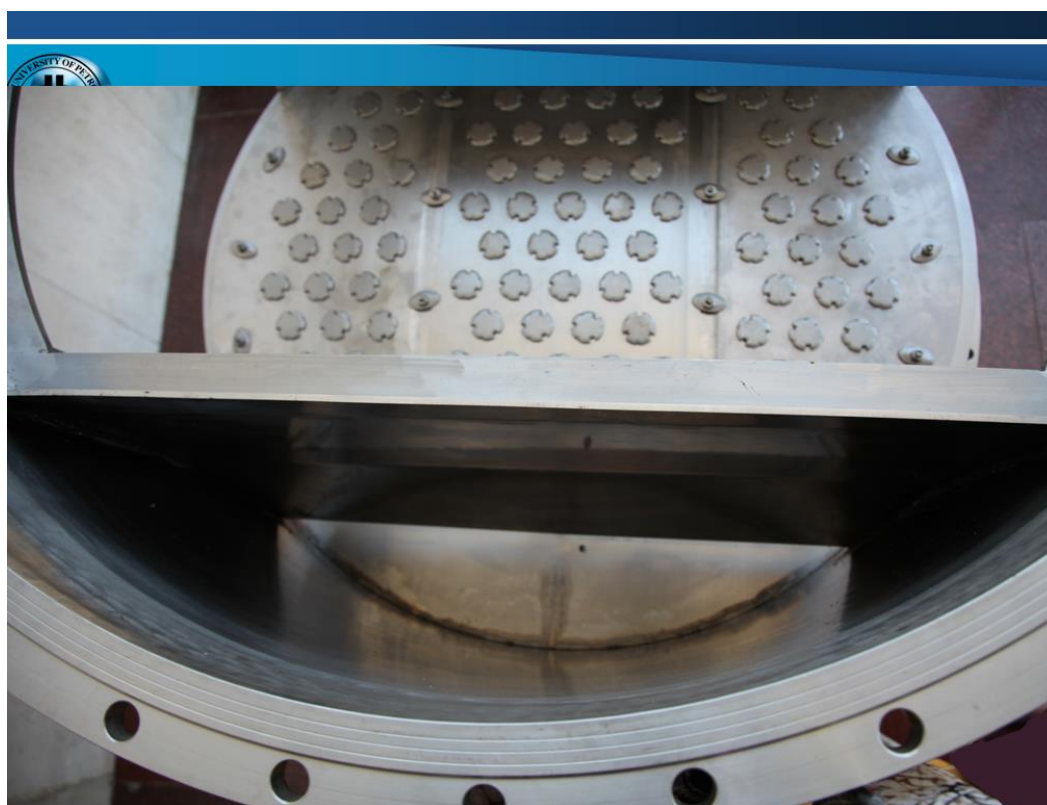
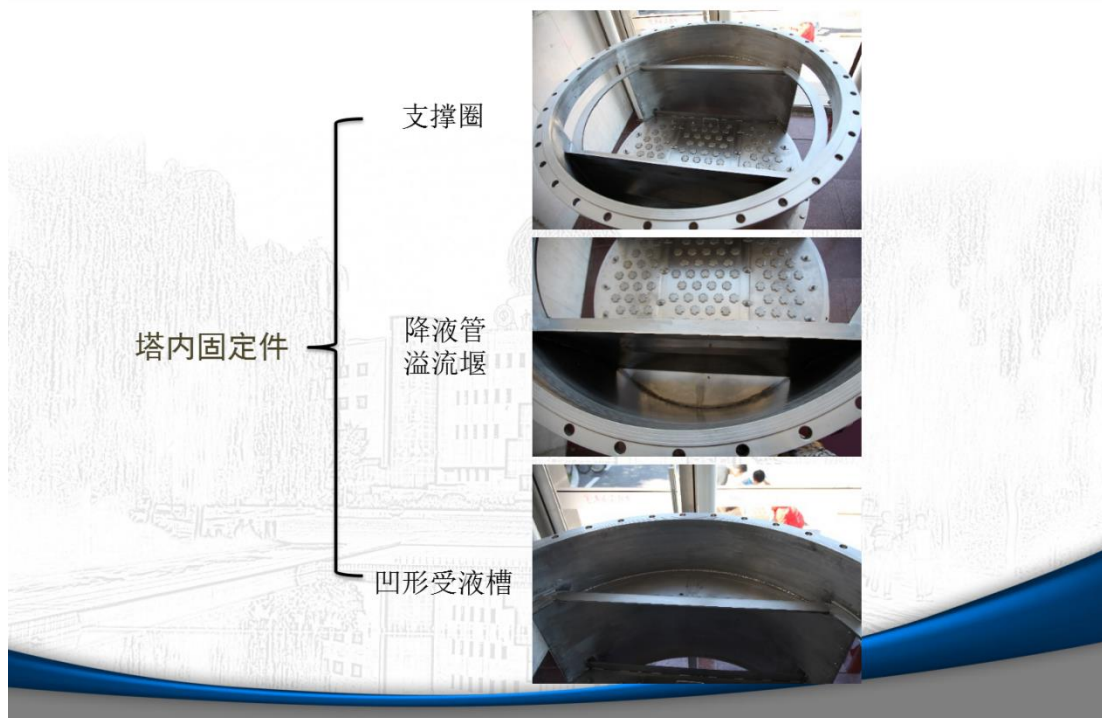
三、教研团队曾获得的奖励

1. “F-1型浮阀塔板和舌型塔板技术”——获得1978年第一届国家科技大会重大科技成果奖；
2. “重油催化裂化后反应系统关键装备技术开发与应用”——获得2010年国家科技进步二等奖；
3. “基于气-液相控制的填料化蒸馏塔板的开发及应用”——获得2008年中国石油化工协会技术发明一等奖；
4. “U型带翼浮阀塔板技术”——获得2000中国石油化工集团公司发明三等奖；
5. “催化裂化新型多段环流组合汽提器(MCS)的开发与工业应用”——获得2013年中石化技术进步三等奖；
6. “以工程和创新能力的培养为导向的化工专业基础课程群建设”获2013年北京市教学成果二等奖。
7. 2009年获得北京市《化工原理》优秀教学团队称号；
8. 2010年《化工原理》课程被评为北京市级精品课程。

工业规模模拟蒸馏塔模型平台建设项目报告



蒸馏塔段模型平台
整体图





工业规模模拟蒸馏塔模型平台建设项目报告



浮阀和卡子照片

浮阀



K10B卡子



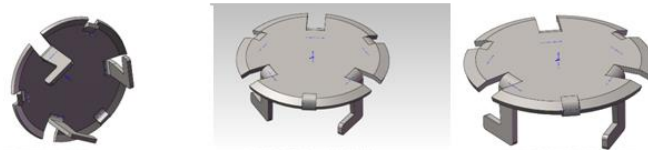
SLB卡子



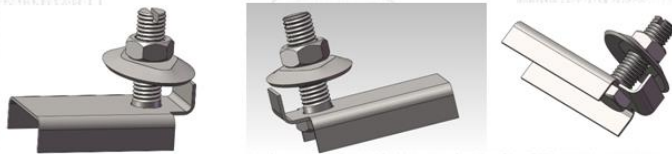
研究内容：

浮阀和卡子的solid work示意图

浮阀

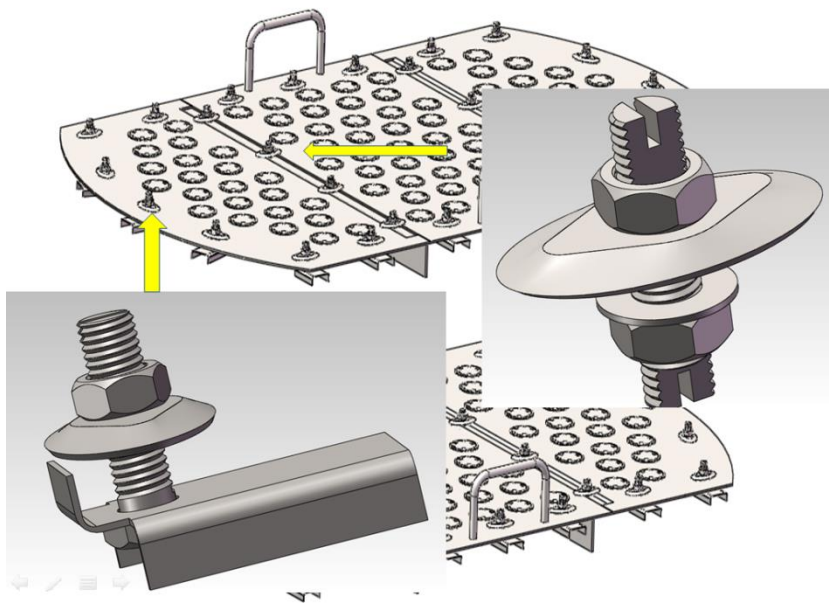
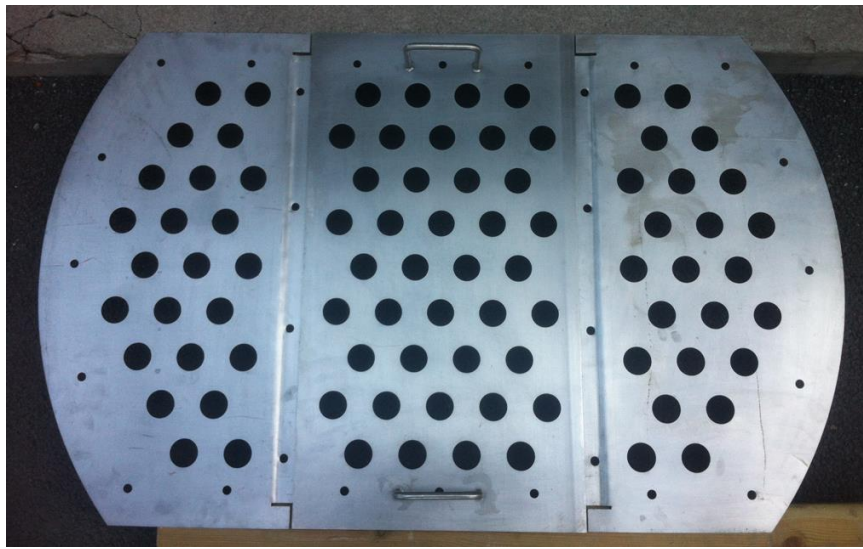


K10B卡子



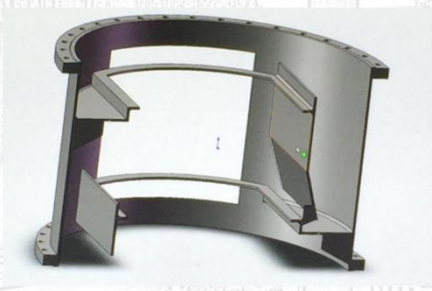
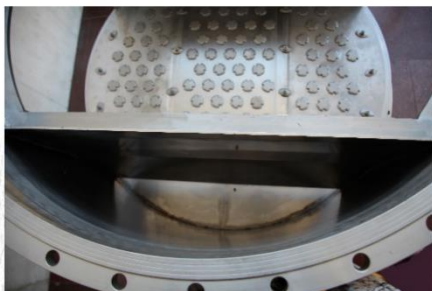
SLB卡子







工业规模模拟蒸馏塔模型平台建设项目报告



降液管的上方是溢流堰，堰板通常与降液板加工为一体，是指高出塔板的那部分。溢流堰的作用是使塔板上保持一定厚度的液层。常用的有平口堰、齿形堰和栅栏堰，小液量常用齿形堰，栅栏堰还具有挡板作用。为了保证降液管液封，对安装平型受液盘的塔板有时还按装入口堰。堰高决定了液层厚度、塔板压降，对降液管内液层高也有一定的影响。



- 在降液管的下方还安装有受液盘
- 受液盘起到接受液体、缓冲、重新分布的作用
- 有平型和凹形两种，一般大塔都采用凹形，可以起到液层作用，小塔用平型受液盘，或用于防止固体颗粒沉积的工况。
- 受液盘中根据规模设有1~2个泪孔，在停工过程中避免积液
- 此外在受液盘的下方、以及受液盘和降液板下端有筋板，起到加强机械强度的作用。上述固定件与塔板支撑件连接在一起。

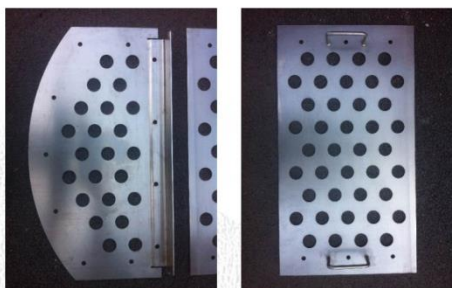


支撑件包括：支撑圈和支撑梁。

支撑圈（常用宽度50、厚度10，用K10B卡子将塔盘板连接在一起）

支撑梁（常用宽度50、厚度10，与K10B卡子连接）。

支撑圈与支撑梁焊后修平。



分为**通道板**、**矩形板**和**弓形板**，板上设有浮阀、筛孔等鼓泡元件，由卡子连接到固定件上。塔板块的宽度不能超过人孔直径**450**。

设计使用标准：

- JB4710 《钢制塔式容器》
- SH3098-2000 《石油化工塔器设计规范》
- HG20592-1998 《塔器设计技术规定》
- SH3088-1998 《石油化工塔盘设计规范》
- SH3048-1999 《石油化工钢制设备抗震设计规范》
- JB/T12050-2001 《塔盘技术条件》
- JBT 1118-2011 《F1型浮阀》

五、学生成果展示



化工原理课程设计 说明书

设计题目： 乙醇—水体系浮阀精馏塔设计

院系： 化学工程学院 班级： 化工13-4班创新班

姓名： 张嘉兴 学号： 2013010590

指导老师： 曹睿 成绩： _____

设计日期： 2016年6月3日—2016年7月9日

中国石油大学（北京）
化工原理课程设计任务书

学生: 张嘉兴 班级: 化工2013-4班创新班

一、题目

设计一连续精馏装置,用以分离 乙醇-水 混合物

二、原始数据

1. 原料: 处理量: (1) 5t/h (2) 3t/h

组成: (1) 50% (mol) (2) 15% (mol)

进料状态: (1) 泡点 (2) 泡点

2. 产品要求: 塔顶产品: 85% (mol)

塔底产品: 2.0% (质)

侧线产品: —

三、计算说明书内容

1、流程简图

2、工艺计算 (包括物料衡算及热量衡算总表)

3、塔板计算

4、塔体初步设计

5、辅助设备的选用

6、计算结果汇总表

7、分析与讨论

四、绘图要求

1、塔体总图

2、塔板总图

五、发出日期: 2016.6.3 完成日期: 2016.7.10

系主任: 刘梦溪

指导教师: 曹睿

设计结果汇总表

工艺计算数据总表

项目	符号	单位	数据
第一股进料热状态	q_1	—	1
第二股进料热状态	q_2	—	1
最小回流比	R_{min}	—	1.8837
回流比	R	—	2.7
最小理论板数	N_{min}	—	7.4
理论板数	N_T	—	19.1
实际板数	N	—	34
实际精馏板数	$N_{精}$	—	27
实际中间板数	$N_{中}$	—	3
实际提馏板数	$N_{提}$	—	4
精馏段板效率	$E_{T精}$	—	64%
中间段板效率	$E_{T中}$	—	50%
提馏段板效率	$E_{T提}$	—	45%
第一股进料量	F_1	kmol/h	156.03
第一股进料浓度	x_{F1}	mol	0.5
第二股进料量	F_2	kmol/h	134.97
第二股进料浓度	x_{F2}	mol	0.15
塔顶出料量	D	kmol/h	109.21

出料浓度	x_D	mol	0.85
蒸汽量	V	kmol/h	404.08
塔底残夜量	W	kmol/h	585.87
残夜浓度	x_W	mol	0.0079

物料平衡与物性总表

项目	符号	塔顶	进料一	进料二	塔釜	精馏段	中间段	提馏段
摩尔分率	x	0.85	0.5	0.15	0.0079	—	—	—
	y	0.15	0.5	0.85	0.9921	—	—	—
质量分率(%)	a	0.93	0.72	0.31	0.02	—	—	—
气相平均相对分子质量	M_g	4.08	3.54	3.12	1.99	3.81	3.33	2.56
液相平均相对分子质量	M_l	41.5	32.0	22.2	18.2	36.8	27.1	20.2
气相平均密度(kg/m ³)	ρ_g	1.594	1.447	1.286	0.834	1.521	1.367	1.060
液相平均密度(kg/m ³)	ρ_l	745.6	772.2	871.9	963.8	758.9	822.1	917.8
气相体积流量(m ³ /h)	V_g	9209.1	9343.5	9431.7	9523.9	—	—	—
液相体积流量(m ³ /h)	V_l	16.4	18.5	14.9	11.1	—	—	—
温度(°C)	t	80.7	86.8	95.8	106.9	—	—	—

46

热量衡算汇总表

全塔热量衡算总表

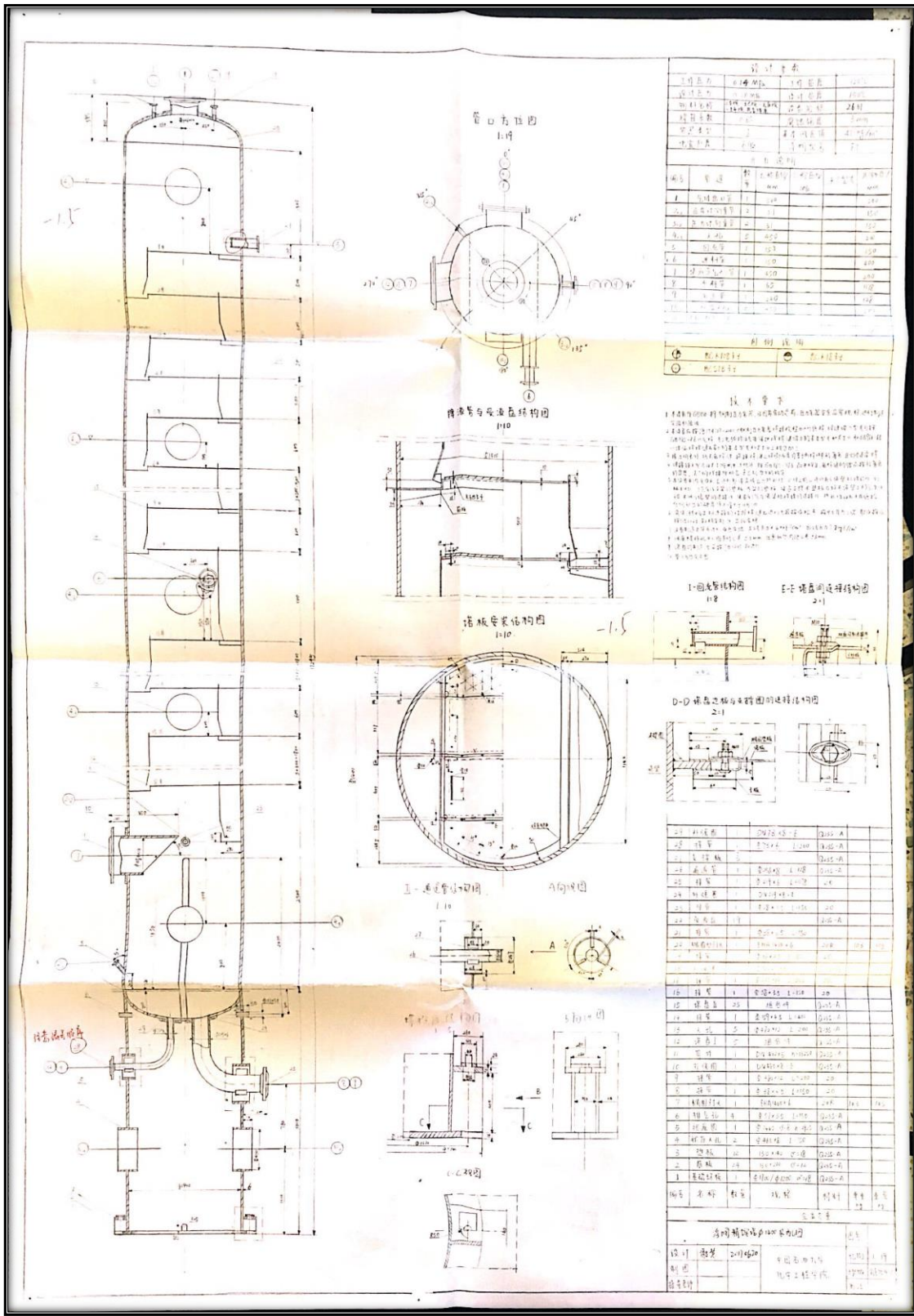
入塔	热量 kJ/h	出塔	热量 kJ/h
进料 F ₁	-4.272×10 ⁷	塔顶 D	-3.04×10 ⁷
进料 F ₂	-3.751×10 ⁷	塔底 W	-1.67×10 ⁸
塔底 V	-1.194×10 ⁸	冷凝 Q _c	1.667×10 ⁷
总计	-1.80×10 ⁸	总计	-1.98×10 ⁸
损失 Q _s	9.72×10 ⁵	损失率	4.9%

塔板设计汇总表

塔段		精馏段	中间段	提馏段
塔径/mm		1600	1600	1600
塔板间距/mm		500	500	500
溢流堰	型式	平口堰	平口堰	平口堰
	堰长/mm	960	1040	1120
	堰高/mm	50	50	50
受液盘	型式	凹形	凹形	凹形
	盘深/mm	50	50	50
进口堰	有/无	无	无	无
降液管	底隙高度/mm	50	50	50
	降液管面积 /mm ²	104552	136722	176532.4
	宽度/mm	160	192	228.8
浮阀	类型	33gF-1 重阀	33gF-1 重阀	33gF-1 重阀
	排列方式	三角形叉排	三角形叉排	三角形叉排
	排间距/mm	60	65	75
	开孔数	271	240	193
	开孔率	16.1%	14.3%	11.5%

塔体设计汇总表：

项目		类型	数值
塔体高度	筒体	直径/mm	1600
		壁厚/mm	8
	封头	直径/mm	1600
		直边高度/mm	400
		曲边高度/mm	25
		壁厚/mm	8
	人孔	个数	9
		直径/mm	450
		位置	塔顶、塔底、进料处、第 7、13、21 块塔板上方、裙座
	裙座	个数	1
		裙座地圈高度/mm	2500
		类型	圆筒形
	塔高	塔顶/mm	1500
		塔底/mm	2100
		进料处/mm	1000
人孔处/mm		600	
总塔高/mm		21400	
接管	塔顶蒸汽管	规格	Φ530×10mm



设计参数

工作压力	0.2 MPa	设计压力	0.25 MPa
设计温度	200℃	设计壁厚	10mm
材料名称	16MnR	卷板厚度	2.5mm
筒体直径	1000mm	罐体高度	10000mm
罐体重量	1000kg	罐体容积	10000L

材料清单

序号	名称	规格	数量	单位
1	筒体钢板	16MnR 10mm	1000	kg
2	罐盖钢板	16MnR 10mm	1000	kg
3	受油盘	16MnR 10mm	1000	kg
4	活板	16MnR 10mm	1000	kg
5	罐盖活板	16MnR 10mm	1000	kg

技术要求

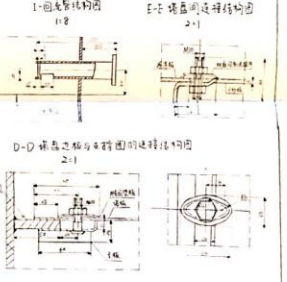
1. 罐体及罐盖材料应符合GB 713-2008《承压设备用碳素钢和低合金钢钢板》的要求。

2. 罐体及罐盖在制造过程中应进行无损检测，合格后方可使用。

3. 罐体及罐盖在安装前应进行预组装，合格后方可进行正式安装。

4. 罐体及罐盖在安装过程中应严格控制焊接质量，合格后方可进行下一步施工。

5. 罐体及罐盖在安装完成后应进行验收，合格后方可投入使用。



21	罐盖	16MnR 10mm	1000	kg
22	筒体	16MnR 10mm	10000	kg
23	受油盘	16MnR 10mm	1000	kg
24	活板	16MnR 10mm	1000	kg
25	罐盖活板	16MnR 10mm	1000	kg
26	罐盖活板	16MnR 10mm	1000	kg
27	罐盖活板	16MnR 10mm	1000	kg
28	罐盖活板	16MnR 10mm	1000	kg
29	罐盖活板	16MnR 10mm	1000	kg
30	罐盖活板	16MnR 10mm	1000	kg
31	罐盖活板	16MnR 10mm	1000	kg
32	罐盖活板	16MnR 10mm	1000	kg
33	罐盖活板	16MnR 10mm	1000	kg
34	罐盖活板	16MnR 10mm	1000	kg
35	罐盖活板	16MnR 10mm	1000	kg
36	罐盖活板	16MnR 10mm	1000	kg
37	罐盖活板	16MnR 10mm	1000	kg
38	罐盖活板	16MnR 10mm	1000	kg
39	罐盖活板	16MnR 10mm	1000	kg
40	罐盖活板	16MnR 10mm	1000	kg

设计说明

设计	谢英	2014.10	中国石化集团	1000
制图				
审核				

中国石油大学 (北京)

CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM

化工原理课程设计

说明书

设计题目: 分离苯-甲苯-对二甲苯

院系名称: 化学工程学院

专业班级: 化工14-4 创新班

学生姓名: 曾伟

学 号: 2014010596

指导老师: 曹 睿

成 绩: _____

2017年7月6日

1 化工原理课程设计任务书

发给学生：曾伟

班级：化工2014-4班创新班

一、题目

设计一连续精馏装置，用以分离：苯（1）—甲苯（2）—对二甲苯（3）混合物

二、原始数据

1.原料：处理量：13.8 吨/小时

进料状态：液体分率 0.10

组成： $x_1=0.35$ （质） $x_2=0.46$ （质）

2.产品要求： $x_{D2}=0.02$ （mol） $x_{W1}=0.01$ （mol）

3.冷凝器形式：全凝器 冷却剂温度：30℃

三、计算说明书内容

1.流程简图

2.工艺计算（包括物料衡算及热量衡算总表）

3.塔板计算

4.塔体初步设计

5.辅助设备的选用

6.计算结果汇总表

7.分析与讨论

四、绘图要求

1.塔体总图

2.塔板总图

五、发出日期：2017.5.19 完成日期：2017.7.6

系主任：刘梦溪 指导教师：曹睿

8 设计结果汇总表

8.1 工艺计算结果汇总表

表 8-1 工艺计算结果汇总表

名称		单位	数值
组成	塔顶	苯	0.98
		甲苯	0.02
		对二甲苯	0.00
	进料	苯	0.40
		甲苯	0.44
		对二甲苯	0.16
	塔底	苯	0.01
		甲苯	0.72
		对二甲苯	0.27
压力	回流罐	kPa	101.30
	塔顶		116.50
	进料		127.16
	塔底		136.49
温度	回流罐	℃	45.00
	塔顶		85.70
	进料		116.11
	塔底		126.75
流量	回流液	kmol/h	239.33
	塔顶产品		62.58
	塔底产品		93.07
	进料		155.66
	第二板气相		301.91
	第二板液相		239.33
	塔底板气相		161.82
	塔底板液相		254.9
	冷却剂		152772.07
	水蒸气	kg/h	4413.95
回流比	最小回流比	-	2.73
	操作回流比		3.82
塔板数	理论板数	块	17.48
	实际板数		32
	精馏段板数		16
	提馏段板数		16
效率	精馏段	-	0.54
	提馏段		0.59
热量	冷凝器热负荷	kJ/h	9565059.56
	再沸器热负荷		9153909.00
	全塔总热量		13074029.97
	全塔热损失		457695.45

8.3 塔板设计汇总表

表 8-3 塔板设计汇总表

塔段		精馏段	提馏段
塔径/mm		1600	1600
塔板间距/mm		450	450
溢流堰	型式	平口堰	平口堰
	堰长/mm	1120	1200
	堰高/mm	50	50
受液盘	型式	凹形	凹形
	盘深	50	50
进口堰	有/无	无	无
降液管	底隙高度/mm	50	50
	降液管面积/mm ²	176440	224674
	宽度/mm	230	360
浮阀	类型	33gF-1 重阀	33gF-1 重阀
	排列方式	三角形叉排	三角形叉排
	排间距/mm	50	60
	开孔数	263	186
	开孔率	15.63%	11.05%

8.4 塔体设计汇总表

表 8-4 塔体设计汇总表

项目		类型	数值
塔体高度	筒体	直径/mm	1600
		壁厚/mm	8
	封头	直径/mm	1600
		直边高度/mm	400
		曲边高度/mm	25
		壁厚/mm	8
	人孔	个数	7
		直径/mm	450
		位置	塔顶、塔底、进料处、 第 8、25 块塔板上方、 裙座 2 个
	裙座	个数	1
		裙座地圈高度/mm	3000
		类型	圆筒形
	塔高	塔顶/m	1.3
		塔底/m	2.0
		进料处/m	1.2
人孔处/m		0.6	
总塔高/m		18.3	

化工原理课程设计说明书

接管	塔顶蒸汽管	规格	$\Phi 426 \times 11\text{mm}$
	回流管	规格	$\Phi 73 \times 6\text{mm}$
	进料管	规格	$\Phi 219 \times 8\text{mm}$
	塔底出料管	规格	$\Phi 73 \times 6\text{mm}$
	塔底至再沸器接管	规格	$\Phi 219 \times 8\text{mm}$
	再沸器返塔联接管	规格	$\Phi 426 \times 11\text{mm}$
辅助设备	冷凝器	数量	1
		型号	FB-600-95-16-2
	冷却器	数量	1
		型号	Dg=500mm, N=4, n=152, l=3m, S=35m ²
	回流泵	数量	1
		型号	IS65—50—160
	再沸器	数量	1
		型号	FB-500-65-16-2

六、教改论文展示

1、曹睿, 刘金龙, 刘艳升, 刘梦溪, 任洁梅. 工业规模塔设备的虚拟设计——SolidWorks 软件在化工仿真中的应用(一) [J]. 化工高等教育. 2020, 37(2): 112-118.

2、曹睿, 刘金龙, 刘艳升, 钟帆, 刘梦溪. 工业规模塔设备的虚拟拆装演示——SolidWorks 软件在化工仿真中的应用(二) [J]. 化工高等教育. 2020, 37(3): 117-122.

3、邓春, 龚雅妮, 王彧斐, 郝江平, 曹睿, 李兴洵, 鄂红, 兰文杰, 刘梦溪. 基于雨课堂的化工原理课程混合式教学改革探索与实践 [J]. 化工高等教育. 2020, 37(6): 20-24, 86.

4、李泯茜, 邓春, 曹睿, 刘梦溪. 分段函数法逐板计算非理想物系的理论板数 [J]. 化工高等教育. 2020, 37(3): 144-147.

5、林少宁, 王敏, 曹睿, 刘艳升. 精馏塔理论板上浓度返混对分离效果及能耗的影响——化工原理课程从闪蒸角度对精馏的解释 [J]. 化学工程与装备. 2017, (4): 8-11.



工业规模塔设备的虚拟设计*

——SolidWorks 软件在化工仿真中的应用(一)

曹睿,刘金龙,刘艳升,刘梦溪,任洁梅

(中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室,北京 102249)

[摘要]塔设备是应用最广的化工设备,由于结构复杂,通常采用非标设计,传统的装备图或实物照片不利于初学者了解塔设备的立体结构和功能。基于 SolidWorks 三维仿真软件建立具有工业规模的虚拟塔设备模型平台,可以完全按照工业标准实现对塔板传质构件、溢流构件、支撑件和连接件的设计。模型平台充分展示了机械构件的 3D 精细结构,可以动态显示设备的立体效果,实时再现机械设计全过程,有助于提高学生对传质设备的认识并强化学生的工程设计能力。

[关键词]塔设备; SolidWorks 软件; 塔内件; 虚拟设计; 化工仿真

Virtual Design of the Tower in Industrial Scale: I, The Application of SolidWorks in Chemical Engineering Simulation

Cao Rui, Liu Jinlong, Liu Yansheng, Liu Mengxi, Ren Jiemei

(State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum, Beijing 102249)

Abstract: Tower has been considered to be the most widely-used device in chemical engineering. It is usually designed in non-standard criteria for its complicate construction. Traditional drawings and pictures of towers are not applicable for beginners to understand the structures and functions of tower. Based on SolidWorks, an efficient 3D simulation software, the virtual modeling tower platform in industrial scale has been established, which can realize the design of the mass transfer components, overflow components, supports and connectors of trays according to industry standards. It makes full use of the 3D function of mechanical components, and can dynamically display the stereoscopic effects of the device, and reproduce the whole process of mechanical design in real time, which helps to improve the students' understanding of mass transfer equipment and strengthen the engineering design ability of students in a brand new way.

Key words: Tower; SolidWorks; Tower components; Virtual design; Process simulation in chemical engineering

[作者简介] 曹睿(1973-),女,副教授,博士。

[通信作者] 曹睿, E-mail: crray@cup.edu.cn。

* 基金项目:中国石油大学(北京)校级重点教改项目“用 SolidWorks 软件构建化工传质设备的机械设计模拟平台”和“《化工原理》课程建设”。

工业规模塔设备的虚拟拆装演示*

——SolidWorks 软件在化工仿真中的应用(二)

曹睿,刘金龙,刘艳升,钟帆,刘梦溪

(中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室,北京 102249)

[摘要]在塔设备的教学中,塔内件的拆装演示是一种高效的教学手段,能使学生直观地了解塔内结构,并深入认识机械构件之间的匹配关系和工程实施细节。利用 SolidWorks 软件建立仿真塔设备模型平台,可以实现 3D 视频教学。特别是内构件的动态拆装演示可使学生完全沉浸到情景学习状态之中,深度了解塔设备结构,建立“工艺装备一体化”的思想。此外,仿真教学可以进行多方案对比和错误案例分析,从根本上改变传统的塔设备教学理念。

[关键词]塔设备; SolidWorks 软件; 拆装演示; 动态仿真; 工艺装备一体化

Virtual Assembling and Disassembling Demonstration of the Tower in Industrial Scale; II. The Application of SolidWorks in Chemical Engineering Simulation

Cao Rui, Liu Jinlong, Liu Yansheng, Zhong Fan, Liu Mengxi

(State Key laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum, Beijing 102249)

Abstract: Demonstration is usually employed as the most effective method to display the assembling and disassembling process of internal components. It enables students to understand the structural of devices intuitively and obtain the specific matching relationships and details during the implementation processes. Based on SolidWorks software, the modeling tower platform has been established, which can perform 3D video teaching in a dynamic way. It is convenient for students to comprehend the structure of equipment while assembling and disassembling, and it provides a feasible way to indulge in case study and establish the idea of process-equipment integration. Additionally, simulation technology can be used in error-case analysis and multi-project comparison and change the traditional design patterns.

[作者简介]曹睿(1973-),女,副教授,博士。

[通信作者]曹睿, E-mail: ctray@cup.edu.cn。

*基金项目:中国石油大学(北京)校级重点教改项目“用 SolidWorks 软件构建‘化工传质设备的机械设计模拟平台’”和“化工原理课程建设”。

基于雨课堂的化工原理课程混合式 教学改革探索与实践*

邓 春, 龚雅妮, 王戎斐, 郝江平, 曹 睿, 李兴洵, 鄂 红, 兰文杰, 刘梦溪

(中国石油大学(北京)化学工程与环境学院重质油国家重点实验室, 北京 102249)

[摘要]化工原理是化工类专业的核心专业基础课程, 对学生树立正确的工程观、培养学生处理实际工程问题的能力至关重要。针对该课程的教学现状, 引入现代化网络教学平台进行混合式教学改革势在必行。文章结合在雨课堂平台开展化工原理课程混合式教学改革的实践, 介绍了雨课堂辅助教学的实践应用及其优势, 以期与同行分享经验, 为雨课堂平台能够更好地服务于高校课程提供借鉴。

[关键词]雨课堂; 化工原理; 教学改革; 混合式教学

Exploration and Practice of Blended Teaching Reform for Principles of Chemical Engineering Based on Rain Classroom Platform

Deng Chun, Gong Yani, Wang Yufei, Hao Jiangping, Cao Rui, Li Xingxun,
E Hong, Lan Wenjie, Liu Mengxi

(State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, College of Chemical Engineering and
Environment, China University of Petroleum, Beijing 102249)

Abstract: Principles of chemical engineering is a core course for chemical engineering, which plays a key role in establishing students' engineering concepts and cultivating their ability to deal with practical engineering problems. According to the current teaching situation of this course, it is imperative to introduce a modern network teaching platform to carry out blended teaching reform. Since the spring semester of 2016, we have explored the blended teaching reform using the Rain Classroom platform in the principles of chemical engineering. This article focuses on the practical application and the advantages

[作者简介]邓春(1984-),男,副教授,博导。

[通信作者]邓春, E-mail: chundeng@cup.edu.cn。

*基金项目:北京高校“优质本科课程”建设项目“化工原理”;中国石油大学(北京)教改项目“化工原理混合式教学课程建设”。

分段函数法逐板计算非理想物系的理论板数*

李沃茜, 邓春, 曹睿, 刘梦溪

(中国石油大学(北京) 化学工程与环境学院, 北京 102249)

[摘要] 运用分段函数法可以逐板计算非理想物系的理论板数; 首先对该非理想物系的气液平衡数据进行分段拟合, 得到气液相组成之间的分段函数; 然后利用逐板计算法求解非理想物系的理论板数。利用 Aspen Plus 中塔的 Radfrac 模块进行严格计算和验证, 结果显示, 采用分段函数法逐板计算的理论板数为 11.72, 严格计算法得到的理论板数为 11, 两者非常接近。因此, 采用分段函数法逐板计算非理想物系的理论板数是一件正确而有效的方法。

[关键词] 非理想物系; 相平衡; 分段函数; 逐板计算

Plate-to-plate Calculation for the Number of Theoretical Plates by Piecewise Function Method for a Nonideal System

Li Minxi, Deng Chun, Cao Rui, Liu Mengxi

(College of Chemical Engineering and Environment, China University of Petroleum, Beijing 102249)

Abstract: A piecewise function method of plate-to-plate calculation for the number of theoretical plates for a nonideal system is introduced in this paper. First, the vapor-liquid equilibrium data of the nonideal system are fitted to obtain the piecewise function between the molar fractions of gas and liquid phases. Next, the number of theoretical plates of the nonideal system is determined by plate-to-plate calculation method. In addition, the rigorous calculation module in Aspen Plus, Radfrac, is used for calculation and verification. Results show that the number of theoretical plates calculated by piecewise function method is 11.72, and the number of theoretical plates obtained by rigorous calculation method is 11, which are very close. It verifies the correctness and applicability of the proposed method in this paper.

Key words: Nonideal system; Phase equilibrium; Piecewise function; Plate-to-plate calculation

[作者简介] 李沃茜(1996-), 女, 本科生; 邓春(1984-), 男, 副教授, 博士, 本文共同第一作者。

[通信作者] 邓春, E-mail: chundeng@cup.edu.cn。

* 基金项目: 北京高校“优质本科课程”建设项目“化工原理”; 中国石油大学(北京) 教改项目“化工原理核心课程建设”“化工原理混合式教学课程建设”和“化工系统工程教学内容的革新”。

精馏塔理论板上浓度返混对分离效果及能耗的影响——化工原理课程从闪蒸角度对精馏的解释

林少宁, 王 敏, 曹 睿, 刘艳升

(中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室, 北京 102249)

摘 要: 精馏塔理论板上的气液相接触后进入相邻理论板的物流组成通常会偏离平衡组成, 带来的浓度返混对分离能力和所需热量具有很大影响。为了便于从能耗和分离效果上进行对比, 采用了带回流的多级闪蒸作为常规精馏的等价流程, 以汽化分率为变量进行研究。通过理论推导及 Aspen plus 模拟证实带回流多级闪蒸与常规精馏构型的一致性, 选用苯-甲苯体系进行模拟研究。研究表明, 进行精馏操作时若每级进料气、液相间的浓度返混程度越小则分离效果和所需的热负荷越能得到优化。同时得到在保证每级进料气、液相间无浓度返混时各级温度、汽化分率分布的初步规律, 为效益高的精馏塔设备的设计提供了目标函数和约束条件。

关键词: 带回流多级闪蒸; 返混; 分离; 热负荷; 模拟; 传质; 汽化分率

随着石油化工、化学工业、环境化工等领域的不断发展和兴起, 精馏过程因其大处理量、连续化操作等优势使得被广泛使用, 但其作为高能耗的分离过程, 在大型工业化生产过程中无法避免的遇到产品高纯度与操作高能耗的矛盾。因此, 对于精馏操作节能降耗的研究越来越多, 在产品达到高纯度分离要求的同时若能降低能耗便成为精馏学科和工程研究开发的主要目标。精馏过程具有巨大的节能的潜力, 提高精馏塔传质效率和生产效能的任何新发展, 都蕴藏着巨大的经济和社会效益, 一直以来都是石油和化学加工过程节能、减排最为关键的研究方向。

虽然精馏技术已具有相当成熟的工程设计应用经验与一定程度的基础理论研究, 并且还发展出以精馏技术为基础的众多新型复合传质技术, 但从总体看仍处于半经验阶段。Keller 对各种分离技术进行了成熟度分析认为, 精馏已成为当今技术成熟度和应用成熟度最高的分离技术。Kunesh 认为这些观点和认识不论从理论认识上还是实际应用上, 无疑都是片面和不足的。Porter 以历程图的方式扼要回顾了精馏技术的发展历程, 指出目前的精馏技术仍处于经验科学的状态, 尤其对于大型精馏塔操作性能的预测依然缺乏科学支撑。对于精馏理论的研究集中于理论板数的计算、适宜回流比的选择等, 对于精馏塔理论板上浓度的返混研究却鲜有报道, 罗新洋分析了精馏塔板上气、液相浓度的返混对塔板

效率的影响。同时精馏塔板上的气、液相接触后进入相邻板的物流组成通常会偏离平衡组成, 如此带来的浓度上的返混对塔板的分离能力和所需热量产生很大影响, 而对此的研究却相对较少。因此, 从精馏塔板上气、液相浓度返混的影响角度深入探索精馏的原理极为重要。

本文调研了目前国内外闪蒸及精馏的原理, 从理论上推导闪蒸与精馏的等价关系, 并运用 Aspen plus 模拟对其进行验证, 得到一种等价于常规精馏的带回流多级闪蒸构型。以此构型替代常规精馏, 选用苯-甲苯体系, 借助 T-x-y 相图分析在进料组成固定的情况下不同进料汽化分率对精馏分离效果及能耗的影响。同时以此构型考察在同等分离效果下返混对其能耗的影响, 分析每层板上汽化分率及温度的变化。本文旨在为找出更优于常规精馏(在保证产品达到高纯分离的同时又能降低能耗)的构型提供一个新思路, 为后续的研究提供重要的理论支撑。

1 带回流多级闪蒸与常规精馏的一致性

在构型上, 带回流多级闪蒸相对常规精馏比较复杂且工程上较难实施。但实际上, 带回流多级闪蒸与常规精馏在实现产品分离的过程中采用的原理是一致的。本节采用理论推导及 Aspen plus 模拟证实带回流多级闪蒸与常规精馏的构型是一致的。常规精馏是由带回流多级闪蒸简化而来的, 并且筛选出与常规精馏等价的带回流多级闪蒸流程。