

揭阳职业技术学院

Jieyang Vocational & Technical College

教 案

课程所属系（部）：化学工程系

讲授课程：反应器操作与控制

教材名称：反应器操作与控制

任课教师：赖江钿、黄云

专业班级：石油化工技术

授课学期：2025-2026 学年第二学期

2026 年 3 月

“反应器操作与控制”课程综述

一、本课程的主要内容

反应器操作与控制课程主要围绕反应器的基础知识、结构、实验操作技能以及性能评估等方面展开。介绍化工生产及反应器的组成、性质、分类和应用，帮助学生建立对化工生产过程的整体认识，并深入学习反应器的多种类别及使用方法，分别通过理论学习和上机仿真学习逐步掌握相关知识。

本课程共六章，其主要内容为认识反应过程与反应器；釜式反应器操作与控制；固定床反应器操作与控制；流化床反应器操作与控制；塔式反应器操作与控制；管式反应器操作与控制等。

二、本课程与其他课程的关系

反应器操作与控制是石油化工技术专业学生的专业必修课，该学科具有极高的学科综合性，学生需要掌握化工生产原理、反应器类别、反应器使用与维护以及仿真操作等技能，以确保化工生产过程的安全性和可靠性。同时能够让学生了解不同反应器所遵循的标准，并学会通过合理使用反应器来确保产品质量符合要求，大大提高学生的学科综合运用能力。

三、本课程的现状

反应器操作与控制这门课具有很强的实用性，同时又有严密、系统的理论，是理论与实际密切结合的课程。学习反应器操作与控制分析有利于培养学生扎实的理论基础和实践能力，使其能够运用所学知识解决实际问题，为石油及相关行业的发展提供技术支持。我们在讲授基本理论的同时，尽量结合实际应用来分析反应器的性能，通过相关指标的测定来评估化工产品的质量和仪器使用性能。在教学方式与方法上，尽量注意采用启发式、研究式教学，特别是重视实验教学，培养学生的动手动脑能力。

四、本课程的发展

反应器操作与控制课程的发展变革主要集中在化工生产效率的发展变革。目前，反应器操作与控制的课程内容主要集中在化工生产效率与质量控制的学习上，同时强调自学与实验，培养学生扎实的理论基础和实践能力，使其能够运用所学知识解决实际问题，为石油及相关行业的发展提供技术支持。

五、本课程的思政教育

本课程思政教育的重点是培养学生树立正确的学习观、就业观、职业观、人生观等主题，每个主题穿插在相应章节课程教学中，在教学引起学生的思考，渗透思政教育元素。并结合反应器操作与控制的学科特点，不断挖掘教材中的思政元素，将思政目标与教学内容进行有机结合。

教案编号	01	
授课题目	第 1 章认识反应过程与反应器	
授课学时	6 课时	
课 型	理论 (<input checked="" type="checkbox"/>); 实验 (); 见习 (); 实训 (); 其它 ()	
教学目标	一、了解化工生产过程、化学反应的分类。 二、理解生产能力和生产强度。 三、掌握转化率、选择性、收率的计算及意义。	
教学重点	一、理解生产能力和生产强度。 二、掌握转化率、选择性、收率的计算及意义。	
教学难点	一、理解生产能力和生产强度。 二、掌握转化率、选择性、收率的计算及意义。	
教学方法	讲授 (<input checked="" type="checkbox"/>); 讨论 (<input checked="" type="checkbox"/>); 指导 (<input checked="" type="checkbox"/>); 示教 (); 其它 ()	
电子教案	有 (<input checked="" type="checkbox"/>)	Microsoft PowerPoint (<input checked="" type="checkbox"/>); Author ware (); 其它 ()
	无 ()	
教学资源	多媒体 (<input checked="" type="checkbox"/>); 模型 (); 标本 (); 实物 (); 音像 (); 其它 ()	
教学过程 时间安排	第一节 2 课时, 第二节 2 课时, 第三节 2 课时	
思 考 题	第 1 章达标测试	
作 业	课后题	
课程思政元素	明确本课程在石化行业中的作用, 教育学生培养正确的学习态度。	
教学后记		

第1章 认识反应过程与反应器

第一节 评价化学反应

知识点一：化学反应的分类

1、按反应相态分类

表1-1 化学反应的分类

分类方法		内容	
按反应相态		均相反应	非均相反应
按反应可逆性		可逆反应	不可逆反应
按反应步骤		单一反应	复杂反应（平行反应、连串反应、可逆反应）
按反应的动力学特性		零级反应、一级反应、二级反应、三级反应和多级反应	
是否用催化剂		催化反应	非催化反应
操作条件	按操作温度	等温反应、绝热反应、非绝热变温反应	
	按操作压力	常压反应、加压反应、减压反应	
操作方式		间歇、连续、半间歇	

均相反应：反应过程不存在相界面，反应过程总速率由化学反应本身决定。

2. 按反应步骤分类

单一反应：只用一个化学反应式和一个动力学方程式就能代表的反应。

复杂反应：有几个反应同时进行，要用几个动力学方程式才能加以描述。包括：

平行反应：反应通式可表示为 $A \rightarrow B$, $A \rightarrow C$ 。由相同反应物进行两个或两个以上的不同反应，得到不同的产物。其中反应较快或产物在混合物中所占比例较高的称为主反应，其余的称为副反应。

例如苯酚和硝酸反应，反应过程中可以同时得到邻位、对位、间位三种硝基苯酚。

连串反应：反应的通式为 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 。主要特征是随着反应的进行，中间产物同时可以进行进一步反应而生成其他产物，且中间产物浓度逐渐增大，达到极大值后又逐渐减少。例如苯氯化生成氯苯，氯苯还会进一步反应生成二氯苯等产物；甲醇在银做催化剂的情况下制备甲醛，甲醛会进一步反应生成甲酸等。

可逆反应：在反应物发生化学反应生成产物的同时，产物之间也在发生化学反应恢复成原料。

例如 A 和 B 反应生成 R 和 S 的同时，R 和 S 也在发生化学反应生成原料 A 和 B。

3. 按操作方式分类

间歇操作反应：原料按一定配比一次性投入反应器，待反应达到一定要求后，一次性卸出物料。

连续操作反应：将原料连续加入反应器，发生反应的同时连续排出反应物料。当操作达到稳定态时，反应器内任何位置上物料的组成、温度等状态参数不随时间而变化。

半连续操作反应：也称为半间歇操作反应，通常是将一种反应物一次加入，然后连续加入另一种反应物，或者反应过程中某种反应产物连续采出。反应达到一定要求后停止操作并卸出物料。

知识点二：化工生产过程

一、生产工序

化学工序：以化学反应的方式改变物料化学性质的过程，称为单元反应过程。一般单元反应根据其反应规律和特点，可分为磷化、硝化、卤化、酯化、烷基化、氧化、还原、缩合、水解等。

物理工序：只改变物料的物理性质而不改变其化学性质的生产操作过程，称为化工单元操作过程。一般化工单元操作过程根据其操作过程的特点和规律可分为流体输送、传热、蒸馏、蒸发、干燥、结晶、萃取、吸收、吸附、过滤、破碎等。

二、化学反应过程的工艺指标

反应时间：指反应物的停留时间或接触时间，一般用空间速率和接触时间两项指标表示。

操作周期：是指在化工生产中，某一产品从原料准备、投料升温、各步单元反应，直到出料，所有操作时间之和为操作周期，也称之为生产周期。

生产能力：是指生产装置每年生产的产品量。在一定的工艺组织管理及技术条件下，所能生产规定等级的产品或加工处理一定数量原材料的能力。对于一个设备、一套装置或一个工厂来说，其生产能力是指在单位时间内生产的产品量或在单位时间内处理的原料量。

生产强度：指设备的单位特征几何尺寸的生产能力，例如单位体积或单位面积的设备在单位时间内生产得到的自的产品数量（或投入的原料量），单位是 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 、 $\text{t}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 或者 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $\text{t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 等。

反应转化率、选择性、收率：它们分别反映了原料通过反应器后的反应程度、原料生成目的产物的量，即原料的利用率。

消耗定额：主要有原料消耗定额和公用工程的消耗定额。

三、化学反应过程的影响因素

生产能力影响因素：主要有设备、人员素质和化学反应进行的状况等。

化学反应过程影响因素：温度、压力、原料配比、物料的停留时间、反应过程工艺优化的目标。

四、化学反应过程监测与操作控制

工艺参数的确定：温度、压力、原料配比、反应时间和转化率、催化剂等的操作控制。

主要控制点、控制方法和控制范围：

主要控制点一般是温度、压力、压差、流量、液位等。

控制方法主要有测量指标、测量记录、给定自调、自动控制、控制阀的位置、仪表自控、自调装置的位置及操作等。

控制范围：主要工艺参数的控制范围。

化学反应操作规程：即操作控制方案。操作人员根据工艺操作规程所要求的控制点，以及相关的工艺参数进行操作控制，完成合格产品的生产。

五、产物分离

产物分离主要是物理过程，分离出最终产品。反应产物通常包括产品物质在内的处于反应器出口条件下的混合物，也必须进行后处理。后处理的目的主要有：

通过分离精制达到合乎质量规格的产品和副产品

处理过程的排放废料使之达到排放标准

分离小部分未反应的原料进行再循环利用

以上每一步都需要在特定的设备中，在一定的操作条件下完成所要求的化学的和物理的转变。

知识点三：转化率、选择性、收率

1. 转化率 X

转化率是反应物料中的某一反应物在一个系统中参加化学反应的量占其输入系统的总量的百分数，它表示了化学反应进行的程度。

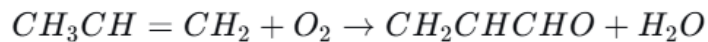
$$x_A = \frac{\text{某一反应物的转化量}}{\text{该反应物的起始量}} = \frac{n_{A0} - n_A}{n_{A0}}$$

$$\text{应用： } n_A = n_{A0}(1 - x_A), C_A = C_{A0}(1 - x_A)$$

2. 例题

已知丙烯氧化法生产丙烯醛的一段反应器，原料丙烯投料量为 600kg/h，出料中有丙烯醛 640 kg/h，另有未反应的丙烯 25 kg/h，试计算原料丙烯的转化率、选择性及丙烯醛的收率。

解：丙烯氧化生成丙烯醛的化学反应方程式：



丙烯转化率：

$$X = \frac{600 - 25}{600} \times 100\% = \frac{575}{600} \times 100\% = 95.83\%$$

丙烯的选择性：

$$S = \frac{640/56}{(600 - 25)/42} \times 100\% = 83.48\%$$

丙烯醛的收率：

$$Y = \frac{640/56}{600/42} \times 100\% = 80\%$$

3. 单程转化率和全程转化率

单程转化率：指原料一次性通过反应器一次达到的转化率，即是以反应器入口物料为基准的转化率。

$$X_{\text{单}} = \frac{MF_1 - RP_1}{MF_1}$$

全程转化率：指新鲜物料进入反应系统到离开反应系统所达到的转化率，即以新鲜物料为基准的转化率。

$$X_{\text{总}} = \frac{FF_1 - P_1}{FF_1}$$

学习检测题

1、通过乙苯催化脱氢制取苯乙烯，若只考虑乙苯脱氢制苯乙烯的主反应和乙苯裂解为苯和乙烯的副反应，当乙苯投料量为 100Kg/h，反应器出口物料组成为乙苯、苯乙烯和苯等，其中乙苯 12.5kg/h，苯为 7.0kg/h，求乙苯转化率，苯乙烯选择性和收率。

2、管式裂解炉原料乙烷进料 1000kg/h，反应掉乙烷量 700kg/h，得乙烯 400kg/h，求反应的转化率、选择性、收率。

3、正丁烯氧化脱氢法制丁二烯的主反应为： $C_4H_8 + 1/2O_2 \rightarrow C_4H_6 + H_2O(\text{气})$ ，当正丁烯投料量为 200kg/h，反应器出口物料组成为丁二烯、正丁烯以及丙酮等，其中丁二烯为 115kg/h，正丁烯为 70kg/h，

求正丁烯的转化率，丁二烯的选择性和收率。

第二节 化学平衡

知识点一：可逆反应与化学平衡

可逆反应是指在相同条件下既能向正反应方向进行又能向逆反应方向进行的反应。

可逆反应特点：在密闭体系中进行，反应物与生成物共同存在于同反应体系中

知识点二：化学平衡的影响因素

影响化学平衡的因素主要有反应物浓度、反应温度、反应压强等。

反应物浓度对化学平衡的影响：在其他条件不变时，增大反应物浓度或减小生成物的浓度，平衡向正反应方向移动；增加生成物的浓度或减小反应物的浓度，平衡向逆反应方向移动。

反应温度对化学平衡的影响：在其他条件不变的情况下，反应温度升高，会使化学平衡向着吸热反应的方向移动；温度降低，会使化学平衡向着放热反应的方向移动。

反应压强对化学平衡的影响：对于气体反应物和气体生成物分子数不等的可逆反应来说，当其他条件不变时，增大总压强，平衡向气体分子数减少即气体体积缩小的方向移动；减小总压强，平衡向气体分子数增加即气体体积增大的方向移动。若反应前后气体总分子数（总体积）不变，则改变压强不会造成平衡的移动。

知识点三：化学平衡的移动原理

化学平衡的移动：可逆反应中旧化学平衡的破坏、新化学平衡的建立过程叫做化学平衡的移动。

勒夏特列原理：如果改变影响平衡的一个条件（如反应物浓度、反应温度、反应压强），平衡就向能够减弱这种改变的方向移动。

化学平衡移动的根本原因：由于改变了外界条件，破坏了原平衡体系，使得 $v_{\text{正}} \neq v_{\text{逆}}$ ；当 $v_{\text{正}} > v_{\text{逆}}$ ，平衡向正方向移动；当 $v_{\text{正}} < v_{\text{逆}}$ ，平衡向逆反应方向进行；当 $v_{\text{正}} = v_{\text{逆}}$ ，平衡不移动。

知识点四：化学平衡常数与平衡转化率

1. 化学平衡常数

对于一般的反应： $aA + bB \rightleftharpoons cC + dD$

当温度一定，达到化学平衡时，其平衡常数表达式：

$$K = \frac{[C]^c \cdot [D]^d}{[A]^a \cdot [B]^b}$$

式中:

- K—该反应的平衡常数
- [A]—反应物A的浓度, 余类同
- a—反应物A的化学计量系数, 余类同

示例: $\text{H}_2(\text{g}) + \text{I}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{HI}(\text{g})$ 在698.6K时各物质的初始浓度和平衡浓度:

初始浓度 (mol/L)			平衡浓度 (mol/L)			[HI] ² /[H ₂][I ₂]
C ₀ (H ₂)	C ₀ (I ₂)	C ₀ (HI)	[H ₂]	[I ₂]	[HI]	
0.01067	0.01196	0	0.001831	0.003129	0.01767	54.49
0.01135	0.009044	0	0.003560	0.001250	0.01545	54.62
0.01134	0.007510	0	0.004565	0.0007378	0.01354	54.43
0	0	0.004489	0.0004798	0.0004798	0.003531	54.16
0	0	0.01069	0.001141	0.001141	0.008110	54.33

2. 平衡转化率

平衡转化率是指某一可逆化学反应达到化学平衡状态时, 某反应物 A 参与化学反应转化掉的量占该反应物投入量的百分数。

对于化学反应 $a\text{A} + b\text{B} \rightleftharpoons c\text{C} + d\text{D}$, 反应物 A 的平衡转化率可表示为:

$$X_A^* = \frac{\text{反应物A的起始浓度或投入量} - \text{反应物A的平衡浓度 (或平衡时剩余量)}}{\text{反应物A的起始浓度 (或投入量)}} \times 100\%$$

学习检测题

一、填空题

A、B、C 三种气体, 取 A 和 B 按 1:2 的物质的量之比混合, 在密闭容器中反应 $\text{A} + 2\text{B} \rightleftharpoons 2\text{C}$, 平衡后测得混合气体中反应物总物质的量与生成物物质的量相等, A 的转化率是_____。

化学平衡的影响因素主要有_____、温度、压强等。

由化学平衡常数 K 可以推断反应进行的_____, K 越大, 说明反应进行的越_____, 反应物的转化率也越_____, 但 K 只与_____有关; 转化率也可以表示某一可逆反应进行的_____, 转化率越大, 反应进行的越_____, 但是转化率与反应物的起始浓度等因素有关, 转化率变化了, K_____变化。

二、选择题

在 2000K 时, 反应 $\text{CO}(\text{g}) + 1/2\text{O}_2(\text{g}) \rightleftharpoons \text{CO}_2(\text{g})$ 的平衡常数为 K_1 , 则相同温度下反应 $2\text{CO}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{CO}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$ 的平衡常数 K_2 为 ()

- A、 $1/K_1$
- B、 K_1^2
- C、 $1/K_1^2$
- D、 $K_1^{(-1/2)}$

三、判断题

- 1 化学平衡是一种动态平衡，所以 $v_{正}=v_{负}=0$ 。 ()
- 2 一个反应体系是否达到平衡的依据是正、逆反应速率相等。 ()
- 3 氢气在氧气中燃烧生成水，水在电解时生成氢气和氧气，是可逆反应。 ()
- 4 在其他条件不变时，增大反应物的浓度，平衡向正反应方向移动。 ()
- 5 若反应前后气体总体积不变，则改变压强不会造成平衡的移动。 ()
- 6 温度降低，可以增大任何化学反应的化学反应速率。 ()
- 7 提高一种反应物在原料气中的比例，可以提高另一种反应物的转化率。 ()

第三节 化学反应速率及影响因素分析

知识点三：均相反应动力学

一、定义

研究化学反应本身的速率规律，也就是研究物料的浓度、温度以及催化剂等因素对化学反应速率的影响。影响反应速率的因素有反应温度、组成、压力、溶剂的性质、催化剂的性质。

在恒温条件下，化学动力学方程可写成：

$$\pm r_i = kf(c_A, c_B, \dots)$$

在非恒温时，化学动力学方程可写成：

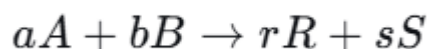
$$\pm r_i = f'(T)f(c_A, c_B, \dots)$$

式中：

- c_A, c_B, \dots — A、B...组分的浓度, kmol/m^3
- k — 反应速率常数

二、均相反应动力学方程式

在均相反应系统中进行如下不可逆化学反应：



其动力学方程一般都可表示成：

$$\pm r_i = k c_A^{\alpha_1} c_B^{\alpha_2}$$

式中：

- α_1 — A物质反应级数
- α_2 — B物质反应级数

三、几个概念

1. 反应级数

是指动力学方程式中浓度项的指数。它是由实验确定的常数，可以是分数，也可以是负数。它反映的是该物料浓度对反应速率的影响程度。

反应级数越高，该物料浓度对反应速率的影响越大。

如果反应级数等于零，在动力学方程式中该物料的浓度项就不出现，说明该物料浓度对于反应速率没有影响。

如果反应级数为负值，说明该物料浓度的增加反而阻抑了反应，使反应速率下降。

总反应级数等于各组分反应级数之和：即 $n = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \dots$

理解反应级数时的特别注意：

反应级数不同于反应的分子数，前者是在动力学意义上讲的，后者是在计量化学意义上讲的。对基元反应，反应级数即等于化学反应式的计量系数值，而对非基元反应，应通过实验来确定。

反应级数高低并不单独决定反应速率的快慢，反应级数只反映反应速率对浓度的敏感程度。级数愈高，浓度对反应速率的影响愈大。

不同级数反应的反应速率随组成的变化：

转化率	反应物组成	零级反应	一级反应	二级反应
0	1	1	1	1
0.3	0.7	1	0.7	0.49
0.5	0.5	1	0.5	0.25
0.9	0.1	1	0.1	0.01
0.99	0.01	1	0.01	0.0001

由表可见，除零级反应外，随转化率提高，反应物浓度下降，反应速率显著下降，二级反应的下降幅度较一级反应更甚。特别在反应末期，反应速度极慢。由此不难想象，当要求高转化率时，反应的大部分时间将用于反应的末期。

2. 基元反应与非基元反应

基元反应：反应物分子在碰撞中一步直接转化为产物分子。

非基元反应：反应物分子要经过若干步，即经由几个基元反应才能转化成为产物分子的反应

3. 化学反应速率常数 k

k 就是当反应物浓度为 1 时的反应速率，又称反应的比速率。 k 值大小直接决定了反应速率的高低和反应进行的难易程度。不同的反应有不同的反应速率常数，对于同一个反应，速率常数随温度、溶剂、催化剂的变化而变化。

温度是影响反应速率的主要因素之一。大多数反应速率都随着温度的升高而增加，但不同的反应，反应速率增加的快慢是不一样的。 k 随温度的变化规律符合阿累尼乌斯关系式：

$$k = A_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

式中 E —活化能， A_0 —频率因子。

4. 活化能

反应活化能是为使反应物分子“激发”所需给予的能量。活化能的大小是表征化学反应进行难易程度的标志。活化能高，反应难于进行；活化能低，则容易进行。

理解活化能 E 时应当注意：

活化能 E 不同于反应的热效应，它并不表示反应过程中吸收或放出的热量，而只表示使反应分子达到活化态所需的能量，故与反应热效应并无直接的关系。

活化能 E 不能独立预示反应速率的大小，它只表明反应速率对温度的敏感程度。

对于同一反应，即当活化能 E 一定时，反应速率对温度的敏感程度随着温度的升高而降低。

第四节 认识化学反应器

知识点一：化学反应的分类

一、按反应系涉及的相态分类

反应器种类	适用的装置形式	工业应用举例
均相气相	管式	烃类热裂解、二氯乙烷热裂解
均相液相	釜式、管式	氢过氧化异丙苯分解、环氧乙烷水合
非均相气液相	釜式、塔式	苯烷基化、对二甲苯氧化
非均相液液相	釜式、塔式	苯磺化、苯硝化
非均相气固相	固定床、流化床	乙苯脱氢、裂解汽油加氢
非均相液固相	釜式、塔式	离子交换、树脂法三聚甲醛
非均相气液固相	釜式、固定床、流化床	减压柴油加氢裂化

二、按结构型式分类

结构型式	适用反应特点	工业应用举例
釜式反应器	液相、液-液相、气-液相、液-固相、气-液-固相；靠机械搅拌保持温度及浓度的均匀；气液相反应的气体鼓泡	酯化、甲苯硝化、氯乙烯聚合、丙烯腈聚合等
管式反应器	气相、液相；流体通过管式反应器进行反应	轻柴油裂解生产乙烯、管式法高压聚乙烯、环氧乙烷水合制乙二醇等
塔式反应器	气-液相、气-液-固相；气体以鼓泡的形式通过液体（固体）反应	苯的烷基化、乙烯氧化生产乙醛、乙醛氧化制成乙酸
固定床反应器	气固相（催化反应或非催化反应）；流体通过静止的固体催化剂颗粒构成的床层进行化学反应	合成氨、乙苯脱氢制苯乙烯、乙烯环氧化
流化床反应器	气-固相催化反应；固体催化剂颗粒受流体作用悬浮于流体中进行反应，床层温度比较均匀	石油催化裂化、丙烯氨氧化、乙烯氨氧化制二氯乙烷

三、按流体流动及混合形式分类

1. 平推流反应器

物料在长径比很大的管式反应器中流动时，如果反应器中每一微元体积里的流体以相同的速度向前移动，此时在流体的流动方向不存在返混，这就是平推流。

特点：各物料微元通过反应器的停留时间相同，物料在反应器中沿流动方向逐段向前移动，无返混，物料组成和温度等参数沿管程递变，但是每一个截面上物料组成和温度等参数在时间进程中

不变，连续稳态操作，结构为管式结构。

2. 理想混合流反应器

反应器的物料微元与器内原有的物料微元瞬间能充分混合（反应器中的强烈搅拌），反应器中各点浓度相等不随时间变化，反应器内物料质点返混程度为无穷大。

特点：各物料微元在反应器的停留时间不相同，物料充分混合，返混最严重，反应器中各点物料组成和温度相同，不随时间变化，连续搅拌釜式反应器。

3. 返混及其对反应的影响

定义：返混专指不同时刻进入反应器的物料之间的混合，是逆向的混合，或者是不同年龄质点之间的混合。

返混的影响：返混带来的最大影响是反应器进口处反应物高浓度区的消失或减低。

降低返混的措施：降低返混程度的主要措施是分割，通常有横向分割和纵向分割两种。

4. 非理想混合流反应器

包括沟流及短路等现象。

四、按组合方式分类

1. 串联：釜式反应器串联

2. 并联：釜式反应器并联

知识点二：反应器操作方式

一、间歇（分批）式操作

原料一次加入，反应完成后一次卸出物料。反应器内物系的组成、温度等参数随时间变化，属于非稳态操作。

二、连续操作

原料不断加入，产物不断引出，反应器内物系参数均不随时间变化。

三、半连续（半间歇）式操作

原料和产物只有一种为连续输入或输出，其余为分批加入或卸出的操作。

教案编号	02	
授课题目	第2章 釜式反应器操作与控制	
授课学时	6 课时	
课 型	理论 (<input checked="" type="checkbox"/>); 实验 (); 见习 (); 实训 (); 其它 ()	
教学目标	一、了解釜式反应器的基本结构。 二、能根据生产情况选择合适的搅拌器。 三、能认识釜式反应器各部件。 四、掌握釜式反应器中各部件的作用。	
教学重点	一、能根据生产情况选择合适的搅拌器。 二、能认识釜式反应器各部件。 三、掌握釜式反应器中各部件的作用。	
教学难点	一、能根据生产情况选择合适的搅拌器。 二、能认识釜式反应器各部件。 三、掌握釜式反应器中各部件的作用。	
教学方法	讲授 (<input checked="" type="checkbox"/>); 讨论 (<input checked="" type="checkbox"/>); 指导 (<input checked="" type="checkbox"/>); 示教 (); 其它 ()	
电子教案	有 (<input checked="" type="checkbox"/>)	Microsoft PowerPoint (<input checked="" type="checkbox"/>); Author ware (); 其它 ()
	无 ()	
教学资源	多媒体 (<input checked="" type="checkbox"/>); 模型 (); 标本 (); 实物 (); 音像 (); 其它 ()	
教学过程 时间安排	第一节 2 课时, 第二节 2 课时, 第三节 2 课时	
思 考 题	第2章达标测试	
作 业	课后题	
课程思政元素	通过我国化工发展案例培养学生积极进取、脚踏实地、甘于奉献、服务社会的职业精神。	
教学后记		

第2章 釜式反应器操作与控制

第一节 认识釜式反应器

一、釜体

1、釜体由圆形筒体、上盖、釜底构成。

二、搅拌装置

搅拌装置由搅拌动力源和搅拌轴组成，常用的搅拌动力源是电动机，另外还有气动机和磁力搅拌机。其根本目的是加强釜式反应器内物料的统一混合，以强化传热和传质。

1、搅拌设备内流体的流动特性

1. 轴向流

物料沿搅拌轴的方向循环流动。凡是叶轮与旋转平面的夹角小于 90° 的搅拌器转速较快时所产生的流型主要是轴向流。轴向流的循环速度大，有利于宏观混合，适合于均相液体的混合、沉降速度低的固体悬浮。

2. 径向流

物料沿着反应釜的半径方向在搅拌器和反应釜内壁之间流动。径向流的液体剪切作用大，造成的局部涡流运动剧烈，因此它特别适合需要高剪切作用的搅拌过程，如气液分散、液液分散和固体溶解。

3. 切线流

物料围绕搅拌轴做圆周运动。平桨式搅拌器在转速不大且没有挡板时所产生的主要是切线流。切线流的存在除了可以提高反应釜内壁的对流传热系数外，对其他的搅拌过程是不利的。

2、常用搅拌器的类型、结构和特点

1. 桨式搅拌器

2. 涡轮式搅拌器

能量消耗不大时搅拌效率较高，搅拌产生很强的径向流。适合于乳浊液、悬浮液。速度较大，线速度约为 $3-8\text{m/s}$ ，转速范围为 $300-600\text{r/min}$ 。

3. 推进式搅拌器

4. 框式和锚式搅拌器

框式和锚式搅拌器结构比较坚固，搅动物料量大。与釜间隙小。用于传热、晶析操作和高粘度液体、高淤浆和沉降性淤浆的搅拌。直径取反应釜内径的 $2/3-9/10$ 。线速度为 $0.5-1.5\text{m/s}$ 。转速范围为 $50-70\text{r/min}$ 。

5. 螺带式搅拌器

直径较大，紧贴釜内壁。与釜壁的间隙很小，所以搅拌时能不断的将沾于釜壁的沉积物刮下来。螺带的高度通常取罐底至液面的高度。转速较低，通常不超过 50r/min。以上下循环流为主的流动，主要用于高粘度液体的搅拌。

3、搅拌器参数及应用范围

类型	参数、应用范围
锚式搅拌器	缓慢旋转的近壁搅拌器，拥有容器的内部轮廓。搅拌器和容器壁之间的狭窄间隙。良好的导热性。 $d_1/d_2^* = 0.9$ 至 0.95 ， $v^* = 0.5$ 至 5 米/秒。通过加热或者冷却混合。
平直叶圆盘搅拌器	搅拌器拥有强烈的径向流出和循环效果。 $d_1/d_2 = 0.2$ 至 0.35 ， $v = 3$ 至 6 米/秒。混合、悬浮、加气。
框式搅拌器	有网格的特殊形式的锚式搅拌器。改进了容器内部的搅拌效果。慢慢搅拌，近壁。层流混合流动。 $d_1/d_2 = 0.9$ ， $v = 0.5$ 至 5 米/秒。通过加热或者冷却混合。
斜叶搅拌器	搅拌器拥有径向和轴向流出，循环效果强。 $d_1/d_2 = 0.2$ 至 0.5 ， $v = 3$ 至 10 米/秒。混合、悬浮、均质。
螺旋搅拌器	缓慢旋转的搅拌器，适用于高粘性液体，良好的轴向循环。 $d_1/d_2 = 0.9$ 至 0.95 ， $v = 0.5$ 至 1 米/秒。混合高粘性介质。
多级脉冲逆流搅拌器	配有多个搅拌元件的搅拌器。它由一个内片和外片组成，叶片位置相反。上下方向的轴向流动。 $d_1/d_2 = 0.5$ 至 0.7 ， $v = 1.5$ 至 8 米/秒。通过加热或者冷却混合悬浮、均质。
桨式搅拌器	简单、缓慢旋转的搅拌器。拥有低至中等搅拌效果，适用于中等至高粘性液体。 $d_1/d_2 = 0.6$ 至 0.8 ， $v =$ 最大至 8 米/秒。混合。
旋桨式搅拌器	高速搅拌器，轴向流出效果强，循环效果强。 $d_1/d_2 = 0.1$ 至 0.5 ， $v = 2$ 至 15 米/秒。均质、悬浮。
叶轮搅拌器	高速搅拌器，配有向后弯曲的叶片，适用于中低粘性的流体。 $d_1/d_2 = 0.4$ 至 0.7 ， $v = 4$ 至 12 米/秒。混合、悬浮。
齿形圆盘搅拌器	主要轴向流出的高速搅拌器。 $d_1/d_2 = 0.2$ 至 0.5 ， $v = 10$ 至 30 米/秒。有粉碎(分散)作用的均质、加气、悬浮。

注: d_1 =搅拌器直径, d_2 =容器直径, v =搅拌器圆周速度

4、搅拌器选型原则

1. 按物料粘度选型

在影响搅拌状态的诸物理性质中，液体黏度的影响最大，所以可根据液体黏度来选型。对于低黏度

液体，应选用小直径、高转速搅拌器，如推进式、涡轮式。对于高黏度液体，应选用大直径、低转速搅拌器，如锚式、框式和桨式。

2. 按搅拌目的选型

5、搅拌附件

1. 挡板

2. 导流筒

导流筒是一个圆筒形，紧包围着叶轮。应用导流筒可使流型得以严格控制，还可得到高速涡流和高倍循环。导流筒可以为液体限定一个流动路线以防止短路；也可迫使流体高速流过加热面以利于传热。对于混合和分散过程，导流筒也能起到强化作用。

三、密封装置

1、填料密封

2、机械密封

四、传动装置

1、传动装置是赋予搅拌装置及其它附件运动的传动件组合体。传动作用是提供搅拌的动力。电动机的转速较高，通过减速机可将转速降至工艺要求的搅拌转速，再通过联轴器带动搅拌轴转动。

五、换热装置

1、夹套式换热

2、蛇管式

蛇管浸没在物料中，热量损失少，且由于蛇管内传热介质流速高，它的传热系数比夹套大得多。但对于含有固体颗粒的物料及黏稠的物料，容易引起物料堆积和挂料，影响传热效果。

形式：水平式蛇管、立式蛇管、几种插入式传热构件。

3、列管式

对于大型反应釜，需高速传热时，可在釜内安装列管式换热器。主要优点是单位体积所具有的传热面积大，传热效果好，此外结构简单，操作弹性较大。

4、外部循环式

当反应器的夹套和蛇管传热面积仍不能满足工艺要求，或由于工艺的特殊要求无法在反应器内安装蛇管而夹套的传热面积又不能满足工艺要求时。可以通过泵将反应器内的料液抽出，经过外部换热器换热后再循环回反应器中。

5、回流冷凝式

当反应在沸腾温度下进行且反应热效应很大时，可以采用回流冷凝法进行换热，即使反应器内产

生的蒸汽通过外部的冷凝器加以冷凝，冷凝液返回反应器中。采用这种方法进行传热，由于蒸汽在冷凝器中以冷凝的方式散热，可以得到很高的传热系数。

六、反应釜内介质的选择

1、高温热源的选择

1. 高压饱和水蒸气

来源于高压蒸汽锅炉、利用反应热的废热锅炉或热电站的蒸汽透平。

2. 高压汽水混合物

由焊在设备外壁上的高压蛇管（或内部蛇管）、空气冷却器、高温加热炉和安全阀等部分构成一个封闭的循环系统。管内充满 70%的水和 30%的蒸汽，形成汽水混合物。

3. 有机载热体

利用某些有机物常压沸点高、熔点低、热稳定性好等特点可提供高温的热源，如联苯导生油，YD、SD 导热油等都是良好的高温载热体。

4. 熔盐

反应温度在 300℃以上可用熔盐作载热体。例：熔盐的组成为 KNO_3 53%， NaNO_3 7%， NaNO_2 40%（质量分数，熔点 142℃）。

5. 电加热法

6. 烟道气加热法

用煤气、天然气、石油加工废气或燃料油等燃烧时产生的高温烟道气作热源加热设备，可用于 300℃以上的高温加热。缺点是热效率低，传热系数小，温度不易控制。

2、低温冷源的选择

1. 冷却用水

如河水、井水、城市水厂给水等，水温随地区和季节而变。深井水的水温较低而稳定，一般在 15-20℃。随水的硬度不同，对换热后的水出口温度有一定限制，一般不宜超过 60℃。

2. 空气

在缺乏水资源的地方可采用空气冷却。其主要缺点是传热系数低，需要的传热面积大。

3. 低温冷却剂

常用的载冷剂有三类，即水、盐水及有机物载冷剂。

七、釜式反应器部件

1、法兰

2、视镜

- 3、安全阀
- 4、连管
- 5、加料管
- 6、温度计套管
- 7、支座

第二节 釜式反应器操作与维护

一、釜式反应器的操作要点

1、开车前准备

- 1 熟悉设备的结构、性能，并熟练掌握设备操作规程。
- 2 准备必要的开车工具，如扳手、管钳等。
- 3 检查水、电、气等公用工程是否符合要求。
- 4 确保减速机、机座轴承、釜用机封油盒内不缺油。
- 5 确认传动部分完好后，启动电机。检查搅拌轴是否按顺时针方向旋转，严禁反转。
- 6 用氮气（压缩空气）试漏，检查釜上进出口阀门是否内漏，相关动、静密封点是否有漏点，并用直接放空阀泄压，看压力能否很快泄完。

2、正常开车

- 1 投运公用工程系统、仪表和电气系统。
- 2 按工艺操作规程进料，启动搅拌运行。
- 3 反应釜在运行中要严格执行工艺操作规程，严禁超温、超压、超负荷运行，凡出现超温、超压、超负荷等异常情况，立即按工艺规定采取相应处理措施。禁止釜内超过规定的液位反应。
- 4 严格按工艺规定的物料配比加(投)料，并均衡控制加料和升温速度，防止因配比错误或加(投)料过快，引起釜内剧烈反应，出现超温、超压、超负荷等异常情况，而引发设备安全事故。
- 5 设备升温或降温时，操作动作一定要平稳，以避免温差应力和压力应力突然叠加，使设备产生变形或受损。

3、正常停车

- 1 根据工艺要求在规定的时间内停车，不得随意更改停车时间。
- 2 先停止搅拌，然后切断电源。
- 3 依次关闭各种阀门。
- 4 放料完毕，应将釜内残渣冲洗干净。不能用碱水冲刷，注意不要损坏搪瓷。

5 在检查釜内、搅拌器、转动部分、附属设备、指示仪表、安全阀、管路及阀门是否按规定都已关闭或冲洗干净之后方可进行交接班。

二、釜式反应器的维护与保养

1、釜式反应器在操作时常见的故障及处理方法

序号	故障现象	故障原因	处理方法
1	壳体损坏(腐蚀、裂纹、透孔)	①受介质腐蚀(点蚀、晶间腐蚀)；②热应力影响产生裂纹或碱脆；③磨损变薄或均匀腐蚀	①用耐腐蚀材料衬里的壳体需重新修衬或局部补焊；②焊接后要消除应力，产生裂纹要进行修补；③超过设计最低的允许厚度需更换本体
2	超温、超压	①仪表失灵，控制不严格；②误操作，原料配比不当，产生剧烈的放热反应；③因传热或搅拌性能不佳发生副反应；④进气阀失灵，进气压力过大	①检查修复自控系统，严格执行操作规程；②根据操作法，紧急放压，按规定定量、定时投料，严防误操作；③增加传热面积或清除结垢，改善传热效果；修复搅拌器，提高搅拌效率；④关总气阀，切断气源管理阀门
3	密封泄露（填料密封）	①搅拌轴在填料处磨损或腐蚀，造成间隙过大；②油环位置不当或油路堵塞不能形成油封；③压盖没压紧，填料质量差或使用过久；④填料箱腐蚀；⑤动静环端面变形、碰伤；⑥端面比压过大，摩擦副产生热变形；⑦密封圈选材不对，压紧力不够或V形密封圈装反，失去密封性；⑧轴线与静环端面垂直度误差过大；⑨操作压力、温度不稳，硬颗粒进入；⑩镶装或粘胶动、静环的镶缝泄漏	①更换或修补搅拌轴，并在机床上加工，保证表面粗糙度；②调整油环位置，清洗油路；③压紧填料或更换填料；④修补或更换；⑤更换摩擦副或重新研磨；⑥调整比压要合适，加强冷却系统，及时带走热量；⑦密封圈选材、安装要合理，要有足够的压力；⑧停车，重新找正，保证垂直度误差小于0.5mm；⑨严格控制工艺指标，颗粒及结晶物不能进入；⑩改进安装工艺或过盈量要适当，胶黏剂要好用，粘接牢固
4	釜内有异常的杂音	①搅拌器摩擦釜内附件(蛇管、温度计管等)或刮壁；②搅拌器松脱；③衬里鼓包，与搅拌器撞击；④搅拌器弯曲或轴承损坏	①停车检修找正，使搅拌器与附件有一定距离；②停车检查紧固螺栓；③修鼓包或更换衬里；④检修或更换轴及轴承
5	搪瓷搅拌器脱落	①被介质腐蚀断裂；②电动机旋转方向相反	①更换搪瓷轴或用玻璃轴；②停车改变转向
6	搪瓷法兰漏气	①法兰瓷面损坏；②选择垫圈材质不合理，安装接头不正确、空位、错移；③卡子松动或数量不足	①修补、涂防腐漆或树脂；②根据工艺要求，选择垫圈材料，垫圈接口要搭拢，位置要均匀；③按设计要求，有足够数量的卡子，并要紧固
7	瓷面产生鳞爆及微孔	①夹套或搅拌轴管内进入酸性杂质，产生氢脆现象；②瓷层不致密，有微孔隐患	①用碳酸钠中和后，用水冲净或修补，腐蚀严重的需更换；②微孔数量少的可修补，严重的更换
8	电动机电流超过额定值	①轴承损坏；②釜内温度低物料黏稠；③主轴转速较快；④搅拌器直径过大	①更换轴承；②按操作规程调整温度，物料黏度不能过大；③控制主轴转速在一定的范围内；④调整检修

2、维护要点

1. 釜式反应器的日常维护

- ① 反应釜在运行中，严格执行操作规程，禁止超温、超压。
- ② 按工艺指标控制夹套(或蛇管)及反应器的温度。
- ③ 避免温差应力与内压应力叠加，使设备产生应力变形。
- ④ 严格控制配料比，防止剧烈反应。
- ⑤ 注意反应釜有无异常振动和声响，如发现故障，应检查修理并及时消除。
- ⑥ 清洗密封液系统、密封液贮罐及视镜，必要时置换密封液。

- ⑦ 定期对设备进行状态监控。
- ⑧ 定期对设备润滑油进行化验。
- ⑨ 检查及消除跑、冒、滴、漏缺陷，紧固松动的螺栓，检查密封液液位，及时补加。

2. 搪玻璃反应釜在正常使用中注意事项

- ① 要严防金属硬物掉入设备内，运转时要防止设备振动，检修时按化工厂搪玻璃反应釜维护检修规程(HGJ 1008-79)执行。
- ② 尽量避免冷罐加热料和热罐加冷料，严防温度骤冷骤热。
- ③ 尽量避免酸碱液介质交替使用，否则将会使搪玻璃表面失去光泽而腐蚀。
- ④ 严防夹套内进入酸液(如果清洗夹套要用酸液时，不能用 pH<2 的酸液)，酸液进入夹套会产生氢效应，引起搪玻璃表面像鱼鳞片一样大面积脱落。一般清洗夹套可用 2% 的次氯酸钠溶液，最后用水清洗夹套。
- ⑤ 出料釜底堵塞时，可用非金属棒轻轻疏通，禁止用金属工具铲打。对粘在罐内表面上的反应物料要及时清洗，不宜用金属工具，以防损坏搪玻璃衬里。

第三节 间歇反应釜仿真操作

一、技术交底

1、工艺说明

主反应：

- $2C_6H_4NCIO_2 + Na_2S_n \rightarrow C_{12}H_8N_2S_2O_4 + 2NaCl + (n-2)S\downarrow$
- $C_{12}H_8N_2S_2O_4 + 2CS_2 + 2H_2O + 3Na_2S_n \rightarrow 2C_7H_4NS_2Na + 2H_2S\uparrow + 2Na_2S_2O_3 + (3n-4)S\downarrow$

副反应：

- $C_6H_4NCIO_2 + Na_2S_n + H_2O \rightarrow C_6H_6NCl + Na_2S_2O_3 + (n-2)S\downarrow$

2、设备一览

R01：间歇反应釜

VX01：CS₂计量罐

VX02：邻硝基氯苯计量罐

VX03：Na₂S_n沉淀罐

PUMP1：离心泵

二、操作规程

1、反应中要求的工艺参数

反应釜中压力不大于 8 个大气压。冷却水出口温度不小于 60℃，如小于 60℃ 易使硫在反应釜壁和蛇管表面结晶，使传热不畅。

2、主要工艺生产指标的调整方法

温度调节：操作过程中以温度为主要调节对象，以压力为辅助调节对象。升温慢会引起副反应速度大于主反应速度的时间段过长，因而引起反应的产率低。升温快则容易反应失控。

压力调节：压力调节主要是通过调节温度实现的，但在超温的时候可以微开放空阀，使压力降低，以达到安全生产的目的。

收率：由于在 90℃ 以下时，副反应速度大于正反应速度，因此在安全的前提下快速升温是收率高的保证。

3、仪表报警一览表

位号	说明	单位	高报	低报	高高报	低低报
TIC101	反应釜温度控制	℃	128	25	150	10
TI102	反应釜夹套冷却水温度	℃	80	60	90	20
TI103	反应釜蛇管冷却水温度	℃	80	60	90	20
TI104	CS ₂ 计量罐温度	℃	80	20	90	10
TI105	邻硝基氯苯罐温度	℃	80	20	90	10
TI106	多硫化钠沉淀罐温度	℃	80	20	90	10
LI101	CS ₂ 计量罐液位	m	1.40	1.75	0	0
LI102	邻硝基氯苯罐液位	m	1.20	1.50	0	0
LI103	多硫化钠沉淀罐液位	m	3.60	0.1	4.00	0
LI104	反应釜液位	m	2.70	2.90	0	0
PI101	反应釜压力	atm	8	0	12	0

4、事故及处理

1. 事故-反应釜超温

原因：反应釜超温（超压）

现象：温度大于 128℃（气压大于 8atm）

处理：

开大冷却水，打开高压冷却水阀 V20

关闭搅拌器 PUM1，使反应速度下降

如果气压超过 12atm，打开放空阀 V12

2. 事故-搅拌器坏

原因： 搅拌器坏

现象： 反应速度逐渐下降为低值，产物浓度变化缓慢

处理： 停止操作，出料维修

3. 事故-水阀 V22 卡

原因： 蛇管冷却水阀 V22 卡

现象： 开大冷却水阀对控制反应釜温度无作用，且出口温度稳步上升

处理： 开冷却水旁路阀 V17 调节

4. 事故-出料管堵塞

原因： 出料管硫磺结晶，堵住出料管

现象： 出料时，内气压较高，但釜内液位下降很慢

处理： 开出料预热蒸汽阀 V14 吹扫 5 分钟以上（仿真中）；拆下出料管用火烧化硫磺，或更换管段及阀门

5. 事故-测温电阻连线故障

原因： 测温电阻连线断

现象： 温度显示置零

处理： 改用压力显示对反应进行调节(调节冷却水)：

升温至压力为 0.3-0.75atm 就停止加热

升温至压力为 1.0-1.6atm 开始通冷却水

压力为 3.5-4atm 以上为反应剧烈阶段

反应压力大于 7atm，相当于温度大于 128℃，处于故障状态

反应压力大于 10atm，反应器联锁起动

反应压力大于 15atm，反应器安全阀起动

第四节 水杨酸磺化反应生产

一、工艺技术分析

1、工艺流程说明

通过 V101 向反应釜 R101 内注入浓硫酸 98% 276 公斤。

通过 R101 加料口缓慢加入固体水杨酸 0.5Kmol（69.1 公斤）。

加料完毕，继续搅拌 15 分钟。

缓慢开通与夹套相连的蒸汽进口阀 VA104，以及蒸汽凝结水出口阀 VD157/VD139，控制釜温 45-50℃。

当反应液逐步变清时，30 分钟内将釜温升温至 75℃。

当有结晶析出，开大蒸汽阀门加热，继续升温至 115℃，保温反应 4 小时。

取样检查，当 10 克的试样全部溶解于 60 毫升水时，即为反应终点。

关闭蒸汽进口阀 VA104 和蒸汽凝结水出口阀 VD157/VD139，打开冷却水进口阀 VD155 和出口阀 VD128，逐步冷却至 40℃。

将反应混合物转移至离心机或滤泵中，过滤，得到粗品（约 120 公斤）。

将粗品转移至反应釜中，加入 75-80℃ 的热水，搅拌 1 小时，离心过滤，冷却至 25℃ 以下，析出结晶，甩滤，干燥，得到 5-磺基水杨酸，收率为 93%。

2、反应原理

3、工艺仪表一览表

序号	仪表号	说明	单位	正常数据	量程
1	LG101	高位槽V101液位	L	750	0-100
2	TIC101	釜内温度显示	℃	115	0-150
3	PI101	釜内压力显示	MPa	0	-0.1-1

第五节 操作反应釜装置

一、工艺技术分析

1、反应釜实训装置主要设备技术参数

序号	代码	设备名称	主要技术参数
1	V101	产品罐	Φ400, 高600
2	V102	热水罐	Φ450, 高600
3	V103	原料罐	Φ400, 高600
4	P102	原料泵	WB50/025
5	P101	热水泵	TD-35
6	E101	热水罐电加热	
7	E102	釜电加热器	
8	E103	冷凝器	Φ140, 长500
9	R101	反应釜	

2、反应釜实训装置流程简述

1. 物料流向

原料罐 V103 中的原料由进料泵 P102 经阀 VA114 经流量计计量后进入反应釜中反应, 反应后的物料经 VA102 回到产品罐中。

2. 热水走向

反应釜本身带有加热器, 或通过热水泵 P101 将热水罐中的水进入反应釜夹套中给釜循环加热。

3. 冷却水流向

冷却水分成两股:

一股冷却水经阀 VA104 经流量计计量后进入反应釜蛇管中给物料冷却后, 流入下水。

一股冷却水经阀 VA110 经流量计计量后进入 E103 中给反应釜汽化的物料冷却后, 流入下水。

二、任务单

1、开车前准备

2、釜装置分段控制

1. 釜液位控制操作

表 1 间歇釜式反应器液位控制数据记录表

项目	时间	离心泵频率 (Hz)	釜式反应器内液位 (mm)
1			
2			
3			
4			
5			

2. 热水罐内温度控制操作

首先调节仪表 TCI101 的设定温度到所需的温度不超过 70℃。

保持热水罐中水的储量占三分之二到四分之三以上。

打开热水泵入口阀门 VA109，启动热水泵 P101 开关，打开热水泵出口阀门 VA107。

打开 EIC101 加热器开关。

液体必须没过电加热器才能进行加热，否则会发生干烧事故。

3. 温度自动控制操作

热源：

釜式反应器 R101 的釜内温度，是通过控制热水罐向釜式反应器 R101 输送热水的流量来实现的，即控制热水泵的电机频率来实现。要想釜式反应器快速升温可以启动釜电加热 EIC102。

冷源：

如果温度过高可以启动蛇管中的冷却水进行降温。

设置釜需要的温度：

首先调节仪表 TCI102 的设定温度，釜式反应器设定温度一定要低于热水罐的设定温度 TCI101。

搅拌均匀：

启动釜搅拌装置，调节搅拌频率。

开启釜电加热、冷却水：

如果釜温较低，可以开启釜电加热，在接近设定的温度 TIC102 的时候，关闭釜电加热。并打开上水总阀门，然后打开阀门 VA104 来启动冷却水。

4. 停止装置操作

停设备： 停止釜加热 EIC102，停止热水罐电加热 EIC101；停止泵 P101；停止釜搅拌。

停冷却水： 关闭冷却水阀门 VA104，关闭上水总阀门 VA122。

出料： 确认产品罐出口阀门 VA105 关闭，打开阀门 VA102 出料。

检查、清扫。

4、釜装置参数控制

请根据领取的 PID 图以及以往的操作经验，使用釜装置完成下列目标：

对反应釜进料并控制到目标液位。请填写你要达到的液位： _____ mm

启动相应的设备及措施控制釜的温度稳定。你的目标温度是： _____ °C

合理准备、启动、停止装置。从你接到开始的操作时间是 50 分钟，现在的时间是： _____

教案编号	03	
授课题目	第3章固定床反应器操作与控制	
授课学时	6 课时	
课 型	理论 (<input checked="" type="checkbox"/>) ; 实验 () ; 见习 () ; 实训 () ; 其它 ()	
教学目标	一、掌握气-固相固定床反应器类型。 二、了解固定床反应器中固体颗粒的作用。 三、掌握固定床反应器的优缺点。	
教学重点	一、了解固定床反应器中固体颗粒的作用。 二、掌握固定床反应器的优缺点。	
教学难点	一、了解固定床反应器中固体颗粒的作用。 二、掌握固定床反应器的优缺点。	
教学方法	讲授 (<input checked="" type="checkbox"/>) ; 讨论 (<input checked="" type="checkbox"/>) ; 指导 (<input checked="" type="checkbox"/>) ; 示教 () ; 其它 ()	
电子教案	有 (<input checked="" type="checkbox"/>)	Microsoft PowerPoint (<input checked="" type="checkbox"/>) ; Author ware () ; 其它 ()
	无 ()	
教学资源	多媒体 (<input checked="" type="checkbox"/>) ; 模型 () ; 标本 () ; 实物 () ; 音像 () ; 其它 ()	
教学过程 时间安排	第一节 2 课时, 第二节 2 课时, 第三节 1 课时, 第四节 1 课时	
思 考 题	第3章达标测试	
作 业	课后题	
课程思政元素	学习大庆精神和“铁人”精神, 汲取“石化人”不断进步的精神营养。	
教学后记		

第3章 固定床反应器操作与控制

第一节 认识固定床反应器

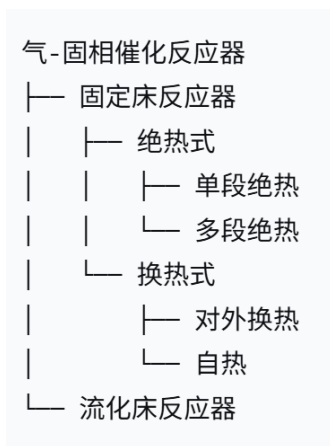
一、认识固定床反应器

定义

凡是流体通过不动的固体物料所形成的床层而进行反应的装置。固体催化剂颗粒堆积起来所形成的固定床层静止不动，气体反应物自上而下流过床层，进行反应的装置称作固定床反应器。

1、固定床反应器的分类

1、气-固相催化反应器分类



2、绝热式固定床反应器

1. 单段绝热式固定床反应器

在圆筒体底部安装一块支撑板，在支撑板上装填固体催化剂或固体反应物

形式：薄床层绝热式、厚床层绝热式

2. 多段绝热式固定床反应器

固体颗粒床层分多层，原料气通过第一段绝热床反应，温度和转化率升高

将反应物料通过换热冷却，使反应气远离平衡温度曲线状态，再进行下一段绝热反应

形式：

中间间接换热式（层间加入换热器、两单段反应器间加换热器）

中间直接冷激式

3、换热式固定床反应器

1. 对外换热式固定床反应器

多为列管式固定床反应器，结构类似于列管式换热器

在管内装填催化剂，管外通入换热介质

传热效果好，易控制固定床反应器床层的反应温度

载热体类型：

导热油

熔盐（如 KNO_3 53%， NaNO_3 7%， NaNO_2 40%）

2. 自热式固定床反应器

利用反应热来加热原料气，使原料气的温度达到要求的温度

同时降低反应物料的温度，使反应温度控制在适宜反应温度

形式：

单管逆流式

双套管并流式

4、重要概念

热点：在放热反应时，通常在换热式反应器的轴向上存在一个最高的温度点

飞温：超过工艺允许的最高温度

二、固定床反应器的优缺点

1、优点

返混小：流体流动接近平推流，反应效率高

催化剂磨损小，可长时间使用

适于在高温、高压下操作

气体停留时间可以控制，便于精确控制反应程

所需催化剂量和反应器体积小

2、缺点

导热差，温度分布复杂，易出现热点

催化剂更换不便，需要停车装卸

不能用细粒催化剂，否则压降过大

第二节 认识固定床反应器用催化剂

一、固体催化剂基础

1、催化作用的定义与基本特征

1. 定义

催化剂是这样一种物质，它能够加速热力学允许的化学反应，在反应结束时该物质并不消耗。

2. 基本特征

- ① 催化剂能够加快反应速率，但它本身并不进入化学反应的剂量
- ② 催化剂对反应具有选择性，即对反应的类型、反应方向和产物的结构具有选择性
- ③ 催化剂只能加速热力学上可能进行的化学反应，而不能加速热力学上不能进行的反应
- ④ 催化剂只能改变化学反应的速率，而不能改变化学平衡的速率（平衡常数）
- ⑤ 催化剂不改变化学平衡，既能加速正反应，也能同样程度地加速逆反应

2、催化剂的组成及功能

3、催化剂的性能与标志

1. 活性

指催化剂改变反应速率的能力，即加快反应速率的程度

反映了催化剂在一定工艺条件下催化性能的最主要指标

直接关系到催化剂的选择、使用及制造

2. 选择性

指催化剂促使反应向所要求的方向进行而得到目的产物的能力

是催化剂的又一个重要指标

3. 使用寿命

指催化剂在反应条件下具有活性的使用时间，或活性下降经再生而又恢复的累计使用时间

催化剂寿命愈长，使用价值愈大

高活性、高选择性的催化剂还需要有长的使用寿命

4. 机械强度和稳定性

催化剂需定期更换，在装卸、填装和使用时都要承受碰撞和摩擦

特别在流化床反应器中，对催化剂的机械强度要求更高

催化剂活性随时间变化曲线

a 型：起始活性很高，很快下降达到老化稳定

b 型：起始活性很低，经一段诱导达到老化稳定

4、固体催化剂的特征参数

参数	定义	单位
比表面积 S_g	单位质量催化剂所具有的表面积	m ² /Kg
孔容积 V_g	每克催化剂中空隙的容积	cm ³ /g
孔隙率 ε_B	颗粒之间的空隙体积与床层体积之比	cm ³ 空隙/cm ³ 床层
真密度	催化剂颗粒中的固体实体的密度（骨架密度）	g/cm ³
表观密度	包括催化剂颗粒中的孔隙容积的颗粒密度（假密度）	g/cm ³
堆积密度	催化剂自由填入反应器时，单位体积反应器中催化剂的质量	g/cm ³

二、固体催化剂的失活与再生

1、催化剂的失活

1. 中毒引起的失活

原料中极微量的杂质导致催化剂活性的迅速下降的现象

2. 结焦和堵塞引起的失活

催化剂表面上的含碳沉积物称为结焦

由于含碳物质和/或其它物质在催化剂孔中沉积，造成孔径减小（或孔口缩小），使反应物分子不能扩散进入孔中，这种现象称为堵塞。

堵塞常归并为结焦中，总的活性衰退称为结焦失活是最普遍和常见的失活形式。

3. 烧结和热失活

由高温引起的催化剂结构和性能的变化

2、催化剂的再生

催化剂的再生是在催化活性下降后，通过适当的处理使其活性得到恢复的操作。再生对于延长催化剂的寿命、降低生产成本是重要的手段。

再生介质：空气、蒸汽、氢气、酸和碱

三、催化剂的运输、储藏、装填

1、催化剂的运输

使用专用搬运装置搬运催化剂桶

2、催化剂的贮藏

要求防潮、防污染

例如，SO₂接触氧化使用的钒催化剂，在贮藏过程中不与空气接触则可保存数年，性能不发生

变化

催化剂受潮与否，就钒催化剂来说，大致可由其外观颜色判别，新的未受潮的催化剂应是淡黄色或深黄色的

3、催化剂的装填

装填质量直接影响反应器性能和催化剂寿命

需要保证装填均匀、松紧适度、避免架桥现象

4、固定床催化剂的填装操作要点

第三节 固定床反应器操作

一、固定床反应器操作要点

1、开车前的准备工作

熟悉设备的结构、性能，并熟悉设备操作规程

检查所有设备、管道、阀门试压合格，清洗吹扫干净，符合安全要求

所有温度、流量、压力、液位等仪表要正确无误

生产现场包括主要通道无杂物乱堆乱放，符合安全技术的有关规定

检查燃料气、燃料油、动力空气、水蒸气、冷冻盐水、循环水、电、生产原料等符合要求，处于备用状态

2、正常开车

投运公用工程系统、仪表和电气系统

通入氮气置换反应系统

按工艺要求先对床层升温直至合适温度，进行催化剂的活化

逐渐通入气体物料，适时打开换热系统，按要求控制好反应温度

调节反应原料气流量、反应器操作压力、操作温度到规定值

反应运行中，随时做好相应记录，发现异常现象时及时采取措施

二、固定床反应器的维护与保养

1、常见故障及处理方法

序号	异常现象	原因分析及判断	操作处理方法
1	炉顶温度波动	(1)燃料波动 (2)仪表失灵 (3)烟囱挡板滑动至炉膛负压波动 (4)蒸汽流量波动 (5)喷嘴局部堵塞 (6)炉管破裂(烟囱冒黑烟)	(1)调节并稳定燃料供应压力 (2)检查仪表, 切换手控 (3)调整挡板至正常位置 (4)调节并稳定流量 (5)清理堵塞喷嘴后, 重新点火 (6)按事故处理, 不正常停车
2	一段反应器进口温度波动	(1)物料量波动 (2)过热水蒸气波动 (3)仪表失灵	(1)调整物料量 (2)调整并稳定水蒸气过热温度 (3)检修仪表, 切换手控
3	反应器压力升高	(1)催化剂固定床阻力增加 (2)水蒸气流量加大 (3)进口管堵塞 (4)盐水冷凝器出口冻结	(1)检查床层催化剂烧结或粉碎, 应限期更换 (2)调整流量 (3)停车清理, 疏通管道 (4)调节或切断盐水解冻, 严重时用水蒸气冲刷解冻
4	火焰突然熄灭	(1)燃料气或燃料油压力下降 (2)燃料中含有大量水分 (3)喷嘴堵塞 (4)管道或过滤器堵塞	(1)调整压力或按断燃料处理 (2)油储罐放存水后重新点火 (3)疏通喷嘴 (4)清洗过滤器或管道
5	炉膛回火	(1)烟挡板突然关闭 (2)熄火后, 余气未抽净又点火 (3)炉膛温度偏低 (4)炉顶温度仪表失灵 (5)燃料带水严重	(1)调节挡板开启角度并固定 (2)抽净余气, 分析合格后, 再点火 (3)提高炉膛温度 (4)检查仪表 (5)排净存水

2、维护要点

1. 生产期间维护

严格控制各项工艺指标, 防止超温、超压运行

循环气体应控制在最佳范围, 应特别注意有毒气体含量不得超过指标

升、降温度及升、降压力速率应严格按照规定执行

调节催化剂层温度不能过猛, 要注意防止气体倒流

定期检查设备各连接处及阀门管道等, 消除跑、冒、滴、漏及振动等不正常现象

在操作、停车或充氮气期间均应检查壁温, 严禁塔壁超温

运行期间不得进行修理工作, 不许带压紧固螺栓, 不得调整安全阀

按规定定期校验压力表

主螺栓应定期加润滑剂, 其他螺栓和紧固件也应定期涂防腐油脂

2. 停车期间维护

无论短期停产还是长期停产, 都需要进行以下维护:

① 检查和校验压力表

- ② 用超声波检测厚仪器测定与容器相连接管道、管件的壁厚
- ③ 检查各紧固件有无松动现象；检查反应器外表面，防腐层是否完好，对表面的锈蚀情况（深度、分布位置）要绘制简图予以记载
- ④ 短期停车时，反应器必须保持正压，防止空气流入烧坏催化剂
- ⑤ 长期停车检修，还必须作定期检修停反应器所做的各项检查

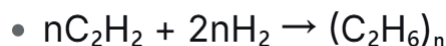
第四节 固定床反应器仿真操作

一、技术交底

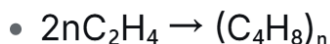
1、工艺说明

本流程为利用催化加氢脱乙炔的工艺。乙炔是通过等温加氢反应器除掉的，反应器温度由壳侧中冷剂温度控制。

主反应：



副反应（温度超过 66℃时）：



进料：

反应原料分两股：

一股为约-15℃的以 C₂为主的烃原料，进料量由流量控制器 FIC1425 控制

另一股为 H₂与 CH₄的混合气，温度约 10℃，进料量由流量控制器 FIC1427 控制

FIC1425 与 FIC1427 为比值控制，两股原料按一定比例在管线中混合

混合后经原料气/反应气换热器(EH-423)预热，再经原料预热器(EH-424)预热到 38℃，进入固定床反应器(ER-424A/B)

预热温度由温度控制器 TIC1466 通过调节预热器 EH-424 加热蒸汽(S3)的流量来控制

冷剂（热载体）：

冷却介质为液态丁烷

通过丁烷蒸发带走反应器中的热量

丁烷蒸汽通过在水冷器 EH-429 中由冷却水冷凝

C4 冷剂的压力由压力控制器 PIC-1426 通过调节 C4 蒸汽冷凝回流量来控制，从而保持 C4 冷剂的温度

2、本单元复杂控制回路说明

FII1427: 为一比值调节器。根据 FIC1425 (以 C₂为主的烃原料) 的流量, 按一定的比例, 相适应的调整 FIC1427 (H₂) 的流量。

比值调节: 工业上为了保持两种或两种以上物料的比例为一定值的调节叫比值调节。

对于比值调节系统, 首先是要明确哪种物料是主物料, 而另一种物料按主物料来配比。在本单元中, FIC1425 (以 C₂为主的烃原料) 为主物料, 而 FIC1427 (H₂) 的量是随主物料 (C₂为主的烃原料) 的量的变化而改变。

3、设备一览表

位号	设备名称
EH-423	原料气/反应气换热器
EH-424	原料气预热器
EH-429	C4蒸汽冷凝器
EV-429	C4闪蒸罐
ER-424A/B	C ₂ X加氢反应器

二、操作规程

1、开车操作规程

EV-429 闪蒸器充丁烷

ER-424A 反应器充丁烷

ER-424A 启动

2、正常操作规程

1. 正常工况下工艺参数

- (1) 氢气流量 FIC1427 稳定在 200KG/H 左右
- (2) FIC1425 设自动, 设定值 56186.8KG/H, FIC1427 设串级
- (3) PIC1426 压力控制在 0.4MPa
- (4) 反应器 ER-424A 压力 PI1424A 控制在 2.523MPa
- (5) TIC1466 设自动, 设定值 38.0℃

(6) 反应器温度 TI1467A: 44.0℃

(7) EV429 液位 LI1426 为 50%

(8) EV-429 温度 TI1426 控制在 38.0℃

2. ER-424A 与 ER-424B 间切换

(1) 关闭氢气进料

(2) ER-424A 温度降低低于 38.0℃后, 打开 C4 冷剂进 ER-424B 的阀 KXV1424、KXV1426, 关闭 C4 冷剂进 ER-424A 的阀 KXV1423、KXV1425

(3) 开 C₂H₂进 ER-424B 的阀 KXV1415, 微开 KXV1416。关 C₂H₂进 ER-424A 的阀 KXV1412

3. ER-424B 的操作

ER-424B 的操作与 ER-424A 操作相同

3、停车操作规程

1. 正常停车

关闭氢气

关闭加热

冷凝全回流

减少乙炔进料

降温、降压

4、连锁说明

1. 连锁源

现场手动紧急停车 (紧急停车按钮)

反应器温度高报 (TI1467A/B > 66℃)

2. 连锁动作

关闭氢气进料, FIC1427 设手动

关闭加热器 EH-424 蒸汽进料, TIC1466 设手动

闪蒸器冷凝回流控制 PIC1426 设手动, 开度 100%

自动打开电磁阀 XV1426

三、事故处理

事故名称	原因	现象	处理方法
氢气进料阀卡住	FIC1427卡在20%处	氢气量无法自动调节	①降低EH-429冷却水的量 ②用旁路阀KXV1404手工调节氢气量
预热器EH-424阀卡住	TIC1466卡在70%处	换热器出口温度超高	①增加EH-429冷却水的量 ②减少配氮量
闪蒸罐压力调节阀卡	PIC1426卡在20%处	闪蒸罐压力、温度超高	①增加EH-429冷却水的量 ②用旁路阀KXV1434手工调节
反应器漏气	反应器漏气, KXV1414卡在50%处	反应器压力迅速降低	停工
EH-429冷却水停	EH-429冷却水供应停止	闪蒸罐压力、温度超高	停工
反应器超温	闪蒸罐通向反应器的管路有堵塞	反应器温度超高, 会引发乙烯聚合的副反应	增加EH-429冷却水的量

教案编号	04	
授课题目	第4章流化床反应器操作与控制	
授课学时	6 课时	
课 型	理论 (<input checked="" type="checkbox"/>); 实验 (); 见习 (); 实训 (); 其它 ()	
教学目标	一、了解流化床反应器的特点、应用及各装置的作用。 二、熟悉流化床反应器的结构。 三、能判断流化床反应器常见的异常现象。 四、掌握流化床反应过程的传热与传质。	
教学重点	一、熟悉流化床反应器的结构。 二、能判断流化床反应器常见的异常现象。 三、掌握流化床反应过程的传热与传质。	
教学难点	一、熟悉流化床反应器的结构。 二、能判断流化床反应器常见的异常现象。 三、掌握流化床反应过程的传热与传质。	
教学方法	讲授 (<input checked="" type="checkbox"/>); 讨论 (<input checked="" type="checkbox"/>); 指导 (<input checked="" type="checkbox"/>); 示教 (); 其它 ()	
电子教案	有 (<input checked="" type="checkbox"/>)	Microsoft PowerPoint (<input checked="" type="checkbox"/>); Author ware (); 其它 ()
	无 ()	
教学资源	多媒体 (<input checked="" type="checkbox"/>); 模型 (); 标本 (); 实物 (); 音像 (); 其它 ()	
教学过程 时间安排	第一节 2 课时, 第二节 2 课时, 第三节 2 课时	
思 考 题	第4章达标测试	
作 业	课后题	
课程思政元素	1.学习和理解“高、严、细、实”的工作作风; 2.培养遵纪守法、坚持原则, 对分析结果负责的职业操守。	
教学后记		

第 4 章 流化床反应器操作与控制

第一节 认识流化床反应器

一、固体流态化

1、固定床阶段

当流体的速度较低时，流体只能穿过静止颗粒之间的空隙而流动，运动而运动，保持固定状态，这种情况称为固定床阶段。

2、流化床阶段

①临界流化床 当流体的流速增大到一定程度后，颗粒床层开始松动，床层中的颗粒发生相对运动，床层开始膨胀。当流速继续增大，床层膨胀程度加大，直至床层中的全部颗粒恰好悬浮在流动的流体中颗粒本身的重力与流体和颗粒之间的摩擦力相等。但颗粒还不能自由的运动，这种情况称为临界流化床阶段，此时流体的速度称为临界流化速度。

② 流化床阶段 当流体的流速超过临界流化速度，这时反应器中的全部颗粒刚好悬浮在向上流动的流体中而能做随即的运动。流速增大，床层高度随之升高，这种床层称为流化床

3、输送床

当流体的流速进步增大到某一极限值时，固体颗粒不再自由运动，而是随流体运动，被流体从反应器中带出。这种情况称为输送床阶段。

固定床阶段： $u_0 \leq u_{mf}$ 时，固体粒子不动，床层压降随 u_0 增大而增大；

➤ 流化床阶段： $u_{mf} \leq u_0 \leq u_t$ 时，固体粒子悬浮湍动，床层分为浓相段和稀相段， u_0 增大而床层压降不变；

➤ 输送床阶段： $u_0 > u_t$ 时，粒子被气流带走，床层上界面消失， u_0 增大而床层压降有所下降。

流化床操作优点：

流化床中可以采用粒径很小的粉末颗粒，并在悬浮状态下与流体接触，流体固体颗粒接触的相界面面积很大，有利于提高非均相反应催化剂的利用率。

由于流体和固体颗粒在流化床层内剧烈混合，床层温度分布均匀，避免局部过热，两相界面更新很快，有利于流体与颗粒之间传热、传质。

有利于催化剂再生和反应同时进行，使易失活催化剂能在实际生产中得以使用。

单位设备生产能力大，设备结构简单、造价低，符合现代化大生产的需要。

流化床操作缺点：

流化床中流体和颗粒混合物返混严重，使得床内物料停留时间分布不均，导致产品质量下降，另外，由于返混的存在，造成反应速率下降和副反应增加。

床内气流不少以气泡的形式通过床层与固体颗粒接触，极大降低气固接触面积，导致反应速率下降，影响产品质量。

催化剂颗粒的剧烈运动，导致催化剂、管子和反应器磨损严重。

不利于高温操作，由于流化状态需要固体以颗粒的形式存在，如果高温操作，容易使颗粒聚集和黏结。

二、流化床反应器的结构

1、流化床反应器主体

按床层中的介质密度分布分为浓相段（有效体积）和稀相段，底部设有锥底，有些流化床的上部还设有扩大段，用以增强固体颗粒的沉降。

2、气体分布装置

气体分布装置包括设置在锥底的气体预分布器和气体分布板两部分。其作用是使体均匀分布，以形成良好的始流化条件，同时支承固体催化剂颗粒。

3、内部构件

内部构件一般设置在浓相段，主要用来破碎气体在床层中产生的大气泡，增大气固相间的接触机会；减少返混，从而增加反应速率和提高转化率。内部构件包括挡网、挡板和填充物等。

4、内部构件

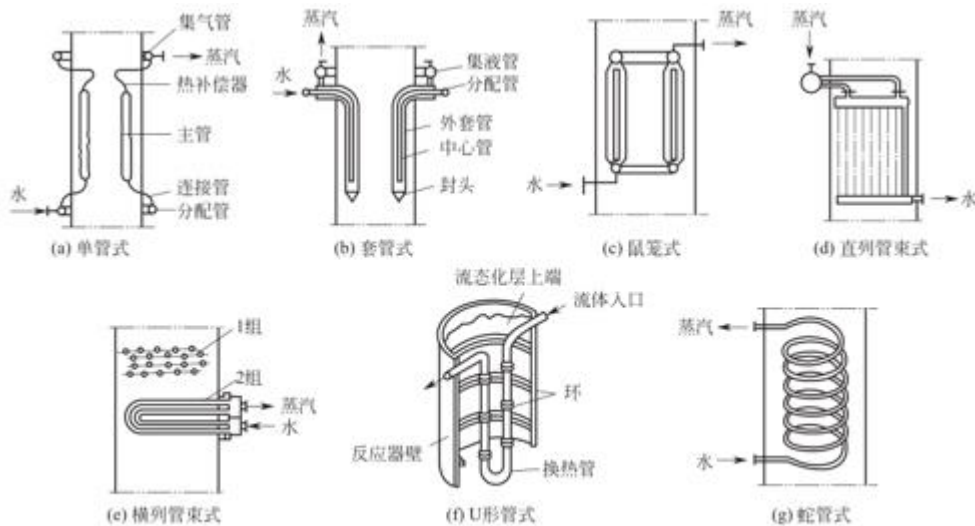


图 4-8 常见的流化床内部换热器

5、气固分离装置

由于流化床内的固体颗粒不断地运动，引起粒子间及粒子与器壁间的碰撞而磨损，使上升气流中带有细粒和粉尘。气固分离装置用来回收这部分细粒，使其返回床层，并避免带出粉尘影响产品的纯度。常用的气固分离装置有旋风分离器和过滤管。

三、流化床反应器的分类

- 1、按照床层的外形分类
- 2、按照固体颗粒是否在系统内循环分类

四、流化床反应器操作中常见的异常现象

1、沟流现象

沟流现象的特征是气体通过床层时形成短路。

沟流现象产生的原因：颗粒的粒度很细，密度大，流体气速很低时，潮湿的物料和易于黏结的物料；气体分布板设计不好布气不均。

消除沟流现象：对物料预先进行干燥并适当加大气速，另外，分布板的合理设计也是十分重要的。还应注意风帽的制造、加工和安装，以免通过风帽的流体阻力相差过大而造成布气不均。

2、大气泡现象

流化床中生成的气泡在上升过程中不断合并和长大，直到床面破裂是正常现象。但是如果床层中大气泡很多，由于气泡不断搅动和破裂，床层波动大，操作不稳定，气固间接触不好，就会使气固反应效率降低，这种现象也是一种不正常现象，应力求避免。通常床层较高、气速较大时容易产生大气泡现象，床层压降波动厉害。

在床层内加设内部构件可以避免产生大气泡，促使平稳流化。

3、腾涌现象

大气泡状态下继续增大气速，气泡直径变大，直到与床径相等时，此时，床层分为几段，变成一段气泡和一段颗粒的相互间隔状态。此时颗粒层被气泡像活塞样向上推动，达到一定高度后气泡破裂，引起部分颗粒的分散下落。腾涌现象发生时，床层的均匀性被破坏，使气固间接触不良，严重影响产品的产量和质量，并且器壁磨损加剧，引起设备的振动在床层内加设内部构件可以避免产生大气泡，促使平稳流化。

出现腾涌现象时，由于颗粒层与器壁的摩擦造成压降大于正常值，而气泡破裂时又低于正常值，即压降在理论值上下大幅度波动。一般来说，床层越高、容器直径越小、颗粒越大、气速越高，越容易发生腾涌现象。在床层过高时，可以增设挡板以破坏气泡的长大，避免腾涌现象的发生。

观察压降变化判断流化质量

正常操作：压力降的波动幅度一般较小，波动幅度随流速的增加而有所增加。

腾涌现象：一定的流速下，压降突然增加，而后又突然下降。

沟流现象：压降比正常操作时低，说明气体形成短路

五、流化床反应器中流体的传质

1、流化床中的气泡及其行为

2、流化床反应器中的流体传质

第二节 流化床反应器的仿真操作

一、技术交底

1、工艺说明

聚合物从顶部进入流化床反应器，落在流化床的床层上。流化气体（反应单体）通过一个特殊设计的栅板进入反应器。由反应器底部出口管路上的控制阀来维持聚合物的料位。聚合物料位决定了停留时间，从而决定了聚合反应的程度，为了避免过度聚合的鳞片状产物堆积在反应器壁上，反应器内配置一转速较慢的刮刀，以使反应器壁保持干净。

栅板下部夹带的聚合物细末，用一台小型旋风分离器 S401 除去，并送到下游的袋式过滤器中。

2、反应机理

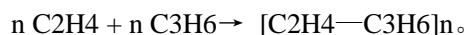
主要原料：乙烯、丙烯、具有剩余活性的干均聚物（聚丙

烯）、氢气（改善共聚物的本征粘度）。

主 产 物：高抗冲击共聚物（具有乙烯和丙烯单体的共聚物）。

副产物：无。

反应方程式：70℃，一定的压力 1.35Mpa



3、设备一览表

A401: R401 的刮刀

C401: R401 循环压缩机

E401: R401 气体冷却器

E409: 夹套水加热器

P401: 开车加热泵

R401: 共聚反应器

S401: R401 旋风分离器

二、冷态开车操作规程

1、正常操作规程

正常工况下的工艺参数：

- (1)FC402: 调节氢气进料量（与 AC402 串级）正常值：0.35kg/hr。
- (2)FC403: 单回路调节乙烯进料量正常值：567.0kg/hr。
- (3)FC404: 调节丙烯进料量（与 AC403 串级）正常值：400.0kg/hr。
- (4)PC402: 单回路调节系统压力正常值：1.4Mpa。
- (5)PC403: 主回路调节系统压力正常值：1.35Mpa。
- (6)LC401: 反应器料位（与 PC403 串级）正常值：60%。
- (7)TC401: 主回路调节循环气体温度正常值：70℃。
- (8)TC451: 分程调节取走反应热量（与 TC401 串级）正常值：50℃。
- (9)AC402: 主回路调节反应产物中 H₂/C₂ 之比 正常值：0.18。
- (10)AC403: 主回路调节反应产物中 C₂/C₃&C₂ 之比正常值：0.38

三、事故处理

1、泵 P401 停

原因：运行泵 P401 停。

现象：温度调节器 TC451 急剧上升，然后 TC401 随之升高。

处理：(1)调节丙烯进料阀 FV404，增加丙烯进料量。

(2)调节压力调节器 PC402，维持系统压力。

(3)调节乙烯进料阀 FV403, 维持 C2/C3 比。

2、压缩机 C-401 停

原因: 压缩机 C-401 停。

现象: 系统压力急剧上升。

处理: (1)关闭催化剂来料阀 TMP20。

(2)手动调节 PC402, 维持系统压力。

(3)手动调节 LC401, 维持反应器料位。

3、丙烯进料停

原因: 丙烯进料阀卡。

现象: 丙烯进料量为 0.0。

处理: (1)手动关小乙烯进料量, 维持 C2/C3 比。

(2)关催化剂来料阀 TMP20。

(3)手动关小 PV402, 维持压力。

(4)手动关小 LC401, 维持料位

第三节 流化床反应器现场操作

一、技术分析

1、装置技术指标及控制精度

操作压力 0.05~0.14MPa, 控制精度 $\pm 1\%$ FS。

反应温度 400~500C, 控制精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

催化剂装填量 200mL。

气体流量 1000~1600mL/min, 控制精 $\pm 1\%$ 。

进油量 150~2500 mL/h,控制精度 $\pm 2\%$ 。

进水量 100~200mL/h, 控制精度 $\pm 2\%$ 。

2、操作规程

二、操作规程

1、开车准备工作

(1)熟知装置工艺流程。

(2)熟悉装置泵、液位计、温控表、减压阀的功能、工作原理和使用方法

- (3) 按照要求制定操作方案。
- (4) 认真检查装置汽化器、预热器、反应器热电偶温度显示是否正常、是否和负载对应并插入负载内。
- (5)检查装置公用工程(水、电、汽)是否正常
- (6) 检查装置上电、各仪表状态是否正常。
- (7)检查油泵、水泵润滑油。
- (8)装填催化剂:打开反应器上部球阀 HV31, 将定量催化剂由此装入反应器内
- (9) 气密性检查,打开总空气阀 HV11,减压阀 PCV11,将压力定至 0.1≈0.2MPa 时控制浮子流量计 FI11 流量向装置内充气, 充气后关总原料气阀,进行气密性检查, 观察反应器压力, 如每小时压降<0.05 MPa 即为合格。
- (10)准备开车原料油。
- (11)检查防火设备及其它用具是否齐全。
- (12) 定期检定压力表、流量计、热电偶、安全阀等计量元件。

2、开车操作

- (1) 按要求对预热器、反应器降温, 待反应器内温度降至 150 后, 分馏器内的存油.
- (2) 关装置总原料气阀。
- (3) 将所有温控仪表回零后, 依次关仪表电源、微机电源及装置总电源。

3、停车操作

打开原料气阀 HV11, 减压 PCV11, 调节浮子流量计 F11 流量 1200mL/min 进行催化剂流化。

升温

进水

进油

再生当反应温度升到 550C 后, 可开始再生。

教案编号	05	
授课题目	第 5 章塔式反应器操作与控制	
授课学时	6 课时	
课 型	理论 (<input checked="" type="checkbox"/>) ; 实验 () ; 见习 () ; 实训 () ; 其它 ()	
教学目标	一、熟悉鼓泡塔反应器的基本结构及特点。 二、了解填料塔反应器的结构。 三、了解填料塔反应器的应用。	
教学重点	一、熟悉鼓泡塔反应器的基本结构及特点。 二、了解填料塔反应器的结构。	
教学难点	一、熟悉鼓泡塔反应器的基本结构及特点。 二、了解填料塔反应器的结构。	
教学方法	讲授 (<input checked="" type="checkbox"/>) ; 讨论 (<input checked="" type="checkbox"/>) ; 指导 (<input checked="" type="checkbox"/>) ; 示教 () ; 其它 ()	
电子教案	有 (<input checked="" type="checkbox"/>)	Microsoft PowerPoint (<input checked="" type="checkbox"/>) ; Author ware () ; 其它 ()
	无 ()	
教学资源	多媒体 (<input checked="" type="checkbox"/>) ; 模型 () ; 标本 () ; 实物 () ; 音像 () ; 其它 ()	
教学过程 时间安排	第一节 3 课时, 第二节 3 课时	
思 考 题	第 5 章达标测试	
作 业	课后题	
课程思政元素	学习和理解“碳排放”的重要性, 认识“双碳”战略下的机遇和挑战	
教学后记		

第5章 塔式反应器操作与控制

第一节 认识塔式反应器

一、认识塔式反应器

塔反应器除了广泛应用于精馏、吸收等物理过程外，也可以作为反应器用于气液相非均相反应。塔式反应器的外形呈圆筒状，高度一般为直径的数倍以至十几倍，内部常设有填料、筛板等构件，用来增大反应混合物相际间的传质面积。应用较广泛的作为反应器的塔设备有鼓泡塔、填料塔等。

1、气-液相反应器定义

气液相反应过程是指一个反应物在气相，另一个反应物在液相，气液相反应物需进入液相才能反应或两个反应物都在气相，但需进入液相与液相催化剂接触才能反应。

2、气液相反应器的基本类型和特点

二、鼓泡塔反应器

1、鼓泡塔反应器分类与应用

2、鼓泡塔反应器结构

1.塔底部的气体分布器

使气体均匀地分布在液层中。分布器鼓气管端的直径大小，要使鼓出来的气体泡小，使液相层中含气率增加，液层内搅动激烈，有利于气液相传质过程。

2.塔筒体部分

主要是气液鼓泡层，是反应物进行化学反应和物质传递的气液层。如果需要加热或冷却时，可在筒体外部加上夹套，或在气液层中加上蛇管均可。

3.气液分离器塔顶的扩大部分

内装液滴捕集装置，以分离从塔顶出来气体中夹带的液滴，达到净化气体和回收反应液的作用。

3、鼓泡塔反应器中的流动特性

安静鼓泡区

当表观气速低于 0.05m/s 时，常处于此种安静鼓泡区域，此时，气泡呈分散状态，气泡大小均匀，进行有秩序的鼓泡，目测液体搅动微弱。

湍流鼓泡区

在较高的表观气速下，安静鼓泡状态不再能维持。此时部分气泡凝聚成大气泡，塔内气液剧烈无定向搅动，呈现极大的液相返混。气体以大气泡和小气泡两种形态与液体相接触，大气泡上升速度较快，停留时间较短，小气泡上升速度较慢，停留时间较长，形成不均匀接触的状态，称为湍流鼓泡区。

栓塞气泡流动区

在小直径气泡塔中，较高表观气速下会出现栓塞气泡流动状态。这是由于大气泡直径被鼓泡塔的器壁所限制，实验观察到栓塞气泡流发生在小直径直至 0.15m 直径的鼓泡塔中。

4、鼓泡塔反应器的优缺点

优点：

气体以小的气泡形式均匀分布，连续不断地通过气液反应层，保证了气、液接触面，使气、液充分混合，反应良好。

结构简单，容易清理，操作稳定，投资和维修费用低。

鼓泡塔反应器具有极高的储液量和相际接触面积，传质和传热效率较高，适用于缓慢化学反应和高度放热的情况。

在塔的内、外都可以安装换热装置。

和填料塔相比较，鼓泡塔能处理悬浮液体。

缺点：

为了保证气体沿截面的均匀分布，鼓泡塔的直径不宜过大，一般在 2~3m 以内。

鼓泡塔反应器液相轴向返混很严重，在不太大的高径比情况下，可认为液相处于理想混合状态，因此较难在单-连续反应器中达到较高的液相转化率。

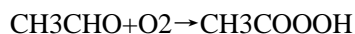
鼓泡塔反应器在鼓泡时所耗压降较大

第二节 鼓泡塔反应器仿真操作

一、生产方法及工艺路线

1、生产方法及反应机理

乙醛首先与空气或氧气氧化成过氧醋酸，而过氧醋酸很不稳定，在醋酸锰的催化下发生分解，同时使另一分子的乙醛氧化，生成二分子乙酸。氧化反应是放热反应。



总的化学反应方程式为：



2、 工艺流程简述

一、控制指标

序号	名称	仪表信号	单位	控制指标
1	T101压力	PIC109A/B	MPa	0.19±0.01
2	T102压力	PIC112A/B	Mpa	0.1±0.02
3	T101底温度	TI103A	°C	77±1
4	T101中温度	TI103B	°C	73±2
5	T101上部液相温度	TI103C	°C	68±3
6	T101气相温度	TI103E	°C	与上部液相温差大于13°C
7	E102出口温度	TIC104A/B	°C	60±2
8	T102底温度	TI106A	°C	83±2
9	T102温度	TI106B	°C	85~70
10	T102温度	TI106C	°C	85~70

序号	名称	仪表信号	单位	控制指标
11	T102温度	TI106D	°C	85~70
12	T102温度	TI106E	°C	85~70
13	T102温度	TI106F	°C	85~70
14	T102温度	TI106G	°C	85~70
15	T102气相温度	TI106H	°C	与上部液相温差大于15°C
16	T101液位	LIC101	%	35±15
17	T102液位	LIC102	%	35±15
18	T101加氮量	FIC101	M3/H	150±50
19	T102加氮量	FIC105	M3/H	75±25

二、 分析项目

序号	名称	位号	单位	控制指标
1	T101出料含醋酸	AIAS102	%	92~95
2	T101出料含醛	AIAS103	%	<4
3	T102出料含醋酸	AIAS104	%	>97
4	T102出料含醛	AIAS107	%	<0.3
5	T101尾气含氧	AIAS101A、B、C	%	<5
6	T102尾气含氧	AIAS105	%	<5
7	T103中含醋酸	AIAS106	%	<80

教案编号	06	
授课题目	第 6 章管式反应器操作与控制	
授课学时	6 课时	
课 型	理论 (<input checked="" type="checkbox"/>); 实验 (); 见习 (); 实训 (); 其它 ()	
教学目标	一、了解管式反应器的实物图。 二、掌握管式反应器的结构及特点。 三、了解管式反应器的传热方式。	
教学重点	一、掌握管式反应器的结构及特点。 二、了解管式反应器的传热方式。	
教学难点	一、掌握管式反应器的结构及特点。 二、了解管式反应器的传热方式。	
教学方法	讲授 (<input checked="" type="checkbox"/>); 讨论 (<input checked="" type="checkbox"/>); 指导 (<input checked="" type="checkbox"/>); 示教 (); 其它 ()	
电子教案	有 (<input checked="" type="checkbox"/>)	Microsoft PowerPoint (<input checked="" type="checkbox"/>); Author ware (); 其它 ()
	无 ()	
教学资源	多媒体 (<input checked="" type="checkbox"/>); 模型 (); 标本 (); 实物 (); 音像 (); 其它 ()	
教学过程 时间安排	第一节 2 课时, 第二节 2 课时, 第三节 2 课时	
思 考 题	第 6 章达标测试	
作 业	课后题	
课程思政元素	学习本行业的工匠和模范, 培养正确的择业观、就业观, 规划自己的 职业发展。	
教学后记		

第 6 章 管式反应器操作与控制

第一节 认识管式反应器

概述

管式反应器在化工生产中的应用越来越多，多数用于气相连续操作的场合，例如低级烃的卤化反应和氧化反应、石油烃类的热裂解反应等。而且向大型化和连续化发展。

定义：管式反应器是一种呈管状、长径比很大的连续操作反应器。

一、管式反应器的结构

一、直管

根据反应段的不同，内管内径通常有 $\Phi 27\text{mm}$ 和 $\Phi 34\text{mm}$ 两种

夹套管用焊接形式与内管固定

夹套管上对称地安装一对不锈钢 Ω 形补偿器，以消除开停车时内外管线膨胀系数不同而附加在焊缝上的拉应力

反应器预热段夹套管内通蒸汽加热进行反应，反应段和冷却段通热水移去反应热或冷却

二、弯管

弯头半径 $R \geq 5D$ ($1\% \pm 4\%$)

弯管在机架上的安装方法允许其有足够的伸缩量，故不再另加补偿器

内管总长（包括弯头弧长）为 8m

三、密封环

套管式反应器的密封环为透镜环，有两种形状：

圆柱形透镜环：用反应器内管同一材质制成

带接管的 T 形透镜环：安装测温、测压元件用的

四、管件

反应器连接必须按规定的紧固力矩进行，对法兰、螺柱和螺母都有一定要求。

五、机架

反应器机架用桥梁钢焊接成整体

地脚螺栓安放在基础栓的柱头上

安装管子支架部位装有托架

管子用抱箍与托架固定

二、管式反应器分类及传热方式

一、管式反应器与釜式反应器的差异

内容	釜式反应器	管式反应器
反应器类型	全混流反应器	平推流反应器
停留时间	长短不一	相对均匀
移走反应热	容易	难

二、管式反应器的特点

停留时间相等：反应物的分子在反应器内停留时间相等，反应物浓度和化学反应速率都不随时间而变化，只随管长变化

比表面大：容积小、比表面大、单位容积的传热面积大，特别适用于热效应较大的反应

生产能力高：反应速率快、流速快，适用于大型化和连续化的化工生产

返混较小：和釜式反应器相比较，在流速较低的情况下，管内流体流型接近于理想流体

适用范围广：既适用于液相反应，又适用于气相反应，用于加压反应尤为合适

可实现分段温度控制

主要缺点：反应速率很低时所需管道过长，工业上不易实现

三、管式反应器的分类

水平管式反应器

立管式反应器

盘管式反应器

三、管式炉及管式裂解炉

管式炉是工业炉的一种结构形式，是炼油、化工、石油化工装置以及油田建设和长输管道工程中的重要工艺生产设备。

工业炉定义：通常是指除蒸汽锅炉之外的用于各工业生产装置中的各种炉窑。例如：

冶金工业：高炉、热风炉、转炉、平炉等

化工工业：转化炉、裂解炉、煤气发生炉、焚烧炉

石油工业：加热炉、重整炉

玻璃制造工业：玻璃熔窑

管式裂解炉的主要组成部分

1. 炉体

通常分为辐射室和对流室两部分

每部分都由炉墙、炉顶和炉底构成

辐射室由耐火砖（里层）、隔热砖（外层）砌成

辐射室是以辐射方式传热的部分，吸收燃料燃烧的辐射热为主对炉管进行加热

2. 炉管

对流管（预热管）：

安置在对流段的炉管

置于对流室内的炉管组件，通常由若干管束组成

部分管束的管外带有翅片或钉头，以提高换热效率

管内物料被管外的高温烟道气以对流方式进行加热并汽化，达到裂解反应温度后进入辐射管

辐射管（反应管）：

安置在辐射段的炉管

置于辐射室中的炉管组件

通过燃料燃烧的高温火焰、产生的烟道气、炉墙辐射加热将热量经辐射管管壁传给物料裂解反应在该管内进行

3. 燃烧器

用以将气体或液体燃料喷入炉内进行燃烧的装置，亦称烧嘴

按安装位置：侧壁烧嘴、顶部烧嘴、底部烧嘴

按燃烧燃料：燃油烧嘴、燃气烧嘴、联合烧嘴

第二节 管式反应器实训操作

一、工艺技术分析

一、反应原理

一次反应：由原料烃经热裂解生成乙烯和丙烯的主反应，在裂解反应中，要取得较高的目的产物乙烯，必须在确定工艺条件下保证主反应的进行。

二次反应：由一次反应生成的乙烯、丙烯进一步反应，最后生成焦和碳。二次反应生成的焦和碳不仅会堵塞设备及管道，而且还浪费了原料，降低了烯烃的收率，影响操作的稳定性，应尽力避免。

二、结焦的影响

1. 急冷换热器结焦的影响

内径变小，阻力增大，使进料压力增加

有焦层的地方局部热阻大，导致反应管外壁温度升高
增加燃料消耗，影响反应管的寿命

破坏裂解的最佳工况

2. 裂解炉和急冷锅炉的结焦判断

① 裂解炉管管壁温度超过设计规定值

② 裂解炉辐射段入口压力增加值超过设计值

③ 废热锅炉出口温度超过设计允许值，或废热锅炉进出口压差超过设计允许值

3. 清焦的方法

停炉清焦

化学除焦法

水利除焦法

不停炉清焦法

三、裂解反应实验装置与控制

1. 技术指标

反应炉为四段加热，各段功率为 1.0kw

最高使用温度 800℃，反应管由耐热无缝钢管制作，内径 16mm，长 750mm

热电偶套管 Φ 3mm，热电偶 1.0mm

混合预热器内径 12mm，长 280mm，加热功率 8kw

气液分离器直径 42mm，高 180mm

湿式流量计 2L

液体加料泵为进口电磁泵，额定流量为 0.76/h

含有计算机数据采集与温度控制软件

2. 烃类热裂解工艺流程图（图 6-13）

主要设备：

氮气钢瓶

原料罐

原料泵

预热器

裂解炉

冷凝器

气-液分离器

液相组分储罐

色谱仪

湿式流量计

知识点二：操作规程

一、冷态开车

1. 开车前的准备工作

检查设备内无杂物，设备、管线、阀门、仪表、电器完好

水系统完好，消防器材到位

关闭所有阀门

2. 装置的试

将三通阀放在进气位置，进入空气和氮气

卡死出口，冲压至 0.1MPa，5min 不下降合格

否则用毛刷涂肥皂水在各接点涂拭，找出漏点重新处理后再次试漏

打开卡死的管路，可进行实验

3. 升温和温度控制观察加热炉控制温度和内部温度的关系

反应前后微有差异，主要表现在预热器的温度变化

预热器是靠管内测的温度去控制加热，当加料时该温度有下降的趋势，但能自动调节到所给定的温度范围值内

二、正常停车

进料、在原条件下，只进水，降温，进行烧焦处理

将电流给定旋钮回至零（或关闭控温温度表），一段时间后停止进水

当反应器温度降至 300℃ 以下后，冷却器停水

三、注意事项

一定要熟悉仪器的使用方法，为防止乱动仪表参数，参数调好后可将"Loc"数改为新值，即锁住各参数

升温操作一定要有耐心，不能忽高忽低乱改乱动控温设置

流量的调节要随时观察及时调节，否则温度容易发生波动，造成反应过程中温度的稳定性下降

不使用时，应将湿式流量计的水放干净。应将装置放在干燥通风的地方。如果再次使用，一定在低电流（或温度）下通电加热一段时间以除去加热炉保温材料吸附的水分

每次实验后一定要将分离器的液体放净

四、故障处理

故障现象	可能原因	处理方法
开启电源开关指示灯不亮，没有交流接触器吸合声	保险坏或电源没有接好	检查保险和电源连接
开启仪表各开关时指示灯不亮，没有继电器吸合声	分保险坏或接线有脱落	检查分保险和接线
开启电源开关有强烈的交流震动声	接触器接触不良	反复按动开关即可消除
仪表正常但电流表没有指示	保险断或固态变压继电器有问题	检查保险和固态继电器

五、产品分析检测、数据处理

裂解气体的分析（气相色谱法

色谱柱：在氧化铝单体载体上 1.5%阿皮

可分析：C1~C4

条件：室温下用热导检测器

柱长：4m

柱径：Φ3mm

第三节 管式反应器故障处理与维护

一、常见故障及处理

故障现象	故障原因	处理方法
爆破片爆炸	① 片存在缺陷 ② 爆破片疲劳破坏 ③ 油放出阀连续失灵，造成压力过高 ④ 运行中超温超压，发生分解反应	① 注意安装前爆破片的检验 ② 按规定定期更换 ③ 检查油压放出阀连锁系统 ④ 分解反应爆破后，应做下列各项检查：接头箱超声波探伤；相邻超高压配管超声波探伤；经检查不合格接头箱及高压配管应更新
反应管胀缩卡死	① 安装不当使弹簧压缩量大，调整垫板厚度不当 ② 机架支托滑动面相对运动受阻 ③ 支撑点固定螺栓与机架上长孔位置不当	① 新安装：控制蝶形弹簧压缩量；选用适当厚度的调整垫板 ② 检查清理滑动面 ③ 调整反应管位置或修正机架孔
套管泄露	① 套管进出口因为管径变化引起汽蚀，穿孔套管定心柱处冲刷磨损穿孔 ② 套管进出接管不合理 ③ 套管材料较差 ④ 接口及焊接存在缺陷 ⑤ 接管法兰紧固不均匀	① 局部修理 ② 改造套管进出接管材料 ③ 选择合适的套管材料 ④ 焊口规范修补 ⑤ 重新安装连接接管，更换垫片

二、管式反应器日常维护要点

维护要点

1. 振动控制

反应器的振动通常有两个来源：

超高压压缩机的往复运动造成的压力脉动的传递

反应器末端压力调节阀频繁运作而引起的压力脉动

振幅较大时要检查反应器入口、出口配管接头箱固定螺栓及本体抱箍是否有松动，若有松动应及时紧固但接头箱紧固 50%，以保证管子热膨胀时的伸缩自由

反应器振幅控制在 0.1mm 以下

2. 钢结构检查

要经常检查钢结构地脚螺栓是否有松动

检查焊缝部分是否有裂纹等

3. 伸缩检查

开停车时要检查管子伸缩是否受到约束，位移是否正常

除直管支架处蝶形弹簧垫圈不应卡死外，弯管支座的固定螺栓也不应该压紧，以防止反应器伸缩时的正常位移受到阻碍