



炼油设备工程师手册

中国石油和石化工程研究会 编著



天大北洋

中国石化出版社

炼油设备工程师手册

中国石油和石化工程研究会 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

本《手册》从结构特点、作用原理、使用维护、常见故障处理等方面对炼油生产中常用的设备作了论述。包括：反应器、塔器、管式加热炉、热交换器、空气冷却器、泵、压缩机、电动机、汽轮机、脱蜡转鼓真空过滤机、套管结晶器、专用阀门、催化裂化动力回收系统，书后还附有炼油设备工程师常用数据；本《手册》旨在进一步提高现场设备工程师的水平和技能。

本《手册》结合国内外数十年的开发、操作、维护经验编撰而成，资料新，权威性和实用性都比较强，是石化设备工程师的案头必备工具书，对于工艺工程师也有很好的参考作用。

图书在版编目(CIP)数据

炼油设备工程师手册/中国石油和石化工程研究会编著.

—北京：中国石化出版社，2003

ISBN 7-80164-214-7

I. 炼… II. 中… III. 石油炼制—机械设备—技术手册
IV. TE96-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 085030 号

中国石化出版社出版发行

地址：北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编：100011 电话：(010)84271850

读者服务部电话：(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com.cn

北京精美实华图文制作中心排版

北京大地印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

x

787×1092 毫米 16 开本 46.75 印张 28 彩页 1189 千字 印 1—3000

2003 年 11 月第 1 版 2003 年 11 月第 1 次印刷

定价：120.00 元

京工商广临字 200240041

前 言

近年来，我国的石化工业有了飞速的发展，无论在工艺、设备、电器、仪表、材料和管理等方面都取得了显著的进步，获得了甚多的新成果，达到了新的水平。为了让广大从事炼油工作的读者能了解到新近的技术水平和发展，中国石油和石化工程研究会和中国石化出版社决定编写出版《炼油设备工程师手册》。

此手册的作者和审稿人均是长期从事该专业的高级工程师和专家，在该领域中积累了丰富的专业理论知识和实践经验。本册内容对从事炼油设备工作的技术人员非常具有实用价值。

本手册共十三章，编写人员分别为：第一章反应器 黎国磊 徐碧云 黄荣臻；第二章塔器 张荣庆；第三章管式炉 李文辉；第四章热交换器 刘巍；第五章空气冷却器 刘巍；第六章工业泵 杜道基；第七章压缩机 陈允中；第八章电动机 陈允中；第九章汽轮机 陈允中；第十章脱蜡转鼓真空过滤机 高海水 孙延长；第十一章套管结晶器 阎善道；第十二章专用阀门 刘惠麟；第十三章催化裂化能量回收系统 张荣克 于克敏 杨石理；附录 邵祖光。

此手册仅用了一年多时间就完成了全部章节的编写、审校和出版，这与各位作者、编委、出版人员的共同努力是分不开的，在此特向所有为《炼油设备工程师》手册付出辛勤劳动的同志们表示最诚挚的感谢。

本书编委会

邵祖光 齐树柏 黎国磊 刘积文

孙梦兰 王少春 王子康 王力建

本书编写人员

黎国磊 徐碧云 黄荣臻 张荣庆

李文辉 刘 巍 杜道基 陈允中

高海水 孙延长 阎善道 刘惠麟

张荣克 于克敏 杨石理 邵祖光

本书编辑部成员

王力健 孙梦兰 白 桦

目 录

第一章 反应器	(1)
1.1 加氢反应器	(1)
1.1.1 加氢反应器的分类	(1)
1.1.2 加氢反应器技术进步与演变	(3)
1.1.3 加氢反应器结构特征	(6)
1.1.4 加氢反应器内件设置	(9)
1.1.5 加氢反应器的主要损伤形式、原因与材料选用	(13)
1.1.6 加氢反应器制造过程的监控要点	(28)
1.1.7 加氢反应器使用中的安全管理与保护	(29)
1.1.8 热壁加氢反应器的在役检验	(34)
参考文献	(37)
1.2 重整反应器	(38)
1.2.1 重整反应器的分类	(38)
1.2.2 结构形式	(38)
1.2.3 材料选择	(42)
1.2.4 设计计算	(43)
1.2.5 故障分析	(44)
1.3 催化裂化装置反应——再生系统	(47)
1.3.1 反应(沉降)器与再生器的相对位置形式	(47)
1.3.2 反应(沉降)器的形式及特点	(49)
1.3.3 再生器的结构形式及特征	(55)
1.3.4 沉降器与再生器同轴的结构特点	(61)
1.3.5 带隔热耐磨衬里设备壁厚的决定	(61)
1.3.6 烟气的走向形式	(62)
1.3.7 材料选用原则	(62)
1.3.8 反应——再生系统波纹管膨胀节	(63)
1.3.9 衬里	(65)
第二章 塔器	(66)
2.1 塔器的分类及发展概况	(66)
2.2 常用塔板形式	(71)
2.3 塔板连接件	(79)
2.4 塔板的制造与安装	(84)
2.5 板式塔操作常见故障分析	(86)

2.6	塔器常用填料	(87)
2.7	填料塔内构件	(92)
2.8	填料的制造与安装	(98)
2.9	填料塔操作故障分析	(99)
2.10	金属丝网除沫器	(99)
2.11	塔内件常用材料	(101)
	参考文献	(103)
第三章	管式炉	(106)
3.1	概述	(106)
3.2	炉型及结构	(110)
3.3	材料选择	(114)
3.4	设计计算	(133)
3.5	操作、故障分析及检维修	(160)
	参考文献	(168)
第四章	管壳式换热器	(169)
4.1	基本类型与结构特点	(169)
4.2	几种强化传热设备及管件	(180)
4.3	无相变过程传热与阻力计算	(187)
第五章	空气冷却器	(243)
5.1	基本类型与总体设计	(243)
5.2	传热基本方程式	(254)
5.3	传热系数的计算	(262)
5.4	管程压力降与空气阻力计算	(267)
5.5	风机功率	(270)
5.6	例题	(274)
第六章	工业泵	(294)
6.1	分类	(294)
6.2	结构形式	(300)
6.3	材料选择	(334)
6.4	设计计算	(351)
6.5	故障处理	(385)
	参考文献	(402)
第七章	压缩机	(403)
7.1	炼厂常用压缩机分类及特点	(403)

7.2	离心式压缩机	(407)
7.3	轴流式压缩机	(421)
7.4	往复式活塞压缩机	(429)
7.5	螺杆式压缩机	(443)
	参考文献	(449)
第八章	电动机	(450)
8.1	电动机的分类及型号意义	(450)
8.2	电动机的选用	(452)
8.3	有关电动机的标准、规范及防爆标志	(454)
8.4	常用电动机规格	(457)
8.5	电动机变频调速及调速电动机	(499)
	参考文献	(506)
第九章	工业汽轮机	(507)
9.1	汽轮机的分类及型号表示方法	(507)
9.2	汽轮机热效率	(509)
9.3	工业汽轮机	(510)
9.4	常用工业汽轮机的使用范围及原则流程	(512)
9.5	炼油厂工业汽轮机的选用原则	(514)
9.6	单级工业汽轮机	(515)
9.7	多级工业汽轮机	(516)
9.8	杭州汽轮机股份有限公司的概况及在炼油厂的应用情况	(525)
	参考文献	(528)
第十章	脱蜡转鼓真空过滤机	(529)
10.1	规格和主要性能参数	(529)
10.2	技术经济指标	(529)
10.3	结构种类及特点	(530)
10.4	主要零部件的作用、材料及技术要求	(532)
10.5	运输、保管及安装要求	(533)
10.6	使用中的注意事项	(534)
10.7	常见故障及处理方法	(534)
第十一章	套管结晶器	(535)
11.1	概述	(535)
11.2	分类	(535)
11.3	技术参数	(535)
11.4	流程简介	(536)

11.5 结构	(537)
11.6 材料	(546)
11.7 安装	(548)
参考文献	(548)
第十二章 专用阀门	(549)
12.1 专用阀门分类	(549)
12.2 结构形式	(550)
12.3 材料选择	(584)
12.4 设计计算	(586)
12.5 故障处理	(589)
第十三章 催化裂化动力回收系统	(592)
13.1 FCC 动力回收系统工艺流程	(592)
13.2 烟气轮机	(594)
13.3 主风机	(622)
13.4 第三级旋风分离器	(636)
参考文献	(642)
附录 常用数据和资料	(643)
附 1 气象和地震	(643)
附 2 我国和进口的各种原油特性	(647)
附 3 炼油厂常见介质的特性	(653)
附 4 常用材料的物理性质	(657)
附 5 钢板、型钢、钢管质量和规格	(662)
附 6 常用几何体断面面积、重心、惯性力矩和断面系数	(677)
附 7 常用几何体体积、表面积和单位圆的弧长等	(679)
附 8 常用换算单位	(682)
附 9 梁受静载荷的反力、弯矩、挠度和转角计算	(695)
附 10 等断面立杆受压计算	(704)
附 11 常用国内外钢材型号对照表(板材)	(707)
附 12 预测可焊性间接方法——碳当量计算	(714)
附 13 可燃气体蒸气火灾、爆炸危险性参数	(715)
附 14 加工高硫原油选材导则	(715)
参考文献	(735)

第一章 反应器

1.1 加氢反应器

1.1.1 加氢反应器的分类

1.1.1.1 按工艺过程的特点分类

依据催化加氢过程进料原料油性质的不同，相应地所采用的工艺流程和催化剂是不相同的，其反应器形式也有各异，一般有表 1-1-1 所列的三种类型。

表 1-1-1 加氢反应器类型

序号	反应器类型	示意图例	反应器特点	适用场合
1	固定床反应器	见图 1-1-1	此反应器床层内的固体催化剂是处于静止状态。它的最大优点是催化剂不易磨损，而且当催化剂不失去活性情况下，可以长周期使用	一般主要用于加工固体杂质、油溶性金属有机化合物含量较少的馏分油
2	移动床反应器	见图 1-1-2	此反应器在生产过程中催化剂可以连续或间断地移动加入或卸出	主要用于加工含有较高金属有机化合物和沥青质的渣油原料场合，以避免容易在催化加工中迅速引起床层堵塞和/或催化剂失活的问题
3	流化床反应器	见图 1-1-3 (膨胀床反应器)	它是一种以一定流速的流体(原料油和氢气)从反应器下部进入而通过装填微粒(或细粉)催化剂的床层时，使催化剂粒间空隙率随流速渐增而逐渐拉开，催化剂床层体积开始膨胀，直至催化剂床层被流体托起的反应设备。流化床反应器大致还可划分为悬浮床反应器(或称浆态反应器)和膨胀床反应器(或称沸腾床反应器)	主要用于加工处理含有较多金属有机化合物、沥青质及固体渣质的渣油场合

当今，在各种各样的加氢装置中，仍以固定床反应器使用最多，而且为了使进入反应器的液体停留时间更短，以避免碳析出和当采用较大的液体流速时，不致于引起催化剂流化或磨损；另外还为了使反应器的压降更小，几乎都采用着气液并流下流式的流程。本节所介绍的内件皆为下流式流程的结构。

1.1.1.2 按反应器使用状态分类

从使用状态下反应器内部的高温介质是否直接与器壁接触，可以分为冷壁结构和热壁结构两种。此两种结构形式反应器的特点与应用情况见表 1-1-2。

表 1-1-2 冷热壁结构反应器特征与应用情况

	冷壁结构	热壁结构
隔热形式	器壁内表面设非金属隔热衬里 ^①	器壁外保温
设计温度(或壁温)选定	国外: 设计壁温一般按 150~200℃ 国内: 设计壁温一般按 300℃考虑	设计温度按最高操作温度加 10~20℃
器壁局部过热现象	易	不易
反应器有效容积利用率 ^②	小, 一般仅有 50%~70%	大, 一般可达 80%~90%
材料选用	因壁温低, 可选用耐高温氢腐蚀档次较低的材料。由于有隔热衬里层, 一般实际壁温在 200℃以下, 即使反应物料中含有 H ₂ S, 对器壁的腐蚀也不大	需选用能抗高温氢腐蚀的材料, 若有 H ₂ S 存在时, 还要考虑设置不锈钢覆盖层(采用堆焊层或复合板的方法)以抵抗 H ₂ S 的腐蚀
施工与维护	施工周期长, 生产维护不太方便	施工周期短, 生产维护方便
设备制造费用	相对较低	相对较高
应用情况	国内: 目前仍有 20 世纪 70 年代前建造的反应器在应用 国外: 现在极少使用	国内: 从 20 世纪 80 年代起陆续开始使用。国内自行开发的首台锻焊结构热壁加氢反应器投用至今, 已安全可靠运行 13 年 国外: 早已占统治地位

注: ① 在冷壁结构中还有一种称为“瓶衬”式的冷壁结构(见图 1-1-4)。它是在反应器内壁与内衬筒之间的环形空间通入经过换热后的温度不高的氢气, 以隔绝含高温氢气的介质直接与反应器器壁接触, 从而达到避免使器壁遭受高温氢腐蚀的目的。

② 反应器有效容积利用率系指反应器中催化剂装入体积与反应器容积之比。

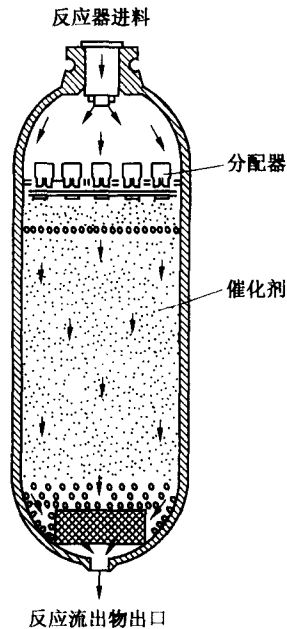
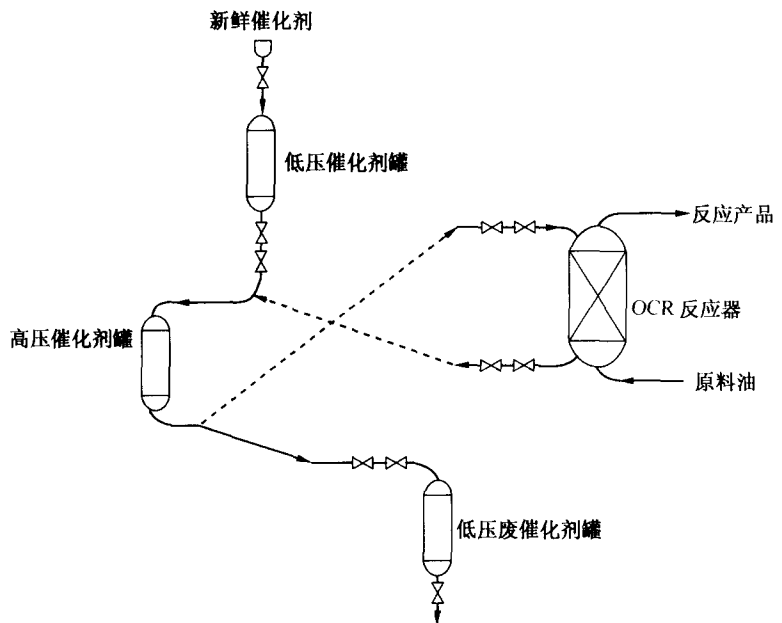


图 1-1-1 固定床反应器示意图

图 1-1-2 移动床反应器示意图
(OCR 工艺催化剂移动输送系统)

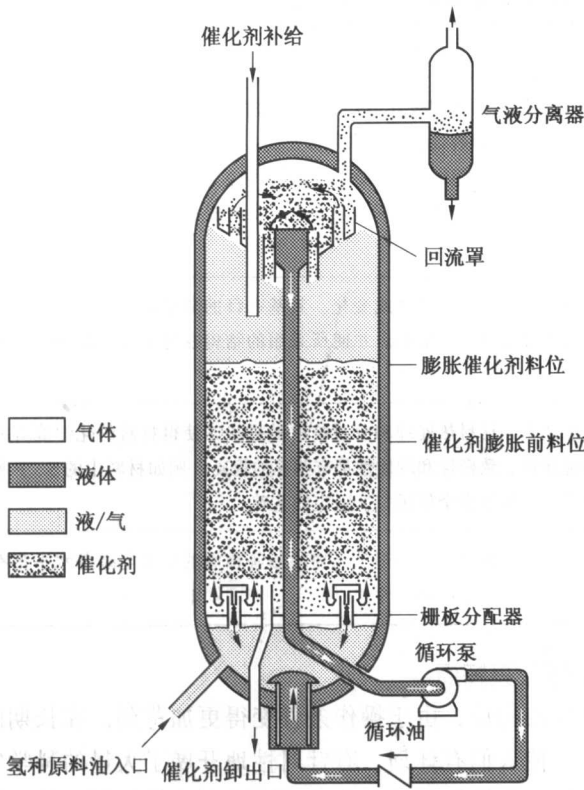


图 1-1-3 膨胀床反应器示意图

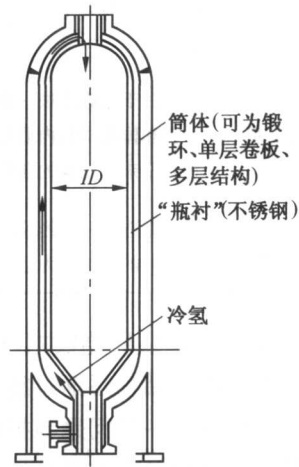


图 1-1-4 “瓶衬”结构冷壁反应器

1.1.1.3 按反应器本体结构特征分类

按反应器本体结构的特征可分为两大类：一是单层结构，二是多层结构。单层结构中又有钢板卷焊结构和锻焊结构两种；多层结构用于加氢反应器上的一般有绕带式、热套式等多种形式。

1.1.2 加氢反应器技术进步与演变

1.1.2.1 加氢反应器技术进步的主要表现

加氢反应器技术进步的突出表现有两个方面：

(1) 加氢反应器使用安全性不断提高

几十年来加氢反应器技术进步的核心问题是围绕着提高其使用的安全性。随着科学技术、制造业、冶金业及电子计算机应用等技术的进步，加氢反应器技术有了很大的提高。具体表现见表 1-1-3。

(2) 反应器向大型化发展

为获取较佳的经济效益，装置日趋大型化。从而带来了设备的大型化。如日本在 20 世纪 60 年代初期制造的反应器单台质量仅 300 余吨，而 1993 年已制造出当今世界最重的 1450 t 大型加氢反应器。目前国外有的制造厂已具备生产 2000 t 巨型加氢反应器的能力。图 1-1-5、图 1-1-6 分别为我国和世界上制造加氢反应器最多的日本制钢所制造的反应器大型化进展情况。

表 1-1-3 加氢反应器安全性提高的主要表现

安全技术进步的表现	主要内容
设计方法	由开始基本上是按“规则设计”，即“常规设计”的方法逐步发展到采用以“应力分析为基础的设计”，即“分析设计”的方法。这是容器设计观点和方法的一个飞跃。它要求对容器有关部位的应力进行详细计算及按应力的性质进行分类，并对各类应力及其组合进行评价。同时对材料、制造、检验也提出了比“常规设计”更高的要求，从而提高了设计的准确性与使用可靠性
结构形式	无论是本体结构还是局部结构都有一些改进或变化。其基本目的是尽可能使各个部位结构的应力分布得到改善，使应力集中减至最小。并使所采用的结构在设计阶段就能认证是安全的
材料性能与质量	由于冶炼方法、炉外精炼技术、材料热处理和分析技术的进步，使得材料的化学成分控制和体现材料内质特性的纯净性、致密性和均质性都有明显的提高，例如材料中的 S、P 和其他杂质元素的含量都很低，为设备安全使用打下坚实的基础
制造技术与装备	制造技巧与经验以及包括焊接、堆焊、热处理、无损检测等领域的技术与装备水平都有很大的进步，为生产高质量产品提供了有利条件

1.1.2.2 热壁加氢反应器技术进展历程及其特点

加氢反应器由冷壁结构逐渐过渡到热壁结构后，由于操作条件变得更加苛刻，在长期的使用过程中曾经出现过一些问题与损伤，促使人们有计划、有针对性地开展了大量的科学实验与研究，并利用其成果和有关领域中不断进步的科学技术去逐步解决了这些问题，从而推动加氢反应器技术不断向前发展。至今热壁加氢反应器技术已经经历了 4 个阶段的演变与发展，详见表 1-1-4。

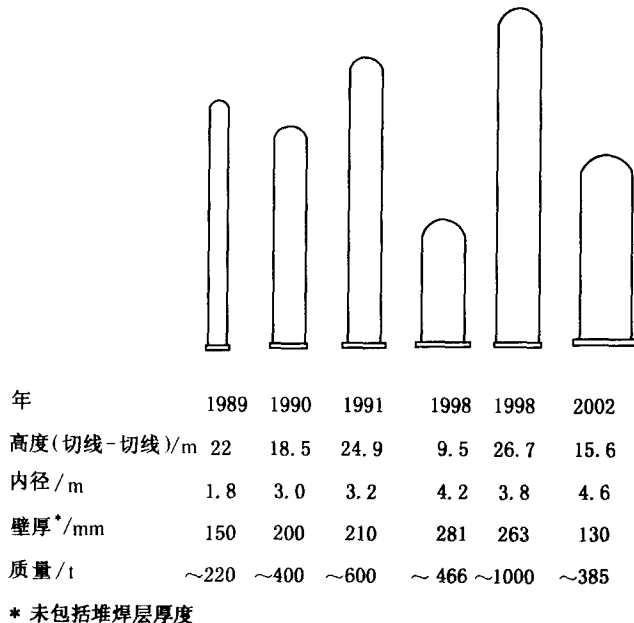


图 1-1-5 国产化加氢反应器大型化的进展

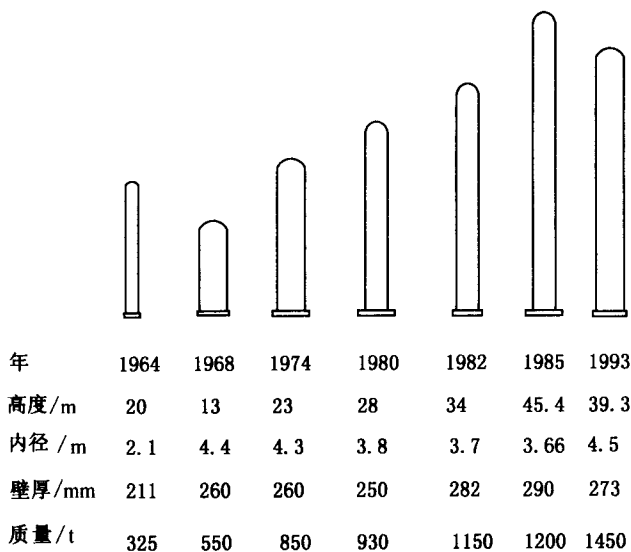


图 1-1-6 国外加氢反应器大型化的进展

表 1-1-4 热壁加氢反应器技术的演变

阶段	起止时间	阶段特征	技术进步内涵与存在问题
第一阶段	1972 年以前	开发初期	设计：开始是按“常规设计”方法设计，从 1969 年起开始采用“分析设计”方法设计。设计中材料只提出满足标准规定的化学成分、力学性能及抗高温氢腐蚀和硫化氢腐蚀的要求；材料：冶炼开始是由平炉，后逐渐发展到电炉冶炼，材料的均质性能和纯净度还较差；堆焊：采用常规的 SAW 工艺(末期开发出浅熔深堆焊工艺)，使用中曾出现 Cr-Mo 钢的回火脆化现象和不锈钢的氢脆损伤问题
第二阶段	1973 ~ 1980	改进期	设计：“分析设计”应用较普遍。设计对材料已提出控制回火脆化的要求(如控制 J 系数、X 系数和回火脆化的韧性指标等)。设计中结构设计已有所改进，一是尽量减小应力集中，二是方便在役检测；材料：冶炼由电炉(+保温炉)逐渐发展到以电炉+炉外精炼的冶炼工艺(如真空碳脱氧工艺或其他新的冶炼工艺等)，可以冶炼出低 Si 或低 S、P，甚至超低 S、P，且微量杂质元素含量很低的钢；焊接：由常规的焊接方法进展到小坡口焊接直至窄间隙焊接方法，使焊接质量和焊缝性能大有提高。堆焊：由初期未大力推广的浅熔深堆焊法，因后来发现采用此堆焊工艺的堆焊层对剥离的抵抗能力较差，因而改进为双层或单层(带极)堆焊方法。而且在某些堆焊 TP309L + TP347 双层堆焊层的有关部位，还采取堆焊 TP309L 后即进行 PWHT，然后再堆焊 TP347 时就不再进行 PWHT 的工艺，以提高堆焊金属的韧性；制造：可制造出大型反应器用整体封头，开发了锻造筒体的缩口技术等等 这一阶段的反应器，回火脆化问题已基本得到控制。但在此阶段末期发现了在役反应器堆焊层的氢致剥离现象

续表

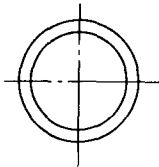
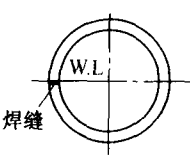
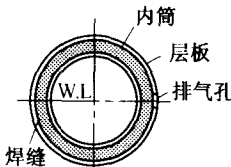
阶段	起止时间	阶段特征	技术进步内涵与存在问题
第三阶段	1981~1987	成熟期	综合应用针对使用中出现的各种损伤所开展的多项研究成果,对反应器的某些局部结构又做了进一步改进(如保温结构);为防止回火脆性, J 系数和 X 系数的控制不断趋严,材料的纯净度越来越好;焊接方面,由于焊接设备、焊接材料和焊接结构的改进,焊缝质量进一步提高。另外堆焊技术由于采用了高焊速、大电流的堆焊工艺,提高了堆焊层抗剥离的能力。其结果各种损伤发生极少。但由于出现更趋高温高压化的加氢新工艺,现用反应器材料却难以适应。迫切要求开发强度更高、对环境适应性更好的材料
第四阶段	1998~现在	更新期	以开发成功新的 Cr-Mo 钢,并很快得到推广应用为标志,将加氢反应器技术推进到一个新的阶段

1.1.3 加氢反应器结构特征

1.1.3.1 加氢反应器本体结构

加氢反应器的本体结构,根据不同的年代的技术水平与需求,曾使用了不同形式的本体结构。表 1-1-5 是曾使用过的板焊、锻焊和多层 3 种不同本体结构特征的比较。

表 1-1-5 加氢反应器不同本体结构的特征

		锻焊结构	板焊结构	多层结构
结构断面				
适用范围	条件	可用于高温高压场合。其最高使用温度取决于所用材料的性能(如抗高温氢腐蚀性能等)。一般宜用于厚度大于 130~150mm 以上的场合	可用于高温高压场合。其最高使用温度取决于所用材料的性能(如抗高温氢腐蚀性能等)	可用于高压,但温度不宜太高。因为它存在结构上不连续性的缺点,会造成较大的热应力和因缺口效应而使疲劳强度下降等。所以一般认为对于温度大于 350℃ 和温度、压力有急剧波动的场合,选用要谨慎。国外、国内近年又开发了一种多层夹紧式结构。国内对此结构的对层间间隙分析和层间摩擦力利用等问题还做了研究与考虑
	最大厚度/mm	约 480	约 300	总厚约 600。一般内筒厚 16~20,层板厚为 4~8,有的可达 14
材料选用		(1) 须选择能满足标准规定的化学成分、力学性能和抗环境脆裂(如高温氢腐蚀)性能要求的材料 (2) 当有 H ₂ S 腐蚀时,要在内表面堆焊不锈钢堆焊层	(1) 须选择能满足标准规定的化学成分、力学性能和抗环境脆裂(如高温氢腐蚀)性能的材料 (2) 当有 H ₂ S 腐蚀时,要在内表面设置不锈钢覆盖层(采用复合钢板或堆焊不锈钢)	(1) 内筒选用能抗高温氢腐蚀和 H ₂ S 腐蚀的材料(如不锈钢) (2) 层板可采用高强钢,以利设备轻量化

续表

	锻焊结构	板焊结构	多层结构
材料内质特性(致密性、纯净性、均质性)	筒节锻坯由于需经墩粗、拔长、墩粗、冲孔的锻造加工过程,可冲掉中心部位的偏析与夹杂,使筒节材料的内质特性得到改善,从而提高反应器抗氢损伤的能力	钢板内质特性不如锻件筒节,且厚度越厚时更难保证	由于钢板较薄,其内在质量较容易保证
设计时的应力分析	可采用有限元法等进行	可采用有限元法等进行	对层间和焊缝部位的应力状况,需要根据实验来分析
焊缝	仅有环焊缝,对提高反应器耐周向应力的可靠性有利。而且焊缝少	有纵、环焊缝,焊缝多。焊接工作量大	有纵、环焊缝,焊缝多。但系由薄(或较薄)板焊接而成的焊缝,其质量较易保证
射线或超声检测	易	易	难
声发射检测	易	较易	较易
焊后热处理	必需	必需	一般不进行
破坏行为	超过临界裂纹后迅速扩展	超过临界裂纹后迅速扩展	裂纹缓慢地、阶段地扩展

应用中至于采取何种本体结构形式,主要取决于使用条件、反应器规格、制造厂的加工装备与能力以及经济上的合理性和用户的需要。

1.1.3.2 加氢反应器局部详细结构的改进

过去反应器曾有某些脆性损伤常发生在应力集中的高应力区。诸如承受重载荷的内部支持圈拐角处和法兰密封槽底拐角处以及外部附件连接焊缝部位等。为了避免或尽可能减少各种损伤的发生,曾对相关局部结构做了改进。

(1) 催化剂支承结构

催化剂支承结构一般由过去的图 1-1-7(a)改进成图 1-1-7(b)的结构。

(2) 法兰密封结构

一般,反应器上的接管法兰多采用环形八角形金属垫片密封。由于原先设计上有不完善之处,且螺栓载荷又较大,曾在法兰密封槽内产生过裂纹,因而将该结构的设计由图 1-1-8(a)改进为图 1-1-8(b)。

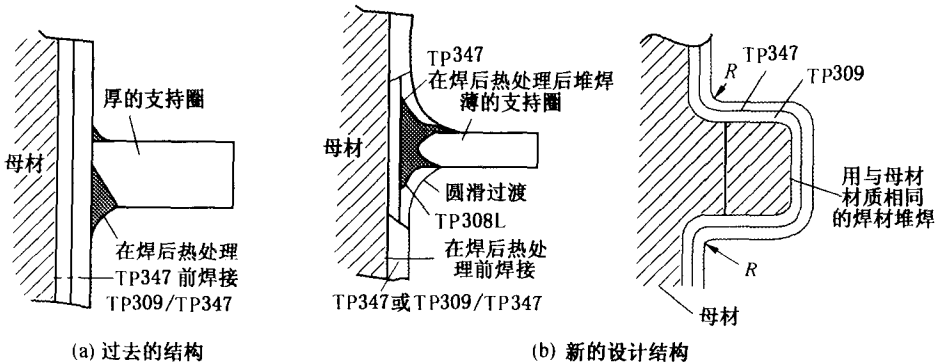


图 1-1-7 催化剂支承结构的改进

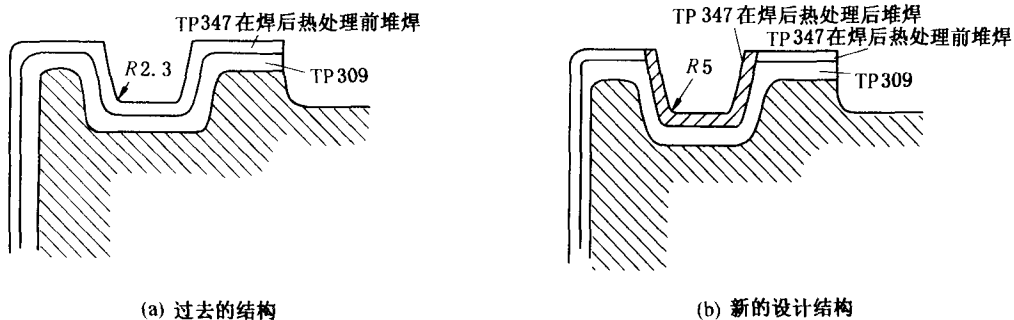


图 1-1-8 法兰梯形槽密封结构的改进

(3) 反应器支承结构

为改善反应器裙座支承部位的应力状况和能使裙座连接处的焊缝在制造和使用过程的停工检修时可以进行超声检测或射线检测，将此处结构由图 1-1-9(a) 的各种形式改进为图 1-1-9(b) 的相应形式。

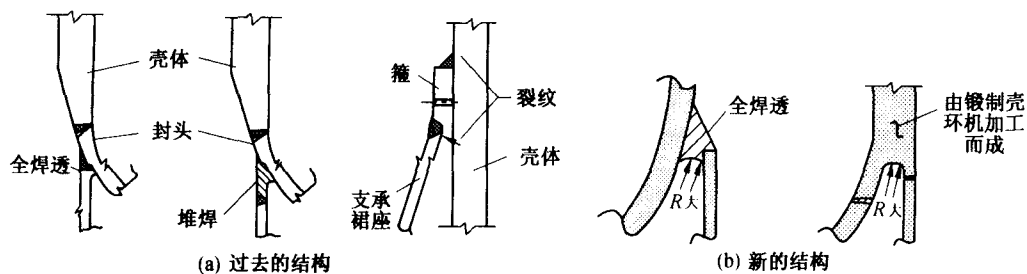


图 1-1-9 反应器支承结构的改进

(4) 反应器裙座连接结构

在操作状态下，裙座连接部位由于器壁和裙座的边界条件差别较大，往往存在着较大的热应力。为了改善此部位的应力状况，将此处连接结构由过去的图 1-1-10(a) 改进成设有热箱的图 1-1-10(b) 形式。

(5) 反应器外部附件连接结构

为改进过去附于反应器外表面的一些附件(如保温支持圈、管架、平台支架等)的连接焊

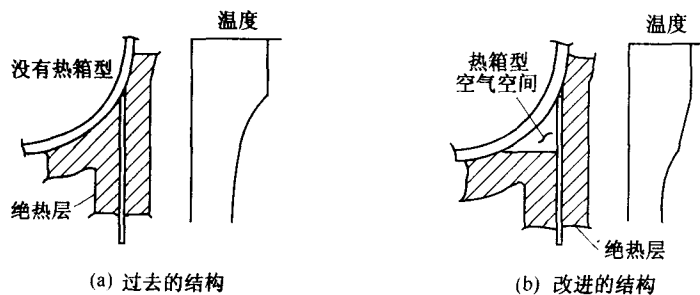


图 1-1-10 裙座连接部位的结构改进