



中国石油天然气集团公司统编培训教材

装备制造业务分册

石油化工固定式 压力容器制造工程

《石油化工固定式压力容器制造工程》编委会 编



石油工业出版社

内 容 提 要

本书共分为九章,内容涵盖了石油化工设备及制造准备工序、钢材的下料切割、钢材的成型、焊接、设备的拼装、中低压容器的制造、高压容器的制造以及不锈钢压力容器的制造特点和设备的检验等内容。

本书主要适用于从事石油化工设备制造的工程技术人员、设计人员及管理人员阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

石油化工固定式压力容器制造工程/《石油化工固定式压力容器制造工程》编委会编.

北京:石油工业出版社,2011.7

(中国石油天然气集团公司统编培训教材)

ISBN 978-7-5021-8088-1

I. 石…

II. 石…

III. 石油化工-固定式-压力容器-生产工艺-技术培训-教材

IV. TQ051.306

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 134884 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010)64523585 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2011 年 7 月第 1 版 2011 年 7 月第 1 次印刷

787×960 毫米 开本:1/16 印张:24.5

字数:412 千字 印数:1—2000 册

定价:86.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

《中国石油天然气集团公司统编培训教材》 编 审 委 员 会

主 任 委 员：李万余

副主任委员：金 华 白泽生

委 员：王志刚 连建家 胡宝顺 马晓峰
卢丽平 杨大新 吴苏江 杨 果
方朝亮 王同良 刘江宁 卢 宏
周国芳 雷 平 马新华 戴 鑑
上官建新 陈健峰 秦文贵 杨时榜
何 京 张 镇

秘 书：张玉文 王子云

《石油化工固定式压力容器制造工程》 编 委 会

主 任:张晗亮

副主任:何 京 孙宝福

成 员:韩忍之 李明光 牛宏飞 王连才 王进全

杨忠文 李树生 郭孟齐 朱旭光 雷 涛

刘 欣 刘鼎恒 叶大建 李 萌

《石油化工固定式压力容器制造工程》 编 审 人 员

主 编:朱旭光

副主编:杨开远 张 勇 邢 芳

序

企业发展靠人才,人才发展靠培训。当前,集团公司正处在加快转变增长方式,调整产业结构,全面建设综合性国际能源公司的关键时期。做好“发展”、“转变”、“和谐”三件大事,更深更广参与全球竞争,实现全面协调可持续,特别是海外油气作业产量“半壁江山”的目标,人才是根本。培训工作作为影响集团公司人才发展水平和实力的重要因素,肩负着艰巨而繁重的战略任务和历史使命,面临着前所未有的发展机遇。健全和完善员工培训教材体系,是加强培训基础建设,推进培训战略性和国际化转型升级的重要举措,是提升公司人力资源开发整体能力的一项重要基础工作。

集团公司始终高度重视培训教材开发等人力资源开发基础建设工作,明确提出要“由专家制定大纲、按大纲选编教材、按教材开展培训”的目标和要求。2009年以来,由人事部牵头,各部门和专业分公司参与,在分析优化公司现有部分专业培训教材、职业资格培训教材和培训课件的基础上,经反复研究论证,形成了比较系统、科学的教材编审目录、方案和编写计划,全面启动了《中国石油天然气集团公司统编培训教材》(以下简称“统编培训教材”)的开发和编审工作。“统编培训教材”以国内外知名专家学者、集团公司两级专家、现场管理技术骨干等力量为主体,充分发挥地区公司、研究院所、培训机构的作用,瞄准世界前沿及集团公司技术发展的最新进展,突出现场应用和实际操作,精心组织编写,由集团公司“统编培训教材”编审委员会审定,集团公司统一出版和发行。

根据集团公司员工队伍专业构成及业务布局,“统编培训教材”按“综合管理类、专业技术类、操作技能类、国际业务类”四类组织编写。综合管理类侧重中高级综合管理岗位员工的培训,具有石油石化管理特色的教材,以自编方式为主,行业适用或社会通用教材,可从社会选购,作为指定培训教材;专业技术类侧重中高级专业技术岗位员工的培训,是教材编审的主体,按照《专业培训教材开发目录及编审规划》逐套编审,循序渐进,计划编审300余门;操作技能类以国家制定的操作工种技能鉴定培训教材为基础,侧重主体专业(主要工种)骨干岗位的培训;国际业务类侧重海外项目中外员工的培训。

“统编培训教材”具有以下特点：

一是前瞻性。教材充分吸收各业务领域当前及今后一个时期世界前沿理论、先进技术和领先标准,以及集团公司技术发展的最新进展,并将其转化为员工培训的知识和技能要求,具有较强的前瞻性。

二是系统性。教材由“统编培训教材”编审委员会统一编制开发规划,统一确定专业目录,统一组织编写与审定,避免内容交叉重叠,具有较强的系统性、规范性和科学性。

三是实用性。教材内容侧重现场应用和实际操作,既有应用理论,又有实际案例和操作规程要求,具有较高的实用价值。

四是权威性。由集团公司总部组织各个领域的技术和管理权威,集中编写教材,体现了教材的权威性。

五是专业性。不仅教材的组织按照业务领域,根据专业目录进行开发,且教材的内容更加注重专业特色,强调各业务领域自身发展的特色技术、特色经验和做法,也是对公司各业务领域知识和经验的一次集中梳理,符合知识管理的要求和方向。

经过多方共同努力,集团公司首批 39 门“统编培训教材”已按计划编审出版,与各企事业单位和广大员工见面了,将成为首批集团公司统一组织开发和编审的中高级管理、技术、技能骨干人员培训的基本教材。首批“统编培训教材”的出版发行,对于完善建立起与综合性国际能源公司形象和任务相适应的系列培训教材,推进集团公司培训的标准化、国际化建设,具有划时代意义。希望各企事业单位和广大石油员工用好、用活本套教材,为持续推进人才培训工程,激发员工创新活力和创造智慧,加快建设综合性国际能源公司发挥更大作用。

《中国石油天然气集团公司统编培训教材》

编审委员会

2011 年 4 月 18 日

前言

石油化工是近代发达国家的重要基于工业。随着我国石油化工、化纤和化肥工业的发展,对工艺装备制造提出了越来越高的要求。近年来,原有设备制造企业在很大程度上得到了扩建和充实,还建成了许多新的专业化石油化工设备制造厂。与此同时,石油化工设备的制造工艺水平在不断地提高,加工和检验的新技术正越来越广泛地得到应用。而且,石油化工设备制造工艺在实践上有着较广泛的加工综合性,在理论上又涉及多种学科领域,为适应这一新形势的需要,编写了这本《石油化工固定式压力容器制造工程》。

鉴于石油化工设备制造工艺在实践上有着广泛的加工综合性,在理论上又涉及多种学科领域,为突出石油化工固定式压力容器制造的特殊性,本书着重介绍了设备制造的工艺过程,而且侧重于常见的中低压石油化工设备方面的内容。

本书适合于石油化工设备制造厂的工程技术人员、石油化工设备制造厂的操作人员、石油化工设备设计人员及有关人员。

本书虽经过多次讨论、审查、修改、补充,但由于调查研究工作不够全面,引用的标准更替较快,书中难免存在疏漏和不足之处,恳请广大读者提出意见和建议。

编委会

2010年1月

目 录

第一章 石油化工设备制造准备工序	(1)
第一节 设备种类与制造工序	(1)
第二节 常用材料及其选择	(5)
第三节 钢材的矫形	(19)
第四节 钢材的表面净化	(23)
第二章 钢材的下料切割	(26)
第一节 展开与划线	(26)
第二节 切割	(34)
第三节 边缘加工	(46)
第三章 钢材的成型	(54)
第一节 钢材的弯曲	(54)
第二节 封头的压制	(63)
第三节 管子的弯曲	(74)
第四章 焊 接	(83)
第一节 焊接及分类	(83)
第二节 焊接热过程及其特点	(90)
第三节 弧焊电源	(99)
第四节 焊条电弧焊	(111)
第五节 埋弧焊	(140)
第六节 钨极氩弧焊	(162)
第七节 熔化极气体保护焊	(170)
第八节 其他焊接技术	(184)
第九节 焊接的变形与内应力	(189)
第十节 焊缝的缺陷	(196)
第五章 设备的拼装	(204)
第一节 装配单元及其划分	(204)

第二节	常用装配工具及其使用法	(205)
第六章	中低压容器的制造	(211)
第一节	贮罐的制造	(211)
第二节	球形容器制造工艺	(217)
第三节	管壳式换热器的制造	(229)
第四节	塔器的制造特点	(254)
第七章	高压容器的制造	(264)
第一节	概 述	(264)
第二节	高压容器的筒体结构	(268)
第三节	高压容器的密封结构	(289)
第八章	不锈钢压力容器制造	(299)
第一节	不锈钢概述	(299)
第二节	不锈钢压力容器用料	(308)
第三节	不锈钢压力容器制造特点	(310)
第四节	不锈钢复层板压力容器制造特点	(317)
第五节	不锈钢制压力容器的表面处理与晶间腐蚀试验	(322)
第六节	不锈钢制压力容器压力试验	(327)
第九章	设备的检验	(332)
第一节	无损探伤和机械性能的检验	(332)
第二节	形状位置与尺寸公差检验	(357)
第三节	压力试验与泄漏试验	(366)
参考文献		(380)

第一章 石油化工设备 制造准备工序

石油化工设备制造工艺是对钢板或型钢进行各种变形、焊接等加工,并使之成为石油化工设备生产中所需要的单件或组件的工艺过程。石油化工设备大部分都是压力容器,所以本文所提到的设备制造是指压力容器制造。

压力容器制造是石油化工生产中十分重要的一环,要掌握制造工艺,首先要对制造对象的种类、结构和制造上的特点、工序及常用材料等有所了解,本章将就这方面的内容加以阐述。

第一节 设备种类与制造工序

一、石油化工设备的种类

按 2009 版新发布的 TSG R0004—2009《固定式压力容器安全技术监察规程》(以下简称《容规》)压力容器有以下几种分类方法:

1. 按危险程度分类

根据危险程度石油化工设备可分为 I 类、II 类和 III 类压力容器。

1) I 类容器

(1) $p \leq 1.6 \text{ MPa}$, $pV \leq 5 \times 10^6 \text{ L} \cdot \text{MPa}$ 的非毒性程度为极度危害、高度危害的化学介质、易爆介质与液化气体的低压容器。

(2) $pV > 2.5 \text{ L} \cdot \text{MPa}$, $V \leq 25 \text{ L}$ 非毒性程度为极度危害、高度危害的化学介质、易爆介质、液化气体的中、高压容器。

(3) $pV > 2.5 \text{ L} \cdot \text{MPa}$, $V \leq 25 \text{ L}$ 毒性程度为极度危害、高度危害的化学介质,易爆介质,液化气体的压力容器。



2) II类容器

(1) $pV \leq 5 \times 10^5 \text{ L} \cdot \text{MPa}$, $V > 25 \text{ L}$ 非毒性程度为极度危害、高度危害的化学介质、易爆介质、液化气体的中压容器。

(2) $pV \leq 5 \times 10^6 \text{ L} \cdot \text{MPa}$, $V > 25 \text{ L}$ 毒性程度为极度危害、高度危害的化学介质、易爆介质、液化气体的低压容器。

(3) $pV \leq 5 \times 10^4 \text{ L} \cdot \text{MPa}$, $V > 25 \text{ L}$ 毒性程度为极度危害、高度危害的化学介质、易爆介质、液化气体的中压容器。

3) III类容器

(1) $p > 10 \text{ MPa}$, $V > 25 \text{ L}$ 的压力容器。

(2) $pV > 5 \times 10^6 \text{ L} \cdot \text{MPa}$ 的压力容器。

(3) $pV > 5 \times 10^5 \text{ L} \cdot \text{MPa}$ 非毒性程度为极度危害、高度危害的化学介质、易爆介质、液化气体的中压容器。

(4) $pV > 5 \times 10^4 \text{ L} \cdot \text{MPa}$ 毒性程度为极度危害、高度危害的化学介质、易爆介质、液化气体的中压容器。

2. 按设计压力分类

按设计压力可分为低压、中压、高压和超高压压力容器。

(1) 低压容器: $0.1 \text{ MPa} \leq p < 1.6 \text{ MPa}$ 。

(2) 中压容器: $1.6 \text{ MPa} \leq p < 10.0 \text{ MPa}$ 。

(3) 高压容器: $10.0 \text{ MPa} \leq p < 100.0 \text{ MPa}$ 。

(4) 超高压容器: $p \geq 100.0 \text{ MPa}$ 。

3. 按作用原理分类

根据生产工艺过程中的作用原理,压力容器又可分为反应压力容器、换热压力容器、分离压力容器和储存压力容器。具体划分如下:

(1) 反应压力容器,例如各种反应器、反应釜、聚合釜、合成塔与变换炉等,主要是用于完成介质的物理、化学反应的压力容器。

(2) 换热压力容器,例如各种热交换器、冷却器、冷凝器与蒸发器等,主要是用于完成介质的热量交换的压力容器。

(3) 分离压力容器,例如各种分离器、过滤器、集油器、洗涤器、吸收塔、干燥塔与汽提塔等,主要是用于完成介质的流体压力平衡缓冲和气体净化分离的压力容器。

(4) 储存压力容器,例如各种形式的储罐与缓冲罐等,主要用于储存、盛装气体、液体及液化气体等介质的压力容器。

还可按压力容器的结构形式分为塔类、罐类、换热器、空冷器等。

此外,还有设备附件,如管线与金属框架等。管线即为连通设备、输送物料的管道,根据需要也可弯曲成各种形状,其直径通常为 $\phi 25 \sim \phi 600\text{mm}$ 。金属框架一般用来支承载荷和制成平台,通常由管件、型钢和各种板材连接而成。

上述各类设备在结构方面尽管存在较大差异,但归纳起来具有以下几个特点:

(1) 本体受力部分通常由圆筒形筒体加上各种形状的封头所组成。

(2) 承受传热传质以及反应介质的零部件,一般为管件、各种板坯或异形件。

(3) 承载部位及其连接处均有严格的密封要求。

(4) 设备表面有不同程度钝化要求,以承受介质腐蚀。

由于石油化工设备具有上述特点,因而决定了设备制造工艺的特殊性。

二、设备制造工序

压力容器制造工艺过程是由各单道工序集合而成的,由于压力容器种类不同,所以工序也不尽相同。若将生产中零件在同一地点所连续完成的工艺过程称作为一道工序,则压力容器制造有代表性的工序大体应包括:备料、下料、坡口加工、筒体成形、组装、焊接、开孔、矫形、焊缝质量检验、热处理、装配与水压试验等。

1. 备料

备料就是按设计图样中材料规格和技术要求准备材料,这一工序主要要求备料要符合设计要求,另外所备材料尺寸还要考虑尽可能提高材料利用率并减少焊缝数量的问题。

2. 下料

下料包括划线和切割两个环节。

(1) 划线。划线是根据需要的形状和尺寸在所备材料上用石笔划出线条,以便进行切割,划线前要根据材料上的标识对材料是否符合图样要求进行确认,对变形较大的材料还要进行矫形。另外,划线一定要尽量节约材料,提高材料利用率。

(2) 切割。就是根据划线用切割工具将材料割开,达到所需要的形状和

尺寸,切割后如有剩余材料在切割前要进行标识移植。近年来,随着设备制造业的迅速发展,数控切割、水下等离子切割和激光切割等下料方法已被广泛应用。

3. 坡口加工

坡口加工就是按焊接工艺坡口形式用工具或加工机械将板边加工成具有一定角度的斜面,以便于焊接。

4. 筒体成形

筒体成形包括两个环节。一是筒体卷制,就是将加工好坡口的钢板在卷板上卷成筒形,这一环节要保证筒体的圆度。二是筒体纵缝的焊接,就是用焊接材料将筒体的两个直边连接在一起,形成一个完整的筒体。

5. 组装

组装就是将加工好的封头与筒体、筒体与筒体用点焊的方法对好,这一工序要保证直线度、对口错边量与筒体长度等指标符合图样和工艺要求。

6. 焊接

焊接就是将组装好的封头和筒体、筒体与筒体间的环边用焊接材料连接在一起,形成一个完整的容器。

7. 开孔

开孔就是在焊接好的筒体上按图样要求加工出各种用途的圆孔(如人孔、手孔)。这一工序包括两个环节,一是划线,就是根据图样中开孔方位、开孔尺寸在筒体或封头上用石笔划出线条,表示开孔位置和尺寸。二是按工艺要求加工出开孔坡口,便于其他部件焊接。

8. 矫形

筒体经过焊接和开孔后,有时会产生局部变形,所以在容器整体装配前要进行矫形,就是用外力使变形处产生反变形,达到矫形目的。

9. 焊缝质量检验

由于各种原因,容器在焊接过程中,焊缝内部可能产生夹渣与裂纹等缺陷,所以要对焊缝质量进行检验,一般是采用射线照相方法进行检验。压力容器制造行业规范中对各类焊缝射线照相的比例有明确规定。

10. 热处理

容器在焊接过程中,由于焊缝和周边的温度差形成冷热不均,使容器内部

产生应力,为消除这种应力,焊后应进行热处理。可采用整体热处理和局部热处理两种方式,整体热处理就是将容器整体加热以消除应力的处理方法,局部热处理就是对某个焊缝进行加热以消除应力的方法。

11. 装配

装配就是将加工完成的容器筒体和各部件进行组装,一般包括接管、法兰、支座及内件组装等。

12. 水压试验

压力容器整体组装完成后,要进行水压试验。水压试验就是按照工艺要求的试验压力,将容器内部充满水并达到要求压力,保持一定时间,以检查容器是否渗漏。

上述加工工序虽较繁杂,但总体可归纳为两点:

(1)成形:将原材料加工成所需要的形状,关键是使钢板变形。

(2)组装:将已成形的零部件组装成完整的设备,关键是焊接。

成形和组装是设备制造的中心环节,其余各工序均从属于它们。

此外,金属切削加工也是压力容器设备制造工艺中不可缺少的一组工序,因不属于设备制造的典型工艺,故不作介绍。

第二节 常用材料及其选择

一、常用材料

石油化工生产在不同程度上都存在着各种酸、碱等介质的腐蚀作用,而且在运行过程中设备还要承受一定的温度和压力(如高温、低温、高压、低压及负压等),有时甚至受温度和压力两种苛刻条件同时作用。为了适应上述要求,石油化工设备的材料应具备以下条件:

(1)必要的机械性能:以适应温度、压力等操作条件的需要。

(2)良好的加工性能:以便于冷热加工和焊接。

(3)一定的抗腐蚀性:以满足设备使用寿命年限中抗腐蚀、抗氧化及其他方面的要求。

我国钢材品种很多,但能满足石油化工设备要求的材料却有一定范围,即结构钢类。下面将介绍几种设备制造中最常见的钢材。

1. 压力容器制造常用钢种

1) 压力容器制造常用非合金钢钢种

非合金钢就是我们过去常说的碳钢,钢中的主要化学成分有 C, S, Mn, Si, P。压力容器制造常用的钢种有下面两种:

(1) 碳素结构钢。碳素结构钢含 S, P 杂质较多,一般 $S \leq 0.050\%$, $P \leq 0.045\%$ 。钢的牌号由代表屈服强度的字母、屈服强度数值、质量等级符号与脱氧方法符号等按顺序组成。例如,牌号为 Q235AF 的碳素结构钢,其牌号意义如下:

Q——钢材屈服强度“屈”字汉语拼音首字母;

A——质量等级(用字母 A, B, C, D 表示);

F——沸腾钢“沸”字汉语拼音首字母(另外, Z——镇静钢“镇”字汉语拼音首字母; TZ——特殊镇静钢“特镇”两字汉语拼音首字母);

235——是牌号“Q235AF”这个钢号的屈服强度值。

这类钢的化学成分和机械性能可以在国家标准 GB/T 700—2006《碳素结构钢》中查到。

(2) 优质碳素结构钢。优质碳素结构钢含 S, P 杂质较少,一般 S, P 含量均不超过 0.035%,应确保的检验项目有:抗拉强度 σ_b 、屈服极限 σ_s 、伸长率 δ 、断面收缩率 ψ 、冲击韧性 α_k 和化学成分等。其质量稳定,但比碳素结构钢价格要贵。压力容器制造中常用这类钢的牌号有 08F, 10F, 15F, 10, 16, 20, 30, 35, 40 和 45 等,有的地方习惯把这类钢号叫做 20 号钢、30 号钢等。牌号中数字表示钢中的平均含碳量($\times 10^{-4}$),如 20 优质碳素结构钢,其平均含碳量为 20×10^{-4} ,即 0.20%,实际含碳量在 0.17% ~ 0.23% 之间。

非合金钢中的优质碳素结构钢的机械性能和化学成分可查阅国家标准 GB 699—1999《优质碳素结构钢》。在实际应用中,上述碳钢(非合金钢)根据含碳量的多少又可分为:

① 低碳钢:含碳量低于 0.25%,其塑性和焊接性均较好。

② 中碳钢:含碳量在 0.25% ~ 0.50% 之间,经热处理后有较好的综合性机械性能,但焊接性能不如低碳钢。

③ 高碳钢:含碳量超过 0.5%,强度高、硬度高、塑性差,主要用作刀具和工具。

目前,以优质碳素结构钢板制造的化工设备的较少,该钢材主要用作无

缝钢管和锻件。

2) 压力容器制造常用低合金结构钢

(1) 低合金结构钢。在碳钢的基础上添加少量合金元素(一般不超过3%),即可得到普通低合金钢,这样不仅充分利用了我国的金属资源,而且还提高了钢的强度、韧性、抗腐蚀性及耐高、低温性能等。

普通低合金钢代号的前两位数字表示平均含碳量($\times 10^{-4}$),而后面为所加合金元素的符号及其平均含量(10^{-3})。如牌号为20Mn2的低合金结构钢,其牌号意义如下:

20——表示平均含碳量锰为0.2%;

Mn2——表示平均含锰量为0.2%。

合金符号后面没数字,表示其平均含量小于1.5%;若含量为1.5%~2.5%,则合金元素符号后面应加注“2”;当含量超过2.5%~3.5%时,需加注“3”,并依此类推。又如35CrMo,其牌号意义为:

35——表示平均含碳量为0.35%;

Cr——表示平均含铬量小于1.5%;

Mo——表示平均含钼量小于1.5%。

低合金结构钢的化学成分和机械性能可在GB/T 3077—1999《合金结构钢》中查到。

目前,以低合金结构钢(除15CrMoR外)钢板制造的化工设备的较少,主要用做棒材和锻件,也有部分牌号用做无缝钢管。

(2) 低合金高强度结构钢。低合金高强度结构钢由于强度高,价格与其他合金钢相比较低,所以近几年来用途越来越广泛。这类钢的牌号由代表屈服强度的字母、屈服强度数值、质量等级符号、脱氧方法符号等按顺序组成。例如牌号为Q345E的低合金高强度结构钢,其牌号意义为:

Q——钢材屈服强度“屈”字汉语拼音首位字母;

E——质量等级,用A,B,C,D,E表示;

345——牌号Q345E这个牌号的屈服强度值。

这类钢的化学成分和机械性能可以在国家标准GB/T 1591—2008《低合金高强度结构钢》中查到。

目前,以优质碳素结构钢钢板制造的化工设备较少,而主要用作无缝钢管和锻件。

3) 压力容器制造常用不锈钢

不锈钢是以Cr,Ni为主要合金元素的合金钢。不锈钢不仅耐酸、碱浸蚀性