

高压容器

国外化工炼油设备发展概况之二

高压容器

——国外化工与炼油设备发展概况之二——

全国化工与炼油机械行业技术情报网

哈尔滨锅炉厂

东方锅炉厂

华东石油学院

大连工学院

甘肃工业大学

天津大学

通用机械研究所

石油机械研究所

合 编

江苏工业学院图书馆
藏书章

1971 兰州

内 容 提 要

本书主要介绍了国外六十年代高压容器的发展概况、设计研究、结构特点、制造工艺、工业应用及发展趋势。着重介绍了广泛应用于化工、炼油、石油化学及其邻近领域中的多层包扎高压容器、卷板高压容器、热套高压容器和加氢反应器。对新近出现的电渣焊成型高压容器、球形容器等也作了介绍。本书还对高压容器用钢、高压密封及容器开孔补强作了比较详细的叙述。书中提供了 180 余幅结构图和外形照片，给出了若干技术参数和六十年代水平指标。

本书可供有关的研究、设计、制造和使用单位的工人及技术人员参考。对从事本专业的高等院校师生也有一定参考价值。

高 压 容 器

——国外化工与炼油设备发展概况之二——

*

兰州石油机械研究所出版

(兰州市七里河区敦煌路 125 号)

北京第二新华印刷厂印刷

*

开本 787×1092 毫米 $\frac{1}{16}$ · 印张 $10\frac{3}{4}$ · 插页 2 · 字数 285 千字

印数: 2500 定价: 1.80 元

毛主席语录

自力更生，艰苦奋斗，破除迷信，解放思想。

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

对于外国文化，排外主义的方针是错误的，应当尽量吸收进步的外国文化，以为发展中国新文化的借镜；盲目搬用的方针也是错误的，应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

……一切外国的东西，如同我们对于食物一样，必须经过自己的口腔咀嚼和胃肠运动，送进唾液胃液肠液，把它分解为精华和糟粕两部分，然后排泄其糟粕，吸收其精华，才能对我们的身体有益，决不能生吞活剥地毫无批判地吸收。

前 言

经过无产阶级文化大革命战斗洗礼的我国亿万革命人民,高举党的“九大”团结、胜利的旗帜,壮志凌云,豪情满怀,以雄健的步伐跨入了伟大的七十年代。发展国民经济的第四个五年计划的宏图已展现在我们面前,远景壮观,鼓舞人心。“中国人民有志气,有能力,一定要在不远的将来,赶上和超过世界先进水平”。现在,一个广泛的技术革新和技术革命的群众运动正在全国范围内蓬勃兴起,国民经济全面大跃进的新高潮已经到来。

目前,我国化工与炼油设备战线上,如同全国其他行业一样,形势一派大好。近几年来,尤其是无产阶级文化大革命以来,发展很快,取得了很大的成绩。自行设计和制造了许多具有世界先进水平的产品,其中有些项目是我国的独创,把“洋人”的东西远远抛到了后面。这是毛主席无产阶级革命路线的伟大胜利,是自力更生、奋发图强的革命精神的伟大胜利。

随着我国炼油、化工及石油化学工业的飞速发展,对工艺设备提出了许多新的要求。然而,目前的设备在若干方面还适应不了工艺的发展。这种矛盾的解决要求炼化设备在研究、设计和制造等诸方面都必须来一个新的跃进,这是形势发展的需要,是社会主义革命和社会主义建设的需要,是巩固无产阶级专政和支援世界革命的需要。

为了适应国民经济大跃进和赶超世界先进水平的需要,在和帝、修、反抢速度、争时间的战斗中,做到“知彼知己,百战不殆”,在“打破洋框框,走自己工业发展道路”的同时,遵照伟大领袖毛主席“洋为中用”和“批判地吸收外国文化”的教导,我们根据1970年7月在兰州举行的《全国化工与炼油机械行业技术情报网成员会议》的决议,组织了情报网内有关成员单位于1970年10—12月进行了对国外的主要化工及炼油设备六十年代发展概况编写工作。参加这次编写工作的有哈尔滨锅炉厂、东方锅炉厂、华东石油学院、大连工学院、甘肃工业大学、天津大学、合肥通用机械研究所和兰州石油机械研究所。由于人力限制和时间短促,我们仅选择了换热器、高压容器、塔器和化工容器主要制造工艺等四方面作为对象,而其中每一方面又根据我国的实际需要作了重点编写。高压容器部分主要由华东石油学院和大连工学院编写,初稿曾由合肥通用机械研究所进行讨论。继后,为使内容更加充实,两院又进一步作了补充编写;最后,由兰州石油机械研究所整理出版。

编稿过程中,得到中国科技情报所重庆分所的大力支持与指导,并从多方面为我们提供了方便条件,在此谨致感谢。

由于我们学习毛主席著作不够,业务水平有限,时间亦较仓促,编写中一定有不少缺点错误,希读者批评指正。

编 者

一九七一年十二月

目 录

一、概述	(1)
二、压力容器强度设计	(9)
(一) 压力容器破坏的若干型式	(9)
(二) 高压容器弹性或塑性破坏的几个观点	(13)
(三) 各国压力容器强度计算公式	(13)
(四) 压力容器的强度安全系数	(22)
(五) 压力容器强度设计中的应力分类问题	(27)
三、受压容器用钢	(35)
(一) 碳钢	(36)
(二) 低合金高强度钢	(38)
(三) 高温受压容器用钢	(51)
(四) 低温受压容器用钢	(53)
四、多层包扎式高压容器	(63)
(一) 新型层板包扎拉紧装置	(63)
(二) 在现场制造多层式容器	(64)
(三) 多层包扎式高压容器的自增强处理	(66)
(四) 混合多层包扎式高压容器	(67)
(五) 多层包扎高压容器的制造工艺	(67)
五、卷板式高压容器	(70)
(一) 卷板式高压容器钢材规格	(70)
(二) 卷板式高压容器的冷卷工艺	(71)
(三) 卷板式高压容器的热卷工艺	(74)
(四) 极薄钢板卷制的容器	(77)
(五) 卷板式高压容器的强度性能	(77)
(六) 卷板式高压容器的筒体开孔设计	(80)
(七) 卷板式法兰的结构与强度	(81)
六、热套式高压容器	(85)
(一) 热套工艺	(87)
(二) 自增强处理	(88)
七、电渣焊成型高压容器	(90)
(一) 电渣焊成型技术及其装备	(90)
(二) 电渣焊成型容器的焊接工艺	(92)
(三) 电渣焊成型容器的制造质量	(93)
(四) 电渣焊成型容器的机械性能与金相组织	(94)
(五) 电渣焊成型容器的爆破试验	(99)

(六) 电渣焊成型容器的优点	(101)
八、球型高压容器	(103)
(一) 热压成型法	(104)
(二) 冷压成型法	(105)
九、加氢反应器	(107)
(一) 加氢裂化反应器的结构型式	(107)
(二) 高温高压氢气对钢的腐蚀作用	(115)
(三) 氢在加氢反应器筒壁中渗透与扩散规律	(122)
(四) 多层包扎式加氢裂化反应器抗氢腐蚀焊缝设计实例	(126)
(五) 抗氢腐蚀所用的结构设计	(129)
十、高压容器密封元件及连接结构	(134)
(一) 六十年代高压密封发展近况	(134)
(二) 空心金属“O”形环密封	(136)
(三) 径向“C”形环密封	(140)
(四) 三角垫密封	(142)
(五) 抗剪连接装置	(143)
(六) 卡环连接结构	(147)
(七) 机动(或液压)快开密封连接结构	(148)
十一、高压容器的开孔补强	(151)
(一) 概述	(151)
(二) 开孔补强方法及结构设计	(152)
(三) 单层压力容器开孔补强结构	(163)
(四) 多层高压容器开孔补强	(166)
(五) 绕带容器开孔补强	(167)

一、概 述

石油炼制、化工和石油化学工业对整个国民经济、军工和尖端科学技术的发展有着极其密切的关系。长期以来，它们一直是各资本主义国家进行扩军备战和追逐超额利润的主要工业部门之一。进入六十年代以来，一方面由于美帝国主义发动侵越战争，需要大量液体燃料、炸药和各种石油化工产品；另一方面，二次大战以后，在美帝大力庇护和支持下，日本、西德的工业经过恢复和重建，经济实力有了极大的发展。因此，近十年来，在美、日、西德以及英、法、意等资本主义国家之间，国际竞争非常激烈，刺激了这些国家的石油和化学工业的发展，不断扩大企业的生产规模，采用新工艺、新技术、新设备、新材料，以满足它们扩军备战、发动侵略战争、加强竞争实力、攫取超额利润的需要。

高压容器是石油和化学工业的关键设备之一，诸如合成氨、合成尿素、合成甲醇、聚乙烯、重油加氢脱硫、加氢裂化所用的反应器、换热器以及各种贮罐，都由高压容器组成，除此以外，原子能反应堆压力容器，大型水压机蓄势器，以及最近发展起来的太空材料挤压成型和深海探测装置等等都需使用大量高压容器。

从技术上看，在六十年代中，资本主义各国在发展石油和化学工业以及高压容器生产上，具有下述一些特点：

1. 工厂规模或装置的处理能力不断扩大，拼命向大型化方向发展。

据外刊宣称〔1、2、3〕，大型化具有这样一些经济上的优点：

(1) 大大降低基建投资。以合成氨和乙烯工厂为例，不同生产能力的工厂，其基建投资的比较详见表 1-1 和表 1-2。由表可见，合成氨厂产量由 500 吨/日，翻一番到 1,000 吨/日，基建投资仅增加 62%，翻两番到 1,500 吨/日，基建投资增加 116%，产量到 2,000 吨/日，基建投资仅增加 164%。故生产能力越大，则建厂所需的基建投资就越节省。

表 1-1 不同生产能力的合成氨厂基建投资

生产能力，吨/日	500	1,000	1,500	2,000
基建投资，亿日圆	34.1	70.0	93.0	113.8

表 1-2 不同生产能力的乙烯工厂基建投资

生产能力，吨/年	100,000	200,000	300,000	400,000	500,000
基建投资，亿日圆	41.2	67.5	90.0	110.3	128.1

(2) 工厂大型化以后，便于实现自动化，操作人员大大减少，节省了操作费用。

(3) 大型化不仅单纯扩大生产规模，而且同时将工艺过程加以改进，与采用新工艺、新设备结合起来，使成本和操作费用进一步降低。如合成氨厂大型化后，用离心式压气机代替往复式压气机，提高了效率；又如英国帝国化学工业公司（ICI）在合成氨厂大型化以后，采用蒸汽

重整法,大规模回收第一重整反应器一部分氧化产生的热量,使热能得到综合利用。

上述这些经济上的优点被垄断资本当作榨取超额利润的重要途径,因此,近年来,各资本主义国家拼命搞工厂的大型化,装置越搞越大,表 1-3 即日本合成氨厂生产规模的发展趋势。表 1-4 为产量在 500 吨/日以上的合成氨厂在各国所占的比重。

表 1-3 日本合成氨厂生产能力的发展趋势

年 度	1951	1955	1960	1963	1966	1970
生产能力,吨/日	200	300	400	600	1,000	>1,500

表 1-4 各国日产 500 吨以上合成氨厂所占比重

国 别	英 国	荷 兰	加 拿 大	美 国	法 国	比 利 时	日 本
比 重,%	75.1	52.1	50.2	44.6	35.3	27.7	25.9

2. 容器实现大型化,亦即容器的直径、壁厚和重量越来越大。

以合成氨所用的合成塔为例,二十到三十年代,内径一般在 700—800 毫米,长 7,000 毫米,重 30 吨左右。五十年代中,内径增大到 850—940 毫米,长 10,000 毫米以上,重量 78 吨。到了六十年代中期,内径又进一步扩大到 1,600—1,700 毫米,长 15,500 毫米,重 150—180 吨。1967 年以来,单机容量发展更快,其直径已达到 2,870—3,670 毫米,长 20,000 毫米以上,重达 322—400 吨。一个日产 1,500 吨合成氨的工厂,只使用一台合成塔。表 1-5 给出氨合成塔的发展情况[4, 5]。

表 1-5 氨合成塔的发展概况

年 代	设计压力 公斤/厘米 ²	结 构 型 式	尺 寸, 毫 米			重 量, 吨
			内 径	壁 厚	长 度	
1929	300	整 锻	700	170	7,000	29
1936	300	整 锻	740	170	7,000	32
1956	300	整 锻	940	140	12,000	78
1964	360	锻 焊	1,605	200	14,200	182
1965	360	三 层 包 扎	1,700	185	15,400	153
1968	263	多 层 包 扎	2,870	204	20,370	400

至于加氢用的反应器,1950 年在实验性的装置上只重 75—100 吨,60 年代中增大到 600 吨,而目前正在考虑现场制造直径 4,500 毫米,厚 280 毫米,重 1,000 吨的容器[6]。

使用高压容器较多的原子能工业,高压容器的参数也有了很大的提高,同样反映了大型化的趋势,表 1-6 为沸水型反应堆压力容器发展情况[7]。

表 1-6

沸水型反应堆所用的压力容器发展概况

反应堆名称	功率 兆瓦	年 代	重量,吨	尺 寸, 毫 米			材 料
				直 径	壁 厚	高 度	
德累斯登-1 号	200	1959	350	3,660	127	12,500	A302 A533
	640	1969	460	5,400	203	18,300	A302 A533
(设 想 的)	3,000	1973	3,000	9,750	304	30,500	A543

3. 各种新型结构的高压容器不断出现。

六十年代以前,国外高压容器的主要结构型式以锻造、厚板卷焊、多层包扎、锻焊及绕带等几种为主。美国生产的高压容器以锻焊、厚板卷焊及多层包扎居多,西欧则以原有的工艺装备为基础,侧重于发展锻造、厚板卷焊及锻焊结构。绕带容器主要集中在西德生产。苏联在二次大战以后,从德国搬走了大量锻造及绕带式高压容器,除供本国使用外,尚有不少剩余,故在技术上发展不大。进入六十年代以来,由于石油及化学工业的急速发展,以及军工的需要,高压容器供不应求,一些老的结构型式(如多层包扎及绕带)或因专利上的原因,垄断了生产技术;或因设备太大太复杂,无法推广生产;从而刺激各厂研制各种新型的高压容器结构。由于石油和化工高压容器都是处理腐蚀性介质,并且单机容量又大,因此,在研制的新型结构中,总的来看,重点是搞组合式高压容器。在工艺装备上,以小攻大;在筒壁结构上,以薄攻厚;在材料利用上,以贱攻贵;在制造工艺上,以简攻繁。

近十年来,比较重大的技术上的发展大致可以归纳成以下几方面:

(1) 从六十年代初期开始,大型热套式高压容器已成批投产,并广泛用到石油和化学工业中。和早期小型热套式高压容器不同,近年来的大型热套式容器有以下一些特点:①内外筒之间的配合过盈量不必严格加以控制,仅需加热后能松套或轻轻压入即可,冷却后层与层间稍许贴紧。②配合表面的加工光洁度只要求 ∇_3 。③在容器竣工以后,用自紧方法(或自增强方法)处理,使筒壁产生一定的塑性变形,拉平各段筒节中的残余应力。④将内筒适当加厚,以承受介质引起的全部轴向应力,而外筒只承受周向应力,故外筒的环焊缝全部不焊。经过这些技术上的改进以后,制造工艺大为简化,使之有了推广的可能,截止到 1969 年止,已生产 400 台。在海洋开发方面,制成了锻焊式内筒和热套外筒相结合的大型高压容器(内径 3,000 毫米,操作压力 700 公斤/厘米²)。

(2) 在多层包扎式高压容器的基础上,研制成功卷板式容器。卷板式容器和多层包扎式容器不同之处是在内筒上连续缠绕薄板,以构成筒节,每个筒节只有里外两道纵焊缝。因此,它解决了多层包扎式容器的若干根本性弱点,如手工劳动量大、工序繁多,制造周期长,材料利用率不太高等等。近年来,卷板式容器已经成为多层包扎式容器强有力的竞争对手。从 1964 年年底投产以来,至 1970 年初为止,大约生产了 130 台大型容器[9]。

(3) 大型多层包扎式高压容器是传统的组合式容器,历史较久,近年来,在制造工艺上也有若干改进。如发展了在现场直立状态下组装筒节及焊接环焊缝的新技术,它把超重型的多层包扎容器化整为零,分筒节制造,运至现场以后,逐节吊起组装,在环焊缝的中间加填充薄

板,将深槽环焊缝简化成浅而小的焊缝,采用立焊焊接,解决了超重型容器的运输与吊装的困难[10、11]。此外,采用自增强处理,不控制卷板包扎的松动面,以简化工艺,同时提高筒体的承载能力、改善应力分布状态。为了节约钢材,改善筒体的应力分布,目前正在研究混合包扎法(或称等强度设计法),即按筒壁的应力分布特点,在内层、外层及中间层应用强度不同的钢板包扎,使筒壁在某一压力下能同时进入屈服[12]。还有,随着石油加氢工艺的发展,用作加氢脱硫,加氢裂化反应器的多层包扎容器越来越多,除了用作热容器(操作温度 450°C)以外,发展了衬内保温的冷容器[13、14]。利用在层板和内筒之间装集气层、在环焊缝和锻件的附近钻排气孔等方法,释放高温高压氢气,避免氢腐蚀的技术,已经获得了显著的成果[15、16]。

(4) 在电渣焊技术的基础上,研制成功了电渣焊成型或电渣重熔高压容器[17]。此法和高压容器的环缝板极电渣焊类似,只是将一 Π 型滑块代替另一个对焊的筒节,焊机机头边焊边沿轴向移动,筒体则与之同步旋转,呈螺圈状成型。它另一特点是在筒体的另一侧进行切削加工,边焊边加工内外表面、一次焊成和车光、机械化水平很高,制造成本仅为多层包扎容器的82%,为厚板焊接容器的62%,整体锻造容器的50%。

(5) 研制成功了多层包扎式法兰和卷板式法兰,避免使用锻件,制造时不需大型锻压设备,提高了材料利用率,造价低[18]。

(6) 在双层热套式高压容器基础上,研制了双层冷胀式高压容器[19],这种容器和热套不同之处是用液压方法将内筒胀大,使松套在其上的外筒贴紧,构成双层容器,在冷胀过程中,容器同时进行了自增强处理,目前已试验了直径915毫米的容器(内筒厚51毫米,外筒厚51毫米,间隙4.8毫米)。

除此以外,还作了绕钢丝式容器用作大型容器的试验研究。

和上述组合式高压容器迅速发展比较,整体锻造和绕带式容器因设备太大太笨,生产效率不高或对材料的利用不够经济,因此,近年来其发展处于停滞状态,产品也有逐渐为组合式容器取代的趋势。

在表1-7中,我们汇编了在六十年代中,世界各主要高压容器生产国家在各种高压容器结构中的发展情况,从中可以大致上看出当前大型容器发展的一般趋势。

高压密封是保证高压容器正常运转的关键部件。目前,国外使用的高压密封种类很多。由于各国间互搞技术垄断和国际竞争,因此,在高压密封使用方面各国都自成体系。

高压密封最早采用单锥密封结构,以后发展有平垫密封、伍德式密封、氮气式密封、卡扎里密封、袖口密封、双锥面密封、B形环密封、三角垫密封、空心金属“O”形环密封以及“C”形环(也有称“ Π ”形环)密封等。

美、日两国采用三角垫密封及氮气式密封居多。西德和苏联采用双锥面密封比较广泛。近年英、日等国也开始采用这种密封结构。意大利多采用卡扎里密封。英国近年还采用了B形环密封。

在原子能压力容器上已经相当普遍地推广使用具有良好密封效果的两道空心金属“O”形环密封。据国外展望七十年代密封结构,认为随着大型高压容器需要量的急剧增长,这种两道空心金属“O”形环密封将有取代双锥面密封及三角垫密封的可能[9]。

美国近年来还注意研究发展径向“C”形环密封。据认为,空心金属“O”形环尽管有许多优点,但是制作麻烦,成本高。而“C”形环密封结构简单,工作可靠,很有发展前途[20]。

高压密封的连接结构,过去大多数都是采用法兰螺栓连接,如单锥、双锥及平垫密封均是如此。此外,卡扎里密封采用螺栓套筒,伍德密封采用四合环等。这些连接方式都很笨重,零

表 1-7

各 国 生 产 高 压 容 器 水 平 汇 总

结构型式	国 别	制 造 厂 名	规 格					操 作 条 件		材 质	用 途	年 代	备 注	资 料 来 源
			内 径, 毫 米	外 径, 毫 米	壁 厚, 毫 米	长 度, 毫 米	重 量, 吨	温 度, °C	压 力, 公 斤/厘米 ²					
整体锻造	美 国	伯利恒钢铁 (Bethlehem) 公司	1,520	1,748	114	14,600	73	430	160	Cr-Mo 钢		1965	钢锭重 350 吨	Chemical Engineering, 1965, vol. 72, No. 3
	英 国	切斯特菲尔德 (Chesterfield) 厂	990		114	9,150						1965	用 Ehrhardt 冲管法制造	切斯特菲尔德厂样本
	西 德	鲁尔钢铁 (Ruhrstahl) 公司	1,500	2,516	165	20,930	230			30Cr-Mo 12	氨 合 成 塔	1965	两节总长	Technische Mitteilungen, 1965, No. 10
	西 德	克虏伯-多特蒙特 (Krupp-Dortmuod) 联合矿冶公司	1,000	1,400	200	18,000	150		700				钢锭重 300 吨	Krupp 公司样本
	法 国	克罗索特 (Creusot) 公司	1,425		140	20,000	180	222	430	3Fo 钢	氨 合 成 塔	1965		Creusot 公司样本
	日 本	日本制钢所	903	1,160	129	16,000			300	JSW-MC 1	甲醇合成塔	1966		日本制钢所产品说明书
	捷克斯洛伐克	斯柯达 (Skoda) 厂	760			12,100	24.5	200	300				总重 46.5 吨	Skoda 厂样本
锻 焊	美 国	燃烧工程 (Combustion Eng.) 公司	5,410	5,772	181	15,450	600		88	A302-B	原子能容器	1961		日本机械学会志, 1965, 68 卷, 562 期
	西 德	克吕克纳尔 (Klöckner) 厂	3,270			10,000	145	310	175	碳 钢	原子能容器	1967		Nuclear Engineering, 1967, vol. 12, No. 131
	捷克斯洛伐克	斯柯达厂	4,800		150—375	23,805	725	120	65	CSN13030+Al, Ti	原子能容器	1967	锻件最重45吨	Welding Research Abroad, 1967, vol. 13, No. 4
	日 本	日本制钢所	5,700	5,770	350	25,500	600					1967	均为最大参数	日本制钢所样本
厚板焊接	美 国	巴布柯克-威尔柯克斯 (Babcock-Wilcox) 公司	10,700		356	39,500	1,200					1966	均为最大参数	Welding Engineering, 1966, vol. 51, No. 11
	美 国	芝加哥钢桥公司	4,000	4,348	174	20,200	575	425	118	A387D+A347	加氢反应器	1968	直线段长度	Oil & Gas Journal, 1969, vol. 67, No. 20
	英 国	约翰-汤普森 (John Thompson)	1,700	2,000	150	18,200	164	120	360	Mn-Cr-Mo-V 钢	氨 合 成 塔	1965		BWRA Bulletin, 1966, vol. 7, No. 6
	英 国	巴布柯克-威尔柯克斯 (Babcock-Wilcox) 公司	3,590	3,894	152	20,600	180	450	140	A387D 钢	加氢反应器	1966		Oil & Petrochemical Equipment News, 1966, vol. 11, No. 6
	日 本	日立制作所	4,344	4,632	144	18,060	380	280	88	A302-B	原子能容器	1967		日立评论, 1968, 50 卷, 7 期
	日 本	三菱重工株式会社	2,590		93	9,065					加氢反应器	1965		三菱重工样本
	日 本	日本制钢所	6,000		300	25,500	450					1967	均为最大参数	日本制钢所样本
槽型带绕制	西 德	巴登苯胺苏打制造厂 (BASF)	3,500			>20,000	>300		6,000		化 工 容 器	1968	均为最大参数	Chemical Process Engineering, 1968, No. 1
	西 德	凤凰莱茵制管 (Phoenix-Rheinrohr) 厂	1,950	2,750		24,600	160			内筒 16Cr9		1963	均为最大参数	Phoenix-Rheinrohr 公司样本

续表 1-7

结构型式	国 别	制 造 厂 名	规 格					操 作 条 件		材 质	用 途	年 代	备 注	资 料 来 源
			内 径, 毫 米	外 径, 毫 米	壁 厚, 毫 米	长 度, 毫 米	重 量, 吨	温 度, °C	压 力, 公 斤/厘 米 ²					
槽型带绕制	日 本	三菱重工株式会社	2,800	3,400		21,000			5,000			1969	均为最大参数	Hydrocarbon Processing, 1969, vol. 48, No. 12
	英 国	维克斯-阿姆斯特朗斯 (Vickers-Armstrongs) 工程公司		2,740		20,100	173		316	钢 带 用 BS970-EN34		1965		Chemical Processing, 1965, No. 3
	民 德	VEB 机器制造厂	1,200			18,000	85.7	350	325			1963		VEB 厂样本
	匈牙利	切佩尔 (Csepel) 制造厂	1,200			18,000		350	350			1967		切佩尔厂样本
扁平带绕制	西 德	巴登苯胺苏打制造厂	3,050			24,000			150			1967		Proc. 7th World petroleum Congress, vol. 6 1967
	英 国	约翰-汤普森公司	15,300	15,900	185	12,200			17.6	锅 炉 钢	原子能容器	1960	绕 17 层 50 毫米宽钢带, 内筒厚 76 毫米	Proc. IME, 1960, vol. 174, No. 29
多层包扎	美 国	芝加哥钢桥公司		5,800	380	不限	1,000	450	2,380	高 强 度 钢		1968	均为最大参数	Nitrogen, 1968, No. 95
	美 国	A. O. 史密斯 (A. O. Smith) 公司			400		850	-35 ~540	1,580			1956		Chem. Eng. Progress, 1956, vol. 52, No. 12
	美 国	努特 (Nooter) 公司	1,140	1,444	152	27,400	147					1967	称 plywall 容器	Chemical Engineering Progress, 1967, vol. 63, No. 10
	西 德	鲁尔钢铁公司	1,390	1,506	116	28,800	600	200	230	BH 细晶粒钢	尿素合成塔	1966		鲁尔钢铁公司样本
	日 本	日本制钢所		6,000	350	不限	1,000	450	150	Welcon 2H		1967	均为最大参数	日本制钢所样本
	日 本	神户制钢所		5,200	不限	不限	1,000	-30 ~450	3,000	Welcon 2H		1969	均为最大参数	日本神户制钢所样本
	日 本	石川岛播磨重工	1,380			1,750		-10	200	FTW-60	超 音 速 风 洞 气 罐	1965	共包 6 层	化学工学, 1967, 11 卷, 10 期
热 套	美 国	斯脱劳塞斯-威尔士 (Struthers-Wells) 公司	1,600	1,944	305	15,800		220	330	SA240+TP321	氨 合 成 塔	1967	直线段长度, 5 层 热 套	Chemical Engineering Progress, 1971, vol. 67, No. 4
	美 国	全国锻造 (National Forge) 公司	610	1,725	558	3,800	86.5		5,620	高强度调质钢	等静压粉末冶金容器	1968	两 层 热 套	ASME Paper, 70PVP-9
	美 国	美国钢铁 (U. S. Steel) 公司与伯利恒钢铁公司	3,400	4,008	304	8,240	750	室 温	705	HY-100	深海试验容器	1968	两层热套, 外筒 5 个 环	ASME Paper 68WA/UNT 8
	英 国	维克斯-阿姆斯特朗斯公司	610			9,200			2,460	内 筒 不 锈 钢	高压聚乙烯反应器	1961	为最大参数	维克斯-阿姆斯特朗斯公司样本
	法 国	巴布柯克-大西洋 (Babcock-Atlantique) 公司					575				加 氢 脱 硫 反 应 器	1970		Hydrocarbon Processing, 1970, vol. 49, No. 10
	日 本	巴布柯克-日立制作所	1,700		195			300	1,500	SH70		1965		中国化学机械访日代表团考察报告之三, 1965 年
	捷克斯洛伐克	KSB 制造厂	1,300			20,000			325		氨 合 成 塔	1962		Czechoslovak Heavy Industry, 1962, No. 12
卷 板	日 本	三菱重工株式会社		7,000		不限	800		800	MY56, MY65		1970	均为最大参数	Hydrocarbon Processing, 1970, vol. 49, No. 10

说明: 1. 在研制中的容器, 如绕丝式, 双层冷胀式, 电渣焊接成型 (电渣重熔) 高压容器等, 鉴于技术上尚不很成熟, 没有列入上表。

2. 在本表所列的数据, 均为各厂正式生产的数据。

件数量多,而且装卸不便。由于高压容器直径日益增大,温度压力逐步提高,原有的几种连接方式远不能满足要求。近年美、英等国在深海探测试验装置上,发展了新型的抗剪连接结构,代替传统的法兰螺栓连接。在这些新结构中,有径向销连接结构,抗剪环连接结构,抗剪螺栓连接结构,卡环连接结构,带齿卡环连接结构及机动(或液压)快开密封连接结构等。从初步试验来看,它们具有结构简单、节约钢材、装卸方便、使用良好等优点,可以用在大、中、小高压容器上,但目前这些新结构还缺乏较多的使用经验。

高压容器的开孔补强 其目的在于解决顶盖及筒体开孔后引起的壳体强度严重削弱问题。过去大都采用美国压力容器规范第8节规定的等面积补强法,或称100%补强法。此法要求在筒体和接管连接处周围进行补强,补强金属量必须等于或大于开孔挖去的金属量。这种办法偏于安全保守,现在比较倾向于采用另外两种补强法,即弹性失效开孔补强法(英国标准 B. S. 3915-1965)和塑性失效开孔补强法(美国原子能压力容器规范,西德 AD-B9 (1960)规范)。特别是后者越来越受到重视,其要点是允许开孔接管周围的最大应力值达到未开孔容器许用应力的1.5倍,亦即设计时允许孔的周围出现局部的屈服,而相邻的筒体或顶底盖仍处于弹性状态,这种情况不会引起开孔处出现整体屈服现象。

受压容器用钢 炼油、化工、石油化学或原子能等工业部门中所用的高压容器,其工作条件都是很苛刻的,一般均在高温高压下操作,在很多情况下,同时还有化学介质或氢的严重腐蚀,因此要求高压容器用钢具有高的机械强度和耐腐蚀能力,从六十年代以来,国外采用低合金高强度钢或合金钢越来越多。特别是近年来,各国都有增加受压容器设计应力的趋势,从而促使受压容器用钢提高其屈服强度。此外,由于装置和设备向大型化发展,为了减轻设备重量,解决设备在运输与吊装上的困难,也需在设计上广泛采用了各种高强度钢。

在低合金高强度钢方面,美、日及西欧各国对压力容器用钢的要求基本上是一致的,即钢材在室温下强度较高,在高温下能保持良好的强度,低温缺口韧性及可焊性较好。因此要求细晶粒、低碳及有足够的合金元素。在50公斤级的低合金高强度钢中,美国的C-Si钢A212B在原子能反应堆高压容器和氨合成塔的制造中应用相当普遍。日本近年在大容量高压锅炉和炼油化工设备上有采用SB-49B高强度钢代替过去强度稍低的Si-Mn系钢SB-42B,SB-46B的趋势[22]。在60公斤级的低合金高强度钢中,A302B和A516-70等是美、日氨合成塔的典型材料[21]。西欧的Ammo-65(法国),BHW38、BH43W(西德),ASERA60N(意大利)和Ducol-W30(英国)等都是广泛用于锅炉汽包、高压容器和加氢反应器的钢材。六十年代以来,Welcon-2H钢和FTW60钢成为日本多层包扎式高压容器层板的典型钢材[23]。70公斤级的低合金高强度钢几乎都是专供高压及超高压容器使用,如A542钢是美、日及西欧加氢裂化反应器所常用的钢材。在多层包扎式高压容器上,A. O. Smith 1146钢是美、日层板的典型材料之一。除此之外,日本还使用了强度更高的Welcon2HS和Welcon2HU作层板。西德在氨合成塔和加氢裂化上则采用24CrMo10钢。

不锈钢通常用作高压容器的衬里或内壁的堆焊材料。作加氢反应器抗腐蚀衬里用的不锈钢,最常应用的是AISI308L、316L和347三种。在特殊情况下,也有用钛板作衬里材料的。堆焊通常也是用这几种不锈钢焊条,特别是A-347使用比较广泛[21]。

参 考 资 料

- [1] 化学装置, Vol. 12, № 1, 1970
- [2] 化学装置, Vol. 11, № 1, 1969
- [3] 石油学会志, Vol. 4, № 4, 1968
- [4] 高压力, Vol. 8, № 3, 1970
- [5] 化学工学, Vol. 32, № 2, 1971
- [6] Oil & Gas Journal, Vol. 67, № 20, 1969
- [7] Nucleonic's, № 3, 1967
- [8] Proc. 7th World Petroleum Congress, Vol. 7 1967
- [9] Chemische Industrie International, № 1, 1970
- [10] British Chemical Engineering, Vol. 16, № 6, 1971
- [11] Oil & Gas Journal, Vol. 68, № 7, 1970
- [12] 化学工学, Vol. 11, № 10, 1967
- [13] Hydrocarbon Processing, Vol. 45, № 3, 1966
- [14] Oil & Gas Journal, Vol. 64, № 1, 1966
- [15] ASME Paper 70 pet/20
- [16] British Chemical Engineering, Vol. 15, № 7, 1970
- [17] Mitsubishi Heavy Industry Technical Review, Vol. 6, № 3, 1969
- [18] 三菱重工技报, Vol. 4, № 4, 1967
- [19] ASME paper 66 WA/PVP8
- [20] ASME Paper 68-PVP-9 1969. 7
- [21] Hydrocarbon Processing, Vol. 43, № 6, 1970
- [22] 化学工学, Vol. 32, № 5, 1968
- [23] 化学工场, Vol. 11, № 10, 1967

二、压力容器强度设计

最近十年来,随着压力容器制造工艺和检验技术的不断发展,高强度低合金钢的广泛应用,以及电子计算机作为一项计算工具在强度分析中的应用,特别是对受压容器进行了大量的实验应力分析工作,所有这些,使高压容器的强度设计方法得到不断完善。

在压力容器的强度设计方面,近十年来的发展趋势可以归纳成以下几点:

1. 容器的设计规范越来越具体、详尽和明确。对不同结构型式的容器,根据其用途、制造方法、受力特点和应力分布的不同,分别制订了相应的规范,对设计、选材、制造和检验提出了不同的要求。以美国机械工程师学会规范(ASME Code)为例,在1960年以前,对锅炉和压力容器仅制订了两个规范,即动力用锅炉规范(Sec. 1)和压力容器规范(Sec. 8)。1962年增加了原子能容器规范(Sec. 3),1968年在压力容器规范内增添了第二部分(Div. 2),1969年新加塑料容器规范(Sec. 10),适用于操作压力在106公斤/厘米²以下的玻璃钢容器。1971年又增加了非破坏性检查规范(Sec. 5)[1]。日本和西德在试制成功多层包扎式容器以后,由于这种容器和单层容器在结构上及受力上差别较大,在1961年起陆续制订了有关这种容器的专门规范,以便将多层式容器的设计从一般压力容器划出来。

2. 高强度钢在压力容器中得到广泛应用以后,单纯以材料的强度限 σ_B 来确定许用应力已经反映不出材料的真实承载能力,显现不出高强度钢的优越性,为了充分发挥材料的强度性能,减小壁厚,降低造价,越来越多的国家已同意以材料的屈服限 σ_s 为基准来确定许用应力。以美国为例,1934年由美国石油学会与机械工程师学会(API—ASME)联合决定以钢材的强度限为基准来确定许用应力,经过30年左右,在1962年颁布的原子能容器规范中,首次同意以屈服限为基准确定许用应力,1968年在增订的受压容器规范第8节第二部分中,也规定以屈服限为出发点来制订许用应力。英国的容器产品在国际市场上由于受到西德的激烈竞争,打不开销路,从1965年起,在新修订的压力容器规范B. S. 1515—1965中,仿效西德也改以屈服限为基准来定许用应力。目前,除美、英两国以外,西德、法国、意大利、瑞典和日本等国也都在有关的锅炉或受压容器规范中,采用屈服限来制订许用应力。

随着设计计算公式准确性的改进,钢材性能更加稳定,制造工艺不断完善,使用经验的积累,压力容器强度安全系数在不断下降,和五十年代相比,这是一个显著的进步。

3. 二次大战以后,各国对高压容器的爆破压力从理论和实验方面都作了大量的工作,提出了许多与实验结果比较吻合的公式,加深了对高压容器操作规律的认识。在此基础上,日本提出了高压容器的爆破是真正失效的观点,并在多层式及卷板式高压容器中,采用了基于爆破试验得出的半经验公式进行设计,并以爆破压力为基准确定安全系数。

(一) 压力容器破坏的若干型式

压力容器破坏的形式很多,容器因为承受超过操作压力的高压作用,引起筒体内壁的屈服,或整体屈服,或导致爆破等等,是通常所熟知的几种破坏形式。据国际焊接学会的看法,压力容器可能发生如下几种破坏[2]:

(1) 过度的塑性变形

在韧性材料的压力容器中,压力的增加大大超出设计数值时,壁中的应力就进入塑性区,筒壁内表面先发生屈服,随着压力不断增大,逐渐遍及整个截面。在容器发生整体屈服时,其行为在很大程度上取决于钢的塑性应力——应变的性能,并可大致用下式来表示:

$$\sigma = k\varepsilon^n$$

式中: σ ——材料的真应力;

ε ——材料的真应变;

k ——强度系数;

n ——应变硬化指数。

压力增加到更高数值时,筒体的直径增大,同时壁变薄。最后,到达不稳定点,稍许增加压力,周向应变大大增加,容器就发生爆破。开始屈服的压力和材料的屈服限有关,但是屈服和爆破之间的压力值则取决于材料的应变硬化指数 n , n 值在通常的设计公式中是不加考虑的。

精确地确定某一材料的 n 值,必须绘出该材料在拉伸试验中的塑性区真应力——应变曲线。但是测量材料的均匀伸长,也可以求得相当近似的 n 值。此均匀伸长就是极限(最大)负荷时的名义应变值。若令均匀伸长为 ε'_u , 则极限的真应变为 $\varepsilon_u = \ln(1 + \varepsilon'_u)$ 。对于塑性应力——应变特征大致用上式表示的材料,在极限负荷时, $\varepsilon_u = n$ 。

除了压力的影响以外,在高温下,金属材料的蠕变也是引起压力容器过度塑性变形的一个重要原因。

在蠕变过程中,材料发生连续的塑性变形,在相当长的时间内,将以破裂而告终。有一些用在高温的材料,在其总的蠕变变形远远低于室温时的延伸率就发生破坏。

为了避免过度的塑性变形,应注意到:

①在最大应力点(这点的周围被弹性材料,或相对来讲蠕变速率较小的材料所包围),计算应力的峰值必须小于引起过大塑性变形或丧失韧性的应力。

③若应力集中范围比较大,最大应力点的屈服会引起塑性失稳,或蠕变会引起容器形状的失稳,此时,计算的最大应力应小于引起整个截面全部屈服的应力,许多国家的锅炉及压力容器规范规定,它还应小于在 1000 小时内,引起 0.01% 蠕变速率的应力。

(2) 大应变疲劳

有些压力容器在使用期间会受到往复应力的作用,产生往复应力的原因主要有:

①操作压力的变化、波动或频繁的间隙操作。

②周期性的温度梯度。

③在正常的温度变化时,容器及其部件的膨胀和压缩受到约束。

④强迫振动。

⑤外载荷的变化。

如果循环应力的最大值超过钢材的疲劳极限,在使用中就会发生疲劳破坏。

和飞机及回转机械不同,压力容器在使用期间承受的这些交变载荷的次数比较少,一般为 $10-10^5$ 次左右,故疲劳强度往往被忽视。在六十年代以前,压力容器的强度设计是不考虑疲劳强度的。以后鉴于压力容器的焊缝加强部分,开孔和接管、或支承部位所产生的局部应力,往往比容器的设计应力大好几倍(应力集中系数一般在 1.5—3.0 范围内),由于内压反复作用的结果,在应力集中的地方有可能出现疲劳裂纹。特别是为了减轻容器的重量而提高现有设计应力,则局部应力更大,可能接近或超过材料的屈服限。在这种情况下,就必须考虑局部塑性变形和疲劳强度的关系。