

压力容器设计人员培训教材

压力容器设计指导手册(下)

全国化工设备设计技术中心站 编
中国石油和化工勘察设计协会设备设计专业委员会

叶文邦 张建荣 曹文辉 主编

云南出版集团公司
云南科技出版社

· 昆 明 ·

前 言

压力容器是涉及人民生命和财产安全的特种设备。为了确保压力容器的质量和安全,设计是一个重要环节。压力容器设计是一个综合专业,要求设计人员具有广泛的知识,例如:材料性能、容器的结构、元件的受力分析、防腐蚀措施、容器制造与检验等。

根据目前设备设计队伍中压力容器设计人员的现状,本书编写单位提出编写压力容器设计人员培训教材《压力容器设计指导手册》(以下简称“培训教材”)方案,并指出“培训教材”不同于现有的各种手册,也不同于大学教材,编写的目的是指导压力容器设计人员进行各类设备设计,并提高设计人员的设计水平和设计质量。因此,本“培训教材”的编写以现行设计标准为准则,不是照抄照搬,而是指导压力容器设计人员在设计中如何正确选择材料、结构、计算以及对制造与检验提出正确要求等,还可使设计人员了解一些工艺常识;此外,本书还介绍了一些设计过程中应注意的问题,并收集了常用标准、规范和设计中所需的各种物理数据。

国家质量监督检验检疫总局特种设备安全监察局张建荣副处长充分肯定了编写“培训教材”的必要性和重要性,指出编写“培训教材”的目的是为了提高压力容器设计人员的设计水平,并对本书的作用作了明确的定位:本“培训教材”是教材性指导手册。

为了确保“培训教材”的质量,特聘请国内压力容器行业专家参加编审工作,这些专家为大学教授和设计院、工程公司、制造厂(公司)的总工程师等。

本“培训教材”由叶文邦、张建荣、曹文辉主编,并由戴季煌和曹文辉负责统稿工作。在统稿工作中,黄正林、施汉威、应道宴、秦叔经、汪树华、陈泽溥、华天定等对全书中就相关专业的内容进行了审

阅,并提出了许多中肯的意见和建议。

本“培训教材”主要编写人员:

第一篇:丁伯民、叶文邦(第1章、第2章);王非(第3章、第4章);王钰玮、郝文生(第5章);华天定(第6章、第8章);庞成学、郝文生(第7章);丁伯民、黄正林(第9章)。

第二篇:朱秋尔(第10章、第12章);杨振奎、王荣贵、丁伯民(第11章);沈鹏飞(第13章);陈泽溥(第14章);宋文轩(第15章);刘宝中(第16章);盛昌国(第17章);姚佩贤、杨振奎(第18章、第19章);郝文生(第20章);曹文辉(第21章);张建荣、戴季煌(第22章)。

附录:丁伯民(附录1);黄正林、戴季煌(附录2)。

附表:王非(附表1、附表2、附表7);曹文辉、汪树华(附表3、附表4、附表5、附表8);盛昌国(附表6);郝文生(附表9)。

截止到本书出版前,编写人员又尽了最大的努力,跟踪收集了最新版本的标准、规范,使本“培训教材”的时效性与适用性更强。在此谨向全体编审人员、参加审查的专家、对本“培训教材”的编写给予支持和帮助的单位和个人表示衷心的感谢。

虽经多次讨论、审查、修改、补充,但由于引用的标准、规范更新较快,本“培训教材”难免存在疏漏和不足甚至错误之处,恳请广大读者提出宝贵意见和建议,以便再版时补充或修正。

全国化工设备设计技术中心站
中国石油和化工勘察设计协会设备设计专业委员会
2006年8月

目 录

上 册

第一篇 压力容器设计基础知识

第 1 章 压力容器的定义和分类	3
第 2 章 压力容器的失效准则和破坏方式	6
2.1 失效准则	6
2.2 破坏方式	9
2.3 运行功能的丧失或破坏	11
第 3 章 压力容器用钢	13
3.1 化学成分与力学性能	13
3.2 合金元素对钢材的影响及材料热处理	21
3.3 压力容器用钢材的选用	39
3.4 低温钢的要求及选用	51
第 4 章 钢材的腐蚀与防腐蚀措施	68
4.1 腐蚀的分类	68
4.2 均匀腐蚀	70
4.3 局部腐蚀	83
4.4 腐蚀防护	90
4.5 金属耐腐蚀性能的试验与检验	119
第 5 章 压力容器焊接材料的选用	125
5.1 焊接的基本知识	125
5.2 焊材选用	131
第 6 章 压力容器制造中的热处理	145
6.1 概述	145
6.2 焊后热处理	147
6.3 消氢处理	151
6.4 恢复或达到规定力学性能的热处理	152
6.5 奥氏体不锈钢的固溶处理与稳定化处理	154
第 7 章 无损检测方法及其应用	157
7.1 无损检测的目的	157
7.2 射线检测	158

7.3	超声检测	162
7.4	磁粉检测	167
7.5	渗透检测	170
7.6	压力容器用规程标准中无损检测的要求	171
第8章	耐压试验和气密性试验	185
8.1	概述	185
8.2	耐压试验(液压试验或气压试验)	187
8.3	多腔容器的耐压试验	190
8.4	气密性试验	191
第9章	压力容器应力分析	193
9.1	强度理论	193
9.2	薄壁壳体的无力矩理论	194
9.3	薄壁圆筒的有力矩理论及边缘问题	203
9.4	平板的应力分析	207
9.5	应力分类及其在容器设计中的应用	212
9.6	由应力分析所引起对压力容器设计的启示	216

第二篇 压力容器设计

第10章	压力容器设计参数的选取	221
10.1	设计压力 ^{[1][2]}	221
10.2	设计温度 ^[3]	222
10.3	厚度附加量(包括钢材厚度负偏差和腐蚀裕量)	222
10.4	设计中应考虑的载荷	224
10.5	安全系数及许用应力	225
10.6	焊接接头分类及焊接接头系数	227
第11章	压力容器零部件的结构和计算	229
11.1	圆筒和球壳	229
11.2	封头	235
11.3	开孔和开孔补强	243
11.4	法兰	247
11.5	焊接结构设计	269
11.6	局部应力计算	277
第12章	容器设计	300
12.1	概述	300
12.2	卧式容器	301
12.3	三鞍座卧式容器的计算 ^[3]	318
12.4	立式容器	321
12.5	低温容器的材料和结构选用 ^{[4].[5].[6]}	338
12.6	制造和检验中的有关问题	343

第 13 章 机械搅拌设备设计	349
13.1 综述	349
13.2 机械搅拌设备装配图	359
13.3 搅拌容器的结构设计与计算	364
13.4 搅拌机的设计、选型与计算	374
13.5 机械搅拌设备的制造、检验与验收	380
第 14 章 塔器设计	384
14.1 概述	384
14.2 结构简图	387
14.3 工艺设计	387
14.4 内件结构设计	398
14.5 塔体和裙座的强度与稳定校核	427
14.6 附件设计	437
14.7 技术要求	443

下 册

第 15 章 管壳式换热器设计	447
15.1 概述	447
15.2 管壳式换热器介绍	448
15.3 管壳式换热器的设计参数、材料及防腐	452
15.4 管板的计算	456
15.5 管壳式换热器结构设计	471
15.6 管束振动	491
15.7 低温管壳式换热器	492
15.8 管壳式换热器的制造工艺	495
15.9 管壳式换热器的压力试验	498
第 16 章 高压容器设计	500
16.1 概述	500
16.2 高压容器装配图	503
16.3 高压容器的结构	507
16.4 高压容器的设计计算	523
第 17 章 球形储罐设计	533
17.1 概述	533
17.2 装配图	533
17.3 设计参数	537
17.4 材料	538
17.5 结构	540
17.6 计算	546

17.7	球壳板结构尺寸	547
17.8	制造和检验	553
17.9	附件	555
第 18 章	钛制焊接容器设计	558
18.1	总论	558
18.2	材料	559
18.3	圆筒和球壳的强度计算	583
18.4	封头强度计算	584
18.5	开孔补强	585
18.6	法兰	586
18.7	容器结构设计	587
18.8	制造、检验和验收	598
第 19 章	铝制焊接容器设计	610
19.1	总论	610
19.2	材料	611
19.3	圆筒和球壳	620
19.4	封头	620
19.5	开孔补强	623
19.6	法兰	624
19.7	结构设计	626
19.8	制造、检验与验收	630
第 20 章	安全泄放装置的选用和计算	636
20.1	安全阀的分类及结构	636
20.2	爆破片安全泄压装置的分类及结构	642
20.3	安全阀与爆破片的主要区别	644
20.4	安全阀、爆破片及其组合结构的应用	645
20.5	安全阀安全泄放量的计算	647
20.6	爆破片安全泄放量的计算	652
20.7	安全阀与爆破片组合结构泄放量计算	654
20.8	国内外法规及标准对压力容器安全泄放量和安全阀额定泄放量的 计算公式	656
第 21 章	压力容器计算机应用软件	657
21.1	过程设备强度计算软件(SW6 - 1998)	657
21.2	化工设备 CAD 施工图软件(PVCAD)	665
21.3	压力容器设计技术条件专家系统(PVDS)	668
第 22 章	压力容器安全技术监察规程	673
22.1	适用范围	673
22.2	设计参数的确定	673
22.3	不符合《容规》产品	676

22.4	材料	676
22.5	设计	679
22.6	制造	681
22.7	定期检验	686
22.8	安全附件	686

附 录

附录 1	应力分析设计简介	691
1.1	应力分析设计方法的由来及其总体思想	691
1.2	按应力分析设计标准和按规则设计标准的主要区别	693
1.3	压力容器的低循环疲劳设计简介	696
附录 2	压力容器设计常用规范、规定和标准	704

附 表

附表 1	钢的性能	717
附表 2	钢材高温性能	721
附表 3	碳钢、不锈钢耐腐蚀数据	726
附表 4	毒性介质危害程度分级数据表	806
附表 5	爆炸危险介质数据表	812
附表 6	各地基本风压值、雪压值、地震烈度	822
附表 7	国内外常用压力容器用钢材对照	843
附表 8	常用计量单位换算	856
附表 9	常用液化气、液化石油气、饱和水蒸气在不同温度下的饱和蒸汽压	863

第 15 章 管壳式换热器设计

15.1 概述

1. 换热器在工业中应用

换热器是一种实现物料之间热量传递的节能设备,是在石油、化工、石油化工、冶金、电力、轻工、食品等行业普遍应用的一种工艺设备。在炼油、化工装置中换热器占总设备数量的 40% 左右,占总投资 30% ~ 45%。近年来随着节能技术的发展,应用领域不断扩大,利用换热器进行高温和低温热能回收带来了显著的经济效益。目前,在换热设备中,使用量最大的是管壳式换热器。

在石油化工乙烯装置和合成氨装置中,管壳式换热器需满足承压高达 35MPa,承温达 700℃ 的使用要求,为回收装置的大量余热热能,管壳式废热锅炉从 500 ~ 1400℃ 燃气、合成气、烟气等高温气体中回收热量,产生低、中、高压蒸汽,此类废热锅炉都是采用特殊结构的管壳式换热器。随着压力容器制造技术的日益发展,石油化工装置规模日益大型化,国内单台换热器的换热面积已达 7000m²,而国外已达到 8000m²,在国内管壳式换热器最大直径已达 ϕ 3200mm,国外已达 ϕ 4650mm。为提高传热效率,越来越多采用具有强化传热的高效换热器,折流杆换热器的应用有效地克服了管束的震动问题,用于换热器的大型化。

防腐涂层换热器的发展也较为迅速。从 20 世纪 80 年代中期投资低、防腐效果好的 847 防腐涂料开始,发展到 90 年代 901,不仅在冷却水系统成功防腐,而且还具有抗垢性能,Ni-P 非金属化学镀层在 60℃ 以下海水和氯离子的防腐方面也起到了重要作用,在 110℃ 以下对硫的防腐也发挥了较大的作用,不仅防腐而且起到了耐冲蚀、耐磨作用。

随着石化行业的高速发展,换热器的防腐也从单纯的涂层防腐发展到采用钛、钽、锆等稀有金属材料作为换热器制作材料,对换热器制造水平提出了更高要求。

2. 换热器的分类

(1) 按传递过程分类

可分为直接接触式和间接接触式,而后者又可分为直接传递式和蓄热式。

(2) 按传热种类分类

1) 无相变传热——一般分为加热器和冷却器。

2) 有相变传热——一般分为冷凝器和重沸器。

(3) 按材料分类

- 1) 金属——碳素钢、低合金钢、高合金钢、有色金属及其合金。
- 2) 非金属——石墨、搪玻璃、塑料。

(4) 按结构分类

- 1) 管式换热器——蛇管式、套管式、管壳式、翅片管式。
- 2) 板面式换热器——螺旋板式、板式、板翅式、板壳式、伞板式。
- 3) 其他形式换热器——热管、旋转式、块式。

15.2 管壳式换热器介绍

管壳式换热器在工业中用量约占换热器总量 90%，是应用最为广泛的一种换热器，下面着重介绍典型管壳式换热器的结构形式及适用条件。

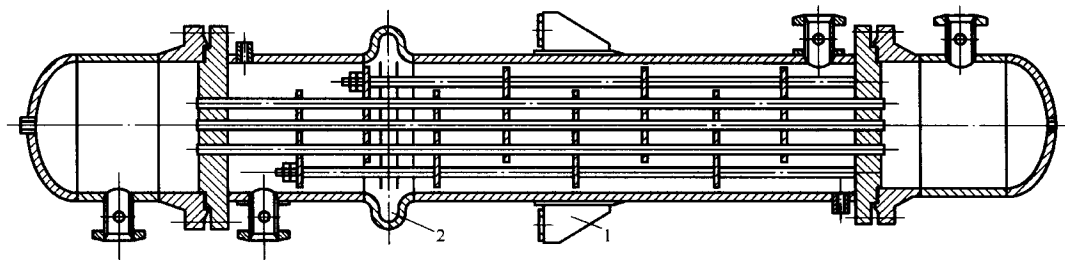
从造价看，固定管板换热器通常最廉价，但如果需要安装膨胀节，则 U 型管换热器最便宜。当因壳程介质需要经常抽取管束进行清洗时，U 型管换热器会最便宜。

1. 固定管板换热器(见图 2-15-1)

这是使用最为广泛的一类换热器。换热管两端固定在管板上，管板牢固的焊接在壳体上。在管壳式换热器中，在相同直径的情况下，它的换热面积能达到较大，制造较简单。

1) 优点：

- ① 传热面积比浮头式换热器大 20% ~ 30%；
- ② 旁路漏流较小；
- ③ 锻件使用较少，成本低 20% 以上；
- ④ 没有内漏。



1—耳式支座(部件);2—膨胀节(部件)

图 2-15-1 BEM 型立式固定管板换热器

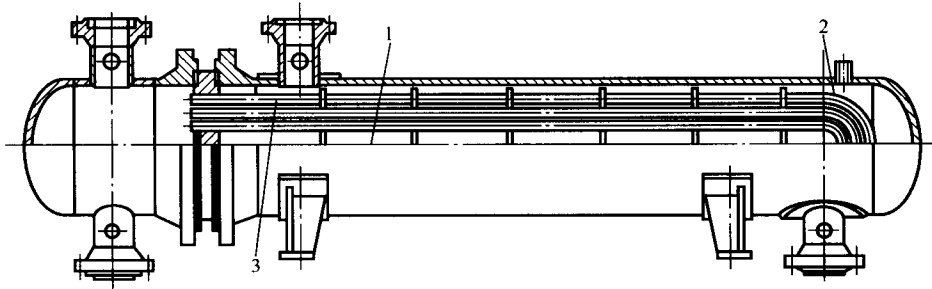
2) 缺点：

- ① 不适用于换热管与壳程圆筒的热膨胀变形差很大的场合，管板与管头之间易产生温差应力而损坏；
- ② 壳程无法机械清洗，不适用于壳程易结垢场合；
- ③ 管子腐蚀后造成连同壳体报废，壳体部件寿命决定于管子寿命，故设备寿命相对较低。

3) 宜用场合:

- ① 设备需要尽量少使用法兰密封面的场合;
- ② 管壳程金属温差不是很大的场合;
- ③ 壳程流体清洁, 无需经常抽取管束清洗的场合。

2. U型管换热器(见图2-15-2)



1—中间挡板;2—U形换热管;3—内导流筒

图2-15-2 BIU卧式U型管换热器

其换热管管束能成独立部件抽出清洗, 只需一块管板, 重量较轻, 同样直径情况下, 换热面积较大, 结构较简单和紧凑, 在高温高压下金属耗量最少。

1) 优点:

- ① 管束可抽出来机械清洗;
- ② 壳体与管壁不受温差限制;
- ③ 可在高温、高压下工作, 一般适用于 $T \leq 500^\circ\text{C}$, $p \leq 10\text{MPa}$;
- ④ 可用于壳程结垢比较严重的场合;
- ⑤ 可用于管程易腐蚀场合。

2) 缺点:

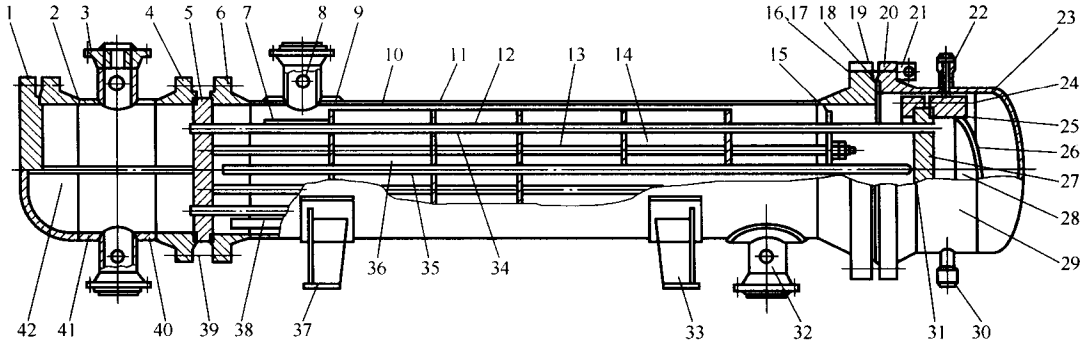
- ① 在管子的U型处易冲蚀, 应控制管内流速;
- ② 管程不适用结垢较重的场合;
- ③ 单管程换热器不适用;
- ④ 因死区较大, 只适用于内导流筒;
- ⑤ 最外排的管子U型弯曲段因为无支撑的跨度大, 会导致流体诱发振动问题;
- ⑥ 不能更换管子。

3) 可用场合:

- ① 管程走清洁流体;
- ② 管程压力特别高;
- ③ 管壳程金属温差很大, 固定管板换热器连设置膨胀节都无法满足要求的场合。

3. 浮头式换热器(见图2-15-3)

其结构是由管板、换热管、浮头盖、勾圈等组成管束, 可抽出清洗。管板包括一块固定管板和一块浮动管板, 浮动管板可连同管束自由伸缩。



1—平盖;2—平盖管箱(部件);3—接管法兰;4—管箱法兰;5—固定管板;6—壳体法兰;
 7—防冲板;8—仪表接口;9—补强圈;10—壳体(部件);11—折流板;12—旁路挡板;13—拉杆;
 14—定距管;15—支持板;16—双头螺柱或螺栓;17—螺母;18—外头盖垫片;19—外头盖侧法兰;
 20—外头盖法兰;21—吊耳;22—放气口;23—凸形封头;24—浮头法兰;25—浮头垫片;26—球冠形封头;
 27—浮动管板;28—浮头盖(部件);29—外头盖(部件);30—排液口;31—钩圈;32—接管;
 33—活动鞍座(部件);34—换热管;35—挡管;36—管束(部件);37—固定鞍座(部件);38—滑道;
 39—管箱垫片;40—管箱圆筒(短节);41—封头管箱(部件);42—分程隔板

图 2-15-3 AES、BES 型 卧式浮头式换热器

1) 优点:

- ① 管束可以抽出,以方便清洗管程、壳程;
- ② 壳体壁与管壁不受温差限制;
- ③ 可在高温、高压下工作,一般温度 $T \leq 450^\circ\text{C}$, $p \leq 6.4\text{MPa}$;
- ④ 可用于结垢比较严重的场合;
- ⑤ 可用于管程腐蚀场合。

2) 缺点:

- ① 浮头端易发生内漏;
- ② 金属材料耗量大,成本高 20%;
- ③ 结构复杂。

3) 可用场合:

- ① 管壳程金属温差很大场合;
- ② 壳程介质易结垢要求经常清洗的场合。

4. 填料函式换热器

1) 优点:它既具有浮头式换热器的优点,由于管束可以伸缩,可以承受很大的管壳程金属温差。结构也较浮头简单,制造方便,易于检修清洗。

2) 缺点:由于受填料密封压力的局限,只适用于壳程压力不高,介质毒性程度不高的场合。

(1) 外填料函式换热器(见图 2-15-4)

不适宜用在壳程介质为易挥发、易燃、易爆有毒及贵重介质的场合,适用设备不宜直径过大,且操作压力和操作温度也不宜过高,一般用于工作压力不超过 2.0MPa 场合。

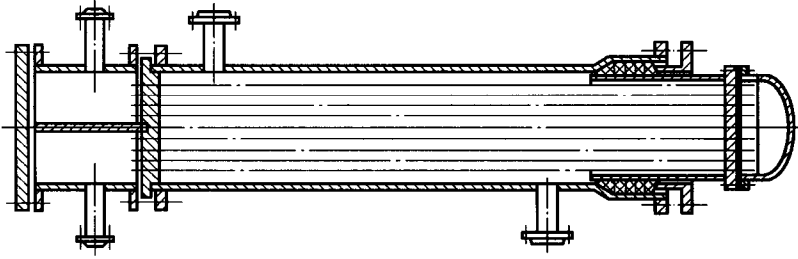


图 2-15-4 AEP 型外填料函式换热器

(2) 滑动管板填料函换热器

适用壳程介质需管束可抽取能清洗场合。

1) 单填料函式换热器(见图 2-15-5)。在填料内侧密封处,管壳程介质间仍会产生串流现象,不适用管壳程介质不允许混合的场合。

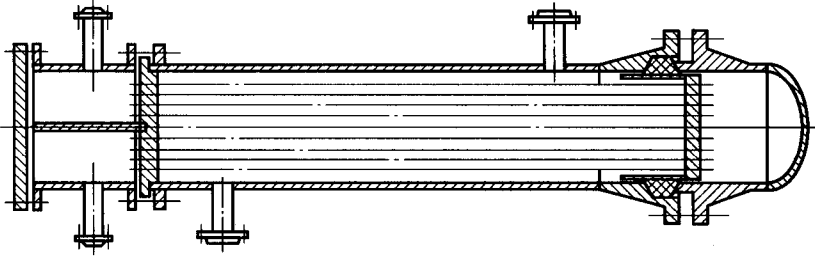


图 2-15-5 AEP 型单填料函式换热器

2) 双填料函式换热器(见图 2-15-6)。

该结构以内圈为主要密封,防止内、外漏,而以外圈为辅助密封,防止外漏,且内外密封圈之间设置泄漏引出管与低压放空总管相连。该结构适用于有毒、易燃、易爆等介质。

5. 釜式重沸器(见图 2-15-7)

釜式重沸器的管程采用固定式管束、U 形管束或浮头管束,壳程为单(或双)斜锥具有蒸发空间的壳体,一般为管程介质加热壳程介质,故管程的温度和压力比壳程高,但设计压力一般不会高于 6.4MPa。釜式重沸器的效率很多场合取决于强化沸腾管的应用,高效重沸器采用 T 形翅片管(见图 2-15-8),给热系数比光管提高 3.3~10 倍以上,此种管子具有抗垢性能好、低温差、推动力大的特点。

1) 优点:

- ① 有自清洗作用;
- ② 总传热系数提高 40% 以上;
- ③ 节约设备重量 25% 以上;

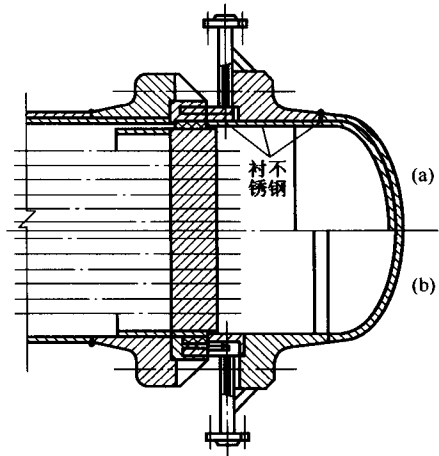
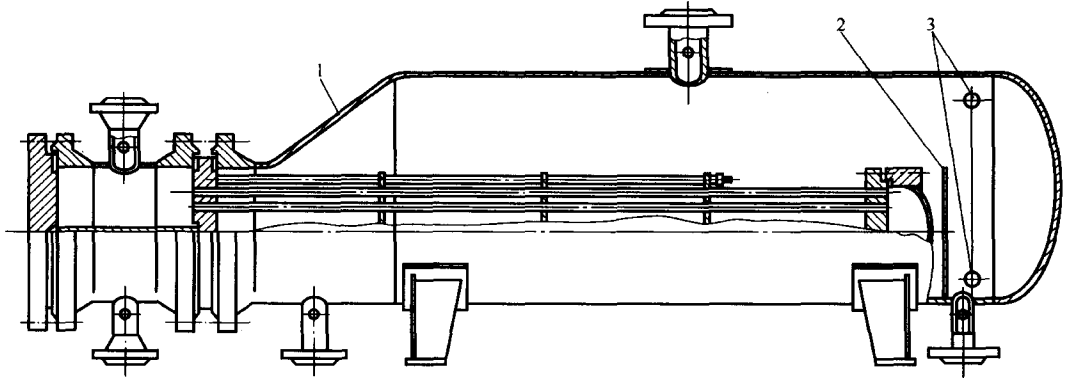


图 2-15-6 双填料函式换热器



1—偏心锥壳;2—堰板;3—液面计接口

图 2-15-7 AKT 型釜式重沸器

- ④ 适用于塔底重沸器、侧线虹吸式重沸器;
- ⑤ 适用于化工、制冷系统重沸器或再沸器;
- ⑥ 抗腐蚀性能良好。

2) 缺点:

- ① 在重油设备上,如渣油、原油设备无应用历史;
- ② 造价上升 10% ~ 15% ;
- ③ 不适用于有湿硫化氢场合。

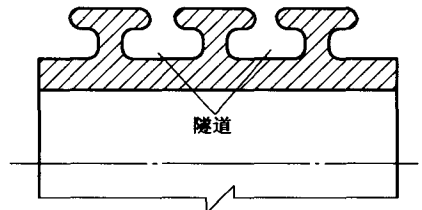


图 2-15-8 T 形翅片管

15.3 管壳式换热器的设计参数、材料及防腐

1. 设计参数

是指用于确定换热器施工图设计、制造、检验及验收的参数。与 GB 150 相同的内容不再介绍。

(1) 公称直径 DN

- 1) $DN \geq 500\text{mm}$, 卷制圆筒, 以圆筒内直径(mm)作为换热器的公称直径;
- 2) $DN \leq 400\text{mm}$, 以钢管外径(mm)作为换热器的公称直径;
- 3) $DN = 450\text{mm}$ 时, 有卷制和钢管两种情况, 此时可按前两种情况分别表示;
- 4) 公称直径一般以 100mm 进挡, 也允许 50mm 进挡, 50mm 进挡时, 应注意与壳体圆筒相配的封头、法兰等标准零部件系列尺寸的匹配。

(2) 公称长度 LN

以换热管的长度(m)作为换热器的公称长度, 换热管为直管时, 取直管长度; 换热管为 U 形管时, 取 U 形管的直管段长度。

(3) 换热面积 A

1) 计算换热面积。以换热管外径为基准, 扣除深入管板内的换热管长度后, 计算得到的面积(m^2); 对于 U 形管换热器, 一般不包括 U 形管弯管段的面积, 当需要把 U 形弯管部分计入换热面积时, 则应使 U 形端的壳体进(出)口安装在 U 形管末端以外, 以消除 U 形管末

端流体停滞的换热损失。

2) 公称换热面积。经圆整后的换热面积(m^2),一般修正间隔为 0.5。

(4) 温度

1) 设计温度。换热器在正常的工作情况下,设定的元件金属温度(沿元件金属横截面的温度平均值),它与设计压力一起作为设计载荷条件,设计温度不得低于元件金属在工作状态下可能达到的最高温度,对于 0°C 以下的金属温度,设计温度不得高于元件金属可能达到的最低温度。

管程设计温度是指管程的管箱设计温度(注意不是换热管的设计温度)。壳程设计温度是指壳程圆筒设计温度。

2) 在任何情况下元件金属的表面温度不得高于材料允许使用的温度。这与设计温度中的元件金属温度(截面平均值)是完全不同的两个概念,前者是材料最高使用温度的限制,而后者是设计温度的确定方法。

3) 同时受管程、壳程温度作用的元件,应按金属温度确定设计温度。该金属温度应通过传热计算确定,也可以在已使用的同类换热器上测定,也可根据成熟的设计经验确定。

(5) 容器类别的确定

1) 换热器的管程、壳程可分别确定类别,但换热器总的类别应取管程、壳程中的高者;

2) 换热器管程、壳程类别的确定原则按《压力容器安全技术监察规程》第 6 条的规定。

(6) 压力试验

换热器管程、壳程压力试验的方法,试验压力应区别管程、壳程不同的工况按 GB 151—1999《管壳式换热器》中有关“压力试验”的规定和本章第 9 节管壳式换热器的压力试验的说明。

2. 材料

换热器用钢材除采用 GB 150 中第 4 章所规定的材料外,作为 GB 151—1999 换热器还规定如下:

(1) 管板、平盖

管板、平盖一般情况用锻件优于用钢板,但用锻件的成本要高很多,故在条件不苛刻时,用板材作管板、平盖依然很多。一般规定如下:

1) 钢板厚度 $\delta > 60\text{mm}$ 时,宜采用锻件。因厚钢板会有分层、夹杂等缺陷及性能指标波动大等问题。

2) 管板以凸肩形式与圆筒相对接时,必须采用锻件如 GB 151—1999 中图 G1(d)、(e) 所示。

3) 采用钢板作管板和平盖时,厚度大于 50mm 的 20R、16MnR,应在正火状态下使用。

(2) 复合结构的管板、平盖

管板、平盖可采用堆焊、轧制或爆炸复合结构,当管程压力不是真空状态时,平盖亦可采用衬层结构。

1) 堆焊结构。用堆焊制作的管板与平盖,其覆层与基层的结合是最好的,但堆焊的加工难度大,中间检验、最终检验及热处理的要求高,堆焊一般有手工堆焊和带极堆焊两种方法。

2) 爆炸轧制复合板。

管板和平盖采用的复合板等级要求见表 2-15-1。

表 2-15-1

标 准	元 件	
	管 板	平 盖
GB/T 8165—1997 《不锈钢复合板和钢带》	I 级, $J_b \geq 210\text{MPa}$ 结合率 100%	Ⅲ级, $J_b \geq 200\text{MPa}$ 结合率 $\geq 95\%$
JB 4733—1996 《压力容器用爆炸不锈钢复合钢板》	B1 级, $J_b \geq 210\text{MPa}$ 结合率 100%	B3 级, $J_b \geq 200\text{MPa}$ 结合率 $\geq 95\%$
GB 8547—1987 《钛-钢复合板》	B0 级, $J_b \geq 196\text{MPa}$ 结合率 100%	B2, BR2 级, $J_b \geq 138\text{MPa}$ 结合率 $\geq 95\%$
GB/T 13238—1991 《铜-钢复合板》(标准中没有分级)	管子与管板采用强度胀或强度 胀加密封焊	可作非真空状态的平盖

注: B—爆炸法; R—轧制法; BR—爆炸加轧制法; J_b —剪切强度。

3) 管板复合结构的评价。

堆焊复合: 其覆层完全可计入管板的有效厚度(以许用应力比值折算), 与换热管连接采用强度焊时, 有充分的能力来承受换热管的轴向剪切载荷。

轧制、爆炸或爆炸加轧制复合: 采用标准中 I 级、B1 级、B0 级的复合钢板时, 覆层是否计入管板有效厚度由设计者自行决定, 但管板覆层与换热管的强度焊, 可以承受换热管的轴向剪切载荷覆层与基层有局部不结合时, 除非在管板钻孔时能全部消除, 或局部不结合符合 II 级、B2, 对于钛钢复合板为 B1、BR1 级要求, 而又发生在管板不布管区较大的中心区域(管程进、出口处)则可使用; 局部不结合若发生在孔桥上是不允许使用, 因此当换热管承受压缩力时, 会撕裂覆层, 同时还会使壳程介质进入不结合的孔桥部位使结合面承受腐蚀, 在壳程压力作用下不结合面可能愈来愈大最终造成失效。

(3) 有色金属

GB 151—1999 加入了铝、铜、钛有色金属, 把原《钢制管壳式换热器》修改成《管壳式换热器》。

1) 铝及铝合金:

① 设计参数: $p \leq 8\text{MPa}$, $-269^\circ\text{C} \leq T \leq 200^\circ\text{C}$;

② 在低温下, 具有良好的塑性和韧性;

③ 有良好的成型及焊接性能;

④ 铝和空气中的氧迅速生成 Al_2O_3 薄膜, 故在空气和许多化工介质中有着良好的耐腐蚀性。

2) 铜和铜合金:

① 设计参数: $p \leq 35\text{MPa}$;

纯铜: $T \leq 150^\circ\text{C}$, $150^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ 许用应力衰减快;

铜合金: $T \leq 200^\circ\text{C}$, 一般的铜合金在 $200 \sim 250^\circ\text{C}$ 的许用应力衰减快, 但铁白铜的性能稳定, 可用到 250°C 。

- ② 具有良好的导热性能及低温性能;
- ③ 具有良好的成型性能,但焊接性能稍差。

3) 钛和钛合金:

- ① 设计参数: $p \leq 35 \text{ MPa}$, $T \leq 300^\circ\text{C}$;
- ② 密度小(4510 kg/m^3),强度高(相当于 20R);
- ③ 有良好的低温性能,可用到 -269°C ;
- ④ 钛-钢不能焊,且铁离子对钛污染后会使得耐腐蚀性能下降;
- ⑤ 表面光滑,粘附力小,且表面具有不湿润性,特别适用于冷凝;
- ⑥ 钛是具有强钝化倾向的金属,在空气或氧化性和中性水溶液中迅速生成一层稳定的氧化性保护膜,因而具有优异的耐蚀性能。

(4) 换热管材料

1) 钢制无缝管。使用普通级换热管制造的 II 级管束,仅限于碳钢和低合金钢;不锈钢和有色金属采用高精度、较高精度换热管,因此全部为 I 级管束。

2) 奥氏体不锈钢焊管。GB 151—1999 允许使用奥氏体不锈钢焊管作为换热管,但鉴于第一次列入标准,故给予了严格限制:

- ① $p \leq 6.4 \text{ MPa}$ (国外无此限制),目前国内焊管的数据来看,焊接质量都较好,爆破压力都超过计算值,该限制有望提高到 10 MPa ;
- ② 不得用于极度危害介质;
- ③ $\phi = 0.85$ 。

国外各种焊接管用作换热器的很普遍,国内目前继奥氏体不锈钢焊管后,碳钢焊管也有个别企业通过了全国锅炉压力容器标准化技术委员会的认证,允许作换热管使用。

3) 强化传热管。实践证明在蒸发、冷凝、冷却及无相变传热过程中,采用适当的强化传热管,将会起到显著的强化传热的效果;但如果选择不当,反而会适得其反。

一般的强化传热管有螺纹管(整体低翅片管)、波纹管。此外应用较多的还有:

- ① 用于无相变传热:螺旋槽管、横槽管、缩放管、内翅片管及内插入管等。
- ② 适用有相变传热:单面或双面纵槽管、锯齿形翅片管、T形翅片管及表面多孔管等。

3. 防腐

目前换热器防腐有如下几种措施:

(1) 防腐涂层

一般采用非金属涂层,常用的水冷器有防腐、防垢涂料 847 和 901,还有 Ni-P 镀层,但在油气系统使用较多的是涂陶瓷,现场证明效果较好。但由于换热器一般可达 6m 长,在长度上涂层均匀很难做到。如果涂层有一点状缺陷腐蚀将会加剧,所以涂层均匀是控制质量的重要因素。

(2) 金属涂层

一般有镀锌、钛、铜等,工艺效果虽好,但造价昂贵是影响使用的障碍。

(3) 金属堆焊

一般采用碳钢、Cr-Mo 钢堆焊不锈钢较多,用来抗硫化氢酸性腐蚀。该方法造价较低,效果很好,一般化肥、乙烯、炼油中加氢、重整、预加氢使用很多。另外,还有复合板、双向钢