套管式换热器密封结构与设计探析

冯栩迟 [1,2] 杨帆 [3] 魏筱婷 [1,2] 李晓峰 [1,2]
（1 甘肃蓝科石化高新装备股份有限公司 甘肃 兰州 730070；
2 上海蓝滨石化设备有限责任公司 上海 201518；3 上海展恒环保科技有限公司 上海 201620）

摘要：针对典型套管式换热器前端、后端的可拆密封结构进行了介绍；对单可拆、双可拆的前端部密封形式进行了概述，并分别对其设计方法进行了讨论；对壳体异形结构法兰的设计、如何合理设计密封进行了探讨。为典型套管式换热器的密封结构选择提供参考。

关键词：套管式换热器；密封；八角垫；楔形垫；异型法兰

0 引言

换热器是化工、炼油、食品、轻工等行业广泛使用的一种通用设备，其主要作用是使热量由温度较高的流体传递给温度较低的流体，使流体温度达到工艺过程规定的指标，以满足工艺过程上的需要。

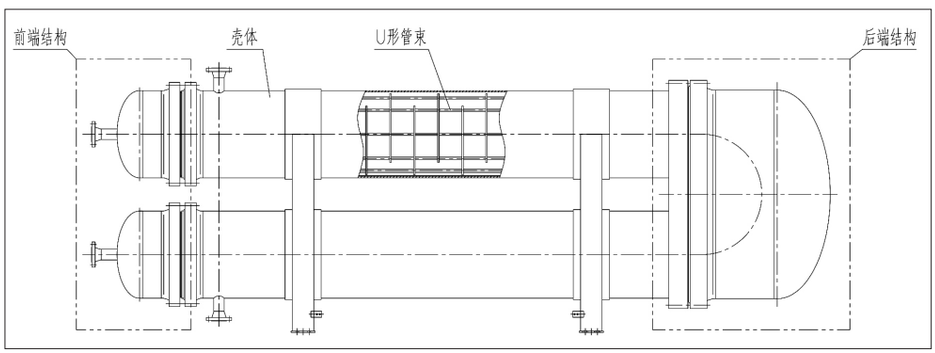

图 1 多套管式换热器结构简图

套管式换热器具有端温差小、维护方便等特点。单套管换热器可以实现多个单独传热单元的组合，灵活变动一台换热设备的换热面积，以满足工艺过程的需要。套管式换热器的结构特征决定了其适用于高温差、高压差、小流量、存在循环工况或严禁管、壳程介质串漏的场合。在介质比较脏的场合，合理地设置前、后端结构，可以实现管束的可抽芯，从而对管束进行拆卸清洗。

套管式换热器的标准有 SH/T 3119-2016《石油化工钢制套管换热器技术规范》和 API STD 663 Hairpin-Type Heat Exchangers。标准中对套管式换热器的结构形式进行了介绍，对于壳体、封头、管板等主要受压元件的设计计算给出相应的标准依据；对于前、后端密封结构及密封元件的尺寸与计算仅给出原则性要求，但未明文给出设计计算方法，产品设计实践中存在不同的技术表现。

1 结构介绍

套管式换热器主要由前端结构、壳体、U 形管束和后端结构四部分组成。前端结构包括上、下管箱，后端结构为封闭 U 形弯管的外套弯管、平盖或封头。管束由单根换热管组成时，为单套管式换热器；管束由多根换热管组成时，为多套管式换热器，又叫发夹式换热器。图 1 为多套管式换热器结构简图。

套管式换热器前端、后端的连接结构形式多样，根据管束是否可抽出可大致分为焊接连接和可拆密封连接。焊接连接类似 GB/T151-2014《热交换器》中固定管板式换热器的管箱、管板连接结构，不做过多介绍，本文分别对典型套管式换热器的前、后端可拆密封结构及其设计方法进行介绍，为套管式换热器密封结构选择及设计提供参考。

2 前端可拆密封结构

套管式换热器的前端可拆密封结构可分为：单可拆密封和双可拆密封；密封元件可分为：八角垫密封和楔形垫密封。

2.1 单可拆密封

单可拆密封即为管、壳程密封使用同一套紧固件、一件密封元件，密封元件可采用八角垫、楔形垫。

2.1.1 八角垫

八角垫密封由管箱法兰、八角垫、分瓣定位环、管板、

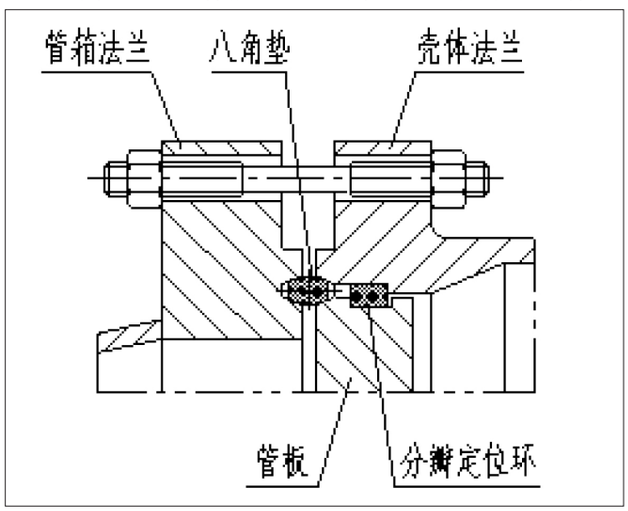

图 2 八角垫密封结构简图

1-17 工业设计 9月下 第27期.indd 9 2022/3/24 9:25:47

壳体法兰构成。图 2 为八角垫密封结构简图。管板被管箱法兰及壳体法兰夹持，管、壳程通过同一个八角垫密封，紧固件共用。管箱法兰密封面上设有梯形槽；壳程法兰端部内壁面加工为 23° 斜切面，管板端部外圆柱面加工为 23° 斜切面，使壳程法兰和管板之间形成一个梯形槽；壳程法兰内壁面加工台阶，管板外圆柱面加工矩形槽，在其间放入分瓣定位环，用于限制壳程法兰与管板之间产生轴向位移，使壳程法兰和管板形成的梯形槽与管箱法兰的梯形槽在紧固件作用下将八角垫压紧。

由于壳程密封面是由壳程法兰和管板两个零件构成，为保证密封可靠性，对密封面、管板矩形槽、分瓣定位环有较高的加工精度要求。八角垫密封结构，由于其垫片中心圆小于设备内径，法兰盘直径也比平面密封的法兰盘小，进而可以缩小上、下壳体的间距，结构相较于楔形垫密封更紧凑。如果管、壳程介质特性差别较大，八角垫作为管、壳程共用的密封元件，其选材应符合较苛刻一侧的要求；同时还应注意另一侧法兰（和管板）与垫片材质的匹配性，如需要，可采用堆焊密封面的方式。

八角垫密封设计方法参照 GB/T 150.3-2011《压力容器》相关要求进行。设计难点为确定垫片的密封载荷和分瓣定位环受力分析。

垫片的密封载荷应考虑内压引起的轴向力、操作状态下的垫片压紧力、预紧状态下的垫片压紧力，其中操作状态下密封载荷为管板轴向力与垫片压紧力之和。

分瓣定位环承受管板矩形槽、壳程法兰台阶的剪切力，以及与管板矩形槽接触面的压应力。剪切力应取内压引起的轴向力与操作状态下的垫片压紧力之和与预紧状态下的垫片压紧力两者的较大值，并分别计算剪切面积以及压紧面面积，以校核分瓣定位环的轴向厚度以及接触面宽度是否满足要求。

2.1.2 楔形垫

楔形垫密封由管箱法兰、平垫片、分瓣定位环、楔形垫片、管板、壳体法兰构成。图 3 为楔形垫密封结构简图。管板被管箱法兰及壳体法兰夹持，管程、壳程密封垫片各自独立，紧固件共用。垫片可根据管壳程介质特性分别选材。

管程采用平垫密封，考虑设备紧凑度，垫片宽度受限，垫片一般选择波齿复合垫或金属平垫。壳程密封采用楔形垫密封，通过紧固螺栓使管板带动分瓣定位环压紧楔形垫，形成线密封条件。楔形垫选用金属材料，与八角垫的密封条件类似，密封设计系数（垫片系数及密封比压）可参照八角垫选取。

壳程密封为径向密封，密封的可靠性与形位尺寸关系密切，因垫片无自紧特性，对管、壳程的温度差异及压力波动较敏感。但考虑锥形结构的自对中特性，对加工精度要求略有降低；两侧密封垫片独立，且型式及密封特性差异较大，但密封结构的紧固件共用，其载荷受苛刻侧控制，对较弱侧密封产生一定影响。

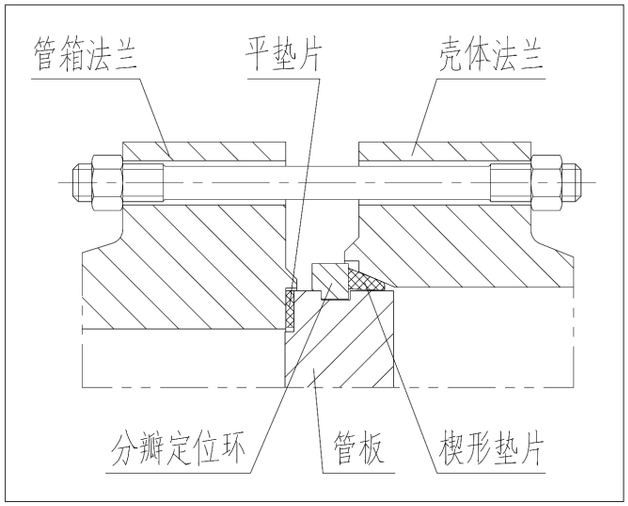

图 3 楔形垫密封结构简图

2.2 双可拆密封

双可拆密封又可以分为单管板双可拆密封和双管板双可拆密封。双可拆密封结构，管、壳程密封完全分离，适用于管、壳程操作条件差异大、存在循环载荷或外密封要求严格的场合。其中双管板结构适用于严禁管壳程介质接触的场合。

双可拆密封相较于单可拆密封多了一对法兰（管板）以及至少一道密封面，因此加工难度和制造成本也随之增高。

2.2.1 单管板双可拆密封

单管板双可拆密封组件由管箱法兰、平垫片、管程侧分瓣定位环、管板、管程活套法兰、套筒、壳程活套法兰、壳程侧分瓣定位环、楔形垫片、壳体法兰构成。图 4 为单

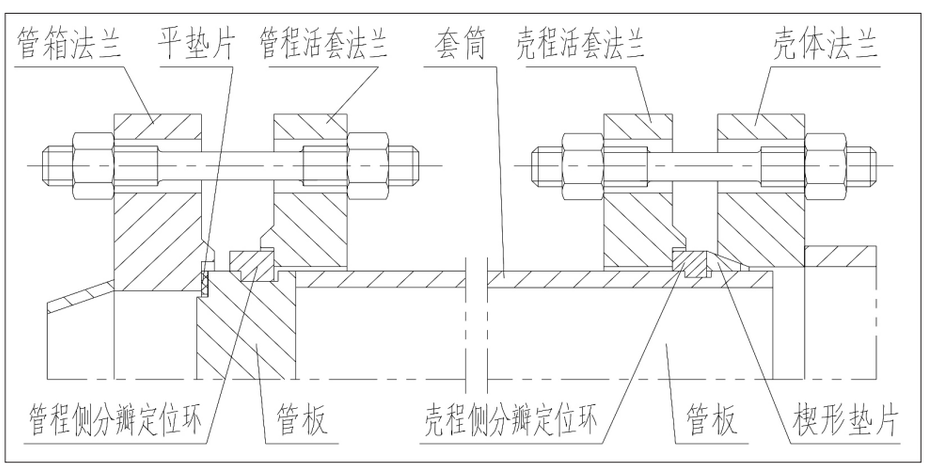

图 4 单管板双可拆密封结构简图

1-17 工业设计 9月下 第27期.indd 10 2022/3/24 9:25:47

管板双可拆密封结构简图。管、壳程密封垫片、紧固件各自独立。单管板双可拆密封结构的密封机理与楔形垫密封相同，是在楔形垫密封结构的基础上增加了一段套筒、两个活套法兰。

2.2.2 双管板双可拆密封

双管板双可拆密封组件由管箱法兰、管程八角垫、管程侧分瓣定位环、前端管板、管程活套法兰、套筒、壳程活套法兰、壳程八角垫、后端管板、壳程侧分瓣定位环、壳体法兰构成。图 5 为双管板双可拆密封结构简图。管、壳程密封垫片、紧固件各自独立。双管板双可拆密封结构的密封机理与八角垫密封相同，是在八角垫密封结构的基础上增加了一段套筒、一个管板、两个活套法兰。

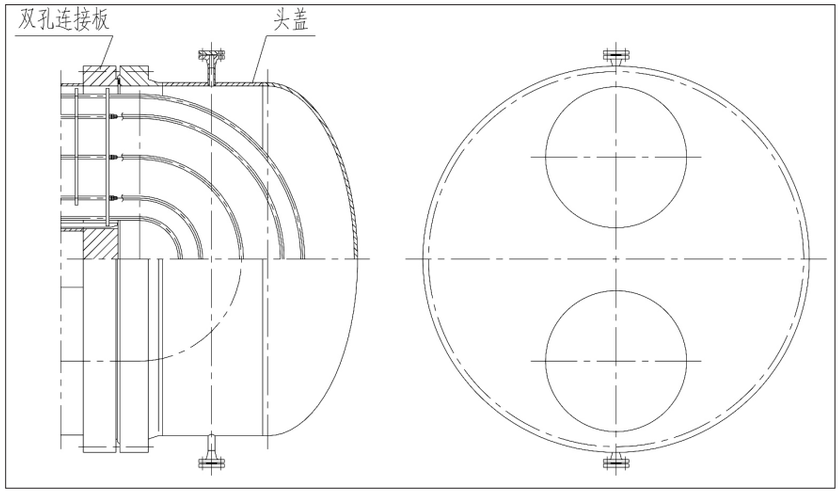

图 6 圆形法兰密封结构简图

2.3 前端可拆密封结构对比

从结构、适用场合、制造难度、经济性等几个方面，对上述四种前端可拆密封结构进行综合对比，如表 1 所示。

3 后端可拆密封结构

套管式换热器的后端可拆密封结构，根据形状可分为：圆形密封和异形密封。

后端法兰密封结构一般由两个部件组成：双孔连接板和头盖。下面主要对圆形法兰密封结构和异型法兰密封结构进行介绍。

表 1 前端可拆密封结构综合对比

密封结构 \ 特点		紧凑度	换热管利用率	适用场合苛刻程度	制造难度	经济性
单可拆密封	八角垫密封	高	高	低	较高	中
	楔形垫密封	较高	高	中	低	低
双可拆密封	单管板双可拆密封	中	低	较高	中	较高
	双管板双可拆密封	低	低	高	高	高

3.1 圆形法兰密封结构

圆形法兰密封结构的双孔连接板和头盖均为正圆形，其密封形式一般为平垫片密封，头盖与浮头式换热器的外头盖相同。双孔连接板用于连接上、下壳体，以及头盖，是套管式换热器中的重要部件。图 6 为圆形法兰密封结构简图。

头盖的公称直径根据上、下壳体内直径和间距确定，可向标准设备法兰公称直径靠拢，方便头盖法兰以及密封垫片的设计和采购。

双孔连接板是套管式换热器后端法兰密封结构的设计重点。首先，一般采用规则设计方法计算平盖厚度，为后续开孔补强或有限元分析计算提供基础参数。

GB/T 150-2011《压力容器》中有两种适用于双孔连接板计算开孔补强的设计方法：

（1）平盖开单个孔，且开孔直径 dop ≤ 0.5Do，采用增加壳体壁厚或平盖壁厚补强；

（2）平盖上开多个孔，采用增加平盖厚度进行补强，该方法适用于：平盖危险径向截面上各开孔宽度总和不超过 Di/2，任意相邻两孔中心距大于两孔的平均直径的 1.5 倍且小于或等于 2 倍。且平盖结构特征系数 K 应考虑开孔削弱，满足 K1/ν ≤ 0.5 时可采用此方法。

对于方法（1）和（2），双孔连接板直径需大于等于 4 倍的上、下壳体外直径。以壳体外径 700 为例，以上 2 种

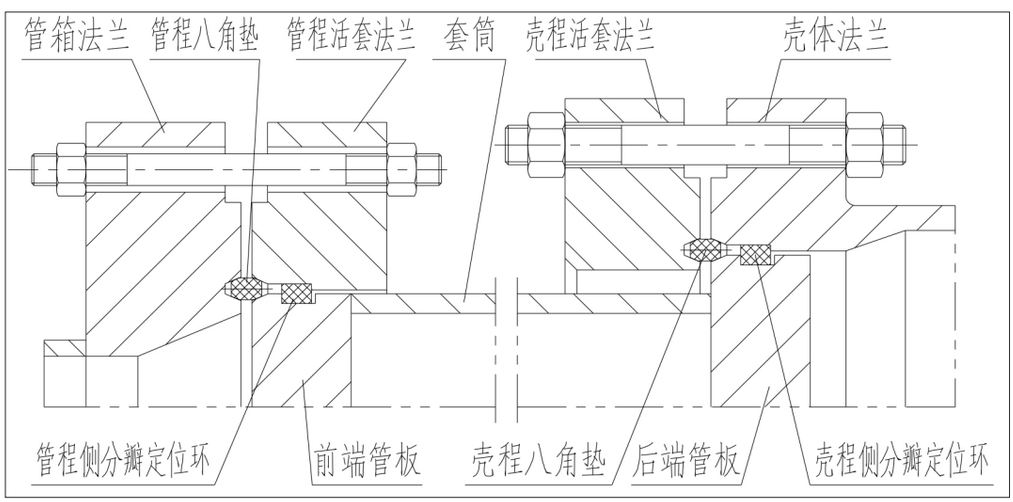

图 5 双管板双可拆密封结构简图

1-17 工业设计 9月下 第27期.indd 11　　2022/3/24 9:25:47

补强方法所适用的双孔平盖直径均应大于或等于 2800；方法（1）所适用的上、下壳体间距应大于或等于 1400，方法（2）所适用的上、下壳体间距应大于 1050 且小于或等于 1400。

满足上述尺寸的双孔连接板以及所配头盖，会导致设备后端重量过重，不仅紧凑度和经济性差，而且设备轴向重量不均，会对支撑产生不利影响。因而对于上、下壳体直径较小的情况，双孔连接板的开孔补强计算可考虑采用 GB/T 150-2011《压力容器》规则设计方法。

对于上、下壳体直径较大的情况，综合考虑经济性、设备整体协调性，双孔连接板通常采用有限元分析计算，双孔连接板直径满足 GB/T 150-2011《压力容器》中螺栓布置的规定即可。采用有限元分析计算时，重点对开孔处补强重叠区域应力水平、开孔距平盖最小距离处的密封性进行评价。

圆形法兰密封结构虽然存在占地面积大、壳程介质流动情况较差等问题，但是由于其计算相对简单、容易制造，仍然是套管式换热器设计最常选用的一种后端可拆密封结构。

3.2 异形法兰密封结构

异形法兰密封结构一般为：长圆形、椭圆形和矩形。图 7 为矩形法兰密封结构简图。

异形头盖法兰可根据 HG/T 20582-2020《钢制化工容器强度计算规范》进行设计计算。异形头盖的筒体可根据 GB/T 150.3-2011《压力容器》附录 A 进行设计计算。

异形双孔连接板在满足适用条件的情况下，可采用本文 3.1 条所述的方法（1）或有限元分析计算开孔补强。

异形头盖的筒体和封头可由平板及弯头焊接、椭圆形封头拼焊、平板焊接、或整体锻制等方式制成。

异形法兰密封结构提高了设备整体的紧凑度，结构更加合理，改善了壳程介质流动情况，且经济性相较于圆形法兰密封结构经济性提升，适用于场地空间有限或流速要求高的场合。

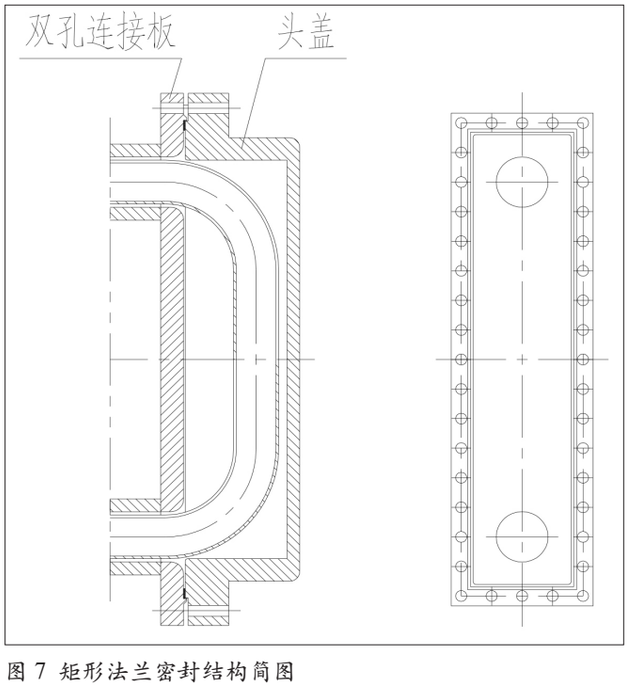

图 7 矩形法兰密封结构简图

3.3 后端可拆密封结构对比

从结构、计算难度、制造难度、经济性等几个方面，对上述两种后端可拆密封结构进行综合对比，如表 2 所示。

表 2 后端可拆密封结构综合对比

特点 / 密封结构	紧凑度	介质流动情况	计算难度	制造难度	经济性
圆形法兰密封	低	漏流	低	低	低
异形法兰密封	高	充分接触	高	高	高

4 结语

套管式换热器的前端、后端密封结构各有利弊，设计者可根据设备实际操作条件、性能要求、空间限制等因素综合考虑，进行前端、后端密封结构的排列组合，选择合适的结构。然后根据密封特征，进行设计计算以确定结构尺寸。

参考文献：

[1] 郑津洋，董其伍，桑芝富 . 过程设备设计 [M]. 北京：化学工业出版社 ,2010:229.

[2] 张铁钢 . 多套管式换热器的设计探讨 [J].2010 年全国石油化工设备、机泵、搅拌年会论文集 ,2010:16-19.

[3] 兰州石油机械研究所主编 . 换热器（第二版）[M]. 北京：中国石化出版社 ,2013：546.

[4]SH/T3119-2016, 石油化工钢制套管换热器技术规范 [S]. 北京：中国石化出版社 ,2016.

[5]API STD 663,Hairpin-Type Heat Exchangers[S].

[6]GB/T151-2014, 热交换器 [S]. 北京：中国标准出版社 ,2015.

[7] 丁伯民，黄正林，等 . 化工设备设计全书高压容器 [M]. 北京：化学工业出版社 ,2002:116-117.

[8]GB/T 150-2011, 压力容器 [S]. 北京：中国标准出版社 ,2012.

[9]GB/T 150-2011, 压力容器标准释义 [S]. 北京：新华出版社 ,2012.

[10] 付平，常德功，等 . 密封设计手册 [M]. 北京：化学工业出版社 ,2009:215-216.

[11]JB 4732-1995, 钢制压力容器－分析设计标准 (2005)[S]. 北京：新华出版社 ,2007.

[12] 丁伯民，黄正林，等 . 化工设备设计全书化工容器 [M]. 北京：化学工业出版社 ,2002:124.

[13] 匡良明，罗展慧，甘望星 .ASME 法兰刚度与转角关系的验证及转角极限的确定 [J]. 化工设备与管道 ,2018,55(1):20-24.

[14]HG/T 20582-2020, 钢制化工容器强度计算规范 [S]. 北京：北京科学技术出版社 ,2021.

[15] 赵国栋，张型波，马一鸣，等 . 一种异形承压元件强度的有限元计算 [J]. 石油化工设备 ,2015,44(4):53-56.

作者简介：冯栩迟（1989-），女，汉族，辽宁锦州人，工程师，学士，研究方向：压力容器设计研发。

1-17 工业设计 9月下 第27期.indd 12 2022/3/24 9:25:47