

高压容器的密封优化设计分析

楚文麒

(内蒙古工业大学 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要:设计快开门式密封结构,能够简化高压容器的启闭操作,但需考虑结构密封失效问题。在对高压容器密封结构展开分析的基础上,对采用卡箍联接方式的快开门高压容器密封结构设计问题进行了探讨,提出了双O形圈密封结构优化设计方案,通过材料特性分析、建模分析确定结构密封性能。经过试验验证,设计的密封结构可以达到容器的使用要求,为同类产品设计提供参考。

关键词:高压容器;密封优化设计;快开密封结构

0 引言

在各种高压容器中,密封结构为核心部件,设计效果将直接影响容器整体性能。因为一旦密封结构失效,无法保持受力状态,就会导致容器泄漏,给容器使用带来安全威胁。为保证高压容器制造达到高质量、高标准要求,需要从密封结构着手研究其内部形态、材质等条件,通过优化设计提高容器密封性能,保证容器使用的安全性和耐久性。

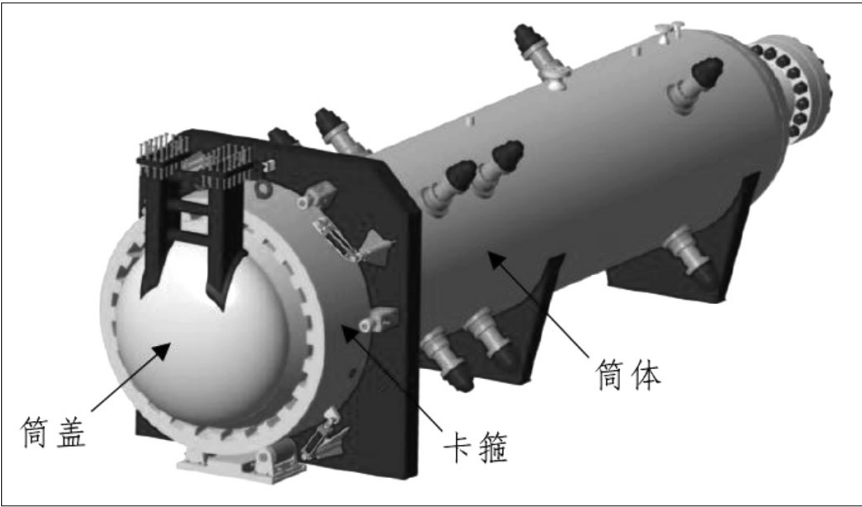
1 高压容器密封结构分析

高压容器属于封闭系统,但可以通过连接口排放内部气、液、固体或接入外部各种物质。针对连接口位置,需要设计密封结构保证容器密闭性、可靠性、安全性。从原理上来看,可以将密封结构划分为静密封和动密封。其中,静密封是在不同部件结合位置布置密封材料,通过施加压力使材料变形,将结构缝隙填满,使接触区域形成密封效果,避免容器内部微小颗粒和气体等泄漏,防止内部物质与外界直接接触。设计静密封,对材料提出了较高要求,应确保其弹塑性、伸展性等各项性能良好,在大压力下发生物理变形的同时,不会受到过多磨损。设计动密封,多指油膜密封,能够用于接触面存在相对或绝对运动的情况。根据胡克定律,接触面承受压力越大,接触材料摩擦阻力越大,将造成机械结构无法正常动作。通过添加润滑油等油液,使接触材料间形成油膜,隔绝内外环境,达到密封目的。在高压容器中,可以采用多种密封结构,如O形圈密封、C形环密封、平垫片等,属于内部密封元件,外部密封结构多采用主螺栓联接、螺纹联接、卡箍式联接等。密封结构通常占高压容器总重量的10%~30%,制造成本在15%~40%范围内,需要结合容器结构特点和设计条件选择适合的密封元件和锁紧结构,确保可以满足容器设计要求。

2 高压容器密封设计问题

近年来,快开门高压容器凭借操作流畅、启闭操作效率高等优势应用广泛,但图1某压力筒结构示意图

该类容器结构设计强调操作安全性,需合理选择密封形式,完成密封性能深入分析,保证设计的密封结构合理、可靠。图1为某压力筒结构示意图,容器设计压力为30MPa,最高操作压力为35MPa,液压试验压力达到43MPa,属于高压容器。容器端部采用卡箍式结构,结构相对简单,但在筒体内径达到 $\Phi 2000\text{mm}$ 的情况下,需要逐一打开或拧紧用于联接的移动卡扣装置,造成容器启闭操作较为繁琐。而选择快开门法兰密封形式,在容器设计压力较高的情况下,容易引发泄漏风险。根据以往设计经验可知,快开门密封多采用O形圈,在泄漏通道位置增加密封元件避免泄漏问题发生。在安装金属密封垫片前,在筒盖径向位置设计与O形圈匹配的沟槽结构,可以依靠橡胶圈自带预压缩量使结构保持密封效果。但实际密封效果与密封间隙、材料参数、预压缩率、接触压力等多项因素相关。如密封间隙较大,将导致密封元件在内压作用下出现从间隙中挤出的情况,引发间隙咬伤问题,造成结构失效。密封直径较大,静密封可能与动密封发生扭曲,导致密封失效。此外,面向内压和密封压缩量,O形圈回弹能力将逐步下降,引发永久变形问题。而在卡箍式快开门容器中,密封间隙相对较低,因此需要重点分析其他因素给密封效果带来的影响,通过优化设计避免出现结构失效情况。



3 高压容器的密封优化设计

3.1 结构优化设计

在高压容器中安装 O 形圈，主要可以采用两种方式，一是在使密封件受径向压力实现预压，二是受径向和轴向两方压力完成预压。预压过程均在零载荷下进行，结合实际操作条件需要选择第二种安装方式。综合考虑卡箍等配件加工和装配问题，可知密封间隙约 2.5mm，结合以往设计经验可知，底部密封槽和筒体内部件存在介质通道，密封圈靠近筒体一侧将与介质直接接触，确保密封圈底部与筒体内部介质压力相同。在工作状态下，密封结构将出现两个密封面，一是矩形外表面和密封槽外壁构成的密封面，二是密封圈和矩形上表面、筒盖法兰接触构成的密封面。

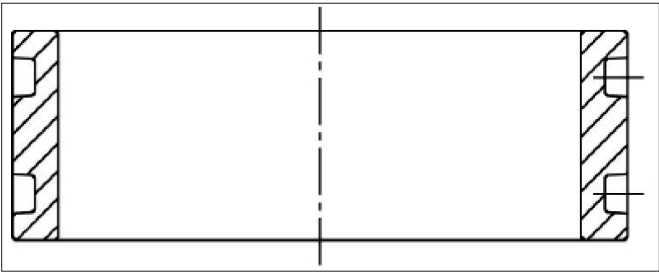


图 2 双 O 形圈密封结构

为保证密封效果，需要采用双 O 形圈结构（如图 2 所示），通过在顶盖和筒体端部间布置密封元件，借助金属密封环凹槽内垫圈挤压变形获得上下封口的初始密封。采用该种自紧式结构，具有较强的自适应性，能够在容器压力增大时加强与外壁的贴合，达到自紧密封效果。此外，该结构安装无需预紧载荷，并且拆卸简单，能够满足快开门压力容器使用需求。但在实际使用过程中，考虑到密封间隙的压力较低，尽管密封圈不会因介质作用失稳，但承受过大的径向压力依然可能出现材料挤出问题，因此需进一步分析结构密封性能。

3.2 材料特性分析

作为聚合物材料，橡胶具有非线性，对温度、载荷率等相对敏感，可能出现蠕变、应力松弛等效应。考虑到材料力学行为复杂，但普遍具有高弹性，假设材料在恒温状态下能够保持变形过程可逆，因此可以利用超弹性本构模型对材料应力张量展开分析。结合橡胶材料压缩性等特性，可以使用双参数 Mooney-Rivlin 模型解决单轴拉伸试验数据不准的问题，确保分析结果达到较高拟合度和计算精度。通过对材料进行预分析，确定设计工况下密封圈最大应变达到 96%。筒体内介质以水和压缩空气为主，常规在 20℃ 条件下操作，决定选用丁腈橡胶作为 O 形圈的材料。在压力较高的情况下，为避免密封圈在间隙中挤出，要求达到 70 ~ 80 硬度。对材料开

展拉伸试验，能够通过有限元分析完成 Rivlin 系数拟合，获得材料弹性模量，准确反映材料真实力学性能。通过反复分析可知，丁腈橡胶在温度达到 70℃ 时拉伸强度不足的 50%，弹性模量大幅降低。但按照容器设计参数，最大温度不超 50℃，所以不会因材料软化出现挤出问题，引发密封圈回弹、卡死等现象。利用本构模型展开分析可以得到 Rivlin 系数 C10 为 1.7MPa，C01 为 -0.002MPa，可知材料在常温下弹性模量达到 11MPa。

3.3 密封性能分析

针对端部法兰 1s 位移载荷中，进行 0.4 ~ 0.65s 预密封。在压缩率分别达到 12%、17%、22% 和 24% 时，根据最大应力曲线可以确认最大应力峰值分别达到 4.3、6.3、8.6 和 10.6MPa（如图 3 所示）。从理论上讲，密封圈压缩率仅要求不超 30%，但实际在达到 24% 时已经出现剪切问题。因为随着压缩率的增加，沟槽的接触长度逐渐增加，在压缩率达到 12% 时为 5mm，在 17% 时为 5.8mm，增长幅度不大。但在 22% 的条件下，沟槽接触长度已经达到 7mm，达到 24% 时增加至 7.2mm。而沟槽接触长达到 7mm，意味着存在沟槽充填率过大的问题，受内压加载作用，容易导致结构出现永久变形，严重影响密封件的使用寿命。而压缩率不超 20%，可以依靠筒盖开关位置的过渡倾角缓解剪切作用，避免密封圈被剪切。考虑到容器加工过程中可能出现倒角过小等问题，可以将压缩率设定为 12%，有效预防应力剪切问题的出现。

对密封圈的密封性能展开分析，需要考虑到在高压状态下密封圈反复开启时不会受到机械损伤，保证结构耐久性达到要求。按照工作压力 35MPa 展开数值分析，对不同压缩率条件下结构接触压力展开分析。为确定双 O 形圈密封结构有效性，可以同时单 O 形圈密封结构进行建模

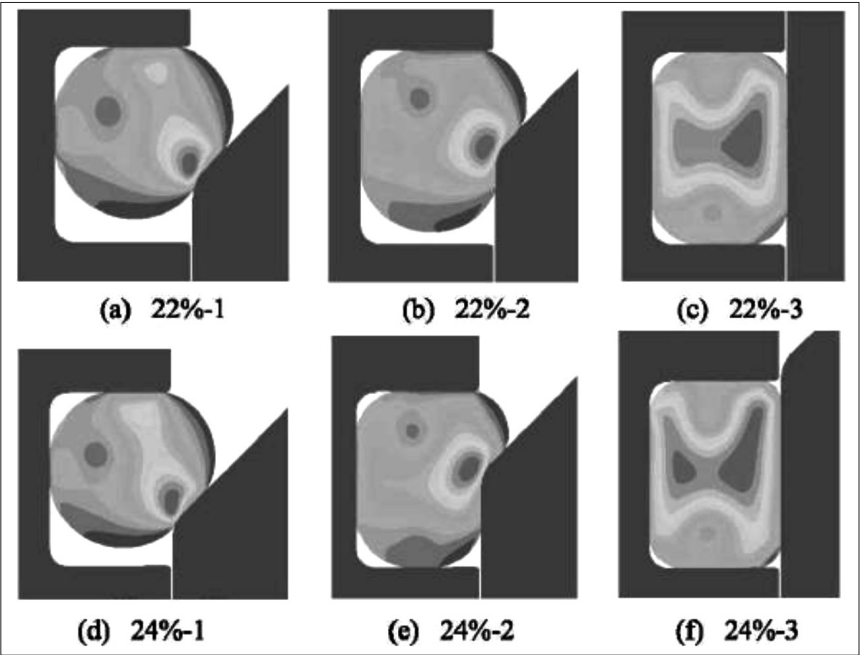


图 3 22% 和 24% 压缩率条件下密封圈密封过程

分析,对不同结构接触压力展开分析(如下表所示)。无论采用哪种密封结构,随着压缩率增加,最大接触压力均有所增加。而相较于单 O 形圈,双 O 形圈的最大接触压力更大,峰值均超出最大内压 35MPa。单从接触压力上来看,采用单 O 形圈也可以满足密封性能要求。但在操作实践中,受操作因素、接触面摩擦不理想等各种因素的影响,可能导致结构出现轻微损伤。

表 不同密封结构最大接触压力比较 (MPa)

压缩率	12%	17%	22%	24%
单 O 形圈	36.7	41.2	47.6	55.1
双 O 形圈	43.5	50.8	54.1	60.8

对两种密封结构进行分析,可以发现单 O 形圈的内部应力呈现出“Y”型分布,在沟槽位置的最大应力区域不对称。但是双 O 形圈内部应力呈现出“X”形,可以保证壁面接触均匀。从接触长度来看,在 12% 的压缩率下,双 O 形圈接触长为 5mm,单 O 形圈达到了 6.2mm。因此,在双向开关的形式下,接触面压力分布不均可能引发剪切现象。考虑到快开门式高压容器需要反复开关,为避免因应力不均匀分布导致局部位置变形过大,影响密封结构使用寿命,应使用双 O 形圈密封件,在保证结构弹性足够的同时,发挥结构自适应优势,做到与沟槽较好配合。

3.4 密封效果验证

根据密封结构优化设计方案制造小型试验容器,开展液压试压确认结构密封性能和承压效果。结合容器相关设计标准,使用 10Mn II 材质制作筒盖、筒体等结构,内部介质为水,采用密封环材为 S31603,垫圈外径较之密封面内径略大 1.0mm。在开展试验期间,需要先固定筒体结构,然后安装 O 形圈和筒盖,在排气口位置设置压力表测定和指示压力值。完成主体结构安装后,需要安装卡箍、防跳螺栓等配件,然后分步加载,每次加 5MPa,达到设定压力值后维持 1 ~ ~2min,之后继续升压。达到试验压力 43MPa 后,保压 15min,确认期间是否出现压力下降情

况,并确认容器外表面是否发生异常。考虑到容器为快开门式,需要反复开、闭密封结构,完成多次液压试验。在重复试验过程中,发现筒盖环状通道位置出现小凹坑,结束试验后对内壁进行观察,确认不存在其他异常变形,同时容器未出现泄漏问题,判断变形与容器材质相关。反复试验后,凹坑并未变化,容器无泄漏问题,说明密封结构可满足多次使用要求。从试验结果来看,采用双 O 形圈适用于快开门式高压容器,能保证结构内部应力分布均匀,在双向开关过程中不存在剪切问题,同时可以提供较大的接触压力,确保密封结构安全、可靠。

4 结语

在高压容器研制领域,密封技术仍然有待提高和优化,确保密封产品达到更高使用寿命和结构安全性。结合高压容器发展趋势,针对快开门式压力容器,需要结合密封形式做好密封结构设计,在强化材料特性分析的基础上,通过建模分析和试验确保结构密封性能良好,保证提出的结构优化设计方案的有效性,为容器的安全使用提供可靠保障。

参考文献:

[1] 倪永良,王海范,崔琴.用于大直径高压容器的卡块连接紧固结构[J].化工机械,2021,48(02):155-159.

[2] 禹新鹏,邓晓山,陈学虎,等.某高压容器不锈钢锥螺纹密封改进[J].机械工程师,2021(04):106-107.

[3] 孙雅丽.高压容器筒体端部及顶盖结构的分析研究[D].东北石油大学,2020.

[4] 沈啸彪.卡箍式高压自紧式法兰密封性能的研究[D].华东理工大学,2020.

[5] 朱金花,戴兴旺,危书涛,等.新型快开抗剪钢球密封结构研制[J].液压气动与密封,2020,40(01):81-83.

[6] 倪永良,刘干.采用主螺栓连接的高压容器极限设计压力分析[J].石油和化工设备,2019,22(12):5-8.

作者简介: 楚文麒,男,汉族,甘肃武威人,本科,研究方向: 机械工程。

