

新型快开式高压容器顶盖密封结构原理和强度分析

张云肖 陈 平 钱才富*

(北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

摘 要: 针对现有高压容器顶盖密封结构存在的结构笨重、装拆不便等问题, 设计了一种新型快开式高压容器顶盖密封结构。将顶盖置于端部法兰内部并平齐, 由 D 形抗剪螺栓连接二者, 采用具有自紧作用的 C 形环作密封元件。只需将 D 形螺栓旋转大约 90° , 即可实现顶盖与端部法兰的装拆, 具有装拆迅速、质量轻、螺纹不易“咬死”等特点。本文对该密封结构的关键部件进行了强度分析, 可为其工程应用在设计上提供理论依据。该结构在需要频繁装拆的各种高压、超高压容器的密封装置上应用前景广大。

关键词: D 形抗剪螺栓; C 形环; 高压密封

中图分类号: TQ053.2

传统主螺栓或大螺纹套筒等连接方式在石油、化工、核能等工业的高压容器顶盖密封装置上应用广泛, 但存在结构笨重、装拆困难等问题^[1]。针对此不足, 设计开发了 D 形轴向抗剪螺栓连接结构^[2-4], 这是一种新型高压容器顶盖密封法兰连接装置。该装置能实现容器顶盖的快速装拆, 同时具有结构部件制造方便、重量轻、密封可靠和适用范围广等特点。为此, 就 D 形螺栓连接 C 形环高压密封装置进行结构设计及关键部件进行强度分析, 目的是为其工程应用提供理论依据。

1 结构设计及原理

D 形螺栓连接 C 形环高压密封装置如图 1 所示。

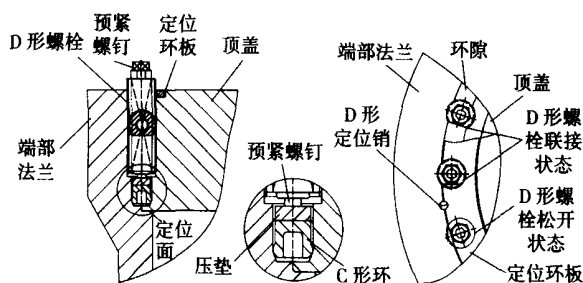


图 1 D 形螺栓连接 C 形环高压密封装置

Fig. 1 High-pressure sealing structure connected with D-shape bolts

示。将顶盖置于端部法兰内部并平齐, 在顶盖与端部法兰之间的环隙中均布“偏心”安装的 D 形螺栓^[2], 即 D 形螺栓的连接螺孔有 $1/4$ 圈加工在端部法兰上, 其余在顶盖上。顶盖与端部法兰之间应留有环隙, 以方便 C 形环和压垫的安装。定位环将 D 形螺栓固定于顶盖上, 其上的螺纹孔需与顶盖和端部法兰上的螺纹孔一次性定位加工。在介质内压作用下, C 形环有一定的自紧密封作用, 而预紧螺钉可以单独调节压紧力, 从而实现密封可调。

安装之前将顶盖上的所有 D 形螺栓调整为图 1 所示的松开状态, 然后将顶盖组件 (包括顶盖、定位环固定的 D 形螺栓及预紧螺钉、C 形环及压垫) 装入端部法兰腔内, 进行轴向定位和周向定位后, 旋转所有 D 形螺栓约 90° , 便可将顶盖与端部法兰连接上; 拆卸时, 只需将 D 形螺栓反向旋转约 90° , 即可将顶盖组件从端部法兰内取出。从而实现容器顶盖的快速装拆。

2 结构强度分析及设计

2.1 力学简化模型

上述密封装置的主要受力部件有: C 形环、D 形螺栓、端部法兰和顶盖。C 形环主要受到密封力 F 及压垫压紧力 N 作用, 图 2 所示为 C 形环力学模型。

D 形螺栓主要在两侧螺纹处受到方向相反的剪切力作用, 以及底部由预紧螺钉传递的密封反力 N_1 和由此产生的摩擦力 F_1 。上述力的综合作用形成了螺栓的倾覆力矩, 为平衡这一力矩, 在两侧螺纹上

收稿日期: 2004-10-11

基金项目: 北京化工大学青年教师科研基金 (QN10272020)

第一作者: 女, 1973 年生, 博士生

*通讯联系人

E-mail: qiancf@mail.buct.edu.cn

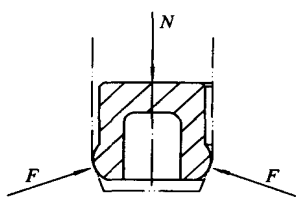


图2 C形环力学模型

Fig. 2 Mechanical model of C ring

作用着能形成反向力矩的正向线性分布压力 $q_1(x)$ 和 $q_2(x)$ 。为简化力学分析,可假设 D 形螺栓两侧螺纹处的剪应力简化为分别作用在各自截面形心处的集中力 Q_1 和 Q_2 。D 形抗剪螺栓的力学模型如图 3 所示。

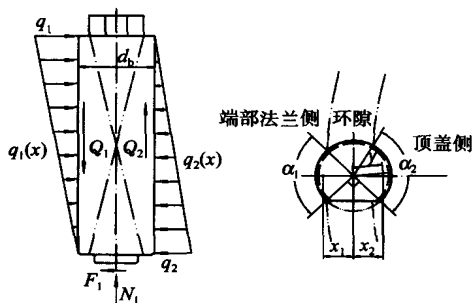


图3 D形螺栓力学模型

Fig. 3 Mechanical model of D-shape bolt

端部法兰内壁螺纹受到 D 形螺栓传递的剪力 Q 和正向线性分布压力 $q(x)$ 作用,由于 D 形螺栓数量较多,可按轴对称问题处理,即切应力和正向分布压力沿内壁周向均布,端部法兰的力学模型如图 4 所示。

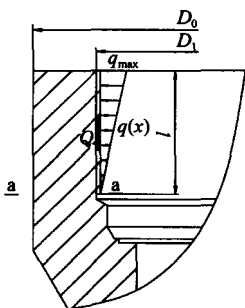


图4 端部法兰力学模型

Fig. 4 Mechanical model of end flange

2.2 强度设计

2.2.1 D形螺栓连接的强度设计 端部法兰内壁螺纹受到的切应力来自于介质内压产生的轴向力 Q_0 以及 C 形环预紧密封力的轴向分力 F_a 。

$$Q = Q_0 + F_a = \frac{1}{4} D_G^2 \cdot p + D_G \cdot q_0 \frac{\sin(\frac{\alpha}{2})}{\cos \alpha}$$

式中 D_G 为 C 形环外侧线密封接触处直径; q_0 为线密封比压,一般取 200 ~ 300 N/mm; α 为端部法兰密封面与垂直方向夹角; μ 为 C 形环与端部法兰密封面摩擦角; p 为容器设计内压。

作用在 D 形螺栓端部法兰侧的切应力

$$Q_1 = \frac{Q}{n} = \frac{Q_0 + F_a}{n}$$

因为轴向受力平衡,可知作用在顶盖侧的切应力

$$Q_2 = Q_1 - N_1 = \frac{Q_0 - F_a}{n}$$

因此,D 形螺栓端部法兰侧螺纹表面均布切应力是

$$\tau_1 = \frac{Q_1}{\frac{1}{2} d_b l} = \frac{4(Q_0 + F_a)}{d_b l \cdot n}$$

D 形螺栓顶盖侧螺纹表面均布切应力是

$$\tau_2 = \frac{Q_2}{\frac{1}{2} d_b l} = \frac{2(Q_0 - F_a)}{d_b l \cdot n}$$

式中: d_b 为 D 形抗剪螺栓的公称直径; α_1 为 D 形抗剪螺栓与端部法兰的螺纹实际啮合弧度, $\alpha_1 = \alpha/2$; α_2 为 D 形抗剪螺栓与顶盖的螺纹实际啮合弧度; l 为 D 形抗剪螺栓的实际啮合长度; n 为 D 形抗剪螺栓数量。

D 形螺栓两侧连接处需满足的强度条件是

$$\tau_1 \leq [\tau]_1 \text{ 和 } \tau_2 \leq [\tau]_2$$

式中: $[\tau]_1$ 、 $[\tau]_2$ 分别为连接处,即端部法兰和顶盖与螺栓的连接,在设计温度下两侧材料的许用切应力的较小值。推荐取材料抗拉许用应力 $[\sigma]$ 的 0.577 倍。

2.2.2 端部法兰的强度设计 D 形螺栓两侧螺纹受到的集中力 Q_1 和 Q_2 的形心位置见图 3,分别为

$$x_1 = \frac{\sin \frac{\alpha_1}{2}}{1} d_b, \quad y = \frac{\sin \frac{\alpha_2}{2}}{2} d_b$$

y 在连接方向的投影是

$$x_2 = y \cos \left(\frac{\alpha_2}{2} - \frac{\alpha_1}{4} \right) = \frac{\sin \frac{\alpha_2}{2} \cos \left(\frac{\alpha_2}{2} - \frac{\alpha_1}{4} \right)}{2} d_b$$

对螺栓列写水平方向的力平衡方程及对底部中心取矩,可解得线性分布压力 $q_1(x)$ 和 $q_2(x)$ 的最大值,即 q_1 和 q_2 。

$$q_1 = \left[\frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{\sin \frac{\alpha_2}{2} \cos \left(\frac{\alpha_2}{2} - \frac{\alpha_1}{4} \right)}{2} \right] \frac{6 d_b Q_0}{l^2 n} - \left[4f + \right]$$

$$\left[\frac{\sin \frac{\alpha}{2} \cos \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\pi}{4} \right)}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \right] \frac{6 d_b}{l} \frac{F_a}{l n}$$

$$q_2 = q_1 - \frac{4 f F_a}{l n}$$

式中 f 为预紧螺钉与压垫之间的摩擦因数。

由此可知,作用在端部法兰内圆周单位长度上的分布压力 $q(x)$ 的最大值是

$$q_{\max} = \frac{q_1 n}{D_f}$$

端部法兰可简化成半无限长弹性基础梁,其强度计算类似于 GB 150 - 1998《钢制压力容器》有关卡扎里密封^[5],其危险截面位于图 4 的 a - a 截面,可分别计算由 Q 引起的最大弯曲应力 $\frac{Q}{\sigma_{\max}}$ 和轴向拉应力 $\frac{Q}{\sigma_z}$,以及 $q(x)$ 引起的弯曲应力 $\frac{q}{\sigma_{\max}}$ 三者的叠加,其中 $\frac{q}{\sigma_{\max}}$ 的计算参考文献[2]。

因此,端部法兰 a - a 截面应满足的强度条件是: $\frac{Q}{\sigma_{\max}} + \frac{Q}{\sigma_z} + \frac{q}{\sigma_{\max}} \leq 0.9 [\sigma]'$

对于 $q(x)$ 引起的环向应力 σ_q ,可按偏于保守的厚壁圆筒在 q_{\max} 作用下的应力计算

$$\sigma_q = \frac{q_{\max} (D_o^2 + D_f^2)}{(D_o^2 - D_f^2)} [\sigma]'$$

式中 D_o 为端部法兰外径; D_f 为端部法兰内径; $[\sigma]'$ 为端部法兰材料在设计温度下的许用应力。

顶盖可以是平盖,也可以是半球形等凸形封头,可按照 GB 150 - 1998 的有关规定计算。C 形环也

有类似的选形和设计(限于篇幅不做详细讨论)。

3 结语

以上对快开式 D 形螺栓和 C 形环高压密封装置进行了结构设计,并对关键部件进行了强度分析,可以作为该装置在工程上应用的设计依据。该装置是通过结构本身的合理连接方式实现容器顶盖的快速装拆,无需借助于液压扳手等辅助工具;顶盖置于筒体端部法兰内,可以显著减小顶盖直径和厚度,使得结构整体十分紧凑,质量得以减轻;该结构的加工也很方便。因此,在化工、能源等工程中的高压和超高压容器密封装置上有很大的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 郑津洋,徐平,匡继勇,等. 高压密封装置技术进展[J]. 化工设备设计, 1994, 31(2): 7 - 13
- [2] 陈平,钱才富. 新型高压密封 D 形轴向抗剪螺栓连接技术[J]. 压力容器, 2003, 20(4): 14 - 16
- [3] Chen Ping. A new flange shearing bolted connection closure design for pressure vessels[C]. Grafisches Zentrum an der Technischen Universität Wien, Vienna: J L Zeman, 2003, 329 - 333
- [4] 陈平. 高压容器用 D 形抗剪螺旋螺栓和 O 形环快速装拆接头[J]. 石油化工设备, 2004, 33(1): 34 - 35
- [5] 全国压力容器标准化技术委员会. GB 150 - 1998 钢制压力容器[S]. 北京:中国标准出版社, 1998

Principle and strength analysis of sealing structure of a new type of quick-opening head for high-pressure vessels

ZHANG Yun-xiao CHEN Ping QIAN Cai-fu

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Considering of these problems such as heavy structure and inconvenient assembly for the existing head sealing structures of high-pressure vessels, a new type of quick-opening and high-pressure sealing structure was proposed. In the new structure, the head is put into and flushed mounting with the end flange, using self-energizing C ring as the sealing component. The head and the end flange are connected with D-shape shearing bolts, and the connection or disconnection of the head with the end flange can be achieved by turning the D-shape shearing bolts about an angle of 90°, making the structure being easy in assembly and disassembly, light in weight and not easily seized in screw. Strength analysis and stress limitation for the key parts were performed, which can supply a theoretical source in design for its engineering application. This structure is suitable for head sealing of high-pressure and ultrahigh pressure vessels, which need frequently assembly and disassembly.

Key words: D-shape shearing bolts; C ring; high-pressure seal

(责任编辑 刘同帅)