

压力管道法兰连接密封实践

贺青奇 吴越 董亮 文勇

摘要 主要通过新疆北疆引水工程三个泉倒虹吸和小洼槽倒虹吸压力管道上安装的伸缩节、阀门、进入孔法兰密封实践,论述怎样确定O型胶圈的压缩比和石棉橡胶垫片法兰螺栓的预紧力矩,以确保两种密封方式的安全有效密封。

关键词 O型胶圈 压缩比 石棉橡胶垫片 预紧力矩

中图分类号 TV34 · **文献标识码** B **文章编号** 1007-6980(2008)03-0029-04

三个泉倒虹吸工程和小洼槽倒虹吸工程是新疆北疆引水工程两个重要一级建筑物,管道最大工作压力分别为1.7 MPa和0.46 MPa,管道直径分别为2.7, 2.8, 3.2 m,单条管道设计流量为17.5 m³/s。为了确保倒虹吸管道的安全运行和放空,无论是以PCCP管和钢管组成的三个泉倒虹吸工程,还是以玻璃钢管道为主的小洼槽倒虹吸管道工程,都安装了许多进排气阀、放空阀以及进入孔等管阀件,它们均采用法兰连接,密封件主要为O型胶圈和石棉橡胶垫片2种,2个倒虹吸共使用了约700余件O型胶圈和石棉橡胶垫片。O型胶圈主要用在22对 $\Phi 700$ mm的人孔盖板和62个 $\Phi 2\ 700$ mm的伸缩节法兰上;石棉橡胶法兰垫片主要用于 $\Phi 300$ mm的84套进排气阀和2套放空系统法兰密封件上(见图1)。

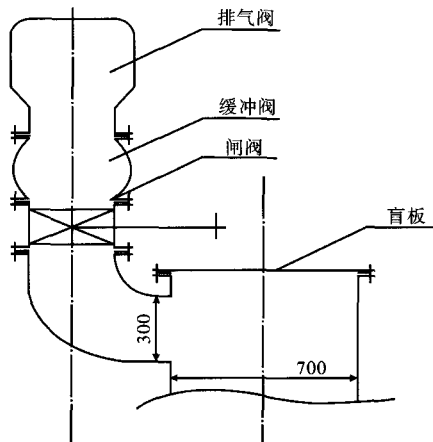


图1 DN300 闸阀法兰连接

石棉橡胶垫片密封面则漏水处较多,有些垫片甚至被破坏,漏水严重。为确保工程安全,2006年4月,建设单位将原使用的石棉橡胶密封垫片全部更换成包边石墨增强垫片,在安装管阀件时,采用电动液压力矩扳手紧固法兰螺栓,以保证每个法兰螺栓的预紧力矩均匀。但由于法兰螺栓预紧力过大,造成部分阀件法兰根部出现了微小裂缝(见图2)。

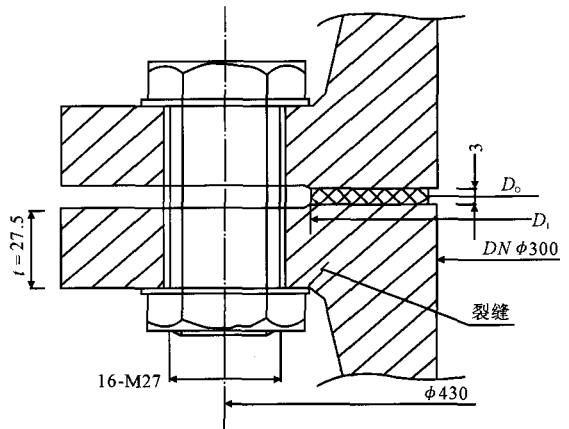


图2 $\Phi 300$ 法兰根部裂缝示意图(单位: mm)

为此,重新对O型胶圈和石棉橡胶垫片两种形式法兰密封件的压缩比、螺栓预紧力、螺栓拧紧方法等进行了分析研究和计算,在计算出螺栓预紧力矩的基础上,又在上海冠龙阀门厂进行密封试验,以求得满足密封的最佳螺栓预紧力矩,密封垫片采用上海石棉制品厂生产的XB450和XB350两种石棉橡胶垫片,并利用液压力矩扳手严格控制预紧力矩,最终取得了较为满意的结果。

1 O型胶密封圈

O型胶圈用在压力管道伸缩节和进入孔盖上,一般采用天然橡胶,其主要物理特性见表1。

2005年10月,北疆引水工程全线通水后,三个泉倒虹吸压力钢管上的62个 $\Phi 2\ 700$ mm伸缩节O型胶圈和22对 $\Phi 700$ mm进入孔盖板法兰O型胶圈无一渗水现象发生。而连接进排气阀 $\Phi 300$ mm法兰石

表1 O型胶密封圈物理性能表

项目	特性值
抗拉强度	$\sigma_B = 13 \sim 22 \text{ MPa}$
延伸率	$\lambda = 400\% \sim 500\%$
压缩弹模	$E = 5.5 \sim 7 \text{ MPa}$
含胶量(新胶)	$> 60\%$
工作温度	$-60 \sim +60 \text{ }^\circ\text{C}$ 不发生冻裂或硬化

O型胶圈断面直径 d ，须根据封水断面直径 D_0 而确定。

1.1 O型胶圈在沟槽内应满足的条件

当O型胶圈直径 d 确定后，其沟槽断面至关重要，并应满足3个条件(见图3)。

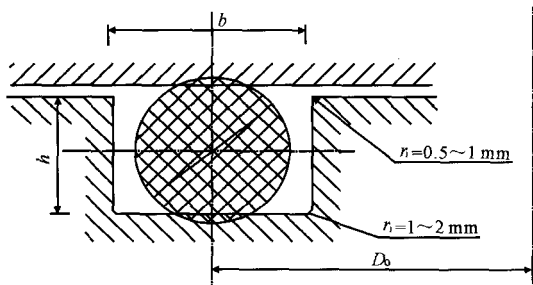


图3 O型密封圈沟槽尺寸

1.1.1 压缩比

$$\epsilon = \frac{d - h}{d} \times 100\% \quad (1)$$

式中 d ——O型胶圈压缩前直径；

h ——O型胶圈压缩后高度。

压缩比 ϵ 如过小，则密封性差；如过大，则其使用寿命短。为此，应在保证密封前提下， ϵ 以小为好。根据国际标准化组织(ISO)规定： $\epsilon = 10\% \sim 30\%$ ，并且 d 越小， ϵ 越大，当 $d \geq 5 \text{ mm}$ 时 $\epsilon = 10\% \sim 20\%$ 。在现有设计手册中提到法兰静密封用 ϵ 值一般为 $15 \sim 25\%$ 。

1.1.2 面积比

对O型胶圈断面和沟槽断面进行比较，一般应满足：

$$0.85bh \leq \frac{\pi d^2}{4} < bh \quad (2)$$

式中 b ——沟槽宽度(见图2)。

即O型胶圈断面应小于沟槽断面，但应大于0.85倍的沟槽断面。

1.1.3 光洁度

对沟槽的光洁度要求不低于6.3，并应倒圆角，以免橡皮变形后在尖角处受损坏。胶圈应在制造厂模压后整体出厂。

1.2 O型胶圈密封实践

(1) 压力管道人孔盖板 $\Phi 700 \text{ mm}$ ， $P_n = 1.7 \text{ MPa}$ ，原采用O型胶圈直径 $d = 9 \text{ mm}$ ，沟槽断面 $b \times h = 12 \text{ mm} \times 7.3 \text{ mm}$ ，则其压缩比 $\epsilon = 19\%$ 。不能满足不等式(2)要求，O型胶圈断面积小于沟槽断面积的0.85倍，当倒虹吸管道运行时进入人孔盖板发生漏水现象。由于沟槽已加工，不宜更改，只能将O型胶圈直径增大至 $d = 10 \text{ mm}$ ，则其压缩比为 $\epsilon = 27\%$ 。经修改后已满足上述不等式(2)的要求，其密封性可靠。

(2) 伸缩节在出厂时均作过水压试验，在伸缩节的法兰连接上共有O型胶圈248件， $\Phi 2700 \text{ mm}$ ， $P_n = 1.7 \text{ MPa}$ ，O型胶圈直径 $d = 24 \text{ mm}$ ，原沟槽断面 $b \times h = 28 \text{ mm} \times 14 \text{ mm} = 392 \text{ mm}^2$ ，沟槽断面偏小，但未压到底，如压缩 $\delta = 6 \text{ mm}$ ，则压缩比 $\epsilon = 25\%$ ，大量漏水。如压缩 $\delta = 7 \sim 8 \text{ mm}$ ，则 $\epsilon = 29.1\% \sim 33.3\%$ ，密封较好。考虑到压缩比过大，将沟槽断面修改为 $b \times h = 30 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$ ，基本满足上述不等式(2)的要求，压缩率控制为 $\epsilon = 30\%$ ，经过几年的通水无渗漏现象发生。

1.3 几点探讨

(1) 对上述两处O型胶圈的工厂试压和倒虹吸通水实践考验，达到了密封要求，但其压缩比要比ISO和国内有关设计手册规定的值大得多，由于长期过量压缩，将会使橡皮失去了弹性，容易老化，以致影响橡皮的寿命，对此问题尚需进一步研究。

(2) 对大管径，宜研究采用自封式密封结构的可能性，有二种形式可供探讨。

1) 采用楔形沟槽，当受水压后，O型胶圈在楔形区如有漏水，压力降低，内水压力将O型胶圈外推，并越压越紧(见图4)。

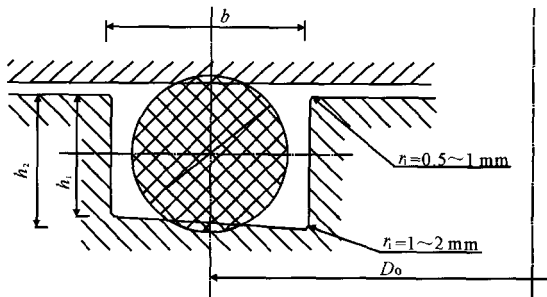


图4 自封式O型圈沟槽

2) 采用V型胶圈，这种胶圈能满足上述公式(1)、(2)的要求，并靠内水压张开，考虑到为防止

开始低压时漏水, 在制造 V 型胶圈模型时, 应使之预张开 t 值。这种胶圈必须模压, 不允许在橡胶挤压成条形断面后再胶接的制造工艺(见图5)。

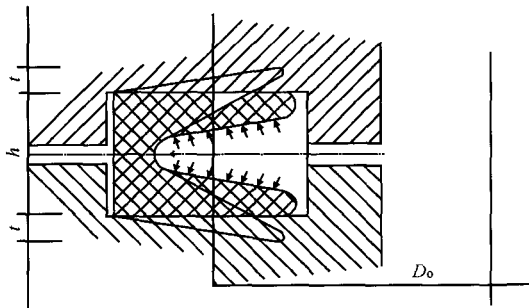


图5 自封式 V 型圈沟槽

(3) O 型胶圈的螺栓预紧力

由于橡胶弹性模量小, 欲使 O 型胶圈压至设定的压缩比, 其螺栓预紧力亦较小, 还是针对上述二例断面进行计算。

1) 人孔盖板 $\Phi 10$ mm 的 O 型胶圈

为便于计算, 假设 O 型胶圈在沟槽内未受侧向压力(沟槽断面大于 O 型胶圈断面), 并假设其断面为矩形断面, 其高为 $h = d = 10$ mm, 其等面积宽为 $b_0 = \frac{\pi d}{4} = 7.85$ mm, 并根据上述计算其压缩比为 $\epsilon = 27\%$, 则需要总的压缩作用力为:

$$P_1 = E_r \epsilon b_0 \pi D_0 \quad (3)$$

式中 E_r ——橡胶弹性模量, $E_r = 6$ MPa;

D_0 ——O 型胶圈大直径(见图2)。

通过计算, $P_1 = 29\ 165$ N, 人孔盖有 16 个 M30 螺栓, 则每个螺栓所受预紧力为 $P_1 = 1\ 822$ N, 每个螺栓的预紧力矩:

$$T = KP_1 d \quad (4)$$

式中 K ——预紧力矩系数, 对粗牙螺纹通常在 0.18~0.21 范围内, 取 $K = 0.2$;

d ——螺栓公称直径, $d = 30$ mm。

计算后得 $T = 10\ 930$ N·mm = 11 N·m

受水压力后每个螺栓的作用力为:

$$P_2 = P_n \cdot \pi D_0^2 4n \quad (5)$$

式中 P_n ——管内设计压力, $P_n = 1.7$ MPa;

n ——螺栓数量, $n = 16$ 个。

计算后得 $P_2 = 44\ 470$ N, 由此可知螺栓所受水压力远大于预紧力, $P_2 > P_1$ 。

$$\text{螺栓受水压后的伸长量 } \Delta \ell = \frac{4P_2 \ell}{E_s \pi d_0^2} \quad (6)$$

式中 ℓ ——螺栓受拉长度, 取 $\ell = 120$ mm;

E_s ——钢的弹性模量, $E_s = 2.1 \times 10^5$ MPa;

d_0 ——螺栓直径, $d_0 = 30$ mm。

代入后得 $\Delta \ell = 0.036$ m, 比 O 型胶圈的压缩量 $d - h = 2.7$ mm 要小得很多, 远在橡胶回弹以内, 不致影响其密封性。对于螺栓和法兰管的强度, 经计算是足够的, 不在此进行计算。

2) 伸缩节上的 $\Phi 24$ mm 的 O 型胶圈

根据上式(3)计算, 并代入 $\epsilon = 30\%$, $b_0 = \frac{\pi \times 24}{4}$, $D_0 = 3\ 054$ mm, 得 $P = 325\ 400$ N, 共有 64 个 M36 螺栓, 每个螺栓 $P_1 = 5\ 084$ N, 根据上式(4), 其预紧力矩为 $T = 36\ 600$ N·mm = 36.6 N·m。

由于本伸缩节不承受全断面轴向力, 而仅受部分圆环面积的轴向力和摩擦力, 所受力不大, 不再进行细算。

2 法兰垫片

本工程所用法兰密封垫片主要是用于 $\Phi 300$ mm ($P_n = 1.0$ MPa, $P_n = 1.6$ MPa, $P_n = 2.5$ MPa) 和 $\Phi 400$ mm ($P_n = 1.0$ MPa) 的进排气阀上。法兰垫片的密封可靠性与法兰螺栓预紧力大小、紧固螺栓顺序、密封垫片材质和法兰配合面的沟槽等因素有关。特别是对法兰螺栓预紧力的大小计算要慎重, 重要管阀件的安装要通过试验来获得最小预紧力和预紧力矩, 以达到最佳效果。

2.1 石棉橡胶垫片

石棉橡胶板是由 60%~80% 的石棉与 10%~20% 的橡胶(质量比)为主要成分, 加入填充剂、硫化剂压制成板状, 其耐热、耐寒、耐化学腐蚀性能相对好, 却价格便宜。经裁制后石棉橡胶板用作法兰垫片是常用的管道密封垫片。但需根据使用条件进行择优选用以调准配比和制作工艺。2005 年 10 月本工程试通水时, 进排气阀法兰连接处漏水严重, 甚至有部分垫片被高压水切断后沿半径方向将碎片冲了出来。经分析, 一致认为其主要原因与预紧力矩的大小、垫片质量等有关。本工程选用上海石棉制品厂生产的石棉橡胶板, 主要性能见(表2)。

2.2 预紧力和预紧力矩计算

2.2.1 预紧力

$$P = \frac{1}{n} \cdot \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_0^2) Y \quad (7)$$

式中 n ——法兰上螺栓的数量;

D_1 ——垫片有效密封外径;

D_0 ——垫片有效密封内径;

表 2 石棉橡胶板主要性能表

型号	XB450	XB350
表面颜色	紫	红
适用温度/℃	450	350
适用应力/MPa	6	4
横向抗拉强度/MPa	≥ 19	≥ 12
预紧比压/MPa	23	23
回弹率/%	45	45
密度/(g·cm ⁻³)	1.6~2	1.6~2
柔软性	无裂缝	无裂缝
老化系数	0.9	0.9
缩率/%	12±5	12±5

Y——垫片预紧比压(xp450石棉橡胶垫片预紧比压为23 MPa)。

2.2.2 预紧力矩

$$T = KPd \tag{8}$$

式中 k ——垫片系数,一般取 0.2;

P ——预紧力;

d ——螺栓直径。

由(1)式和(2)式计算出不同管道压强(不同螺栓个数、直径)的理论预紧力和预紧力矩,见表 3。

表 3 预紧力、预紧力矩表

管径/mm	压强/MPa	螺栓个数/个	螺栓直径/cm	预紧力/N	预紧力矩/(N·m)	试验时不漏水最小预紧力矩/(N·m)	最后拧紧力矩/(N·m)
Φ300	2.5	16	2.7	43 926	237.2	200	250
Φ300	1.6	16	2.4	43 926	210.8	150	180
Φ300	1.0	16	2.0	43 926	175.7	80	120
Φ400	1.0	16	2.0	53 912	215.6	100	120

2.2.3 分析

根据计算和分析,理论计算出的预紧力矩与实验得出的最小预紧力矩有所差距,一般试验值小于理论计算值 20 % 以上,而实际最后的拧紧力矩一般大于试验值的 20 %。经分析影响这些数据变化的原因很多,因为上述计算是从理想的条件出发的,在实际连接中,影响预紧力矩的因素很多,如螺栓与螺母的制造质量、法兰刚度、螺母与螺栓及法兰接触面的润滑情况、操作条件、螺栓上紧顺序等,尤其是垫片的材质、加工质量影响最大,因此,在实际应用时,要结合实际条件应用预紧力矩。

力矩,在理论条件下计算出后,应进行水压预紧力矩试验,以确定最佳预紧力矩的大小。发现有漏水现象不能单纯认为是上得不紧而多次上紧,结果造成螺栓受力过大而失效或者把各类阀门法兰根部拉裂,在这方面本工程教训是沉重的。

(3) 除了确定最佳的预紧力矩外,预紧螺栓力矩的控制和顺序也很重要。为了使每只螺栓的预紧力矩均匀,本工程专门购置了 1 台德国产的液压扭力矩扳手,误差率可控制在 3 % 以内,取得了较好的效果。建议今后在重要的管道法兰连接和阀门连接中,使用液压力矩扳手。

3 实践与体会

通过三个泉倒虹吸和小洼槽倒虹吸压力管道上各类阀门法兰连接密封实践,有以下几点体会。

(1) O 型胶圈密封性优于法兰垫片,其优点为密封性能好,螺栓预紧力要比石棉橡胶垫片预紧力小得多,但压缩比宜比手册上规定的大 10 % 左右,即由 $\epsilon = 20 \%$,提高至 $\epsilon = 30 \%$ 左右,为此应对橡胶的特性作进一步试验研究,并建议采用自封式密封结构。

(2) 在实践中常用的石棉橡胶法兰垫片预紧力

作者简介

- 贺青奇 男 高 工 新疆额尔齐斯河流域开发工程建设管理局 新疆乌鲁木齐 830000
- 吴 越 女 工程师 中水北方勘测设计研究有限责任公司 天津 300222
- 董 亮 男 助 工 新疆额尔齐斯河流域开发工程建设管理局 新疆乌鲁木齐 830000
- 文 勇 男 工程师 新疆额尔齐斯河流域开发工程建设管理局 新疆乌鲁木齐 830000

(收稿日期 2008-06-24)

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告