

管道球阀密封原理研究与泄漏分析

赵永丽 张磊庆 吕昊 闫波 (国家管网山东运维中心济宁作业区, 山东 济宁 272508)

摘要: 本文针对目前石油化工和天然气管道输送行业应用最多的管道球阀进行分析研究, 从各种密封的结构入手, 分析了不同厂家、不同形式密封结构的球阀密封原理以及阀门密封在工作中的受力情况, 提出了管道球阀选型建议, 分析了泄漏原因和泄漏处理措施。

关键词: 球阀; 密封机理; 泄漏; 研究

1 引言

管道球阀是用于流体控制的主要设备, 在石油化工、天然气管道输送以及液体管道输配等行业应用非常广泛。仅在西气东输管道、冀宁联络线管道、中俄东线管道上就使用了上万只管道球阀。但是, 全国每年由于阀门泄漏导致的停产、抢修、大量石油、天然气泄漏或放空以及其他人民生命财产损失逾数亿元。阀门泄漏问题也是石油天然气、化工行业主要的安全隐患之一。

2 管道球阀构造

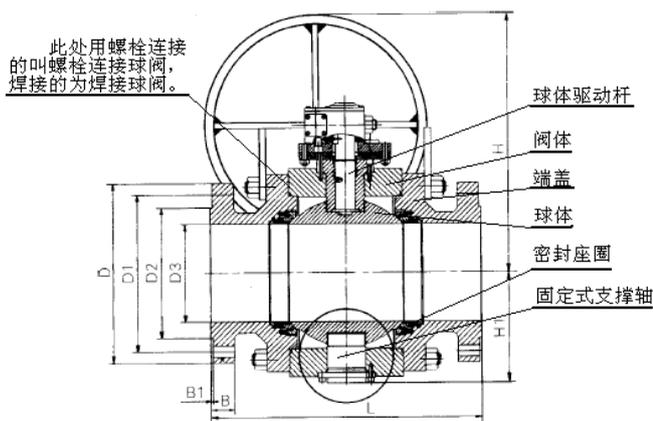


图1 固定球管道球阀结构示意图

管道球阀外观结构非常简单, 一般由一个锻造(根据压力等级和用户要求可以采用铸造)形成的阀体、经精密抛光处理的球体、两个用于定位密封座圈的端盖(也叫密封座圈座)、两个密封座圈、一个球体驱动杆和一个固定式支撑轴以及其他附件组成(见图1)。按阀门与管道的连接形式分为法兰连接和焊接连接两种; 按阀端盖和阀体的连接形式分为螺栓连接球阀和焊接球阀。这种将阀端盖和阀体焊接在一起的阀门密封座密封损坏后很难更换维修, 但由于可靠性非常高, 达到规定开关操作次数即更换整个阀门。CAMERON

T31、T32、T33即为这种整体焊接型阀门, 在国内管道应用较少。

3 管道球阀经典密封原理

12"以上的管道球阀多采用球体用固定轴支撑和弹簧加载的浮动密封座圈结构, 利用“活塞效应”在关闭压差的作用下, 保持严密密封的结构原理。“活塞效应”和弹簧加载的浮动座圈密封结构, 可以在较大的温度和压差范围使密封座圈始终与球体保持紧密贴合, 达到零泄漏的密封效果。另外, 固定球、浮动阀座结构还有利于在最大压差情况下有较小的操作扭矩, 分别分析如下:

3.1 密封原理

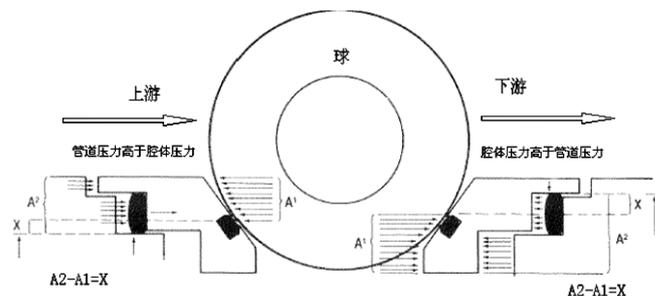


图2 活塞效应密封原理

从上图可以看到, 这个“活塞效应”使管道介质压力作用在面积不同的环面上, 浮动密封座上承受的作用力大于反作用力, 从而产生一个正向压差(密封紧贴于球体)X。正是这个压差确保了上下游密封座圈都始终紧贴在球体两边, 实现了双向控制流体介质泄漏的目的。

3.2 最小操作扭矩原理

密封与球体贴紧力的大小取决于受力环面的面积差X的大小和加载弹簧的刚度, 在设计时需要综合考虑可靠密封和最大操作扭矩的关系。这也是为什么不同制造商生产的同规格阀门操作扭矩和密封可靠性差别很大的主要原因。

固定球阀的球体用固定轴支撑，消除了因单侧操作压力使球体与密封座之间产生的很大的密封负荷；球体支撑轴经精密加工，具有高光洁度，并配以具有自润滑材料的衬套（也可以叫做轴瓦），有效地减小了摩擦阻力。基于以上结构原理，固定球阀即使在单侧受压的情况下也有最小的操作扭矩。但是，由于机械加工精度和装配质量问题，支撑轴与衬套的材料选择原因，对操作扭矩的影响非常大。

3.3 不同厂家的管道球阀比较

3.3.1 GROVE B 系列管道球阀

GROVE S.p.A 是一个著名的流体控制设备制造商，在美国、意大利和其他欧洲国家有制造工厂，在世界各地都有销售分部。由于其产品的高可靠性，在石油、天然气和化工等领域有广泛应用。现介绍其密封结构原理。

上文 2 中描述的经典密封原理即是 GROVE B 系列球阀的基本原理，而密封座圈的实际结构比原理图所示的要复杂一些。密封座圈实际上是由两个环状零件组合在一起的，这种组合结构便于在密封圈损坏或失效时更换。根据不同的应用场合，在密封座圈上安放不同的 O 形软密封圈。其中主密封圈的截面不一定是 O 形，而是近似三角形的，这有利于对密封圈的固定。另外，几乎所有的 12" 以上的管道球阀都设置了用于紧急密封的密封剂注射口，其作用是在主密封圈有轻微划伤等损坏而不能密封的情况下，能采取临时的紧急补救措施。

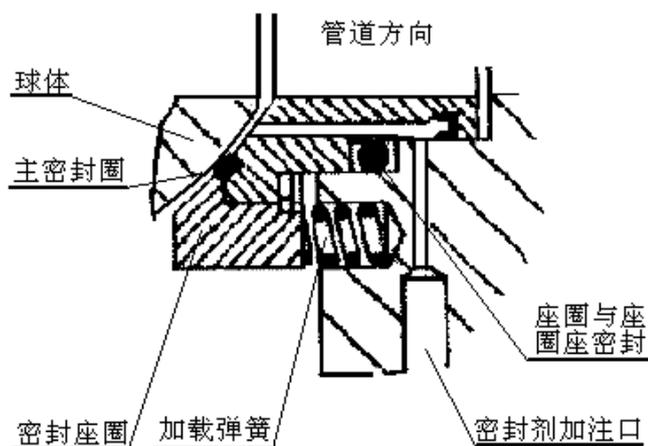


图 3 密封结构示意图

图 3 是 GROVE B8 球阀的密封结构。阀门在安装时如果管道清扫不干净，如果有沙砾或者焊渣通过球体和密封座圈之间的缝隙进入到主密封圈处，在使用

过程中就有可能使密封损坏或者球体表面划伤，导致不能完全密封而出现泄漏。

3.3.2 CAMERON 管道球阀

CAMERON 管道球阀在密封结构设计上有其独到之处，尽管原理都是一样，但是所使用的软密封具有止回阀的功能；加载弹簧使用的是板形弹簧。CAMERON 管道球阀密封同样应用“活塞效应”，通过在密封座圈不同环面面积上建立不平衡力，这个不平衡力始终让密封与球体保持贴紧（密封负荷），阻止了流体介质泄漏。

3.3.3 上海耐莱斯·詹姆斯伯雷 G 系列固定球阀

上海耐莱斯·詹姆斯伯雷是一家合资公司，主要生产球阀和驱动装置，是西气东输管道工程球阀的国内供应商，其生产的 G 系列球阀在国内其他管道上也有较多使用。

上海耐莱斯·詹姆斯伯雷生产的 G 系列管道球阀密封原理与 GROVE 相同，同样应用了“活塞效应”，但在密封结构设计上略有不同。其中 G 系列 K 型球阀的密封结构设计几乎与 GROVE B 型球阀完全相同。

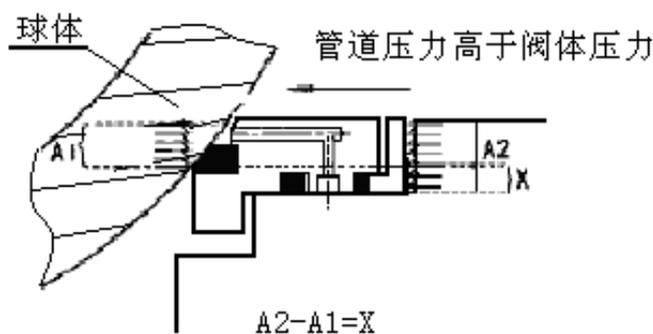


图 4-1

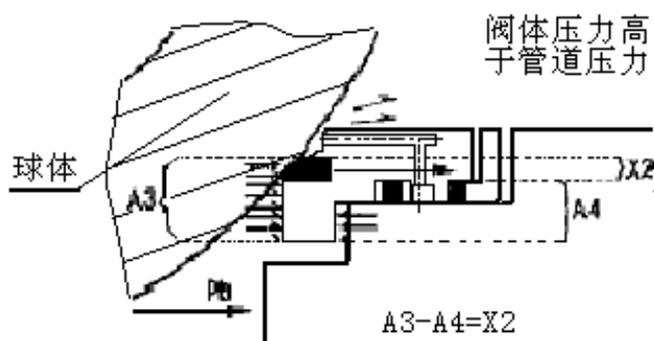


图 4-2

图 4 所示的是上海耐莱斯 G 系列（非 K 型）管道

球阀的密封原理图。它是标准的上游密封球阀，先分析阀门上游侧密封座圈的受力情形，见图 4-1。A2 大于 A1，密封压差为 X，密封座圈在压差 X 和负载弹簧的共同作用下，密封紧紧贴合在球体上，从而实现无气泡泄漏密封。再分析下游侧密封座圈的受力情形，见图 4-2。A3-A4=X2，这样如果压差 X2 大于加载弹簧的压力，密封座圈将会离开球体，这时腔体介质向下游泄漏。

从以上分析可以看出，该型阀门密封结构的优点是当阀腔压力增高时可以向下游泄放，不至于在阀腔建立高压而产生一定危险。但是其泄漏概率是 GROVE 球阀的 2 倍。因为其始终是阀门上游侧起密封作用，如果上游侧密封损坏，该阀门必定泄漏无疑。这也就是上海耐莱斯·詹姆斯伯雷管道球阀在西气东输管道上的泄漏率比 GROVE 球阀泄漏率高 50% 以上的根本原因。因为一旦上游密封损坏，阀体压力不断增高，下游密封即失去密封功能。下面再分析 G 系列 K 型阀门的密封结构，它将不会出现上述情况。它采用了和 GROVE 几乎完全一样的双向密封原理。

在阀门上游，密封座圈正向受力面积 A2 大于反作用力面积 A1，则总的密封负荷为： $X1+$ 加载弹簧的张力，在这个合力的作用下，密封紧紧贴合在球体上，从而达到无气泡泄漏的目的。

在阀门下游，如果阀体压力为 P，密封座圈正向受力面积 A4 仍然大于反向受力面积 A3，则密封负荷为： $X2+$ 加载弹簧的张力。这就是说在下游侧，阀体压力高于管道压力时仍然可以使密封紧紧贴合在球体上，实现无泄漏密封。

综上所述，上海耐莱斯 G 系列 K 型管道球阀阀门比 G 系列的其他阀门有较好的密封可靠性，用户应根据使用场合不同合理选型。否则，将会影响生产安全。笔者建议在施工安装质量难以控制，安装中不可避免地存在沙砾等异物的场合，尽可能地选择双向密封结构的管道球阀，其可靠性比单向密封的管道球阀高 50%。

4 结论

通过对不同生产厂家制造的固定球管道球阀的结构原理分析研究，发现其密封原理都相同，均应用了“活塞效应”原理，只是根据不同应用场合的需要，制造了不同密封结构的管道球阀。尽管原理都一样，但实际制造的产品质量各不相同。本文提到上述厂家都是在国内外阀门制造行业中享有一定声誉，在相关

市场中占有一席之地的阀门制造商。根据近几年各用户的反馈信息，进口阀门可靠性还是显著高于国产阀门（当然价格也昂贵），主要原因是各制造商对阀门零部件的选材不同，机械加工水平不同。

阀门在生产运用中存在的主要问题是不同程度、不同形式的泄漏，根据密封结构原理和安装施工质量分析，造成阀门泄漏的原因及判断处置方法如下：

4.1 阀门安装施工质量是主要原因

在安装施工中不注意阀门密封面和密封座圈的保护，密封面受到损伤；安装完工后，对管道及阀腔吹扫不彻底、不干净，在操作中有焊渣或沙砾卡于球体与密封座圈之间，导致密封失败。出现这种情况，紧急时可以采取在上游密封面注射适量的密封剂临时措施，缓解泄漏，但不能彻底解决问题。必要时从管道上拆下来更换密封。

4.2 阀门机械加工、密封圈材质和装配质量原因

阀门结构虽然简单，但是一个对机械加工质量要求较高的机械产品，其加工质量直接影响密封性能。密封座圈与圈座的装配间隙和各个环面面积要经过精确计算，表面粗糙度要合适。另外，软密封圈材料的选取也非常重要，不仅要考虑耐腐蚀和耐磨性，还应考虑其弹性和刚度。如果太软会影响自洁能力，太硬则容易断裂。

4.3 根据应用场合和工况合理选型

不同密封性能和密封结构的阀门使用场合不同，只有在不同的场合选用不同的阀门，才能达到理想的应用效果。以西气东输管道为例，应尽可能地选择具有双向密封功能的固定球管道球阀（强制密封的轨道球阀除外，因为其价格更贵）。这样，一旦上游密封损坏，下游密封仍可起作用。如果要求绝对可靠的场合，应选择强制密封的轨道球阀。

4.4 不同密封结构的阀门，应用不同的操作、维护和保养方法

对于不存在泄漏的阀门可以在每次操作前后或每 6 个月在阀杆和密封剂注射口少量地加注一些润滑脂，只有当已经存在泄漏或不能完全密封的情况下才注射适量的密封剂。因为密封剂的粘度很大，如果平常在没出现泄漏的阀门上也加注密封剂，就会影响球面自洁效果，往往适得其反，将一些小的沙砾等污物带入密封之间造成泄漏。对于具有双向密封功能的阀门，如果现场安全条件许可，应将阀腔中的压力泄放为零，有利于更好地保证密封。