doi:10.3969/j.issn.1005－0329.2025.02.013

三偏心蝶阀密封原理分析及优化设计

余晓光,周位伟,刘诗梅,周　枭,蒋永兵,郝娇山
(重庆川仪调节阀有限公司,重庆 400707)

摘　要:为了提升整体式阀座结构三偏心全金属蝶阀的密封性能,针对不同结构形式的三偏心蝶阀的密封面压痕和变形情况,通过离散化方法对三偏心全金属蝶阀的密封圈单层单元的应力和变形进行分析计算,并对密封结构进行了改进和试验验证。结果表明,三偏心蝶阀在关闭时,密封圈沿流道方向的每个截面单元受到作用力的大小和方向都不同,在大端面位置,密封圈截面单元受到的最大合应力为9.145 MPa,且方向向下,在小端面处,最大合应力为6.482 MPa,方向向上;经过改进的金属多层密封圈,其受到相同扭力作用时变形量增大了15.4%~27.7%,更有利于阀座和密封圈的密封面贴合形成密封区间;利用特殊设计的密封圈结构和装配工艺,可以使金属多层密封圈实现自动调整,进一步提高密封性能,使三偏心全金属蝶阀既可以具有良好的密封性能,又具有较长的使用寿命。研究可为高性能三偏心全金属蝶阀的设计提供参考。

关键词:三偏心蝶阀;全金属密封圈;金属多层密封圈;优化设计
中图分类号:TH134;TB42　　**文献标志码:**A

Analysis and optimization design of sealing principle for triple offset butterfly valve

YU Xiaoguang, ZHOU Weiwei, LIU Shimei, ZHOU Xiao, JIANG Yongbing, HAO Jiaoshan
(Chongqing Chuanyi Control Valve Co., Ltd., Chongqing 400707, China)

Abstract: In order to improve the sealing performance of the triple eccentric all-metal butterfly valve with an integral valve seat structure, the sealing ring single-layer unit of the triple eccentric all-metal butterfly valve was analyzed through a discretization method based on the sealing surface indentation and deformation of the triple eccentric butterfly valve with different structural forms. The stress and deformation were analyzed and calculated, and the sealing structure was improved and verified experimentally. The results showed that when the triple offset butterfly valve was closed, the magnitude and direction of the force acting on each cross-sectional unit of the sealing ring along the flow channel direction were different. At the large end face position, the maximum closing stress acting on the sealing ring cross-sectional unit was 9.145 MPa, and the direction was downward. At the small end face position, the maximum closing stress was 6.482 MPa, and the direction was upward; The optimized metal multi-layer sealing ring has increased the deformation of the sealing ring by 15.4%~27.7% when subjected to the same torque, which is more conducive to forming a sealing zone between the sealing surface of the valve seat and the sealing ring; In addition, by utilizing a specially designed sealing ring structure and assembly process, the metal multi-layer sealing ring can be automatically adjusted, further improving the sealing performance. This enables the triple offset all metal butterfly valve to have both good sealing performance and a long service life. The research can provide reference for the design of high-performance triple eccentric all metal butterfly valves.

Key words: triple offset butterfly valve; all-metal sealing ring; multi-layer metal sealing ring; optimization design

0　引言

三偏心蝶阀相比中线蝶阀、双偏心蝶阀,除了结构简单、体积小、成本低、安装方便等优点外,3个偏心参数的提出解决了蝶阀在关闭过程中干涉的问题,使蝶阀的密封副可以完全采用金属硬密封的形式,大大提高了蝶阀的使用温度和压力范围。目前,三偏心蝶阀可以替代闸阀和球阀等,广泛用于石油化工、冶金、电力等各种复杂管道系统中,起到切断和调节流量的双重作用[1-3]。

随着三偏心蝶阀的应用越来越广泛,其缺点也逐渐凸显出来,国外先进蝶阀生产厂家对其进

收稿日期: 2024－03－14　**修回日期:** 2024－10－23
基金项目: 国家科技重大专项(2019ZX06002026－005)

行了不同的优化，如 VELAN 公司的 torqseal 系列三偏心蝶阀升级到 torqseal 2.0，OHL 公司提出三偏心蝶阀的 plus 版，以提高性能、满足更加严苛的工况。然而，国内虽然对三偏心蝶阀的研究也不断增多[4-6]；但是由于对其密封原理没有深入了解，无法对仍然存在的密封问题进行有效的优化改进，在对蝶阀的稳定性和密封性有更高要求的核电、航天等关键设备，还未达到使用要求[7]，使得国内生产的三偏心蝶阀的性能与国外差距仍然较大。

本文通过对三偏心蝶阀在使用过程中密封面压痕的研究，提出对全金属密封圈离散化分析的方法。利用仿真分析模型，分析对比全金属密封圈和金属多层密封圈在关闭时的应力和变形情况，进一步对金属多层密封圈的装配方法进行优化，使一体式阀座结构的三偏心蝶阀具有多重密封的效果，从而显著提高蝶阀的密封性能。从实用的角度对三偏心蝶阀进行性能优化，具有很高的市场应用价值。

1 三偏心蝶阀的结构原理

三偏心蝶阀的密封副可以看作两平行截面在圆锥上斜切所得的部分，其 3 个偏心为：蝶板的旋转中心相对于蝶板平面的轴向偏心1、旋转中心相对于流道中心的径向偏心2 和圆锥轴线相对于流道中心线的角度偏心3。其中，密封圈和阀座的角度偏心相同，3 个偏心如图 1[8]所示。

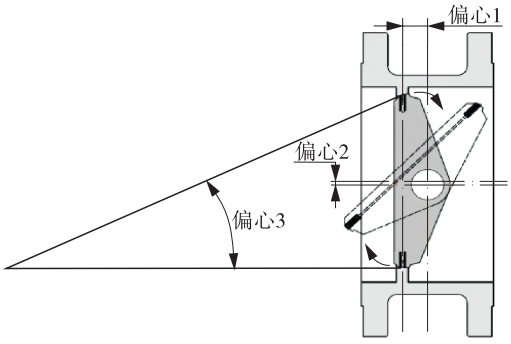


图 1 三偏心蝶阀的偏心结构示意

Fig.1 The eccentric structure of the triple offset butterfly valve

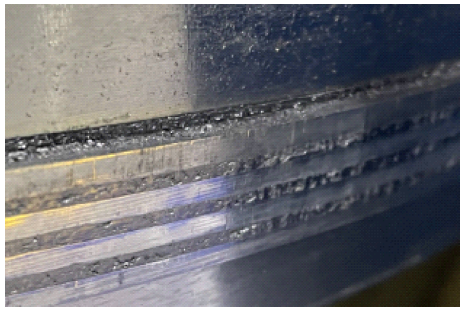
经过合理设计的偏心参数，既能保证三偏心蝶阀在开启和关闭过程中，密封圈能够迅速完全脱离阀座，与阀座密封面无摩擦干涉；又能保证蝶阀在关闭时，密封圈与阀座的密封面在执行机构提供的扭矩作用下可以严密贴合，实现稳定的密封。三偏心蝶阀相比于只能用非金属材质或者弹性薄壁圈作为密封副的中线蝶阀和双偏心蝶阀，由于在关闭过程中密封副之间完全没有挤压和摩擦，只在关闭位置处阀座和密封圈紧密接触实现密封，可以采用力学性能更好的整体金属材质制作而成，因此，可以应用于高温、低温、高压等严苛工况中。

2 现有三偏心蝶阀的结构形式和特点

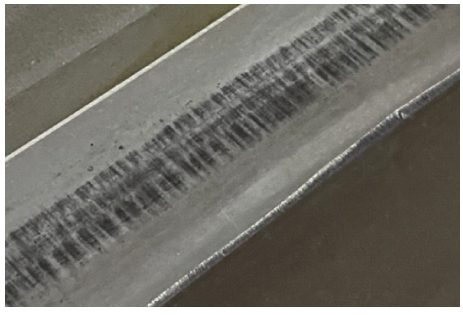
根据密封圈不同材质和结构形式，三偏心蝶阀的类型可以大致分为多层次密封圈结构和全金属密封圈结构 2 类。

2.1 多层次密封圈结构

目前，使用较多、应用较广泛的三偏心蝶阀采用的是多层次密封圈，多层次密封圈由金属薄板和非金属层依次叠加而成，该类型的三偏心蝶阀密封性能良好，可以满足 ANSI FCI70–2 标准中规定的 VI 级密封，甚至当执行机构提供的扭矩足够大时，阀座和密封圈贴合更加紧密，使三偏心蝶阀实现零泄漏。图 2 示出三偏心蝶阀开关若干次后，密封圈和阀座的压痕情况。密封圈和阀座的密封面上都有相互挤压的痕迹且宽度均匀，说明多层次密封圈的三偏心蝶阀关闭时，密封副形成的是面密封。



（a）多层次密封圈摩擦痕迹



（b）阀座的摩擦痕迹

图 2 三偏心蝶阀多层次密封圈和阀座的摩擦痕迹

Fig.2 Friction marks of multi-level sealing ring and seat of triple offset butterfly valve

多层次密封圈的密封性能良好，但是由于非金属的存在，易受到介质冲蚀并受温度影响较大，因此，在高温等严苛工况中无法长期稳定使用。

2.2 全金属密封圈结构

为了扩大三偏心蝶阀的应用范围，蝶阀生产厂家采用全金属密封圈代替多层次密封圈，然而仅仅更换全金属密封圈，反而会降低三偏心蝶阀的密封性能，使三偏心蝶阀的密封等级由 VI 级降低至 V 级，甚至 IV 级。为了提高全金属密封蝶阀的密封性能，部分蝶阀生产厂家将与阀体铸造一体的阀座，改为用螺栓固定连接在阀体上的分体阀座结构。相比一体式阀座，分体式阀座结构的刚度较小，阀门关闭时，密封圈和阀座相互挤压同时发生变形，可以弥补由于加工和装配误差造成的密封面不能完全配合的间隙，使密封性能得到显著提升，使三偏心蝶阀也可以达到 VI 级密封。

开关若干次后，全金属密封圈上虽然也出现压痕情况，但只在边缘位置的黑色标记有摩擦的痕迹，中间位置没有变化，说明三偏心蝶阀在关闭时，只有密封圈的边缘有密封作用，其他位置并没有和阀座接触；在阀座上与密封圈初始接触的位置，有明显的圆周向的完整连通压痕，在该压痕线后，有很多垂直圆周压痕线的摩擦线，说明在关闭位置，受加工和装配误差的影响，全金属密封圈的边缘先与阀座接触，继续关闭时，密封圈的边缘在阀座上挤压和刮擦，形成了以上所述的摩擦线。以上现象说明，常规全金属密封圈蝶阀的密封形式与理想状态有差异，使密封副形成良好密封的必需密封比压并不是均匀分布在整个密封面上，形成的有效密封区域仅为密封面上的一部分。

此外，通过螺栓固定的分体式阀座虽然可以提高三偏心全金属蝶阀的密封性能，但是固定阀座的螺钉在长期使用时会受到温度波动或者管道振动的影响而松动，甚至脱落，无法对阀座起固定作用，最终会严重影响三偏心蝶阀的密封性能。国外某蝶阀公司在产品介绍中明确指出，分体式阀座结构相比一体式阀座结构更容易产生泄漏。国外一些先进的蝶阀制作公司大多采用与阀体一体的阀座结构。

3 密封副的受力和变形分析及结构优化

为了研发制作出高性能蝶阀，需要对三偏心蝶阀的密封原理进行分析，并根据密封原理对现有问题进行改进，以提高三偏心蝶阀的密封性能。针对以上对不同形式的三偏心蝶阀密封现象的观察，采用有限元分析的方法，分别对全金属密封圈和金属多层密封圈的受力和变形进行分析。

以 Class150 DN250 的三偏心蝶阀为研究对象，建立简化的三维模型，其结构参数如表 1 所示。为了使计算更加高效，将金属多层密封圈设置为 3 层，所有零部件材质均为结构钢。运用 ANSYS 软件对三维模型进行网格划分，为了提高分析效率和计算精度，整体网格尺寸设置为 10 mm，并在阀座和密封圈的密封面上对网格进行细化，将该处的网格尺寸设置为 1 mm。在阀体法兰端面施加固定约束，阀杆设置圆柱约束，并将轴向设置为自由约束。阀杆顶端施加顺时针扭矩 1 000 N·m，密封圈与阀座、阀板、压圈之间，阀杆与阀体之间，金属多层密封圈的层与层之间均设置摩擦接触，其余为绑定约束。网格划分和边界条件设置等完全一样，只改变密封圈的结构，分别对阀座和密封圈的密封面上的应力和变形进行分析。

表 1 三偏心蝶阀结构参数

Tab.1 Structural parameters of three eccentric butterfly valve

参数	数值
圆锥角θ/(°)	30
径向偏心距 e/mm	4
轴向偏心距 b/mm	23
偏心角α/(°)	15
圆锥底圆直径 D/mm	244
密封圈厚度 /mm	8
阀座厚度 /mm	16

3.1 应力分析

通过有限元分析可以发现，三偏心蝶阀在关闭时，密封圈上形成一定的密封压力环面[9]，即应力等值线是连续的，且其大小在厚度方向呈现阶梯分层。密封压力分布云图见图 3。

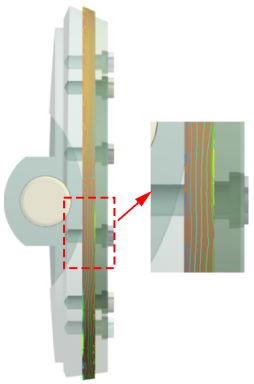
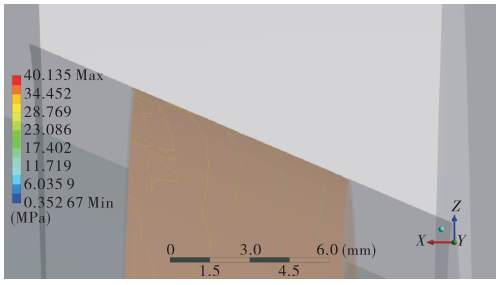


图 3 密封压力分布云图

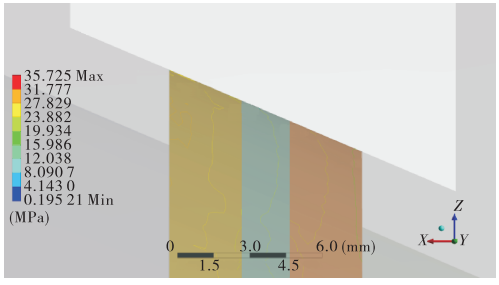
Fig.3 Seal pressure distribution contour

蝶阀关闭时，阀座和密封圈之间需形成密封副材料的必需密封比压才能实现密封。从图 3 可以看出，对于全金属密封圈来说，只在应力等值线达到足够大且连续的位置才能形成密封，在其他应力等值线较小的位置并不能起到密封的作用。因此，为了提高三偏心蝶阀的密封性能，将密封圈沿厚度方向进行离散化分析，使受力情况不同的每层密封圈都可以与阀座单独形成有效的密封。为了更详细地了解密封圈上应力分布情况，对全金属密封圈和金属多层密封圈沿厚度方向不同位置进行分析。

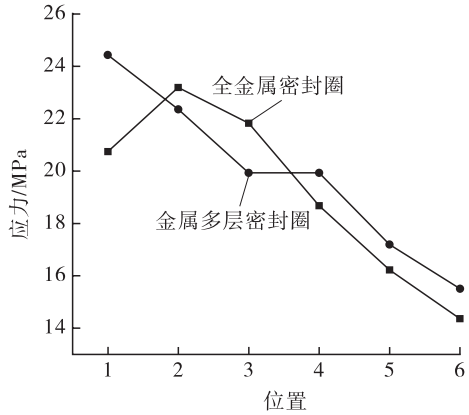
在三偏心蝶阀全金属和金属多层密封圈的大斜面处，取大斜面位置沿厚度方向均匀分布的 6 点应力值绘制曲线进行对比，应力变化情况如图 4 所示。



（a）全金属密封圈应力分布



（b）金属多层密封圈应力分布



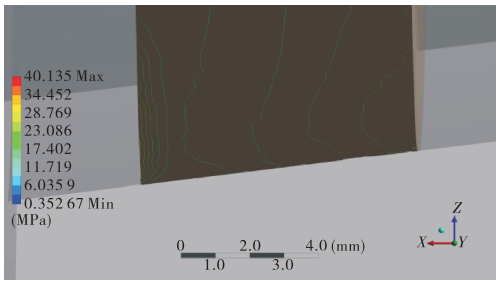
（c）全金属和金属多层密封圈应力分布对比

图 4　大斜面位置的应力分布

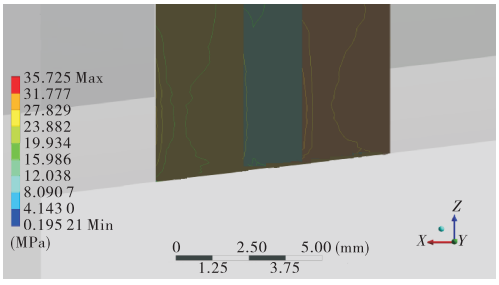
Fig.4　Stress distribution at large inclined plane locations

在大斜面位置，全金属和金属多层密封圈均在大端面位置应力偏大，且在靠近小端面时应力有减小的趋势，与全金属密封圈相比，金属多层密封圈的变化相对平滑。

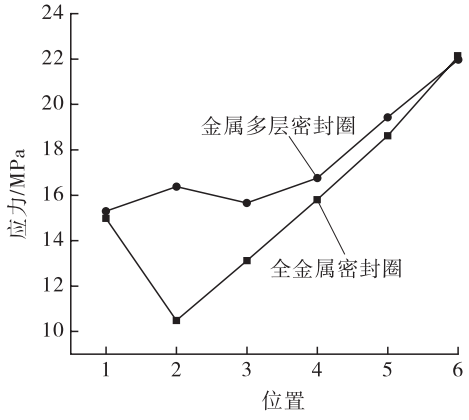
在小斜面处，取边缘处均匀分布的 6 点的应力值绘制曲线进行对比，应力变化情况如图 5 所示。



（a）全金属密封圈应力分布



（b）金属多层密封圈应力分布



（c）全金属和金属多层密封圈应力分布对比

图 5　小斜面位置的应力分布

Fig.5　Stress distribution at small inclined plane locations

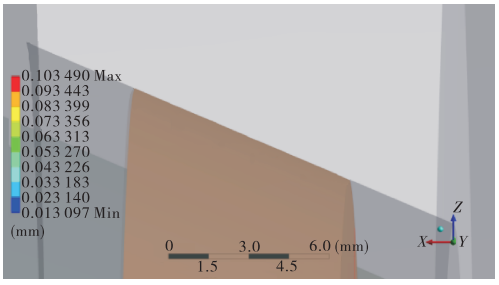
在小斜面位置，全金属和金属多层密封圈均在大端面位置应力较小，且在靠近小端面时应力有变大的趋势（与大斜面位置的应力变化趋势相反），且金属多层密封圈的变化相对平滑。

从应力分析结果可以看出，在大小斜面处，接触应力的极限值均在密封圈的边缘位置，不同的是，在大斜面的大端面接触应力最大，小斜面位置处小端面的接触应力最大，二者正好相反；此外，

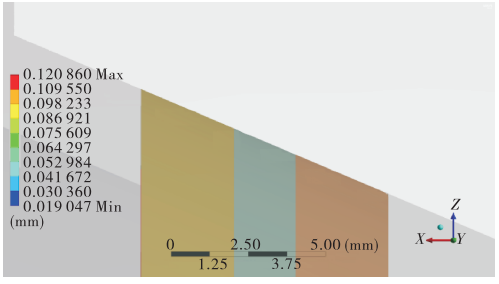
对于金属多层密封圈来说，应力值变化波动较小，更趋于平缓，因此可以获得更为稳定可靠的密封区间，使密封性能得以提升。

3.2 变形分析

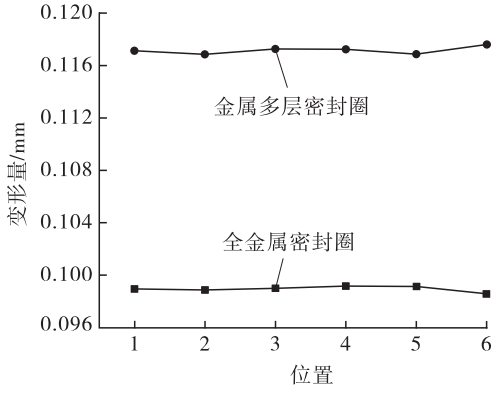
阀门关闭时，三偏心蝶阀密封圈在大斜面处的变形情况如图 6 所示，取大斜面边缘处均匀分布的 6 点的变形值绘制曲线进行对比。



（a）全金属密封圈变形分布



（b）金属多层密封圈变形分布



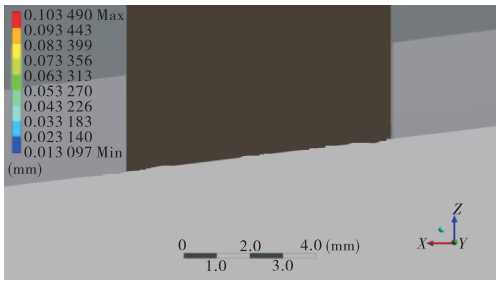
（c）全金属和金属多层密封圈变形分布曲线

图 6 大斜面位置的变形

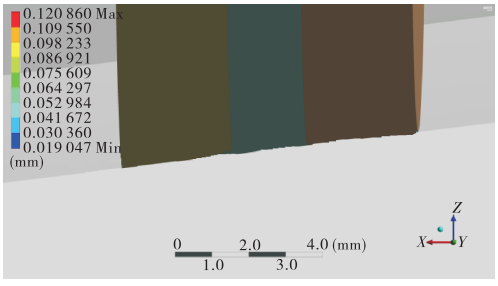
Fig.6 Deformation at large inclined plane locations

在大斜面处，全金属密封圈不同位置的变形量基本相同，为 0.117 mm，金属多层密封圈不同位置的变形量也基本相同，约为 0.099 mm，二者变形都比较均匀。金属多层密封圈的变形量比全金属密封圈大约 0.018 mm，变形量增大约 15.4%。

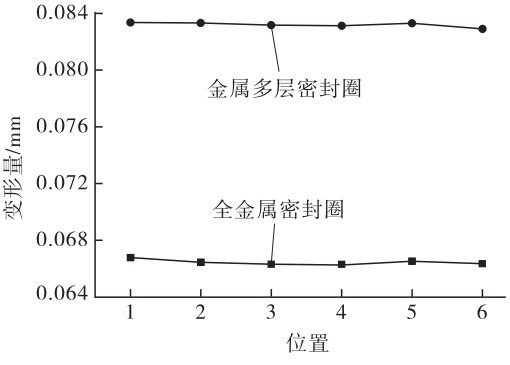
三偏心蝶阀密封圈在小斜面处的变形情况如图 7 所示，同样取小斜面边缘处均匀分布的 6 点的变形值绘制曲线进行对比。



（a）全金属密封圈变形分布



（b）金属多层密封圈变形分布



（c）全金属和金属多层密封圈变形分布

图 7 小斜面位置的变形

Fig.7 Deformation at small inclined plane locations

与大斜面处的变形情况相似，在小斜面处，全金属和金属多层密封圈不同位置的变形都比较均匀，且金属多层密封圈的变形量（0.083 mm）比全金属密封圈的变形量（0.065 mm）大，二者同样相差 0.018 mm，变形量增大 27.7%。

对比三偏心蝶阀全金属和金属多层密封圈不同位置的变形可知，三偏心蝶阀在扭矩作用下蝶板关闭时，全金属和金属多层密封圈的整体变形都比较均匀，且金属多层密封圈由于各层金属板的刚度小，因此在受到相同作用力时变形相对较大，这种变形可以使阀座和密封圈贴合更加紧密，形成面密封，密封性能得到显著提高。

3.3 优化方法

结合上述对金属多层密封圈的密封面不同位置应力分析，密封圈不同层在垂直阀杆方向的合力大小和方向如图 8 所示。

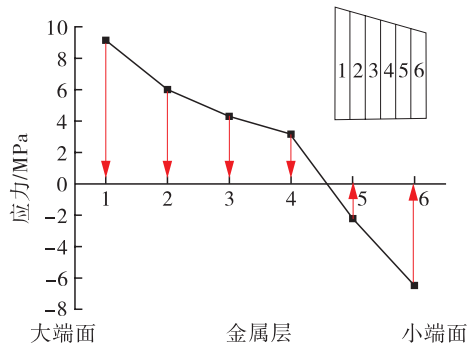


图 8　密封圈不同截面层的受力大小和方向

Fig.8　The magnitude and direction of the force on the different cross-section layers of the sealing ring

由于密封圈相对垂直阀杆方向为对称结构，在沿阀杆方向的合力为 0，因此，本文不对密封圈在沿阀杆方向所受合力进行分析。从图 8 可以看出，在密封圈的大端面处，金属层受阀座作用的合力向下，且合应力为 9.145 MPa，沿垂直密封圈方向金属层受力逐渐减小，且减小到 0 后，合力方向发生变化，合力又逐渐增大，在小端面处，合应力增加到 6.482 MPa。

若金属多层密封圈的各个金属层在关闭时可以自由相对移动，则会在不平衡力的作用下自动调整对齐，形成与阀座贴合度更好的密封效果。金属多层密封圈的不同层相对移动情况如图 9 所示。

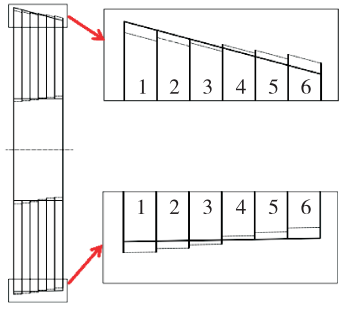


图 9　金属多层密封圈不同截面层的移动情况

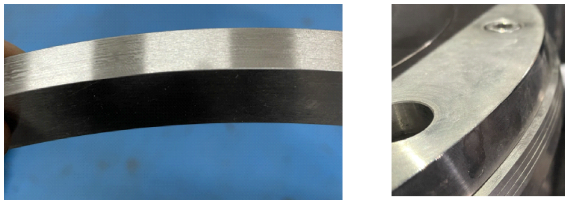
Fig.9　The movement of different cross-section layers of metal multi-layer seal

通过合理设计密封圈结构和装配工艺，可以使金属多层密封圈自适应微调每层的位置来提高密封性能，具体方法如下：（1）金属多层密封圈毛坯在内径 4 个均匀分布的位置点焊，使每层金属板固定在一起，加工密封面时密封圈毛坯不会分散；（2）将加工后的多层密封圈用压圈固定在阀板上，压圈上紧定螺钉的拧紧力矩仅为最终力矩的 33%，使多层密封圈初步固定，且在适当力的作用下，仍会发生移动；（3）将多层密封圈的固定焊点打磨掉，使层与层之间相对分散；（4）用力关闭阀板，使多层密封圈的每层金属板在阀座作用力下均自动调整位置[10]。通过以上方法可以使多层密封圈与阀座形成多层密封结构，弥补全金属密封圈只有单条线接触的缺点，形成多重密封，提高密封性能。

通过对自适应调整后的金属多层密封圈角度偏心的测量，重新优化设计全金属密封圈的结构，使全金属密封圈与阀座完全贴合形成面接触，可以提高整体阀座结构的三偏心全金属蝶阀的密封效果。

4　试验验证

制作规格为 Class300 DN400 的三偏心蝶阀样机，并将金属多层密封圈按照以上方法安装调试，通过试验验证可知，金属多层密封圈的每层由于受力不同，在自动对中过程中均相互独立地与阀座实现了密封。经立车一次加工成型的密封圈，其密封面由光滑〔见图 10（a）〕过渡变为有明显错位的阶梯状〔见图 10（b）〕。



（a）加工后的密封圈密封面　（b）自动对中调试后的密封圈密封面

图 10　安装调试前后密封圈的密封面

Fig.10　The sealing surface of the sealing ring before and after installation and commissioning

与常规采用全金属密封圈的整体式阀座结构的三偏心蝶阀相比，金属多层密封圈的密封由原来在压差为 2 MPa 以内时只能满足 GB/T 4213—2024《气动控制阀》规定的 IV 级提高到 VI 级，密封性能得到显著提升。

通过对金属多层密封圈在关闭时不同层位移的理论分析和实物观察可知，金属多层密封圈在变形后，偏心角α变小，如图 9 和图 10 所示，即密封圈的偏心角为理论设计的α时，每个单层受到的不平衡力较大，使不同层的密封圈发生相对位移，移动后偏心角α在一定程度上小于理论设计，该移动的结果可以使金属多层密封圈的每层都与阀座产生均衡的接触应力，形成多重密封的效果，最终使三偏心蝶阀的密封性能提高。对于全金属

密封圈，在加工时，利用工装控制，使全金属密封圈的偏心角参数α小于理论设计值，可提高全金属密封蝶阀的密封性能。

5 结论

（1）三偏心蝶阀的密封圈在关闭时，不同截面层所受合力的大小和方向不同，在大端面位置，密封圈截面单元受方向向下的最大合应力为9.145 MPa，在小端面，最大合应力为6.482 MPa，方向向上；且受到零件加工和装配误差的影响，密封面上的密封比压并不是均匀分布，形成的有效密封区域仅为密封面上的一部分。

（2）利用金属多层密封圈，通过特殊设计的密封圈结构和装配工艺，使各个金属层在装配时可以自适应微调位置，使密封圈的每层金属板都可以与阀座形成密封，具有多重密封的效果。通过三偏心蝶阀样机验证，金属多层密封圈的密封性能由GB/T 4213—2024规定的Ⅳ级提高到Ⅵ级，密封性能良好，可以应用在高温、低温、开关频率高的工况中。

（3）自动微调后的金属多层密封圈偏心角α变小，将新的偏心参数应用到全金属密封圈的加工中，使制作出来的阀座和密封圈的角度偏心有一定的差异，该差异可以使三偏心全金属蝶阀形成真正稳定可靠的面密封。

参考文献：

[1] 贾琦月．大型液化天然气接收站用低温阀门的特性与分析[J]．阀门，2019(3)：42－45.
JIA Q Y.Analysis of problems in the research of cryogenic valves for large liquefied natural gas receiving terminal[J].China Journal of Valve，2019(3)：42－45.

[2] 齐大伟，张孙敏，李远明，等．快开三偏心真空蝶阀优化设计及应用[J]．流体机械，2022，50(9)：38－42.
QI D W，ZHANG S M，LI Y M，et al.Optimization design and application of quick opening tri-eccentric vacuum butterfly valve[J].Fluid Machinery，2022，50(9)：38－42.

[3] 叶盛来，侯晋峰，邱少官，等.LNG深冷工况超低温蝶阀的分析与选用[J]．阀门，2022(3)：232－235.
YE S L，HOU J F，QIU S G，et al.Analysis and selection of super-cryogenic butterfly valve under LNG cryogenic condition[J].China Journal of Valve，2022(3)：232－235.

[4] 常学森，平辉，姚瑶，等．三偏心蝶阀反向承压密封问题的有限元研究[J]．流体机械，2015，43(6)：25－28.
CHANG X S，PING H，YAO Y，et al.Finite element analysis of three eccentric butterfly valve sealing problem of reverse pressure[J].Fluid Machinery，2015，43(6)：25－28.

[5] 李树勋，杨玲霞，雒相垚，等．快关蝶阀密封副瞬态热及碰撞冲击研究[J]．振动与冲击，2022，41(5)：75－82.
LI S X，YANG L X，LUO X Y，et al.Transient heat and collision impact of sealing pair of fast closing butterfly valve[J].Journal of Vibration and Shock，2022，41(5)：75－82.

[6] 贾琦月，庞东，李文忠，等．液氢用低温三偏心蝶阀的反向密封性能分析[J]．流体机械，2023，51(10)：76－80.
JIA Q Y，PANG D，LI W Z，et al.Analysis of deformation of tri-eccentric butterfly valve and its influence on sealing performance[J].Fluid Machinery，2023，51(10)：76－80.

[7] 李树勋，张建正，尹会全，等．三偏心蝶阀热棘轮效应的数值模拟[J]．华南理工大学学报(自然科学版)，2023，51(6)：119－128.
LI S X，ZHANG J Z，YIN H Q，et al.Numerical simulation of thermal ratcheting of triple eccentric butterfly valve[J].Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition)，2023，51(6)：119－128.

[8] 余晓光，周位伟，张黎，等．催化裂化烟机蝶阀阀杆断裂原因分析及改进措施[J]．阀门，2024(2)：210－215.
YU X G，ZHOU W W，ZHANG L，et al.Analysis and improvement measures for the fracture of butterfly valve stem in catalytic cracking flue gas turbine[J].China Journal of Valve，2024(2)：210－215.

[9] 杨恒虎，郝娇山，王伟波，等．三偏心蝶阀密封压力影响因素分析[J]．液压与气动，2021，45(6)：178－182.
YANG H H，HAO J S，WANG W B，et al.Analysis of sealing pressure influence factors for three-eccentric butterfly valve[J].Chinese Hydraulics & Pneumatics，2021，45(6)：178－182.

[10] 余晓光，周位伟，刘诗梅，等．多偏心全金属密封蝶阀密封副及其加工方法、装配方法：CN113202933B[P].2022－10－14.
YU X G，ZHOU W W，LIU S M，et al. The processing and assembly methods of multi-eccentric all metal sealed butterfly valve sealing pair：CN113202933B[P].2022－10－14.

作者简介：余晓光(1989)，男，工程师，硕士，主要从事蝶阀结构优化研究工作，通信地址：400707 重庆市北碚区蔡家岗镇蔡和路879号重庆川仪调节阀有限公司技术部，E－mail：1548721556@qq.com。

本文引用格式：
余晓光，周位伟，刘诗梅，等．三偏心蝶阀密封原理分析及优化设计[J]．流体机械，2025，53(2)：102－108.
YU X G，ZHOU W W，LIU S M，et al.Analysis and optimization design of sealing principle for triple offset butterfly valve[J].Fluid Machinery，2025，53(2)：102－108.