

机械密封单端面密封改双端面的应用设计

胡庆球

(中国石化镇海炼化分公司 浙江 宁波 315207)

摘要：机械密封单端面密封改为双端面，看似简单的结构调整却内含很多设计因素的变化，包括密封选型、布置空间、密封材料、设计参数、辅助系统方案、监测系统等。设计人员只有综合考虑上述因素，才有可能设计出性能优良的密封。本文借助一个成功案例，展现上述因素在单端面密封改为双端面设计中所起的作用，旨在为同类设计提供参考。

关键词：机械密封；单端面；双端面；设计因素

0 引言

近几年，石油、天然气、化工等行业由于机械密封泄漏，由此引发的减产、误工损失严重，维修费、设备更新费明显增加，使得用户对安全系数的要求逐渐提高，双端面密封的应用变得极为普遍，机械密封很多原有的单端面密封随之升级为双端面结构。其实，API682 中早已对温度高、压力大、易燃易爆、有毒或输送危险工况下使用的密封型式、布置方式、管道配置等做了推荐，意图减少向大气的泄露、保障操作者人身健康和环境安全，同时降低密封周期性成本。密封由一对端面增至两对端面，设计因素的改变可能带来新的问题。本文就公司常减压装置减低渣油泵所配密封，详细叙述了单端面密封升级双端面结构所遇到的问题及其解决方案，介绍设计因素在单端面密封改双端面设计中的应用。

1 密封的应用环境

减低渣油泵为两端支撑，介质温度较高，属于高温油泵，泄漏会引起火灾。

1.1 泵的主要参数（见表 1）

2 原始单端面密封配置及其应用性能

2.1 原始单端面密封配置

原始单端面密封使用时间为 2008 年 8 月份至 2011 年 10 月份，具体配置见表 2。

2.2 原始单端面密封结构及其工作原理

该密封工作原理：螺钉拧紧卡环、传动环时，挤压力使轴套抱紧传动轴并随之旋转；动环靠螺钉紧固在轴套上，

表 1 密封所用泵的主要参数

名称	减低渣油泵	转速 (r/min)	2980
泵型	200X150R2DM44	介质	渣油
泵级数 (级)	两级	比重 (g/m³)	0.7411
额定流量 (m³/h)	395.3	入口温度 (℃)	375
扬程 (m)	235	入口压力 (MPa)	-0.02
轴径 (mm)	80	出口压力 (MPa)	2.25

表 2 原始单端面密封具体配置

密封结构	密封型号	密封材质	API 方案	冲洗液	密封液	使用效果
2 系列、C 型密封、布置方式 1	DBM-90B-1	TUR94/3	Plan32+Plan62	150# 渣油	透平油	三年 维修 5 次

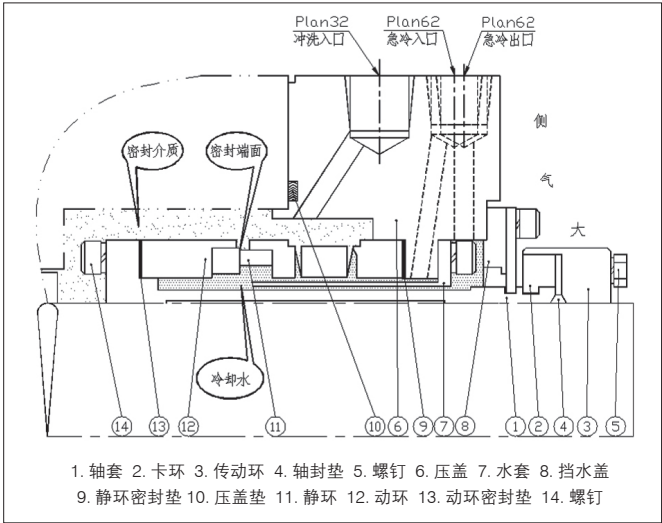


图 1 原始密封结构

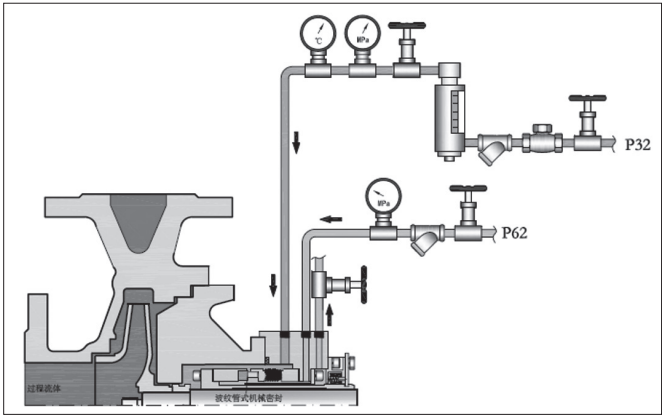


图 2 原始密封辅助系统示意图

并与轴套一起随轴旋转；静环、水套、挡水盖安装在压盖上，随压盖紧固于泵腔上，保持静止。动环与静环两端面实现动密封，压盖垫、动静环密封垫、轴封垫实现静密封。

2.3 原始单端面密封辅助系统及其工作原理

Plan32 工作原理：外部冲洗液经过清洁、调控后，由管道输送到 Plan32 冲洗入口并注入密封腔。

Plan62 工作原理：外部冷却液经过过滤，输送至 Plan62 急冷入口并由此注入到密封端面大气侧，将端面聚集

物冲下，经由急冷出口排出。

2.4 原始单端面密封的应用性能

优点：该单端面密封采用波纹管结构，较之弹簧密封，具有更优良的追随性和补偿性；辅助密封采用柔性石墨，能耐更高温度；平衡型设计提供了可靠的耐性能力。

存在的问题：本选型及材料配置均满足工况要求，安全可靠性能低。密封运行过程中可能遭受压变、温变、气穴、介质多态等环境变化，使得密封出现气化、结焦等现象，导致密封泄漏。该方案虽配有挡水盖，但不足以限制密封封泄漏，仍然存在泵送介质直接进入大气的安全隐患。一旦泄漏加剧，极易引发事故。此外，本方案中未配置报警措施，致使操作人员无法及时获悉密封失效，错过最佳补救时机或延迟故障处理。

3 改后双端面密封配置及其应用性能

针对原始单端面密封存在的安全隐患，结合实际工况考虑设计因素，密封改造如下：

密封结构——增加密封配对端面，可以从径向或轴向着手。综合考虑布置空间尺寸和冲洗方案，决定更改为串联式双端面密封；

密封型号——考虑介质特性和布置空间尺寸，选择轴向尺寸更小的密封型号；

材料选择——考虑介质特性和温度等因素后，保持原材料配置；

API 方案——由于用户要求消除安全隐患、避免泄漏，综合考虑成本与安全性因素后，将 Plan62 改为 Plan53A；

密封液——通常情况下，Plan32 方案的冲洗液为清洁的介质，故建议将渣油更换为蜡油；由于透平油中的抗氧化剂及耐磨剂容易在端面上析出，损伤端面，而矿物油在 70℃ 以下热稳定性较好，故建议将透平油改为 7～15# 工业白油。由于受到现场具体应用条件的限制，冲洗液和隔离液仍分别沿用渣油和透平油。

3.1 改后双端面密封配置

改后双端面密封自 2011 年 11 月末投入使用，具体配置见表 3。

3.2 改后双端面密封方案及其工作原理

工作原理：紧定螺钉将传动环紧固于轴上，螺钉使轴套借助卡环随传动环一起固定在轴上，介质侧动环、大气侧动环靠螺钉固定于尾座，紧定螺钉将尾座紧固于轴套，固定于轴套上的零件与轴套随轴旋转；介质侧静环压紧在内压盖上，大气侧静环压紧在外压盖上，压盖及其附件固定于泵腔，保持静止。轴封垫防止介质从轴套与轴之间泄漏入大气，密封垫 I、柔性石墨圈与端面 I 防止介质漏向外侧密封腔，密封垫 II、端面 II、“O”形圈与压盖垫，

表 3 改后双端面密封具体配置

密封结构	密封型号	密封材质	API 方案	冲洗液	密封液	使用效果
2 系列、C 型密封、布置方式 3	C65-90G/TD// C65-90/TP	TUR94/3- TUR94/3	Plan32+ Plan53A	150# 渣油	透平油	最短 2～3 个月出现泄漏

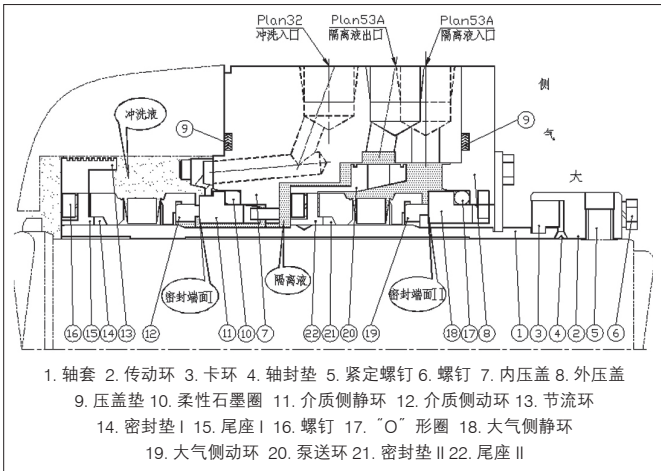


图 3 改后双端面密封结构

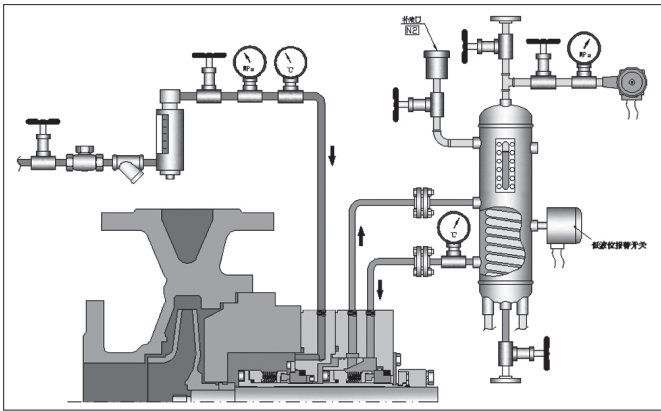


图 4 改后双端面密封辅助系统示意图

防止隔离液向大气侧泄漏。

3.3 改后双端面密封辅助系统及其工作原理

Plan32 工作原理：同上文。

Plan53A 工作原理：该方案由双端面机械密封和它们之间的隔离流体构成。隔离流体盛在储液罐中，储罐所加压力要高于密封腔压力。隔离液经管道输送至隔离液入口并由此注入密封腔，经过泵送环循环至隔离液出口并由此返回储液罐，完成一次循环。如果内侧密封泄漏时，隔离流体泄漏到输送介质中。如果储液罐低于了密封腔压力，通过内侧密封的正常泄漏流向将被逆转，密封系统将像 Plan52 那样开始运作。隔离流体就可能被所泵送的工艺流体污染、使隔离流体产生危险，增加了密封失效的可能性。

3.4 改后双端面密封的应用性能

从理论上，改后双端面密封较之原始单端面密封的安全系数更高；但现场反馈，改后密封在投入使用后 2～3 个月内，二级密封出现严重滴漏，现场需要及时擦拭，之后的泄漏量变得越来越大。至此，与现场有关人员联系后得出如下反馈：储液罐的液位下降很快，严重时 8 小时就得补液一次。外冲洗液压力为 0.9MPa，前后端循环液温度计显示 60℃。下图为失效密封照片。

照片显示，介质侧端面外径侧无明显

显附着物，而大气侧动环和静环端面的内外侧均聚集着大量的黑色黏稠物。

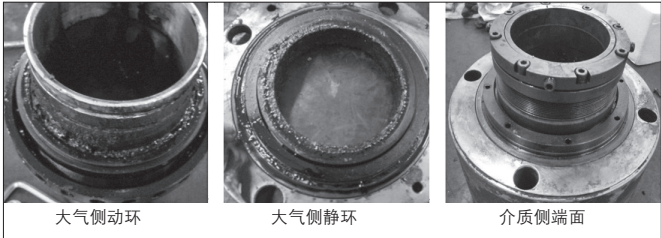


图 5 改后双端面密封失效照片

3.5 改后双端面密封问题分析

综合分析可得，外冲洗压力低于密封腔压，冲洗液无法达到预期的设计效果，致使一级密封端面热量集聚过大，可能产生端面变形引发的泄露；此外，渣油粘度随温度变化大这一特性，也可能影响密封效果；再者，渣油中可能含有固体颗粒，而冲洗液没能及时有效地对一级密封端面起到清洁作用，也可能产生磨粒磨损导致的端面泄漏。透平油中的抗氧化剂及耐磨剂容易在端面上析出，损伤端面，可引起端面泄漏；由波纹管内侧与轴套之间集聚大量泄漏物，石墨环端面出现的麻点，推断为端面泄漏。因此，该密封的改良主要从改善端面及其工作环境着手。

3.6 改后双端面密封的二次优化

3.6.1 改善系统循环

由于受到现场具体应用条件的限制，冲洗液和隔离液仍分别沿用渣油和透平油，故从以下方面对系统进行优化：建议实际测量泵的后端腔压，据此确定外冲洗压力；优化泵送环及流道结构参数，调整泵送效率以改善 Plan53A 循环效果；同时，建议现场控制隔离液的流量为 0.42m³/h，隔离液出口与入口的温差小于等于 16℃。

3.6.2 端面材料选择

目前，RBSiCG 和 SSiCG 复合材料、碳化硅、硬质合金之间配对的“硬对硬”端面组合，PV 值的极限值得到了极大提高；由于介质中的固体颗粒不会破坏密封表面的光洁度，而且经改性后密封端面设计，也能降低端面对润滑性的灵敏度；因此，“硬对硬”摩擦副在高粘度介质及含有少量固体颗粒的介质中应用广泛。在 API682 中也提到，当要密封的介质是油时，硬质合金对碳化硅的组合表现出了良好的性能。甚至在低粘性的液体工况中，例如含有磨蚀性物料的水中，硬质合金对碳化硅的组合是双硬质端面要求的最普遍选择。为了避免一级密封可能出现的泄露，并综合考虑该渣油的具体输送环境、结合用户的具体要求，将端面材料更改为硬质合金 - 碳化硅。由于不含游离硅，无压烧结碳化硅在几乎所有腐蚀性环境中化学性稳定，最终端面配对材料为镍基

硬质合金 - 无压烧结碳化硅。

3.6.3 设计参数

平衡系数 B

对外侧加压的密封，密封平

衡系数 B 的定义如下式：

$$B=(D_0^2-Db^2)/(D_0^2-Di^2) \quad (3.1)$$

其中，D0 为密封端面外径 Di 为密封端面内径 Db 为密封的滑移直径

将 D₀=103.6mm Di=95.6mm Db=98.8mm 代入 (3.1)

式中，得出

$$B= (103.62-99.722) / (103.62-95.62) =0.61$$

端面面积 A (mm²)

$$A= \pi (D_0^2-Di^2)/4 \quad (3.2)$$

将密封端面的内外径代入 (3.2) 式，可得

$$A= \pi (103.62-95.62) /4=1251.6mm^2$$

弹簧比压 PSP，(MPa)

$$P_{SP}=F_{SP}/A \quad (3.3)$$

其中，FSP 为工作状态下弹簧力，单位 (N)；A 为密封端面面积，单位 (mm²)。

将弹簧力、端面面积代入式 (3.3)，得出

$$PSP=50.4 \times (17.5-13.5) /1251.6=0.161N/mm^2$$

端面总比压 P tot，(MPa)

$$P_{tot}= \triangle P (B-K) +PSP \quad (3.4)$$

其中，△P 为通过密封端面的压差，单位兆帕 (MPa)；K 为压降系数。

将弹簧比压、压降系数 (取 0.4)、端面平衡系数、大气侧密封端面差压代入 (3.4) 式中，得出

$$P_{tot}=1.15 \times (0.61-0.4) +0.161=0.40 MPa$$

比较设计参数与表 4 数值并结合经验设计，可得上述参数满足该使用工况。实际中，二次优化的双端面密封自 2014 年 10 月初发至现场使用，使用寿命超过 25000 小时。由此，进一步证明该设计方案优化成功。详见表 5 二次优化后双端面密封具体配置。

4 结语

通过本单端面密封改双端面结构的设计案例，可以得出如下结论：

①当机械密封的可靠性和环境安全要求较高时，可采用双端面密封结构；

②密封选型、布置空间、密封材料、设计参数、辅助系统方案、冲洗液、隔离液 (缓冲液) 等设计因素必须综合考虑，才能获得预期的优良密封性；

③在设计过程中，必须结合密封应用的实际压力、温度、介质特性等工况，将设计因素失效后的风险考虑在内，才能彻底消除安全隐患；

表 4 推荐的端面比压

设备种类	密封型式	一般介质	低粘度介质	高粘度介质
泵	内装式	0.3 ~ 0.6	0.2 ~ 0.4	0.4 ~ 0.7

表 5 二次优化后双端面密封具体配置

密封结构	密封型号	密封材质	API 方案	冲洗液	密封液	使用效果
2 系列、C 型密封、 布置方式 3	C65-90G/TD// C65-90/TP	UOR94/3-UOR 94/3	Plan32+ Plan53A	150# 渣油	透平油	使用寿命超过 25000 小时

④一旦设计因素失效或密封泄漏,一定要及时全面地掌握密封失效时的具体状态(如,拍照留证),运行参数,事故后果等信息并做好详细记录,为解决问题提供足够的依据;

⑤当密封的应用环境无法改变时,可提高摩擦副的材料等级,达到密封的目的。例如,对于粘度高或介质中含颗粒的工况,可参考本设计案例采用“硬对硬”摩擦副。

参考文献:

[1] 顾永泉.机械密封实用技术[M].北京:机械工业出版社,2001.

[2] 陈德才.崔德容.机械密封设计制造与使用[M].北京:机械工业出版社,1993.

[3] 王汝美.实用机械密封——技术问答[M].北京:中国石化出版社,2012.

[4] 离心泵和转子泵用轴封系统 API682,2014;

[5] 王凤喜,等.密封使用与维修问答[M].北京:机械工业出版社,2005.

[6] 密封设计手册,北京化学工业出版社,2009.

作者简介:胡庆球(1974-),男,本科学历,工程师,研究方向:机械。

(上接第16页)

的:第一种是借助“资源查找器”开展准确查找的工作,对问题零件位置进行明确,并且采取针对性的措施对其进行调整,第二种是动态演示装配的具体过程,对数据存在偏差的零件进行挑选。无论是选择什么方案进行检验,都能够准确分析问题零件所在位置,实现了节约人力的效果。同时这样的智能化以及自动化的查找模式对提升机械构建的成功率水平有巨大的价值。三维CAD技术创建的设计、制造以及装配的一体化体系为机械制造行业的快速发展有着积极的促进作用。

总之,在机械模型创建、装配、方案制作等工作进行过程中,CAD技术的实用价值相对较高,为机械制造行业的发展创造了机遇。

3 CAD技术在机械制造中的发展分析

第一,在机械制造工作进行过程中运用CAD体系是大势所趋,在机械装配体系当中运用CAD技术,能够在相邻构件体系的辅助之下,为新构件设计工作品质的提升奠定基础,同时设计工作人员无需单独设计新型的构建,所以由于这一因素所导致的装配失败问题出现的概率也会下降。

第二,相比于传统的机械设计与制造过程,如今的工作周期明显被缩短,随着CAD技术在机械行业中的深入运用,设计与制造工作的缩短工作周期、提升工作效率水平的优势得到了凸显,在对新零件进行创建时,借助CAD技术便能够对重点构件进行设计,其他零件的数据信息为新零件的设计提供了理论参考,这也就为设计工作效率水平的提升奠定了基础。

第三,CAD技术中的变型设计功能为设计与制造人员提供了一定的便利,提升了零件设计的直观性。在装配机械零件时,详细记录零件装配位置细节,若是发现隐藏性的错误,工作人员需要深入了解内部装配结构,避免出现不必要的麻烦。在完成装配工作后,CAD技术能够演示

装配的具体过程,工作人员能够对装配工作的标准与否进行监控,若是出现问题,需要及时对设计进行修改。

第四,随着社会的建设与发展,机械制品所体现出的技术水平本身就在提升,在新的时代背景下,将机械产品和信息科学技术融合在一起是大势所趋,在CAD技术的辅助下,机械设计与制造行业未来的发展方向被明确。因为CAD系统中涵盖着丰富的设计方案,比如虚拟、优化设计等不同层面的内容,因此,在进行机械制造工作时,CAD技术的价值得以凸显。在此基础上,不同的企业开始致力于运用CAD技术,借助数控加工的形式对工作体系进行优化,机械制造的效率水平也就得到了提升,相比之前,机械产品的品质也得到了明显的提升,与时代发展规律相匹配。

4 结语

随着社会的发展,传统意义上的机械制造技术已经与如今的社会体系不匹配,因此需要对技术进行创新,融入现代化设计元素。CAD系统本身的功能比较强大,在机械设计与制造过程中表现出巨大的实用价值,作为机械设计人员需要对CAD技术进行掌握,不断更新自己的知识系统,积极推广和运用CAD新型技术,从而更好的满足机械行业发展的需求,创造出品质更为优良的机械产品,造福于人类。

参考文献:

[1] 关世昊.CAD在机械设计中的应用及机械制造技术的新发展探讨[J].湖北农机化,2020,(06):14.

[2] 孟丹.论CAD在机械设计中的应用及机械制造技术的新发展[J].工程建设与设计,2019,(16):121-122.

[3] 王朝阳.现代数字化设计在机械设计制造技术中的应用与发展[J].信息记录材料,2019,(08):17-18.

作者简介:李文巧(1987.06-)女,汉族,本科学历,工程师,研究方向:机械。