

压裂泵柱塞密封的改进设计^{*}

朱维兵¹ 晏静江¹ 周锡容²

(1.西华大学机械工程与自动化学院 2.西南石油大学)

朱维兵等.压裂泵柱塞密封的改进设计.天然气工业,2007,27(6):103-105.

摘要 压裂泵柱塞密封性能好坏与使用寿命的长短直接影响压裂酸化作业的正常实施,密封不良将带来很大的维护工作量。为适应油气井增产的需要,对 OPI-1800AWS 型压裂泵柱塞密封的结构特点进行了分析,并结合生产和应用实际分析了柱塞密封失效和泄漏的原因,提出了一种油田压裂用柱塞密封的结构改造方案,即通过提高柱塞表面质量,优选密封圈材质,改进密封圈的结构,增加擦拭环,保证柱塞往复运动时与缸套的同轴度,可以提高摩擦副的密封效果和延长柱塞密封的使用寿命。柱塞密封结构改造后,柱塞寿命提高到 15 个月,密封圈寿命延长了 2 倍。

关键词 压裂泵 活塞 密封 优化设计

一、出现的问题

压裂泵是油田进行压裂、酸化作业,提高油气井产量的重要设备。柱塞密封是其关键零部件之一,也是主要易损件,它的密封性能好坏与使用寿命的长短直接影响压裂酸化作业的正常实施,柱塞密封不良将给使用者带来很大的维护劳动量。在市场营销的信息反馈中,OPI-1800AWS 型压裂泵的柱塞密封初期使用效果良好,但经过一段时间运行后,就出现泄漏,质量不稳定,严重时柱塞与密封圈发生粘着,橡胶密封圈被撕裂甚至脱落。

二、柱塞密封结构及原理

OPI-1800AWS 型压裂泵柱塞密封是轴向往复运动密封,属于“V”型自封式接触密封,结构如图 1 所示。该密封的唇部内径比柱塞直径略小而外径则

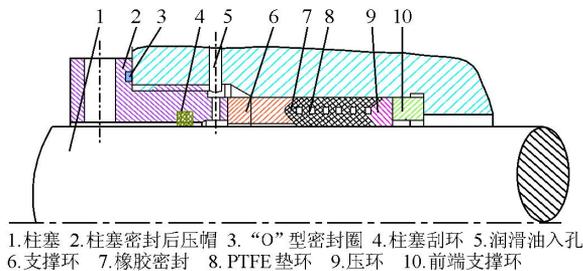


图1 柱塞密封结构图

比填料箱(缸套)内径略大,组装后主要是靠输送压裂液的压力使密封圈唇部张开与柱塞表面和缸套内壁紧密接触形成密封。由于压力脉动和柱塞的往复运动,需要增加 PTFE 垫环,使“V”型橡胶密封圈固定并使唇部张开与柱塞表面和缸套内壁接触。为了防止在高压下“V”型橡胶密封圈被挤入间隙,还需增加支撑环加以补强^[1-3]。支撑环可提高密封效果,延长使用寿命。另外,为补偿密封圈唇口内径在使用过程中因摩擦磨损,该柱塞密封再增加一柱塞密封后压帽,当该泵运转一定时间后,可适当压紧支撑环,压迫密封圈变形,以保证密封圈始终抱紧柱塞。

三、原因分析及改进

针对 OPI-1800AWS 型压裂泵柱塞密封出现的问题,笔者反复分析研究,认为影响柱塞密封效果有 5 方面因素,并为此做了相应的改进。

1. 柱塞往复运动速度和表面质量

当柱塞往复运动速度较高时,柱塞表面与密封圈表面会产生较多的摩擦热,加速橡胶件老化,使之过早失去弹性,减小对柱塞的径向抱紧力。柱塞是压裂泵的主要易损件之一。随着井深的增加,以及压裂酸化半径的扩大,迫切需要强化压裂酸化工艺,即要求向井内注入高压、高砂比、高酸度的压裂液体,这无疑使柱塞的工作条件变得更加苛刻,导致了

^{*} 本文为四川省“制造与自动化”重点实验室基金项目“压裂泵液力端柱塞密封副的研究”(编号:0222766)的部分成果。

作者简介:朱维兵,1971年生,博士,教授,现从事现代机械设计方面的教学和科研工作。地址:(610039)四川省成都市。电话:(028)87726523。E-mail:qazzwb@sohu.com

柱塞的寿命降低。原柱塞表面采用的是镀铬工艺处理,理论上表层的耐磨性、耐热性、耐蚀性较强,但事实上柱塞的使用寿命并不长。由于柱塞表面质量较差,表层被磨损、拉伤、烧蚀和腐蚀的现象时有发生^[4]。柱塞损坏后压裂、酸化作业液由柱塞外表面泄漏进入曲轴箱,使曲轴箱内的润滑油严重变质,失去润滑作用,造成曲轴箱内的一些关键零部件,如十字头、齿轮、拉杆、轴承等严重磨损、烧蚀和腐蚀,导致重大事故发生。为此,将热喷涂技术用于柱塞表面强化,以实验结果为依据,对柱塞表面进行喷焊处理。喷焊材料为 PHNi60A+15% WC,喷焊层的厚度为 0.5 mm,表面硬度 HRC60 以上,喷焊后进行磨削加工。经表面喷焊处理后的柱塞,其耐磨损和抗腐蚀性能明显提高。

2. 十字头、柱塞、柱塞杆、柱塞头作往复运动时与密封圈缸套的同轴度

十字头与柱塞杆、柱塞头与柱塞分别由螺纹连接,柱塞头与柱塞杆球形连接,作为一个整体进行往复运动。其公共轴心线应与十字头缸套、密封圈缸套组成的公共轴心线相重合。否则会使密封圈产生偏磨而失效。

3. 密封圈材料选择

密封圈材质的性能是决定密封圈适用范围的关键条件和使用寿命的重要因素。从密封圈的失效分析看^[4],密封圈的失效形式为永久变形、偏磨、烧伤、磨料磨损、疲劳磨损等多种破坏形式。其中由于过热引起的烧伤是密封圈失效的主要原因,并且烧伤会使密封马上丧失工作能力,而其他各种失效形式造成密封能力丧失则是一个逐步积累的过程。因此必须选用耐热性能较好的橡胶作为密封圈的材料。原密封圈的材料为单一的夹布橡胶,不但耐磨、耐压、耐温性能差,而且耐酸蚀能力更差,因而密封不严,使用寿命较短。新密封圈采用聚氨酯橡胶和填充聚四氟乙烯(填料为青铜粉)两种材料制成,并且交互排列组合在一起使用。聚氨酯橡胶具有耐磨、耐酸、耐温、耐压、耐老化的性能特点,同时还具有扯断强度高,透气性好及一定的回弹性等特点。填充聚四氟乙烯具有承载能力强,耐高、低温性能好,耐油与耐蚀能力强,抗老化,摩擦系数小和自润滑性能好等特点。两种材料的密封圈组合使用,使用性能更显优异,寿命更长^[5]。

4. 密封圈结构的改进设计

现场调研表明:在无润滑油情况下,密封圈在几分钟内因烧蚀而报废,而在良好的强制润滑条件下,

密封圈的寿命可达 50 h,可见,强制润滑对提高密封圈的寿命起到了很好的作用。柱塞密封摩擦副按其工作特点来看,是一对往复运动的滑动副,工作在具有一定黏度的介质下(工作介质:如酸液。润滑介质:润滑油),如果能够形成收敛油楔,则构成流体动压润滑的条件。有限元分析表明^[6],压裂泵在吸入行程,橡胶密封圈由于工作介质压力的作用,使得唇部受到拉伸,离开柱塞表面翘起,即所谓的“偏离效应”。当唇部翘起后,形成收敛楔形,为流体动压润滑形成创造了条件(见图 2)。在压裂泵的排出行程,如果将密封圈背部设计成圆角,则亦能形成收敛性油楔,满足流体动压润滑条件。可见,密封圈的结构对液体油膜的形成起着至关重要的作用。目前,压裂泵的柱塞密封较普遍采用自封式“V”型多皮碗(唇形)密封结构。唇形或“V”型密封圈从理论上讲,外形可以有无穷多的变化,主要变化在于底部厚度与唇高的关系,及唇厚与“V”型槽总深度之间的关系。对于“V”型密封圈,其唇部夹角(α)控制着唇高和底部厚度的比例。通过改变 α 的大小,可以获得不同结构的密封圈。



图 2 泵吸入(左)、排出(右)行程图

原密封圈唇部的“V”型张角较小(见图 3-a),在工作压力作用下唇部“偏离效应”差,背部为尖角形,这种结构不利于流体动压油膜的形成;且当多个密封圈组合在一起时,前后密封依次紧密贴合,密封圈之间的空间极小,这样不但透热性差,而且一旦个别密封圈损害,整体密封性能将大大降低。

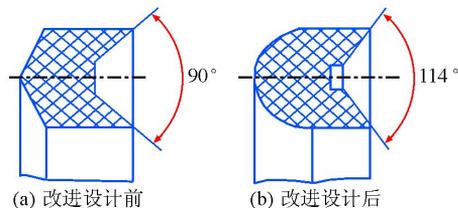


图 3 改进设计前、后的密封圈结构图

通过对密封圈进行有限元计算分析,发现密封圈密封面的平均接触应力(p_m)与唇部夹角的关系是随着 α 的增加 p_m 先是减小,当 $\alpha=114^\circ$ 附近时, p_m 达到最小,然后开始增加。实践经验表明,密封面理

想的应力分布曲线的应力峰应接近于工作唇缘,且比平均应力低。这是因为密封圈在与柱塞的对磨过程中,摩擦系数大,发热量高,橡胶是热的不良导体,因而温度升高快,严重影响密封件的寿命,因此密封面的接触应力不宜太大。通过对 p_m 与 α 关系的对比分析, $\alpha=114^\circ$ 的密封结构比较理想。

改进后的密封圈结构如图 3-b,仍采用“V”型结构,但密封圈唇部夹角由 90° 增至 114° ,密封背部的尖角形变为半圆形,这种结构更利于流体动压油膜的形成。背部的半圆形使各密封圈之间不紧密贴合,从而增强了密封圈的透热性,保证各密封圈能依次工作,即当第一道密封圈失去作用时,后面的密封圈继续起密封作用,避免出现因某一密封圈损坏后而导致后面的密封圈整体密封性能降低的现象。另外,因背部是半圆形,当多个密封圈组合在一起时,前一道密封圈的半圆形背部顶在后一道“V”型唇部,使得后一道密封圈起密封作用的“V”型唇部能张开更大,从而提高密封圈的自封性能。

5. 擦拭环的设计

密封圈的磨料磨损也是造成密封失效的重要因素。橡胶密封圈在工作压力的作用下,有“偏离效应”的存在,使得密封的唇部翘离柱塞表面,为磨料的进入创造了条件,特别是在压裂泵的吸入过程。因为在排出过程中,柱塞推向泵缸,柱塞与密封间的接触应力很大,使得磨料不易进入;而在吸入过程,柱塞与密封间的接触应力较小,这样就为磨料的进入创造了条件。为了减轻由磨料造成的磨料磨损,就应尽量使磨料性介质不能进入或少进入柱塞密封副之间的缝隙,从而提高柱塞和密封的寿命。为此,在柱塞前端支承环与泵壳之间装一金属或其他较硬材料(如硬橡胶)制成的擦拭环,要求擦拭环的柔韧性要好,其断面为梳形(如图 4 所示)。这种结构的擦拭环结构简单,安装方便。在泵的吸入或排出冲程,擦拭环偏向密封一侧。这样在泵的吸入和排出过程中不断刮刷柱塞表面,使得磨粒不进入或少进入密封面;同时擦拭环的断面为梳形,允许工作介质

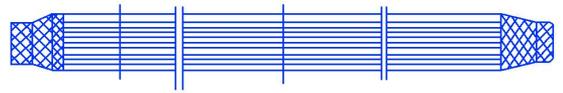


图 4 擦拭环的结构图

通过,这样擦拭不会承受太大的压力,使得擦拭环有着比较长的工作寿命。即使擦拭环失效,也不会影响压裂泵的正常工作的,只是增加了磨料进入密封面的可能性。

四、结 论

压裂泵柱塞密封的效果和使用寿命取决于柱塞表面质量和密封圈材料及结构几何尺寸,同时还要受到箱体及相关零件制造精度的影响,柱塞密封的设计就是要使之适应以上复杂工况并使之有良好效果和较长寿命。压裂泵柱塞密封经改进设计后,经过近几年在四川、长庆等油气田的现场使用,证明效果很理想,解决了柱塞密封泄漏问题,压裂、酸化作业液不再进入曲轴箱,改进后的柱塞密封效果好。改进后的柱塞和密封圈的寿命也提高了很多,柱塞寿命由原来的 3~4 个月延长到 15 个月左右,密封圈寿命也增加了 2 倍。

参 考 文 献

- [1] 广廷洪,汪德涛.密封件使用手册[M].北京:机械工业出版社,1993.
- [2] 朱维兵,周锡容,成愈,等.压裂泵往复密封性能及机理研究[J].天然气工业,2006,26(1).
- [3] 张作龙,张彦廷.RST200型柱塞往复密封试验台的研制[J].石油矿场机械,2000,29(4).
- [4] 张仲亮,朱维兵.OPI-1800AWS 柱塞泵柱塞失效分析[J].西华大学学报,2005,24(5).
- [5] 李金峰,张嗣伟.往复密封材料的现状与发展[J].石油机械,1992,20(12).
- [6] 朱维兵.柱塞泵密封圈有限元分析[J].四川工业学院学报,2004,23(1).

(修改回稿日期 2007-03-27 编辑 韩晓渝)