

# 往复柱塞泵盘根密封压缩量的实验研究

于天亮

北京天玛智控科技股份有限公司, 北京

收稿日期: 2024年5月8日; 录用日期: 2024年6月10日; 发布日期: 2024年7月8日

## 摘要

往复柱塞泵高压液力端密封性能直接影响其工作效率和使用寿命。本文通过实验方式研究往复泵填料密封中盘根压缩量与密封效果及使用寿命的关系。实验结果显示, 5%盘根压缩量的填料密封每小时泄漏12 ml, 盘根与柱塞间平均摩擦力约为69.9 N。这种盘根压缩量既实现了良好的液力密封效果, 又保持了较小的盘根损耗, 可平衡密封效果与使用寿命, 利用该结论可对往复泵填料密封的设计和装配进行指导。通过处理寿命实验中的实验数据得到拟合函数关系, 可对后同类型实验中盘根密封泄漏量和盘根与柱塞之间的摩擦力进行定量预估计算。

## 关键词

往复柱塞泵, 盘根密封, 压缩量, 摩擦力

# Experimental Study on Compression of Gland Packing Sealing in Reciprocating Plunger Pump

Tianliang Yu

(CCTEG) Beijing Tianma Intelligent Control Technology Co., Ltd., Beijing

Received: May 8<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jun. 10<sup>th</sup>, 2024; published: Jul. 8<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

The high-pressure hydraulic end sealing performance of a reciprocating plunger pump directly affects its operational efficiency and lifespan. This study investigates the relationship between the compression volume of the packing seal in reciprocating pumps and its sealing effectiveness and lifespan through experimental methods. Experimental results indicate that a packing seal with a 5% compression volume leaks 12 ml per hour, with an average friction force between the packing and

文章引用: 于天亮. 往复柱塞泵盘根密封压缩量的实验研究[J]. 矿山工程, 2024, 12(3): 364-370.

DOI: 10.12677/me.2024.123043

plunger of approximately 69.9 N. This compression volume achieves a balance between effective hydraulic sealing and minimal packing wear, providing guidance for the design and assembly of packing seals in reciprocating pumps. By analyzing experimental data from lifespan tests, a fitted functional relationship is obtained, enabling quantitative estimation of packing seal leakage and friction force between the packing and plunger in similar experiments in the future.

## Keywords

Reciprocating Plunger Pump, Gland Packing Sealing, Compression Amount, Frictional Force

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

往复柱塞泵液力端柱塞密封通常采用填料密封形式，但在高压清洗系统中，介质压力高，介质清洁度底，导致柱塞密封寿命受到影响[1]。因此，当前国内研究主要侧重于通过仿真[2]和实验[3]手段进行填料密封性能提升和磨损寿命预测。

本文选择了实验方法研究填料密封的泄漏量和盘根与柱塞间的摩擦力，这两个参数直接关系到密封的性能和盘根即盘根使用寿命。通过在实验系统中设置不同预紧力(即不同的盘根压缩量)来深入了解不同盘根压缩量对密封性能和密封使用寿命的实际影响。

对实验数据进行详细记录和分析后，本文评估了不同盘根压缩量下填料密封的性能。结果显示，当盘根压缩量在其总厚度的 5% 时，既能够满足行业标准对系统密封性能的要求，又能够最小程度地损耗盘根。基于此结论，提供了对往复高压柱塞泵填料密封的设计和装配工艺的实用指导。

## 2. 实验方案

实验分两部分进行。

在实验的第一阶段，本研究专注于盘根的压缩量对其密封性能和耐用性的影响。这一部分实验设计了四个不同的压缩量等级，分别是盘根总厚度的 0%、5%、10% 和 15%，以探究在不同压缩程度下盘根的密封效果。实验在高压环境中进行，设定介质压力为 80 MPa，并随时补压以保持实验压力恒定。在实验过程中，密切监控密封函的泄漏情况，通过量杯测量高压介质的泄漏量，同时，利用布置在柱塞末端的力传感器监测盘根与柱塞间的摩擦力，以评估其工作状态。实验结束后，对盘根的磨损程度进行详细观察，以期找到一个既能保证往复柱塞泵高压密封的泄漏量在可接受范围内，又能尽量减少盘根损耗的理想压缩量。

实验的第二阶段，基于第一阶段得出的理想压缩量，进行盘根密封寿命的长期测试。在给定实验条件下，持续进行高压盘根往复密封实验，实验过程中持续监测并记录介质泄漏量和盘根与柱塞之间的摩擦力变化。当盘根的密封性能显著下降，达到无法满足密封要求时，实验终止。通过对实验数据的分析，确定在每小时泄漏量超过标准规定值时对应的柱塞往复运动总里程，作为该压缩量下盘根的预期使用寿命。

为了确保实验结果的实用性和可靠性，实验参数的设定参照了高压清洗机供液单元中高压往复柱塞泵的实际工作参数，并结合高压清洗作业中的实际工况。具体参数如表 1 所示，这些参数的设定旨在模

拟设备实际工作环境，从而得出的实验结果可以直接应用于实际设备的优化和改进，为往复柱塞泵的设计和维修提供科学依据。

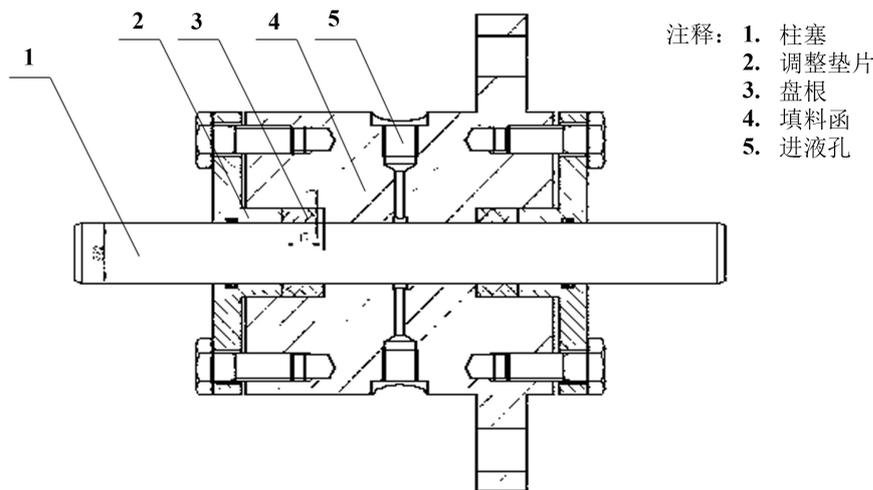
**Table 1.** High-pressure packing seal test parameters

**表 1.** 高压填料密封实验参数

序号	项目	参数
1	环境温度	27℃
2	柱塞直径	22 mm
3	介质	清水
4	柱塞平均速度	0.4 m/s
5	介质压力	80 MPa

### 3. 实验装置设计

柱塞填料密封实验工装，如图 1 所示。该工装是一个模拟真实工况的测试装置，用于研究柱塞与盘根之间的密封性能。该工装的核心部件包括 1 号柱塞、2 号调整垫片、3 号盘根和 4 号填料函。在实验过程中，可通过在各组实验中安装不同厚度的垫片，并拧紧填料函两侧的缩紧螺钉，精确地预紧填料密封中的盘根，进而调整盘根的压缩量。实验中选取了四个不同的压缩量等级，分别是盘根总厚度的 0%、5%、10% 和 15%，以全面评估不同压缩状态下的密封效果。



**Figure 1.** Schematic diagram of the stuffing box plunger seal test tooling

**图 1.** 填料函柱塞密封实验工装示意图

实验过程中，将 80 MPa 压力下的高压介质(纯水)从填料函的正中心处序号 5 补压孔注入填料函，并实时补压已保持密封系统压力恒定。由曲柄连杆机构驱动的柱塞按照预先设定的速度沿轴向进行往复运动。当高压介质试图从柱塞与盘根之间的微小缝隙中泄漏时，这些泄漏的介质会从序号 1 柱塞与填料函端盖之间的间隙流出，并被放置在填料函末端的量杯所捕获，以便后续进行泄漏量的精确测量。随着实验的进行，盘根的磨损情况加剧，盘根与柱塞间的间隙也会增大，柱塞密封的泄漏量也会逐渐增大。

实验系统中，力传感器安置在柱塞末端。在柱塞匀速运行过程中，这个传感器测量的柱塞拉压力与柱塞和盘根之间产生的摩擦力互相平衡，因而可以用该传感器所测拉压力来检测测量柱塞与盘根间的摩

擦力大小。通过监测传感器的读数，可以实时获取柱塞与盘根之间摩擦力，并通过这一数据衡量盘根磨损情况。随着盘根磨损情况的加剧，柱塞与盘根间的摩擦力大小也逐步减小。

## 4. 实验结果分析

### 4.1. 盘根压缩量实验

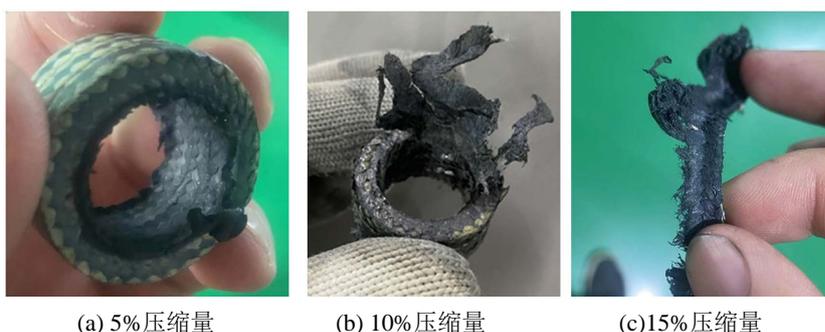
在盘根压缩量实验中，分别采用前述各压缩量进行四组实验，80 MPa 下保压实验一小时。试验结束后分别将四组实验量杯中的介质泄漏量进行记录。表 2 中记录了实验一小时后，不同压缩量的四组实验下填料密封函介质平均泄漏量。

**Table 2.** Experimental results of packing seal leakage at different axial compression amounts

**表 2.** 不同轴向压缩量的盘根密封泄漏量实验结果

序号	轴向压缩量	泄漏量
1	0%	-
2	5%	12 ml/h
3	10%	5 ml/h
4	15%	-

实验结束后拆开密封函工装，分别取出每组填料函中的盘根并记录其损坏情况。图 2 记录了采用不同的盘根压缩量进行实验后，拆开填料函所观察到的盘根状态。



**Figure 2.** Packing damage after one-hour pressure test

**图 2.** 一小时保压测试后盘根损坏情况

实验中力传感器实时记录柱塞与盘根间的摩擦力大小，将记录下来的数据进行处理，求出每组实验中本小时内柱塞盘根间的平均摩擦力。表 3 记录了不同压缩量的各组实验中，盘根与柱塞之间的平均摩擦力大小。

**Table 3.** Average friction force of plunger packing with different axial compression

**表 3.** 不同轴向压缩量的柱塞盘根平均摩擦力

序号	轴向 压缩量	盘根柱塞间的平均摩擦力
1	0%	61.5 N
2	5%	69.9 N
3	10%	83.2 N
4	15%	136.6 N

通过对表 2、表 3 以及图 2 的分析，可以得出不同压缩量对高压填料密封性能的影响。

当压缩量为 0% 时，即未对盘根施加任何预紧力，没有足够的压力将盘根压紧在柱塞表面，高压介质能够穿过盘根间隙直接泄漏。由于缺乏摩擦，盘根在实验结束时基本未出现磨损。

随着压缩量的增加至 5%，泄漏量显著降低，这表明预紧力的增加有助于改善填料密封的效能。在这种情况下，盘根与柱塞之间的摩擦力保持在较低水平，这有利于减少盘根的磨损。同时，由图 2(b) 可知被试盘根内圈沾染了可擦除的石墨，但并未出现损坏或失效。这是由于盘根中的石墨作为固体润滑剂降低了摩擦系数，使盘根免受过度磨损。

当压缩量进一步增加到 10% 时，虽然泄漏量仍然保持在较低水平，但盘根与柱塞之间的摩擦力显著增大。由图 2(c) 可知这种增加的摩擦力导致被试件在实验过程中出现拉毛失效。尽管这种失效并不意味着整个密封系统的失效，但它确实表明在这种压缩量下，盘根的使用寿命和可靠性会受到一定影响。

最后，当压缩量达到 15% 时，填料密封的泄漏量几乎降为零，盘根与柱塞之间的摩擦力也非常高。由图 2(c) 可知这种高摩擦力加速了盘根的磨损过程，导致盘根磨损破裂并失效。这表明虽该压缩量能够在短时间内提供极佳的密封效果，但过大的摩擦力也会加粗盘根磨损，从而缩短其使用寿命。

综上，在高压填料密封中，使用 5% 的压缩量能够实现较好的液力密封效果，同时保持较低的盘根磨损情况，从而平衡密封性能和盘根寿命。

## 4.2. 盘根寿命实验

在盘根寿命实验中，采用盘根压缩量实验中确定的 5% 压缩量继续进行盘根寿命实验，实验系统在 80 MPa 压力下保压持续运行并持续获得实验数据。为了在后续相关研究过程中对盘根密封泄漏量和盘根与柱塞之间的摩擦力进行定量预估计算，将所得实验数据进行函数拟合。

图 3 中散点为所记录的每小时填料密封泄漏量，曲线为使用幂函数制作泄漏量趋势随时间变化的拟合函数曲线。

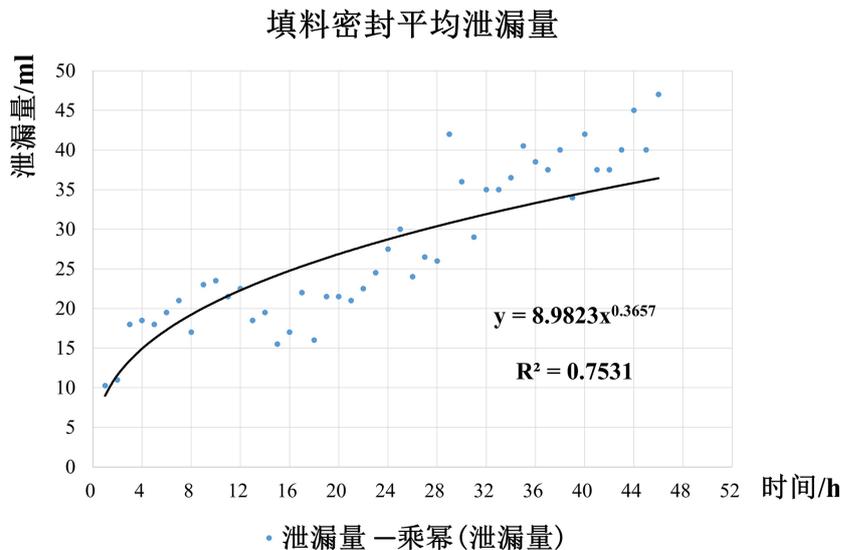


Figure 3. Fitting curve of packing seal leakage and its trend over time

图 3. 盘根密封泄漏量及其随时间变化趋势拟合曲线

根密封泄漏量随时间变化的拟合函数方程为：

$$y = 8.9823x^{0.3657} \quad (1)$$

注释:

y: 盘根密封泄漏量 ml;

x: 时间 h。

图 4 中散点表示实验中每小时记录力传感器数据, 曲线为使用对数函数绘制盘根与柱塞间的摩擦力随时间变化的拟合函数曲线。

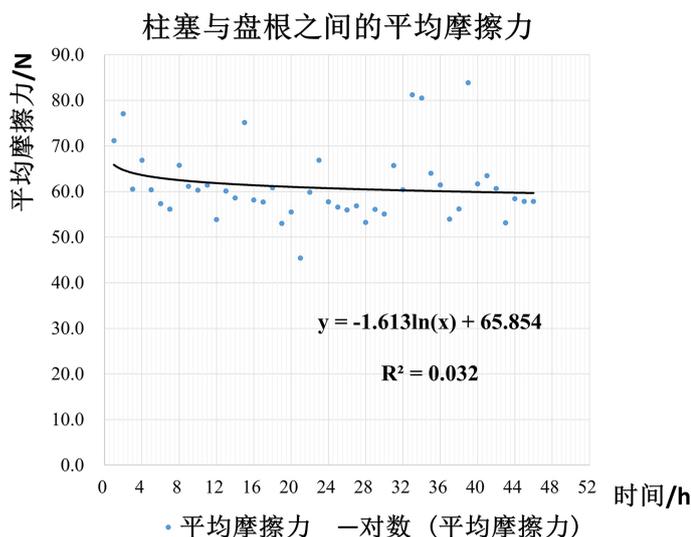


Figure 4. fitting curve of friction force of cylinder A and its changing trend over time

图 4. A 缸摩擦力及其随时间变化趋势拟合曲线

盘根与柱塞间摩擦力随时间变化的拟合函数方程为:

$$y = -1.613\ln(x) + 65.854 \quad (2)$$

注释:

y: 盘根与柱塞间的摩擦力 N;

x: 时间 h。

实验进行到 46 小时时, 观察到盘根再无密封效果, 随即终止试验。取出盘根后发现盘根磨损破裂完全失效。整个实验过程中, 柱塞累计往复运行总里程 17.5 km。故而实验结果表明, 在该工况下, 盘根往复密封的总寿命为 17.5 km。

## 5. 结语

采用实验方法研究高压清洗机中往复柱塞泵液力端柱塞填料密封最适合的盘根压缩量和在最合适压缩量下的盘根密封使用寿命, 实验结果表明, 盘根压缩量在其总厚度的 5% 时, 盘根可获得密封效果与使用寿命的最佳平衡, 使用 5% 压缩量的盘根进行实际工况下的密封寿命实验时, 盘根往复密封的总寿命为 17.5 km。可利用该结论对往复泵填料密封的设计和装配工艺进行指导。

根据填料密封寿命试验中的实验数据, 分别使用方差最小的拟合函数对盘根密封泄漏量和盘根与柱塞之间摩擦力随时间变化的曲线进行拟合, 并给出拟合函数的方程。可利用本次实验所获得的拟合函数在后续往复柱塞泵填料密封研究过程中对盘根密封泄漏量和盘根与柱塞之间的摩擦力进行定量预估计算。

## 参考文献

- [1] 杨学淳. 工程机械整机清洗工艺探讨[J]. 现代涂装, 2015, 18(2): 66-67.
- [2] 孔丽娟. 基于 ABAQUS 的柱塞泵盘根压环结构优化研究[J]. 石油和化工设备, 2016, 19(4): 17-19.
- [3] 王继光, 刘建平, 冯雁, 尤立. 一种高碳纤维盘根弹性变形曲线与摩擦系数测试实验的研究[J]. 现代制造技术与装备, 2020(3): 49-50.