

不同材质液压连接件密封性能数据对比及优化技术探讨

储佳燕 步文静 姜帆 刘晓扬 杨俊超

浙江迈思特液压管件股份有限公司，浙江省嘉兴市，314000；

摘要：液压连接件在高压和高温环境中广泛应用，密封性能直接影响液压系统的可靠性与安全性。不同材质的液压连接件在密封性能上存在显著差异，材质选择、密封结构设计及表面处理技术等因素对密封效果起着决定性作用。通过实验对比，发现不锈钢材质在高压和高温条件下表现出最佳的密封性能，而铝合金和塑料复合材料的密封性能较弱。通过优化密封结构设计、改进密封材料选用及表面处理工艺，可显著提升液压连接件的密封性能和耐久性，延长液压系统的使用寿命。

关键词：液压连接件；密封性能；材料优化

DOI：10.69979/3029-2700.25.02.079

引言

液压连接件在各类机械设备中的应用十分广泛，其密封性能直接影响系统的稳定性与安全性。不同材质的液压连接件在密封性能方面存在显著差异。本文通过对常用液压连接件材质的密封性能进行实验对比，分析其不同工作环境下的表现，并基于数据结果提出优化技术方案。通过系统性的数据分析与优化设计，本文旨在为液压系统的密封性能提升提供技术参考。

1 液压连接件材质选择的影响因素

1.1 材质对密封性的影响

液压连接件的材质直接决定其在高压和高温环境下的密封能力。常见的液压连接件材质包括不锈钢、铝合金、铜合金和塑料复合材料等。不同材质的热膨胀系数、硬度、弹性模量及抗腐蚀性差异，会对密封性能产生不同程度的影响。不锈钢由于其较高的强度和耐腐蚀性，在高温及腐蚀性液体环境下表现出较好的密封效果，但其较低的弹性模量可能导致密封面与密封圈接触不充分，从而影响密封效果。而铝合金虽然具有较轻的重量和良好的加工性，但其耐高压性能较差，不适合用于高压液压系统中。

在密封性能测试中，通过对比不同材质的压降值和泄漏量，可以明确不同材质的优缺点。实验表明，使用不锈钢材质的液压连接件在 10 MPa 压力下的泄漏量比铝合金低 20%。材质的表面粗糙度、表面硬度和表面处理工艺（如镀锌、氮化等）也会显著影响密封面的接触情况，进而影响整体密封性能^[1]。通过选择合适的材质和优化表面处理，可以有效提高液压连接件的密封可靠性与耐用性。

1.2 工作环境对材质选择的要求

液压连接件的工作环境对材质选择至关重要，主要涉及工作压力、温度、介质类型以及环境的腐蚀性等因素。在不同的工作条件下，液压连接件材质的性能需求会有所不同，从而影响其密封效果和使用寿命。工作压力对材质的强度要求较高。在高压液压系统中，如压力达到 40 MPa 以上，材质的抗压强度和抗疲劳性能必须足够优异。在极端压力条件下，不锈钢和钛合金因其高强度和高屈服强度，更适合用于高压系统。而铝合金由于其较低的强度，通常应用于低压环境，承受压力上限一般不超过 25 MPa。

工作温度的变化对材质的热膨胀性和耐高温性能提出挑战。高温环境下，如温度超过 150℃，铝合金和塑料复合材料因其较低的耐高温性能，可能发生膨胀或软化，影响密封效果。相比之下不锈钢和高温合金材料能承受较高的温度变化，且热膨胀系数较低，能够有效保持密封面的接触性。液压系统所使用的介质的腐蚀性也是选择材质时的重要考虑因素。在腐蚀性较强的介质（如酸性液体或海水环境）中，耐腐蚀性强的材质如不锈钢、镍基合金或特种合金材料能够有效防止密封件表面受到侵蚀，提高其密封可靠性和使用寿命^[2]。实验数据表明，使用不锈钢材质的液压连接件在盐雾腐蚀环境下的耐久性比铝合金高出 30%。

1.3 材质与耐久性的关系

液压连接件的耐久性与所选材质的物理、化学特性密切相关。材质的硬度、弹性、抗腐蚀性、耐磨性和抗疲劳性等性能对液压连接件的使用寿命有重要影响。在液压系统长期运行过程中，连接件的材质需承受反复的压力波动、摩擦和化学腐蚀，这要求其具备较强的耐久性。硬度是影响液压连接件耐久性的重要因素之一。硬度较高的材料如碳钢和不锈钢，能有效抵抗液压系统中

介质流动引起的磨损和划伤，延长密封件的使用寿命。实验数据显示，不锈钢材质在高压高温条件下的耐磨性比铝合金提高 40% 以上，从而显著降低了频繁更换密封件的频次。

弹性与耐疲劳性也在材质的耐久性中起到关键作用。在液压系统中，连接件长期受到动态载荷作用，材质的弹性模量和屈服强度决定了其在多次循环负荷下的稳定性。铝合金的弹性模量较低，容易在高频率的压力波动下产生永久变形，影响密封性能。而高强度合金钢或不锈钢则能较好地保持其几何形状和密封效果。抗腐蚀性对耐久性的影响不可忽视。液压系统常使用含有腐蚀性介质的油液或气体，材料的耐腐蚀性决定了其在恶劣环境下的使用寿命。使用耐腐蚀性强的材料（如高性能塑料或镍合金），可以显著提高连接件的耐久性，减少因腐蚀引起的密封失效。镍合金在酸性液体环境中的腐蚀速率比铝合金低 30%，从而提升了系统的可靠性。

2 液压连接件密封性能对比实验

2.1 实验设计与样品选择

为了科学评估不同材质液压连接件的密封性能，本实验设计了标准化的测试流程，确保实验数据的可比性与可靠性。实验方案基于 ISO 19879 标准，设置了不同工作条件下的密封性能测试，涵盖了压力、温度、介质类型等多个因素。通过模拟液压系统中常见的工况，验证各类材质连接件的密封效果及其耐久性。

在样品选择方面，实验挑选了四种常用材质的液压连接件：不锈钢、铝合金、铜合金和塑料复合材料。每种材质的样品均按相同的几何规格和表面处理要求制作，确保不同材质间的实验对比是公平的。对于不锈钢样品，选择了 316 不锈钢材质，其在工业应用中具有良好的耐腐蚀性；铝合金样品选用 6061 铝合金，具有较好的加工性和轻质特点；铜合金样品选择了黄铜，因其在常见液压介质中具有较强的抗腐蚀性；塑料复合材料样品则选择了改性聚四氟乙烯，因其优异的化学稳定性和耐温性能^[3]。实验中每种样品均在相同的测试条件下进行密封性能评估，包括压力测试、泄漏率测定以及长期疲劳测试。压力范围设置为 10 MPa、20 MPa 和 40 MPa，温度范围则为 -20℃ 至 150℃，同时使用含有润滑油和水的介质。通过这种多维度的实验设计，可以全面评估不同材质液压连接件的密封性能表现，并为后续的优化设计提供依据。

2.2 实验数据与结果分析

本实验通过对四种材质液压连接件的密封性能进行严格测试，获得了不同工作条件下的密封性能数据。实验涵盖了三种工作压力（10 MPa、20 MPa、40 MPa）

和两种工作温度（-20℃ 与 150℃），并测量了泄漏率、压力降和密封失效模式。测试结果表明，不锈钢材质的液压连接件在高压环境下表现出最优的密封性能。在 40 MPa 压力下，不锈钢样品的泄漏率仅为 0.02%，显著低于铝合金和铜合金的泄漏率，分别为 0.05% 和 0.07%。这一结果验证了不锈钢在承受高压时的优越密封性能，主要得益于其较高的屈服强度和耐疲劳性能。

温度对密封性能的影响亦非常显著。在 150℃ 的高温下，铝合金和塑料复合材料的密封效果显著下降。铝合金样品在高温下的泄漏率增至 0.1%，而塑料复合材料的泄漏率更高，达到 0.15%。相比之下，不锈钢和铜合金样品的泄漏率保持在较低水平，表明它们在高温环境下的稳定性较好。通过对比不同材质在不同压力和温度下的表现，可以看出不锈钢材质在高压高温环境中的密封可靠性最强，而铝合金和塑料复合材料的密封性能则受限于较低的强度和热稳定性^[4]。所有样品在长期循环负荷下均未出现明显的密封失效，但密封性能的衰减速度与材质的选择密切相关，铝合金的疲劳失效速度明显快于不锈钢。不锈钢材料在多重工作条件下展现出了最佳的密封性能和耐久性。

表 1 不同材质在不同压力和温度条件下的泄漏率数据

材料	10 MPa (-20℃) 泄漏率 (%)	20 MPa (-20℃) 泄漏率 (%)	40 MPa (-20℃) 泄漏率 (%)	10 MPa (150℃) 泄漏率 (%)	20 MPa (150℃) 泄漏率 (%)	40 MPa (150℃) 泄漏率 (%)
不锈钢	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02
铝合金	0.05	0.06	0.05	0.10	0.09	0.10
铜合金	0.07	0.08	0.07	0.05	0.06	0.07
塑料复合材料	0.10	0.12	0.10	0.15	0.14	0.15

2.3 不同材质的密封失效模式

在液压连接件的密封性能测试中，不同材质的密封失效模式存在显著差异，主要表现为泄漏、磨损和疲劳失效。实验数据显示，密封失效的类型与材质的物理、化学性质密切相关。铝合金和塑料复合材料的密封失效主要源于疲劳破坏。随着多次压力波动，铝合金在高压环境下容易产生永久形变，导致密封面不均匀接触，进而引发泄漏。实验结果表明，铝合金样品在 10 MPa 压力下经过 1000 次循环后，泄漏率由 0.03% 升至 0.08%。塑料复合材料的疲劳失效表现为表面微裂纹的扩展，尤其在 150℃ 的高温条件下，裂纹发展速度更快，导致密封效果迅速下降。

对于不锈钢和铜合金材质，密封失效通常表现为磨损。尤其在高压条件下，密封面与密封圈接触面不断摩擦，导致表面磨损加剧。尽管不锈钢的硬度较高，但在

极端压力 (40 MPa) 下, 密封圈与不锈钢连接件之间的磨损依然显著。实验表明, 不锈钢样品在 40 MPa 压力下, 密封面磨损深度约为 0.05 mm, 而铜合金则为 0.08 mm。不同材质的液压连接件在密封失效模式上存在明显差异, 材质的选择应综合考虑工作环境与失效模式, 以优化密封性能。

3 液压连接件密封性能优化技术

3.1 表面处理技术的应用

表面处理技术在液压连接件的密封性能优化中起着至关重要的作用。通过改善材质表面的微观结构与耐磨性, 表面处理不仅可以提升密封面的接触性, 还能有效延长液压连接件的使用寿命。常见的表面处理技术包括氮化处理、镀锌、陶瓷涂层以及激光表面处理等。氮化处理是一种常见的表面硬化技术, 能够显著提高金属表面的硬度和耐磨性。在不锈钢液压连接件的实验中, 氮化处理后, 表面硬度提高了 30% 以上, 磨损率降低了 20%, 有效改善了密封性能。在 20 MPa 的工作压力下, 氮化不锈钢的泄漏率仅为 0.01%, 远低于未处理样品的 0.04%。

镀锌技术则用于提高材料的耐腐蚀性, 特别是在水或酸性液体介质环境下具有显著效果。经过镀锌处理的铜合金连接件, 表现出优异的抗腐蚀性能, 其在盐雾腐蚀实验中的耐久性比未镀锌样品高出 40%。激光表面处理通过高能激光束快速加热金属表面, 形成硬化层, 有效提升了连接件的耐磨性和抗疲劳性能^[5]。通过优化表面处理工艺, 能够最大限度地提升液压连接件的密封性能, 减少因磨损和腐蚀引起的密封失效。

3.2 密封结构设计优化

液压连接件的密封性能不仅依赖于材质, 还与密封结构设计密切相关。优化密封结构设计能够有效提升连接件的密封效果, 降低泄漏率, 延长使用寿命。常见的优化措施包括密封面几何形状的调整、密封圈材料的选择以及密封压力的调控。密封面几何形状的优化是提升密封性能的关键因素之一。通过采用合适的面接触设计, 例如凹凸面或波纹面, 可以增强密封面的接触性, 确保在压力波动下密封圈与连接件之间始终保持足够的接触力。实验表明, 采用波纹密封面的连接件在高压下的泄漏率比传统平面设计降低了 15%。通过这种几何优化, 可以大幅度降低因接触不均匀引发的泄漏。

密封圈材料的选择对密封性能影响巨大。优化设计中, 选择具有较高弹性模量和耐高温、耐腐蚀性能的材料, 如氟橡胶或聚四氟乙烯 (PTFE), 能够提高密封圈的适应性和抗压性。实验中采用氟橡胶密封圈的液压连

接件, 在 40 MPa 的高压测试中, 泄漏率仅为 0.02%, 远低于普通橡胶圈的 0.1%。密封压力的合理调控同样不可忽视。过高或过低的密封压力都可能导致密封失效。通过精确控制密封压力, 可以确保密封圈与连接件之间的最佳接触压力, 从而提升密封可靠性。

3.3 改进密封材料的选用

液压连接件的密封材料直接影响密封性能的稳定性与耐久性。为了提升密封效果, 改进密封材料的选用是关键。选择具有较高弹性模量、耐高温、耐腐蚀的材料能够显著提高密封件的工作效率和使用寿命。常见的改进材料包括氟橡胶、聚四氟乙烯 (PTFE) 和高性能聚氨酯等。

氟橡胶因其优异的耐高温和耐化学性, 广泛应用于高温和腐蚀性环境下的液压系统中。实验数据显示, 氟橡胶在 150℃ 高温下, 泄漏率低至 0.01%, 相比普通橡胶提高了 30%。聚四氟乙烯 (PTFE) 则在高压和强腐蚀环境中表现突出, 特别适用于酸性介质, 实验中其泄漏率在 40 MPa 压力下仅为 0.02%。通过选择适应性更强的高性能密封材料, 可有效提升液压连接件的密封性能和系统可靠性。

4 结论

通过对不同材质液压连接件密封性能的实验研究, 本文明确了材质、工作环境及密封结构设计对密封效果的影响。不锈钢材质在高压高温环境中展现了优异的密封性能, 而铝合金和塑料复合材料则在极端条件下表现出较差的密封可靠性。通过表面处理技术、密封结构优化及密封材料的改进, 可以显著提升液压连接件的密封效果和耐久性。针对不同工况, 合理选择和优化密封件材料与设计, 将有效延长液压系统的使用寿命, 提升系统的可靠性和安全性。

参考文献

- [1] 王浩森. 高速液压旋转接头密封性能研究[D]. 沈阳工业大学[2025-01-18].
- [2] 李良福. 液压缸动连接件密封用的皮碗密封[J]. 机械制造, 1995, 33(4): 2.
- [3] 周晔, 张振清. 用于液压系统的密封连接件: CN202211490649. 7[P]. CN116123180A[2025-01-18].
- [4] 谭继威, 邓国强. 可实现多级密封的液压管卡套连接件: CN201521006406. 7[P]. CN205191015U[2025-01-18].
- [5] 周晔, 张振清. 用于液压系统的密封连接件: 202211490649[P][2025-01-18].