

橡胶垫片密封结构对采样管气密性的影响及优化设计研究

朱剑锋

浙江欧尔赛斯科技有限公司 浙江 绍兴 312366

【摘要】：采样管是环保监测、化工分析、生物医药等领域样品采集与传输的核心部件，其气密性决定样品完整性、检测数据准确性和使用安全性。橡胶垫片是采样管密封结构关键部分，其结构参数、材料性能和装配方式影响密封效果。本文实验分析橡胶垫片厚度、截面形状、表面粗糙度及材料硬度等结构参数对采样管气密性的影响，明确密封失效诱因，提出优化方案。结果显示，优化后的橡胶垫片密封结构能让采样管在 0.1MPa 压力下泄漏率降至 0.03mL/min 以下，满足高精度采样需求，提升密封结构耐用性和稳定性。研究成果可为采样管密封结构设计、生产及优化提供理论和实践参考，提升产品核心竞争力。

【关键词】：橡胶垫片；采样管；气密性；密封结构；优化设计

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.068

1 引言

在环保监测、化工生产、生物医药等领域，采样管是实现样品精准采集、无损传输的关键设备，其气密性影响检测结果。橡胶垫片是采样管密封核心元件，承担填充密封间隙、阻隔介质泄漏作用。但实际中，因结构设计、材料选型或装配工艺问题，采样管气密性不足问题频发，表现为样品泄漏、外界空气渗入，影响检测精度，还可能引发安全隐患。

当前，国内外对橡胶密封结构研究多集中于大型设备，针对对采样管橡胶垫片密封研究少，且缺乏结合实际生产场景的优化方案。因此，开展橡胶垫片密封结构对采样管气密性的影响及优化设计研究，对解决浙江欧尔赛斯采样管密封难题、提升产品质量、满足市场需求有重要意义和价值。

2 采样管橡胶垫片密封相关理论基础

2.1 采样管密封原理

采样管密封依靠橡胶垫片弹性变形。盖体拧紧时，垫片受轴向压力压缩变形，填充盖体与管体间隙，形成密封面，阻止样品泄漏和外界介质渗入。橡胶垫片密封效果取决于两个核心因素：一是弹性变形能力，能否在一定压力下充分填充密封间隙；二是与密封面贴合程度，贴合越紧气密性越好。

其密封结构分两类：一类是钳口式密封，用于 12mL 钳口采气瓶等，通过钳口压紧垫片密封；另一类是螺纹式密封，用于 VOC 直口棕色采样瓶等，通过盖体螺纹拧紧使垫片变形密封。无论哪种方式，橡胶垫片结构参数都直接影响密封面压力分布和贴合效果，决定采样管气密性。

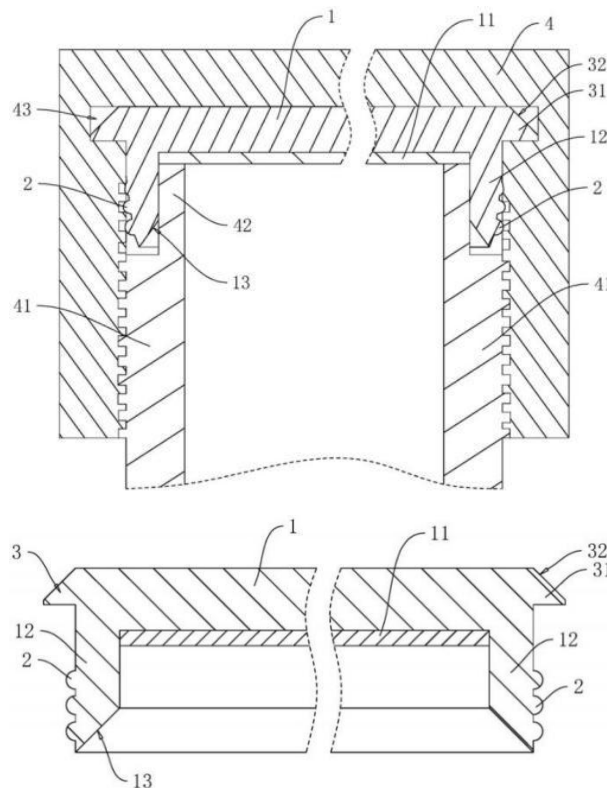
2.2 橡胶垫片密封的核心影响因素

结合橡胶密封理论与采样管使用场景，橡胶垫片密封核心影响因素分三类，即结构参数、材料性能和装配工艺。结构参数是影响气密性最直接因素，涵盖垫片厚度、截面形状等；材料性能决定垫片弹性等，影响密封稳定性和耐用性；装配工艺影响垫片变形均匀性和密封面贴合质量。

橡胶垫片材料性能包括硬度等，常用橡胶材料有丁腈、氟、

硅橡胶，性能差异大。丁腈橡胶耐油耐磨，适合普通工况采样管密封；氟橡胶耐腐蚀耐高温，适合腐蚀性样品和高温环境采样；硅橡胶弹性好、耐低温，适合低温采样。

装配工艺主要影响因素有拧紧力矩、密封面清洁度和装配偏差。拧紧力矩不足或过大，都会影响密封效果和寿命；密封面有杂质或划痕，会使气密性下降。



3 橡胶垫片密封结构对采样管气密性的影响实验

3.1 实验材料与设备

实验材料：选 12mL 钳口采气瓶（硼硅玻璃管体，密封面直径 15mm）作采样管，橡胶垫片用丁腈橡胶（NBR），邵氏硬度 60 度、70 度、80 度，拉伸强度 15MPa，断裂伸长率 300%，压缩永久变形率 18%（23℃ 常温，22h 保温），垫片由同一模

具生产确保参数一致。

实验设备：密封性能测试台（配压力源、皂膜流量计，精度 0.01mL/min）、邵氏硬度计（A 型，精度±1 度）、表面粗糙度仪（精度 0.01 μm）、电子万能试验机（精度 0.5 级）、扭矩扳手（精度±0.1N·m）、恒温箱（控温-50℃~150℃，精度±1℃）。

3.2 实验方案设计

采用单因素实验法，分别探究橡胶垫片厚度、截面形状、表面粗糙度及材料硬度对采样管气密性的影响，每次仅改变一个变量，其他不变。实验条件：温度 23℃，相对湿度 50%，采样管内压力 0.1MPa，稳压 30min 后测泄漏率，每组选 10 个样品取平均值作结果确保可靠性。

实验变量设置：（1）垫片厚度选 0.5mm、1.0mm、1.5mm、2.0mm，截面圆形，表面粗糙度 Ra=0.8 μm，硬度 70 度；（2）截面形状选圆形、矩形、梯形，厚度 1.0mm，表面粗糙度 Ra=0.8 μm，硬度 70 度；（3）表面粗糙度选 Ra=0.2 μm、0.4 μm、0.8 μm、1.6 μm，厚度 1.0mm，截面圆形，硬度 70 度；（4）材料硬度选 60 度、70 度、80 度，厚度 1.0mm，截面圆形，表面粗糙度 Ra=0.8 μm。

3.3 实验结果与分析

3.3.1 垫片厚度对气密性的影响

实验结果显示，垫片厚度为 0.5mm 时，采样管平均泄漏率 0.18mL/min，不满足合格标准；1.0mm 时，平均泄漏率 0.08mL/min，满足合格标准；1.5mm 时，平均泄漏率 0.07mL/min，气密性略有提升；2.0mm 时，平均泄漏率 0.12mL/min，气密性下降。

分析原因可知，垫片厚度过薄（0.5mm），拧紧时变形量不足，无法充分填充密封间隙，密封面有微小缝隙，泄漏率高；厚度适中（1.0mm - 1.5mm），垫片能合理弹性变形，充分贴合密封面，密封效果好；厚度过厚（2.0mm），变形阻力增大，拧紧时难以达到均匀压缩量，密封面压力分布不均，局部有缝隙，泄漏率上升。

因此，橡胶垫片厚度并非越大越好，存在最优范围，结合实验，1.0mm - 1.5mm 是适合浙江欧尔赛斯 12mL 钳口采气瓶的垫片厚度范围。

3.3.2 截面形状对气密性的影响

实验结果显示，圆形、矩形、梯形截面垫片平均泄漏率分别为 0.08mL/min、0.15mL/min、0.06mL/min，梯形截面气密性最优，圆形次之，矩形最差。分析原因，梯形截面上下表面有倾斜角度，拧紧时不仅轴向压缩，还径向扩张，能更紧密贴合密封面，增强压力分布、减少缝隙；圆形仅轴向压缩，贴合效果差；矩形边缘易应力集中、变形不均，密封面贴合不紧密、

泄漏率高。因此，梯形截面更适合采样管橡胶垫片。

3.3.3 表面粗糙度对气密性的影响

实验结果显示，表面粗糙度 Ra=0.2 μm 时，平均泄漏率 0.05mL/min；Ra=0.4 μm 时，0.07mL/min；Ra=0.8 μm 时，0.08mL/min；Ra=1.6 μm 时，0.16mL/min。随着表面粗糙度增大，采样管泄漏率上升，气密性下降。

分析原因：橡胶垫片表面粗糙度越小越光滑，与采样管密封面贴合度高，缝隙少，泄漏率低；反之，表面凹凸不平，缝隙增多，介质易泄漏，泄漏率上升。但表面粗糙度并非越小越好，当 Ra≤0.2 μm 时，垫片表面过滑，拧紧易打滑，影响装配稳定性，且成本高。

因此，结合气密性和生产成本，Ra=0.4 μm - 0.8 μm 为最优表面粗糙度范围。

3.3.4 材料硬度对气密性的影响

实验结果显示，硬度 60 度的垫片平均泄漏率为 0.11mL/min，硬度 70 度的为 0.08mL/min，硬度 80 度的为 0.13mL/min。硬度 70 度时气密性最优，硬度过高或过低，气密性均下降。分析原因，硬度过低（60 度），橡胶垫片弹性过强，拧紧时易过度变形甚至挤出，使密封面压力不足，泄漏率上升；硬度适中（70 度），垫片弹性和刚性良好，能合理变形并紧密贴合密封面，密封效果好；硬度过高（80 度），垫片弹性差、变形量不足，无法填充密封间隙，使密封面有缝隙，泄漏率上升。因此，70 度左右邵氏硬度是采样管橡胶垫片的最优硬度。

3.3.5 实验结论

综合实验结果，橡胶垫片的厚度、截面形状、表面粗糙度和材料硬度对采样管气密性影响显著。最优结构参数组合为：厚度 1.0mm - 1.5mm、梯形截面、表面粗糙度 Ra = 0.4 μm - 0.8 μm、材料为硬度约 70 度的丁腈橡胶。在此组合下，采样管泄漏率可控制在 0.08mL/min 以下，满足合格标准。同时，实验发现密封失效主因是垫片变形不均、密封面贴合不紧及垫片与采样管密封结构不匹配。

4 采样管橡胶垫片密封结构优化设计

4.1 具体优化方案

4.1.1 垫片结构参数优化

基于实验结果优化橡胶垫片关键结构参数：（1）厚度优化：确定垫片厚度为 1.2mm，处于 1.0mm - 1.5mm 最优范围，保证变形量且避免密封失效；（2）截面形状优化：将圆形截面改为梯形截面，上底 12mm、下底 14mm、高 1.2mm、倾斜角度 15°，增强贴合度，提升密封效果；（3）表面粗糙度优化：将表面粗糙度控制在 Ra = 0.6 μm，兼顾气密性与成本，避免装配打滑；（4）边缘优化：在上下边缘设半径 0.2mm 圆

角,减少应力集中,避免边缘破损,提升耐用性。

4.1.2 材料性能优化

常规采样场景,选用邵氏硬度70度的丁腈橡胶,其拉伸强度 $\geq 15\text{MPa}$ 、断裂伸长率 $\geq 300\%$ 、压缩永久变形率 $\leq 18\%$,弹性、耐磨性和耐油性好,能满足密封需求;腐蚀性样品(如酸碱溶液)和高温(温度 $\leq 120^\circ\text{C}$)采样场景,选用邵氏硬度75度的氟橡胶,其耐腐蚀性和耐高温性优异,拉伸强度 $\geq 12\text{MPa}$ 、断裂伸长率 $\geq 200\%$ 、压缩永久变形率 $\leq 15\%$,可提升密封结构稳定性和耐用性;低温(温度 $\geq -40^\circ\text{C}$)采样场景,选用邵氏硬度65度的硅橡胶,其耐低温性好、弹性优异,可避免低温下垫片脆裂致密封失效。

4.1.3 装配工艺优化

除优化垫片结构和材料外,还优化采样管装配工艺以确保密封效果稳定:(1)拧紧力矩优化:根据垫片厚度和硬度,确定最优拧紧力矩为 $1.5\text{N}\cdot\text{m}$,避免力矩不足或过大导致压缩量不够或垫片损坏;(2)密封面清洁:装配前增加清洁工序,用无尘布擦拭采样管和盖体密封面,去除杂质和油污,确保密封面平整干净;(3)装配偏差控制:优化装配工装,使盖体与管体同轴度偏差 $\leq 0.1\text{mm}$,避免装配偏差导致垫片变形不均匀。

4.2 优化后垫片结构特点

优化后的橡胶垫片具有以下特点:一是结构合理,梯形截面设计提升了与密封面的贴合度,圆角边缘减少了应力集中,1.2mm的厚度确保了合理的变形量;二是材料适配性强,根据不同使用场景选用对应的橡胶材料,提升了密封结构的通用性和稳定性;三是装配便捷,优化后的垫片结构适配现有装配工艺,无需新增设备,降低了生产难度;四是耐用性好,通过参数优化和工艺改进,垫片的反复装配次数可达50次以上。

5 优化方案验证实验

5.1 验证实验方案

为验证优化方案有效性,选取12mL钳口采气瓶和VOC直口棕色采样瓶两种常用型号,用优化前后橡胶垫片对比实

验。实验条件同前文,温度 23°C ,相对湿度50%,采样管内压力 0.1MPa ,稳压30min测泄漏率,各型号取10个样品平均值为结果。同时做耐用性实验,反复装配拆卸50次后测泄漏率考察优化后垫片耐用性。

5.2 验证实验结果

12mL钳口采气瓶,优化前垫片平均泄漏率 $0.09\text{mL}/\text{min}$,优化后 $0.03\text{mL}/\text{min}$,泄漏率降66.7%;反复装配拆卸50次后,优化前 $0.15\text{mL}/\text{min}$ 超合格标准,优化后 $0.06\text{mL}/\text{min}$ 仍达标。

VOC直口棕色采样瓶,优化前垫片平均泄漏率 $0.10\text{mL}/\text{min}$,优化后 $0.02\text{mL}/\text{min}$,泄漏率降80%;反复装配拆卸50次后,优化前 $0.16\text{mL}/\text{min}$ 超合格标准,优化后 $0.05\text{mL}/\text{min}$ 达标。

此外,腐蚀性样品采样用优化后氟橡胶垫片实验,垫片浸30%盐酸溶液48小时后装采样管,泄漏率 $0.04\text{mL}/\text{min}$ 仍达标,说明优化后垫片耐腐蚀性好。高温场景,采样管置 120°C 恒温箱72小时后,泄漏率 $0.05\text{mL}/\text{min}$,密封性能稳定。

6 结论

本文深入探讨了橡胶垫片密封结构对采样管气密性的影响,通过实验分析和优化设计,得出以下结论:

(1)橡胶垫片的厚度、截面形状、表面粗糙度及材料硬度均对采样管气密性产生显著影响,其中,厚度 $1.0\text{mm}-1.5\text{mm}$ 、梯形截面、表面粗糙度 $R_a=0.4\mu\text{m}-0.8\mu\text{m}$ 、邵氏硬度70度左右的丁腈橡胶,是适合常规采样管的最优结构参数组合。

(2)密封失效的核心诱因是垫片变形不均匀、密封面贴合不紧密,以及垫片结构参数与采样管密封结构不匹配,通过优化垫片结构参数、材料性能和装配工艺,可有效解决上述问题,提升采样管的气密性。

(3)优化后的橡胶垫片密封结构,可使采样管在 0.1MPa 压力下的泄漏率降至 $0.03\text{mL}/\text{min}$ 以下,反复装配拆卸50次后仍能保持良好的密封性能,同时适配不同使用场景,满足各类采样需求。

参考文献:

- [1] 金祥. 多尺度协同增强密封垫片性能研究及其连接结构健康监测[D]. 江苏:苏州大学,2024.
- [2] 王彦龙. 板式热交换器橡胶垫片非线性接触密封性能有限元分析[J]. 机械研究与应用,2019,32(5):42-46.
- [3] 孙振国,顾伯勤. 高温密封垫片加速寿命试验方法[C]//第八届全国压力容器学术会议论文集. 2013:530-534.
- [4] 康伟. 中开式泵用密封垫片的研究[D]. 江苏:苏州大学,2011.