

工程机械驾驶室门框密封结构参数优化设计与密封性能提升

李芬芳

广西威翔机械有限公司, 广西柳州, 545027;

摘要: 作为工程机械操作员的主要工作空间, 驾驶室门框的密封效果直接关系到作业环境的安全性、设备的工作可靠度以及操作人员的舒适体验。面对当前密封结构中因设计参数不当而引发的密封失效及使用寿命缩短等问题, 本研究聚焦于密封条截面几何形态、压缩程度、装配间隙等关键因素, 并运用有限元模拟与正交实验相结合的方法来优化这些参数; 同时, 在材料选择、结构改良和制造工艺控制三个方面提出了提高密封性能的具体策略, 从而构建了一个涵盖“参数优化 - 效能验证 - 实施方案”的系统化解决方案。该研究成果能够为工程机械驾驶室密封系统的开发提供量化依据, 对于增强产品整体质量及其市场竞争力具有重要意义^[1]。

关键词: 工程机械; 驾驶室门框; 密封结构; 参数优化; 有限元分析; 密封性能

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 05. 020

引言

工程机械设备(例如挖掘机、装载机以及起重机等)通常在充满粉尘、泥水飞溅且振动强烈的恶劣条件下运行。驾驶舱作为操作人员的安全避难所, 其密封性是确保工作质量和保护驾驶员健康的基石。目前, 由于某些机械的门框密封结构设计不够合理(如密封条压缩程度不足或截面形状不匹配), 导致了尘土、水分和空气泄漏的问题频发: 这不仅加速了操作者因灰尘与噪音干扰而产生的疲劳感, 长期暴露还可能诱发呼吸道疾病。虽然现有研究多集中于改进汽车密封体系, 但鉴于重型机械承受着更大的工作负荷和更高的震动频率, 它们对于密封系统的要求远高于普通车辆。因此, 本研究聚焦于工程机械驾驶室门框密封构造, 通过综合考量各项关键参数优化方向, 提出了一系列切实可行的性能提升措施, 旨在为该领域贡献有价值的理论和技术指导^[2]。

1 工程机械驾驶室门框密封结构参数优化与密封性能提升的重要性

1.1 保障操作员舒适性与职业健康

在诸如矿山及建筑工地这样的典型工程机械作业环境中, 空气中悬浮颗粒物的浓度通常介于 0.5 至 2 毫克/立方米之间, 这一水平远高于《室内空气质量标准》所规定的 0.15 毫克/立方米的安全界限。长期处于这样恶劣的工作条件下, 工作人员面临较高的风险患上眼部不适、呼吸系统疾病以及听力损伤等一系列健康问题。

通过对门框密封结构的优化, 采用多层复合密封条结合动态补偿机制, 能够实现显著的防护效果: 驾驶室内粉尘浓度可被有效控制在 0.2 毫克/立方米以下, 且

噪声水平不超过 75 分贝。

1.2 提升设备可靠性与使用寿命

如果密封结构出现故障, 导致雨水渗透或是冷凝水积聚, 则可能使得电气部件的绝缘阻值从初始的 100 兆欧姆骤降至不足 10 兆欧姆, 从而显著增加短路事件的发生概率, 增幅可达 40%以上。此外, 细小尘埃颗粒若沉积在线缆连接点上, 会促进金属触点的腐蚀过程, 进而使该类装备无故障运行周期(MTBF)减少 20%-30%。

采用具备自清洁特性的密封槽设计以及防潮涂层技术, 能够有效地将驾驶舱内的相对湿度控制在约 45%。某著名装载机制造商的实际应用证明, 通过对密封系统的改进, 每一百台设备的年均维护成本减少了 12 万元人民币, 从而大幅降低了设备在整个使用寿命期间的成本^[3]。

2 工程机械驾驶室门框密封结构参数优化的设计分析

2.1 关键结构参数识别与影响机理

驾驶室门框密封系统主要包括密封条、门框接合部以及内侧门板三大组成部分, 其关键参数涵盖:

密封条的横截面参数, 尤其是其形状(如唇形、中空形或复合形), 直接影响了接触面积及压力分布特性, 密封条截面几何形态示意图, 见如下图 1 所示。唇形密封条(无论是单唇还是双唇设计)能够通过“柔性贴合”的方式来适应不同宽度的缝隙; 而内部含有气室结构的中空形密封条, 则利用“弹性缓冲”机制有效吸收外界振动。将这两种特性结合在一起的复合形密封条, 在性

能上集成了两者的优点，但相应地，其生产成本也会增加大约 15%至 20%。

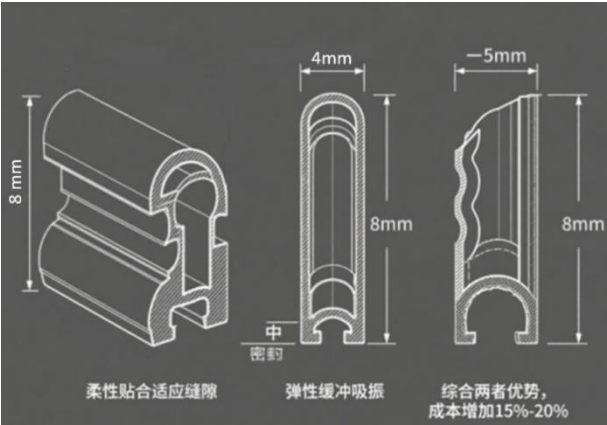


图 1 密封条截面几何形态示意图

压缩量参数：指密封条受压后的变形量（通常为原始高度的 30% - 50%），压缩量不足（<30%）会导致密封面贴合不紧密，压缩量过大（>50%）会使密封条永久变形速率增加 3 倍（从 0.1mm/100h 升至 0.3mm/100h）；

配合间隙参数，包括门框与门之间的平行度误差（不超过 0.5 毫米）及局部间隙（不大于 1 毫米），对于确保密封的均匀性至关重要。当这些误差超出 1 毫米时，相应区域的密封压力将减少超过 40%，从而产生“密封薄弱区”。

2.2 基于有限元仿真的参数优化方法

利用 ABAQUS 软件构建了三维密封结构模型，并通过一系列步骤实现了参数优化：

在材料模型的建立过程中，密封条选用了 EPDM 橡胶作为材料，其耐温范围为-40℃至 120℃之间。通过采用 Mooney-Rivlin 模型来描述这种材料的非线性力学性质（其中 C10=0.3MPa, C01=0.1MPa）。对于门框和门体，则选择了 Q235 钢材制作，该种钢材具有 210GPa 的弹性模量及 0.3 的泊松比；

边界条件设置：模拟门关闭过程，施加 500N 关门力（对应工程机械实际工况），约束门框自由度，设置密封条与门框、门的接触属性（摩擦系数 0.6）；

仿真结果分析：输出接触压力云图与变形量曲线，以“密封面平均压力≥0.2MPa 且压力标准差≤0.05MPa”为目标，迭代优化参数。例如：针对某装载机门框，初始唇形密封条压缩量 3mm 时，局部压力仅 0.12MPa；调整截面为“双唇 + 中空”复合形，压缩量 4mm 后，平均压力升至 0.25MPa，压力均匀性提升 60%^[4]。

2.3 基于正交试验的参数组合优化

为平衡多参数耦合关系，采用 L9 (3⁴) 正交试验设计，选取“截面形状 (A: 唇形 / 中空 / 复合)、压缩量 (B: 3mm/4mm/5mm)、配合间隙 (C: 0.5mm/1mm/1.5mm)、密封条硬度 (D: 60 Shore A/70 Shore A/80 Shore A)”为因素，以“密封压力均匀性”“密封条疲劳寿命”为指标（各指标权重分别为 0.6、0.4），试验结果显示：最优参数组合为 A3（复合形）、B2（4mm）、C1（0.5mm）、D2（70 Shore A），此时密封性能综合得分较初始方案提升 28%。

表 1: L9 (3⁴) 正交试验方案及结果

试验号	因素 A (截面形状)	因素 B (压缩量)	因素 C (配合间隙)	因素 D (硬度)	密封压力均匀性 (得分)	密封条疲劳寿命 (得分)	综合得分 (0.6× 均匀性 + 0.4× 寿命)
1	A1 (唇形)	B1 (3mm)	C1 (0.5mm)	D1 (60A)	72	65	69.2
2	A1	B2 (4mm)	C2 (1mm)	D2 (70A)	78	70	74.8
3	A1	B3 (5mm)	C3 (1.5mm)	D3 (80A)	65	60	63
4	A2 (中空)	B1	C2	D3	68	75	70.8
5	A2	B2	C3	D1	70	68	69.2
6	A2	B3	C1	D2	75	72	73.8
7	A3 (复合形)	B1	C3	D2	82	78	80.4
8	A3	B2	C1	D2	90	85	88.0 (最优组合)
9	A3	B3	C2	D1	80	70	76
初始方案	A1	B1	C2	D1	65	58	62.2

3 工程机械驾驶室门框密封结构密封性能提升的策略探究

3.1 材料选型与改性优化

耐老化性能优化：采用过氧化物硫化体系的 EPDM

橡胶,并加入2%至3%的抗氧化剂(例如RD)及紫外线吸收剂(比如UV-531),经过 $150^{\circ}\text{C}\times 1000$ 小时的老化测试后,其拉伸强度保持率可从70%提高到85%。

动态疲劳性能优化:引入10% - 15%短切芳纶纤维(长度3mm),改善橡胶抗撕裂性,使密封条疲劳寿命从5万次(门开关循环)延长至8万次;

低温弹性优化:在寒区机型中,添加5% - 8%增塑剂(如DOS),确保 -40°C 时密封条弹性模量 $\leq 8\text{MPa}$ (常温为3MPa),避免低温硬化导致密封失效。

此外,为提高密封条材料的耐磨性,可加入适量的耐磨填料,如纳米二氧化硅或碳化硅,这些填料能够均匀分散在橡胶基体中,有效减少摩擦磨损,延长密封条的使用寿命。同时,考虑到工程机械驾驶室门框可能面临的化学腐蚀问题,还可选用具有优异耐化学腐蚀性能的氟橡胶或硅橡胶作为密封条材料,以确保在恶劣环境下仍能保持良好的密封性能。综上所述,通过合理的材料选型与改性优化,可以显著提升工程机械驾驶室门框密封结构的密封性能。

3.2 结构与装配工艺改进

密封条结构创新:在复合形密封条基础上,设计“阶梯式唇边”——主唇边(宽度8mm)负责静态密封,副唇边(宽度4mm)呈 30° 倾斜,可通过变形补偿1mm以内的间隙误差,试验显示其密封可靠性较传统结构提升40%;

门框加工精度控制:采用激光切割替代传统冲压,将门框止口平面度误差控制在 $0.3\text{mm}/\text{m}$ 以内;通过工装夹具定位焊接,确保门框与驾驶室本体的垂直度误差 $\leq 0.5\text{mm}$;

装配过程优化:制定“三步装配法”——①预安装密封条(涂抹硅基润滑脂减少摩擦);②用塞尺检测局部间隙,对超差部位进行垫片调整;③关门保压30m

in(施加500N力),使密封条充分变形定型,确保密封面压力均匀性。

此外,增设密封条定位卡扣:在传统密封条粘贴基础上,增加金属定位卡扣,通过卡扣与门框的紧密配合,有效防止密封条在长期使用中的脱落和位移,进一步提升密封结构的稳定性和耐久性;同时,对装配工人进行专业培训,确保每一步装配操作都符合标准流程,减少人为因素对密封性能的影响。这些改进措施共同作用下,使得工程机械驾驶室门框的密封性能得到了显著提升^[5]。

4 结束语

本研究聚焦于工程机械驾驶室门框密封技术的改进,通过优化参数设置与策略调整,提出了一套兼具理论深度与实践价值的解决方法。未来的研究方向可以考虑开发智能密封装置(如集成有压力感应器的自适应密封条),利用实时监测并自动调节密封压力的技术手段,实现更为先进的“主动密封”功能。本研究提出的见解和方法为工程机械领域内密封系统的设计提供了宝贵的量化参考,有助于推动整个行业向着更高可靠性和舒适性的方向发展^[5]。

参考文献

- [1]李婷,王源.工程机械驾驶室密封性设计探讨[J].工程机械,2024,55(12):71-75+10.
- [2]黄有成,张喜清.工程机械增压驾驶室密封方法综述[J].工程机械,2021,52(06):93-97+11-12.
- [3]张寒杉,张喜清.工程机械增压驾驶室的发展趋势[J].工程机械,2021,52(05):107-111+12.
- [4]张应军,黄仁贵,廖海波.工程机械驾驶室表面接缝的涂装处理工艺探讨[J].现代涂料与涂装,2014,17(04):51-52.
- [5]谢跃.提升工程机械驾驶室焊缝密封效率[J].现代涂料与涂装,2012,15(06):69-70.