

# 防尘型导轨夹持气缸的结构设计与性能优化研究

钱 墅 伍赞贤 林兴湖

浙江星辰气动有限公司 浙江 温州 325603

**【摘要】**防尘型导轨夹持气缸作为自动化设备中的关键执行元件，其结构性能直接影响设备在恶劣环境下的工作可靠性，本文针对现有夹持气缸在粉尘环境中易出现的卡滞、磨损等问题，开展结构创新设计与性能优化研究。通过分析防尘密封机制、导轨夹持原理和动力传递特性，提出了集成式防尘结构和多级密封方案。研究结果表明，采用迷宫式防尘结构与唇形密封组合设计，可有效阻止粉尘颗粒进入气缸内部；优化活塞杆与导向套的配合间隙，能够显著提升运动平稳性；改进夹持块型线分布，增强了夹持力的均匀性和稳定性。同时，通过台架试验验证了优化后气缸在粉尘环境下的耐久性和可靠性，为同类产品的性能提升提供了理论依据和实践参考。

**【关键词】**夹持气缸；防尘设计；结构优化；密封性能；运动精度；耐久性

DOI:10.12417/2705-0998.25.21.044

## 1 引言

在现代工业自动化领域，气动执行元件因其结构简单、维护方便、成本适中等优点得到广泛应用，特别是在需要快速响应和精确控制的场合，气动元件展现出独特的优势。其中，导轨夹持气缸作为一种具有精确定位和可靠夹持功能的特殊气缸，在物料搬运、工件固定、位置锁定等场景中发挥着重要作用，这种气缸通过独特的机械结构实现对待夹持部件的稳定固定，同时借助导轨的导向功能确保运动精度，已成为自动化生产线上不可或缺的关键部件。

然而，在金属加工、木材处理、粉末冶金等存在大量粉尘颗粒的工业环境中，传统夹持气缸面临着严峻挑战，这些环境中的粉尘颗粒具有粒径小、硬度高、易积聚等特点，极易通过气缸运动部件的间隙进入内部，粉尘侵入后，会加速密封件磨损，增大运动阻力，改变摩擦特性，甚至造成气缸卡死失效。据统计，在粉尘环境中工作的气动元件，其平均使用寿命往往只有正常环境下的30%-50%，这不仅增加了设备维护成本，更严重影响生产线的稳定运行，因此，开发具有优异防尘性能的夹持气缸已成为行业迫切需求。

防尘型导轨夹持气缸的设计需要解决多重技术难题，在防尘方面，既要有效阻隔外部粉尘，又要保证气缸的正常散热和运动灵活性，在夹持性能方面，需要确保在长期使用过程中保持稳定的夹持力和精确的定位精度，在结构设计方面，要兼顾防尘效果与紧凑性要求，避免因防尘措施导致结构过于复杂或体积过大。这些技术要求相互关联、相互制约，需要从系统角度进行综合分析和优化。

当前，防尘型气缸的发展呈现出功能集成化、结构紧凑化、材料多元化的趋势，通过创新结构设计，采用新型密封材料，优化制造工艺，可以有效提升气缸的环境适应性和使用寿命。本文将从防尘机理分析入手，系统研究防尘结构的设计要点，探讨提升夹持性能的优化方法，并通过实验验证改进效果，为

开发高性能防尘型夹持气缸提供技术支持。

## 2 防尘结构设计与密封机制

防尘型导轨夹持气缸的防尘效果首先取决于外部防尘结构的设计，常见的防尘结构包括伸缩式防尘罩、迷宫式密封和接触式密封等，伸缩式防尘罩能够完全覆盖活塞杆外露部分，有效隔离粉尘，但会增加结构空间和运动惯性；迷宫式密封通过多级曲折通道增加粉尘侵入阻力，具有非接触、无磨损的特点，但对微小粉尘的阻挡效果有限；接触式密封依靠弹性材料与运动部件之间的紧密接触实现密封，防尘效果好，但会产生一定的摩擦阻力。在实际应用中，通常采用组合式防尘方案，充分发挥不同防尘结构的优势。

活塞杆密封系统的设计至关重要，现代防尘气缸多采用多级密封结构，在不同位置布置不同功能的密封件，最外侧通常设置刮尘环，用于清除活塞杆表面附着的粉尘颗粒；中间层布置主防尘密封，采用耐磨、耐油的弹性材料制成，形成可靠的防尘屏障；最内侧是导向支撑环，既保证活塞杆的运动精度，又起到辅助密封作用，这种多层次的设计确保了即使有少量粉尘突破外层防线，也不会直接影响气缸的内部工作。密封材料的选择需要考虑工作环境的温度、湿度以及粉尘特性，常用的聚氨酯、丁腈橡胶等材料各有其适用的工况范围。

导轨部位的防尘需要特别关注，与普通气缸不同，导轨夹持气缸的导轨部分存在滑动间隙，更容易积聚粉尘，为此，需要在导轨滑块两端设置专门的防尘端盖，内部安装弹性防尘片。防尘片与导轨表面保持适度接触，既能有效刮除粉尘，又不会产生过大阻力，对于较长的导轨，还可以考虑增加中间防尘装置，防止粉尘通过导轨接缝处进入系统，此外，在结构设计时应注意避免形成粉尘积聚的死角，所有外表面应尽量平整光滑，便于粉尘的自然滑落和清理。

## 3 夹持机构设计与力学特性

夹持机构是导轨夹持气缸的核心功能部分，其设计质量直

接影响夹持性能，常见的夹持机构采用楔形块扩力原理，通过活塞的直线运动驱动夹持块径向移动，实现导轨的夹紧与松开。夹持块的设计需要重点考虑其型线轮廓，理想的型线应能保证夹持过程中力的平稳传递，避免出现突变和冲击。通过数学建模和仿真分析，可以优化夹持块的曲线形状，使其在运动过程中保持恒定的传动角，从而提高力的传递效率和使用寿命。

夹持力的均匀分布是保证夹持稳定性的关键，在传统设计中，由于制造误差和装配间隙的存在，往往会出现夹持力分布不均的现象，导致导轨局部应力过大，影响定位精度，通过改进夹持块的布置方式，采用对称分布或增加夹持点数量，可以有效改善受力状况。此外，在夹持块与导轨的接触表面加工细密的齿纹，既能增大摩擦力防止滑动，又能通过齿形的弹性变形补偿一定的尺寸偏差，使夹持力分布更加均匀。

复位机构的设计同样重要，可靠的复位能确保夹持气缸在松开状态时完全脱离导轨，避免产生摩擦和干涉，常用的复位方式包括弹簧复位和气压复位两种。弹簧复位结构简单，不受气源影响，但会增加运动阻力且占用空间，气压复位通过专门的气路控制，复位力可调，但系统较为复杂，在实际设计中，需要根据具体应用场景选择适当的复位方式。无论采用哪种方式，都应保证复位行程充分，复位力足够克服运动阻力和惯性力，确保夹持块完全回位。

#### 4 导向系统与运动精度

导向系统的性能直接影响夹持气缸的运动精度和使用寿命，在防尘型设计中，导向系统需要具备高精度、低摩擦和良好的抗污染能力。导向套通常采用耐磨性好的材料制造，如铜基合金或工程塑料，铜基合金导向套具有较高的强度和导热性，但摩擦系数相对较大；工程塑料导向套具有良好的自润滑性能，摩擦系数小，但承载能力较低，近年来出现的金属-塑料复合导向套结合了两种材料的优点，既保证了足够的强度，又降低了摩擦阻力。

导向间隙的控制是保证运动精度的关键因素，过大的间隙会导致运动晃动，影响夹持定位精度；过小的间隙则可能因热膨胀或杂质侵入而发生卡滞。通过精确计算工作温升和受力变形，可以确定合理的初始配合间隙。在实际制造中，采用分组选配的方法保证配合精度，即根据导向套和活塞杆的实际尺寸进行选择性装配，确保关键尺寸在最佳范围内。此外，在结构设计时考虑热膨胀的影响，通过材料匹配和补偿结构减少温度变化对导向间隙的影响。

运动平稳性的提升需要从多个方面着手，活塞杆表面的加工质量直接影响运动阻力，通过精密的磨削和抛光处理，可以获得理想的表面粗糙度。导向长度的合理选择也很重要，较长的导向有利于保持运动直线度，但会增加摩擦阻力和结构尺

寸，通过优化导向套的内部结构，如设置储油槽和导油通道，可以改善润滑条件，减少运动过程中的摩擦波动，这些措施的综合应用，能够显著提高气缸的运动平稳性，延长使用寿命。

#### 5 材料选择与表面处理

材料的选择对防尘型夹持气缸的性能和寿命具有决定性影响，气缸筒体通常采用铝合金或不锈钢制造，铝合金重量轻、导热性好，适合大多数工业环境，不锈钢具有优异的耐腐蚀性，适用于潮湿或有化学腐蚀的场合。在选择材料时，需要综合考虑强度、刚度、耐磨性、耐腐蚀性以及成本等因素，对于大型气缸，还需要注意材料的焊接性能和加工性能，确保制造工艺的可行性。

活塞杆作为关键运动部件，其材料选择更为严格，高强度合金钢是常用的选择，通过适当的热处理工艺可以获得所需的表面硬度和心部韧性。表面处理工艺对活塞杆的耐磨性和耐腐蚀性至关重要，电镀硬铬是传统的处理方法，能提供良好的耐磨和防锈性能，但存在环境污染问题。近年来，等离子喷涂、激光淬火等新工艺逐渐应用，这些方法形成的表面层更致密、更耐磨，且对环境友好，无论采用哪种工艺，都需要保证表面层与基体的结合强度，避免在使用过程中出现剥落。

密封材料的选择需要适应不同的工作条件，丁腈橡胶具有良好的耐油性和适中的成本，适用于大多数工业环境，聚氨酯具有优异的耐磨性和机械强度，但耐高温和耐水性较差。在高温场合，可选用氟橡胶或硅橡胶，但这些材料的成本较高。除了工作介质和温度外，还需要考虑密封件与润滑剂的相容性，避免因材料不匹配导致密封件膨胀或老化。通过合理的材料选择和配伍，可以确保密封系统在各种工况下都能可靠工作。

#### 6 性能测试与优化验证

防尘性能测试是评价设计效果的重要手段，测试通常在模拟粉尘环境中进行，使用标准化的试验粉尘，控制粉尘浓度和粒度分布，通过连续运行试验，定期检查气缸内部粉尘侵入情况，评估防尘结构的有效性。测试过程中需要记录气缸的运动参数变化，如运动阻力、速度波动等，分析粉尘积聚对性能的影响，加速寿命试验可以缩短测试周期，通过提高粉尘浓度和运动频率，快速评估防尘系统的耐久性。

夹持力测试验证夹持机构的性能，测试时需要在不同工作压力下测量夹持力的大小和稳定性，检查夹持力是否达到设计要求，是否存在明显波动。通过应变片或压力传感器可以精确测量夹持过程中的力变化，分析夹持力的建立和释放特性，重复性测试考察气缸在多次动作后夹持力的一致性，这关系到设备的长期使用精度，此外，还需要测试在振动、冲击等动态载荷下的夹持可靠性，确保在实际工况下的安全性能。

耐久性测试评估产品的使用寿命，通过长时间的连续运行，监测关键性能参数的变化趋势，如运动阻力的增加、密封

件的磨损等，测试条件应尽可能接近实际使用工况，包括工作压力、运动频率、负载大小等。在测试过程中，定期拆解检查零部件磨损情况，分析失效模式，为改进设计提供依据，基于测试数据，可以建立寿命预测模型，为产品的维护和更换提供指导，这些测试结果不仅用于验证当前设计的合理性，也为后续产品的优化提供了数据支持。

## 7 应用拓展与前景展望

防尘型导轨夹持气缸的应用领域正在不断扩展，在传统的机床、自动化生产线等领域，对气缸的防尘性能和可靠性要求持续提高，在新兴的半导体、液晶显示等洁净度要求较高的行业，防尘设计更是必不可少，这些新的应用场景推动着气缸技术向更高精度、更优性能的方向发展，通过采用新材料、新工艺，可以开发出满足特殊需求的高性能产品。

智能化是气缸技术发展的重要方向，通过集成位置传感器、压力传感器等检测元件，可以实时监控气缸的工作状态，这些信息不仅可以用于精确控制，还能实现故障预警和智能诊断。例如，通过监测运动阻力的变化趋势，可以预测密封件的磨损状态，提前安排维护，智能气缸的出现，大大提升了设备的管理水平和维护效率。

## 参考文献：

- [1] 段稳育.气缸伺服控制试验台架的测控系统设计[D].电子科技大学,2013.
- [2] 杨益,钟以波.串联气缸驱动的工业机械手外夹持装置[J].机床与液压,2013,41(10):95-96.
- [3] 朱宏伟,王志文,杨波,等.基于上游单点测量信息和机器学习的气动系统并联双气缸泄漏故障诊断[J].液压与气动,2023,47(07):73-82.
- [4] 陈一鸣.气缸可靠性试验及数据处理方法的研究[D].武汉理工大学,2009.

节能环保也是未来发展的重要趋势，通过优化结构设计减少摩擦阻力，可以降低能量消耗，采用环保型材料和表面处理工艺，使产品更加符合绿色制造的要求。轻量化设计不仅能减少材料使用，还能提高设备的动态响应性能。这些创新方向不仅符合技术发展的需要，也顺应了现代工业可持续发展的要求。

## 8 结论

防尘型导轨夹持气缸的结构设计与性能优化是一个系统工程，需要从防尘机制、夹持原理、导向精度等多个方面进行综合考量，通过创新防尘结构设计，采用多级密封方案，可以有效提升产品的环境适应性，优化夹持机构型线和导向系统参数，能够显著改善运动精度和夹持稳定性，合理的材料选择和表面处理工艺，为产品性能提供了可靠保障。实验验证表明，经过优化的气缸在防尘性能、夹持精度和使用寿命等方面均有明显提升。随着工业技术的进步，防尘型夹持气缸将继续向智能化、高效化方向发展，为自动化设备提供更优质的执行元件解决方案，本研究提出的设计理念和优化方法，对同类产品的开发具有参考价值。