

天然气场站防爆电气设备密封结构设计与性能分析研究

李博贤 朱国俊 李 鑫 (国家管网集团北方管道有限责任公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 本文针对天然气场站特殊的工作环境, 深入探讨了防爆电气设备的密封结构设计及其性能分析, 旨在提高设备的安全性和可靠性, 减少因电气故障引发的爆炸风险。通过综合运用现代设计理论与仿真技术, 提出一套科学合理的密封结构设计方案, 并对其性能进行全面评估。研究表明, 优化后的密封结构能够有效防止外部爆炸性气体侵入, 还能在极端环境下保持良好的工作状态, 为天然气行业的安全生产提供了有力的技术支持。

关键词: 天然气场站; 防爆电气设备; 密封结构设计; 性能分析

在全球范围内对清洁能源需求日益增长的背景下, 天然气作为至关重要的能源选项之一, 其开采与输送的安全性问题愈发凸显。天然气场站, 作为这一能源转换与传输链路上的枢纽, 其作用不可小觑, 而电气设备的安全运行则是确保整个链条稳固性的关键所在。天然气本身的高度易燃易爆属性, 对场站电气设备的防爆性能, 特别是对密封结构设计有着前所未有的高要求。设计上必须确保电气火花与周遭潜在的爆炸性气体环境彻底隔离, 从而消除爆炸事故的风险。为此, 本研究致力于深入探究防爆电气设备的密封结构与性能优化, 提出一套高效且稳健的密封策略, 旨在全面适配天然气场站多变且复杂的作业环境, 保障电气设备在高效生产模式下的稳定运行, 同时实现顶尖水平的安全防护, 为天然气行业的安全生产树立新的标杆。

1 防爆电气设备密封结构设计

1.1 设计原则与要求

防爆电气设备的密封结构设计是天然气场站安全运作的核心, 它必须严格遵循国家及行业规范, 例如 GB 3836《爆炸性环境用电气设备》系列标准及国际电工委员会设定的相关条例。设计时需紧扣几个基本原则: 首要确保密封的完整性, 即在任何工况下都能绝对隔离内外环境, 阻止爆炸性气体或粉尘渗透, 要求密封结构从制造到报废均维持严密状态; 其次, 强调耐久性, 因应天然气场站恶劣工况, 密封结构应能长期抵御磨损、腐蚀及环境变化, 延长使用寿命; 再者, 设计应便于维护, 利于日常检测与快速修理, 防止维护疏漏造成的安全风险; 最后, 密封结构设计还需兼顾电气绝缘与热管理效能, 既要防止外部侵入, 也要促进内部电气部件的良好绝缘, 并有效控制设备产生的热量, 以防局部过热引燃。

1.2 结构设计方法

为了保障现代防爆电气设备能够在极端环境下安全可靠地运行, 其密封结构设计采纳了一系列科学先进的方法, 这些方法紧密围绕提高安全性能、增强耐用性以及适应复杂工况的核心设计原则展开。其中, 计算机辅助设计与制造 (CAD/CAM) 技术的广泛应用, 成为了实现这一目标的关键工具。

设计师依托于高精度的三维建模软件, 如 SolidWorks 或 CATIA, 精细构建防爆电气设备的虚拟模型。这一过程既允许设计者从各个角度审视设备结构, 还便于早期干涉检查和空间优化。更重要的是, 结合流体动力学仿真软件 (如 ANSYS CFX 和 Fluent) 的应用, 可以模拟设备在不同工作条件下的气体流动特性及压力分布情况 (如图 1)。这种仿真分析能力为密封结构的优化提供了科学依据, 使得设计团队能够预先识别潜在的泄漏路径, 及时调整设计, 从而大幅提高了设计的准确性和效率。

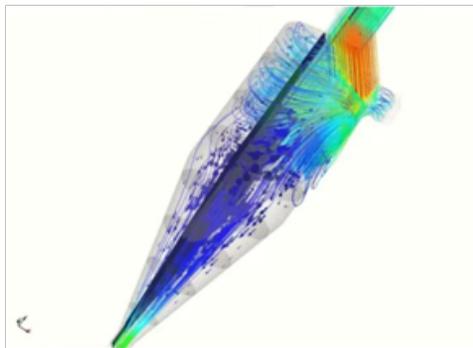


图 1 流体力学仿真效果示意图

鉴于单一密封结构可能存在的风险, 现代设计倾向于采用双重或多重密封系统, 特别是在设备的关键连接和接口部位。这种设计思想通过设置多层防护屏障, 确保即使最外层密封失效, 内部密封依旧能够有效阻隔爆炸性气体的渗透, 大大增强了设备的安全系

数。每一层密封都是独立设计，以满足特定的压力等级和环境要求，形成一个高效可靠的防御体系。

弹性密封圈是防爆电气设备密封结构中的另一项关键技术组件。设计时，会根据设备的工作环境和介质特性，精心挑选如氟橡胶（Viton）、硅橡胶等具有优异耐温性、耐化学腐蚀性的弹性材料。同时，对密封圈的截面形状（如O型、V型等）和预压缩量进行精密计算和设计，确保其在面对温度波动、机械振动等复杂工况时，仍能保持良好的密封效果和适当的弹性回复力，延长使用寿命并减少维护需求。

针对特定类型的防爆设备，设计中还会集成压力平衡装置，如压力平衡阀或呼吸器。这些装置的作用在于自动调节设备外壳内部与外部环境之间的压力差，使之维持在一个相对平衡的状态。这减轻了外部大气压力变化对密封结构的直接冲击，也有助于防止因压力突变导致的密封失效，进一步提升了设备的整体稳定性和安全性。

1.3 计算与模拟分析

在保障设计科学性及提升设备实战性能的框架下，计算与模拟分析成为设计流程的必要组成部分，采纳的核心技术涉及有限元分析（FEA）与计算流体力学（CFD）。FEA通过构建精细的数学模型，仿真设备在多样外力加载下的动态响应，如机械及热应力影响，从而严格评估密封结构的力学强度与长期使用下的稳定性，为结构的迭代优化提供强有力的数理依据。其中，有限元分析（FEA）的数学模型可以表示为：

$$[K] \cdot U = F$$

其中， $[K]$ 为刚度矩阵， U 为位移向量， F 为外力向量。这一模型能够准确描述设备在外力加载下的动态响应，从而评估其力学强度与稳定性。另外，CFD专注于密封区域的气流行为模拟，在极端情境下预判气体泄漏的概率与速率，及时揪出设计潜在漏洞，诸如流场中的涡旋现象或非正常压力区，引导设计人员做出精准调校，确保存续在广泛压力与温度场景中的防爆效能。此二者高级技术的综合运用，促使防爆电气设备的密封设计在理论与实践层面均达到极高水平的整合，确保了在天然气场站这类环境复杂多变、安全标准严格的场所中，设备能维系安全、稳定的作业状态，有效抵御爆炸风险，整体拔高了站点的安全生产标准。

2 性能分析与测试

2.1 密封性能测试

密封性能测试是衡量防爆电气设备安全性与应用

可靠性的重要基准，直接关联到实际操作中的安全水平。该测试严格遵循国际标准化组织（ISO）和国际电工委员会（IEC）的高标准，比如ISO 5277中关于密封测试的指导原则，以及IEC 60079系列标准对爆炸性环境设备的具体要求，将密封性能测试细分为正压测试与负压测试两类，以此全方位验证设备在不同压力环境下的密封效能。

正压测试涉及向设备壳体内充入高于外界压力的惰性气体或空气，并逐步增压至设计极限，同时严密监控压力变化，旨在确认在正压条件下，密封结构能保持完好无损，防止气体外泄。理想结果是压力极少下降，显示密封层有效防止气体渗透。反观负压测试，则是创造一个内部低于外部压力的真空状态，通过抽取设备内部空气实现，旨在探索密封在负压条件下的密封性，尤其是检测微小泄露路径，确保在任何压力梯度下密封结构都能维持优异的隔离效果。这两种测试方式协同工作，构成了密封性能评估的基础，通过精确测量气体渗透程度，保证密封结构达到零泄漏的严格标准，为后续的防爆性能评估奠定了稳固的先决条件。

2.2 防爆性能评估

防爆性能评估是检验防爆电气设备在极端危险条件下能否有效抑制爆炸效应扩散的核心环节，它通过一系列精确而严苛的实验来达成。此评估聚焦于两个关键测试：

2.2.1 爆炸压力测试

这项测试模拟设备内部发生爆炸的极端情境，通过精确的仪器测量并记录设备外壳在爆炸压力下的承受能力和释放机制。其根本目的在于验证在爆炸事件中，设备外壳能够保持结构完整性，阻止火焰或高压气体穿透密封结构，从而防止外部爆炸性气体环境被激活，避免更大规模的灾难性后果。这既考验了外壳的物理强度，也体现了防爆设计的智慧。

2.2.2 火花点燃试验

该试验通过在控制条件下诱发内部电气故障（如故意造成短路）来产生火花，以此来评估密封结构和防爆泄压机制的效能。目的是确保即使内部出现电气故障引发火花，这些火花也无法穿越密封结构，防止外部潜在的爆炸性气体环境被点燃。这要求密封不仅要紧密，还要具备阻火功能，是防爆设计中至关重要的安全防线。这些测试是对设备防爆性能的极限挑战，也是确保设备在最坏情况下的安全冗余，严格遵循并超越国际防爆安全标准，为天然气场站等敏感环境提供坚实的保护伞。

2.2.3 耐环境性能分析

耐环境性能分析是检验防爆电气设备是否能在天然气场站这类复杂多变环境中长期稳定工作的关键指标，它深入探究设备在各种极端条件下的适应能力。这一环节模拟了设备可能遭遇的极端温度变化，从酷暑到严寒，以确保设备的密封材料及电气组件能够承受热胀冷缩的物理效应而不失效。测试中，设备需在连续循环的高低温环境中运行，验证其在季节性温度波动下保持密封完整性及电气性能稳定性的能力，这对于保障设备全年无间断可靠工作至关重要。

考虑到天然气场站常处于多雨区域或靠近海岸线，高湿环境测试显得尤为重要。通过创造高湿度环境，评估设备抵抗湿气渗透的能力，特别是对电子部件的保护效果，防止因湿气导致的绝缘性能下降和潜在的短路风险。这一测试有助于预防因气候因素引起的设备故障，保障在潮湿环境下的安全运行。

在含有盐雾、酸碱气体等腐蚀介质的模拟环境下，对设备的耐腐蚀性进行全面考察，特别是外壳和密封材料。长期暴露于此类腐蚀性环境下的设备必须保持优异的抗腐蚀性能，以维持其功能完整性和外观美观，这对于延长设备使用寿命、减少维护成本、避免因腐蚀导致的意外停机具有重大意义。

综合以上各项耐环境性能分析，防爆电气设备被严格验证其在面对自然环境的各种严峻挑战时，依然能够维持稳定可靠的运行状态。这种高度的环境适应性加强了天然气场站的安全基石，还显著提升了作业效率与经济产出，充分展示科技进步在推动能源行业安全生产、提高经济效益方面不可替代的作用。

3 案例研究

本案例选取位于中国西北地区的一座长输天然气管道压气站作为研究对象。该压气站主要完成对多条长输天然气管道的增压输送功能。压气站内存在多种防爆电气设备，包括电机、电动执行机构、配电箱等。这些设备在长时间运行中曾多次因密封失效导致防爆失效，存在火灾爆炸隐患。

改造前，该压气站使用的防爆电气设备大多采用传统单层密封设计，材料多为普通橡胶密封圈。由于当地气温变化剧烈，昼夜温差大，加之季节性沙尘暴带来的腐蚀性环境，设备密封性能逐渐退化，表现为频繁的设备故障。据统计，过去一年内，因密封问题引起的防爆设备故障事件超过 10 次，严重影响了生产效率和安全生产。

基于前文所述的防爆电气设备密封结构设计原则

与方法，该压气站对关键设备的密封系统进行全面升级：①采用双重密封结构，外层采用耐磨、耐腐蚀的氟橡胶密封圈，内层则选用高温稳定的硅橡胶，增强密封的可靠性和耐久性；②增设压力平衡阀和呼吸器，确保设备壳体内外压力平衡，减少外部环境压力对密封件的影响；③对设备外壳和紧固件采用防腐蚀处理，提高整体抗腐蚀能力。

改造后，该压气站对升级后的防爆电气设备进行了为期一年的跟踪监测，收集了丰富的运行数据：①相比改造前，因密封问题导致的故障次数减少了 90%，仅发生 1 次密封不严事件，且迅速通过维护得到解决，大大提高了设备可用性和生产连续性；②通过实施定期的密封性能测试和防爆性能评估，确认新密封结构在各种工况下均能满足防爆安全要求，未出现任何安全事故，安全系数显著提升；③设备故障事件的大幅减少直接转化为生产效率的提升，据估算，年经济效益提升约 5%，同时降低了维护成本和潜在的事故赔偿风险。

通过对典型天然气场站防爆电气设备密封结构的实地改造与验证，本案例充分展示了先进设计方法与材料在提升设备安全性能、降低故障率方面的显著成效。实践证明，综合考虑环境因素，采用多重密封、压力平衡技术和耐腐蚀材料，是提高天然气长输管道输气站等危险场所电气设备安全可靠性的有效途径。未来，持续的技术创新和优化将是保障能源行业安全生产的关键。

4 结束语

本文通过对天然气场站防爆电气设备密封结构的系统研究，提出创新的设计方案，还通过详尽的性能分析与测试验证了其有效性。研究成果对于提升天然气行业安全生产水平，促进能源产业可持续发展具有重要意义。未来，随着新材料和新技术的应用，防爆电气设备的密封设计将更加智能化、高效化，为能源安全提供更强有力的保障。

参考文献：

- [1] 刘成千. 防爆电气设备安全管理探讨 [J]. 中国设备工程, 2023, (S2): 333-334.
- [2] 王霞, 任天猛. 户外电子设备防水密封结构设计 [J]. 机电元件, 2022, 42(06): 12-13+32.

作者简介：

李博贤 (1990.03—)，男，汉族，河南驻马店市汝南县人，大学本科，工程师，研究方向：天然气长输管道现场工艺及机械设备。