

油田防爆井口隔离箱技术发展与应用价值探索

朱俊俊（中海油能源发展装备技术有限公司，天津 300452）

摘要：本文针对石油钻井作业中井口安全隔离的技术需求，采用一种基于永磁技术的井口隔离装置。对比以往常规油井井口防爆隔离箱。通过理论分析、结构设计和实验验证，研究了永磁隔离箱的工作原理、磁路设计和性能优化方法。该隔离箱的使用为井口安全隔离提供了新的技术解决方案，具有重要的工程应用价值。对未来发展趋势也进行展望。

关键词：井口安全；永磁隔离；结构优化；石油钻井

中图分类号：TE924

文献标识码：A

文章编号：1674-5167（2025）019-0072-03

Exploration of the Development and Application Value of Explosion-proof Wellhead Isolation Box Technology in Oil Fields

Zhu Junjun (Cnooc Energy Development Equipment Technology Co., LTD, Tianjin 300452, China)

Abstract: This paper aims at the technical requirements of wellhead safety isolation in oil drilling operations and adopts a wellhead isolation device based on permanent magnet technology. Compared with the previous conventional explosion-proof isolation boxes at the wellhead of oil Wells. Through theoretical analysis, structural design and experimental verification, the working principle, magnetic circuit design and performance optimization methods of the permanent magnet isolation box were studied. The use of this isolation box provides a new technical solution for wellhead safety isolation and has important engineering application value. The future development trends are also prospected.

Key words: Wellhead safety Permanent magnet isolation Structural optimization Oil drilling

井口隔离箱是石油行业中不可或缺的重要设备，它在油田井口作业中发挥着至关重要的作用。在油田生产中，井口隔离箱的作用是连接控制柜到井口之间的电潜泵的动力电缆，防止油井中易燃易爆气体通过电缆直接进入控制柜，发生火灾或者爆炸。对保证生产运行安全有着十分重要的意义。本文主要对常规井口隔离箱装置进行优化改进研究，以提高其安全性与智能性。

1 井口隔离箱的应用场景及特点

井口接线箱的应用场景主要集中在工业领域中具有爆炸危险的环境，尤其是煤矿、石油和天然气开采等场景。以下是井口接线箱在这些场景中的具体应用：

1.1 煤矿行业

在煤矿行业中，井口接线箱常用于井下采煤设备、通风设备、照明设备等电气控制。由于煤矿井下有瓦斯和煤尘等易燃易爆物质，因此需要使用具有防爆功能的接线箱来确保电气设备的安全运行。例如，在采煤机的电机控制箱和井下照明配电箱等部位，井口接线箱的使用可以有效防止瓦斯爆炸事故的发生。

1.2 石油和天然气行业

在石油和天然气行业中，井口接线箱也发挥着重要作用。在石油勘探、开采、炼油和天然气输送等环节，由于存在易燃易爆的化学物质和气体，因此需要使用防爆接线箱来保护电机控制器、传感器等电气设备。特别是在油井井口的采油设备控制和天然气压缩站的

电气控制装置上，井口接线箱能够防止因电气设备故障或气体泄漏引发的爆炸事故。

1.3 其他工业领域

除了煤矿和石油天然气行业外，井口接线箱还广泛应用于其他具有爆炸危险的工业领域。例如，在化工生产过程中，涉及大量的易燃易爆化学物质，需要使用防爆接线箱来保护化工反应釜的温度、压力控制设备以及化工仓库的照明和通风设备的电气控制部分。此外，在制药行业中，一些药品生产过程中会使用到有机溶剂等易燃易爆物质，也需要使用防爆接线箱来保护制药车间的洁净空调系统和反应釜的搅拌电机控制等电气设备。

1.4 应用场景的特点

井口接线箱在这些应用场景中通常具有以下特点：①防爆性能：接线箱必须具有良好的防爆性能，能够承受内部或外部爆炸产生的压力和热量，确保电气设备和人员的安全。②耐腐蚀和耐磨损：由于工业环境中可能存在腐蚀性气体、液体或颗粒物，因此接线箱需要具有良好的耐腐蚀和耐磨损性能。③密封性能：为了确保接线箱内部不受外部环境的影响，需要具有良好的密封性能，防止水分、灰尘等进入接线箱内部。④易于维护和操作：接线箱的设计应便于维护和操作，方便工作人员进行日常检查和维修工作。

综上所述，井口接线箱在煤矿、石油和天然气开

采以及其他具有爆炸危险的工业领域中具有广泛的应用场景。这些场景中的电气设备需要得到良好的保护和控制,以确保生产安全和人员安全。

2 传统常规油田井口隔离箱组成及应用

井口隔离箱是用于易燃易爆环境的电气设备,主要用于电缆连接,电气隔离和信号分配。确保井下作业安全运行。

2.1 设计原则

①安全性:由于井口环境复杂,存在易燃易爆物质,因此接线箱的设计必须满足防爆要求,以防止电气火花引发爆炸。同时,接线箱应具备防水、防尘等特性,以确保在恶劣环境下仍能正常工作。②可靠性:接线箱作为线路连接的关键部件,其可靠性直接影响到整个系统的运行。因此,设计时应选用高质量的电气元件和接线端子,确保电气连接的稳定性和持久性。③易用性:设计应便于安装、调试和维护。例如,接线箱应配备易于操作的接线端子和密封装置,以及清晰的标识和指示。

2.2 主要组成

①防爆壳体:接线箱的材质应满足防爆、防水、防尘等要求。常见的材质包括铸铝合金、不锈钢等。铸铝合金具有良好的防爆性能和机械强度,而不锈钢则具有优异的耐腐蚀性能。②结构密封:接线箱的结构设计应合理,便于散热和防止内部积水,壳体防爆面通过精密加工,确保防爆面间隙小于0.2mm,其中进出口电缆采用防爆电缆填料函或防爆接头连接。③内部电子元件:其内部为接线端子排,材质通常为铜制或镀镍,内部应配备高质量的电气元件,如接线端子、熔断器、开关等。这些元件应满足相关标准和规范的要求,以确保其可靠性和安全性并要有接地端子确保可靠接地。④防爆防护等级:在选择井口接线箱时,应根据具体的使用环境来选择合适的类型。在井口区爆炸性气体环境中,应选择隔爆型或增安型接线箱。⑤锁紧装置:一般采用快开结构或者防爆螺丝固定,确保箱体闭合后达到防爆使用要求。

3 永磁井口隔离箱组成及应用

在目前油田开采中,永磁电潜泵即通过永磁电机替代传统感应电机,实现电潜泵的高效运转。这种电潜泵的转子采用永磁体,无需额外通电即可产生磁场,从而简化了电能到磁能的转换过程,直接利用永磁体在电场中的旋转实现电能到动能的直接转换,大大提高了能源利用效率。在相同的排量、扬程、转速和功率条件下,永磁电潜泵机组的工作效率大幅提升了20%以上,同时节约了30%以上的能源。与此同时,配合永磁电机运行的井口隔离防爆箱也应运而生。

3.1 定义与用途

永磁井口隔离箱通常被安放在平台井口控制盘附近,用于在特定情况下(如永磁电机停泵时)通过数字化、智能化手段瞬间感应到井下的电力反馈,并自动进行安全操作(如自动跳闸,关断通电路)。它确保了井口作业的安全进行,特别是在涉及高压电、易燃易爆物质等高风险环境中。与原有技术相比,永磁隔离方案具有明显的技术优势和应用价值。

3.2 结构与组成

永磁井口隔离箱的组成与常规井口接线箱外形大致相同,其箱体、结构密封、内部元器件均与常规隔离箱设计相同。最直观的不同在于电缆的进出数量,常规井口隔离箱只有一进一出两根3.6/6kV主动力电缆,一端连接变压器控制柜,一端连接井下电潜泵。而对比常规隔离箱永磁隔离箱多出两根电缆,除了一进一出两根主动力电缆,还有一根箱体电源线和一根到变频器的反馈电缆。这是隔离箱的感应与控制系统,也是隔离箱的核心部分,负责监测井下的电力反馈,并在必要时自动执行安全操作。其内部逻辑安全装置:如自动跳闸装置、断电保护等,用于在紧急情况下迅速切断电源,防止事故发生。允许工作人员在不打开箱体的情况下观察井内情况,远程并进行必要的操作。

3.3 工作原理

永磁隔离箱内配置有交流真空接触器或具有等同功能的器件,能够与输入端的变频器控制信号联动,当变频器停机或断电后(变频器提供干接点常开信号,运行时闭合),应能够立即自动断开真空接触器的主回路触点,使变频器与井下电机断开连接。通过内部的感应系统实时监测井下的电力状态。

隔离箱的主回路接触器吸合或断开状态在本地应有指示灯显示,这也就是比常规隔离箱需要多出一根电源线,在变频器停机状态下,应能通过安全隔离箱本地操作按钮吸合和断开主回路接触器。电机停运后能够实时监测输出端永磁电机的馈电电压,能够自动断开主回路输出端电机与输入端的驱动控制系统。

变频器停机后,应能在本地通过电压表实时监测电机端的三相馈电电压,电压表通过电压互感器连接,量程应满足0到最大电机馈电电压监测,应满足在整个系统失电后仍能正常监测电机端的馈电电压。①判断与决策:当感应到异常情况(如永磁电机停泵导致的电磁感应发电)时,控制系统会迅速做出判断。②执行安全操作:根据判断结果,自动执行相应的安全操作,如跳闸、断电等。通过实际应用有效解决了永磁电机停泵后电磁感应发电问题,使永磁技术应用变得安全可靠。

目前海上油田推荐无人化智能平台, 永磁隔离箱的使用, 在钻井或者修井作业中, 利用永磁驱动的快速响应特性, 数据反馈至平台控制中心, 保障井口长期稳定运动, 更加优化生产管理保障作业安全, 提升系统的可靠性。

综上所述, 井口隔离箱是井口作业中不可或缺的安全设备。通过其独特的设计和先进的工作原理, 为井口作业提供了有力的安全保障。

4 技术挑战与市场应用前景

随着石油钻井技术的不断发展, 海上智能无人化平台的推广, 井口作业安全日益受到重视。也随着高性能永磁材料的问世和控制技术的迅速发展, 永磁电机的应用将会变得更为广泛。通过不断优化电机设计和控制技术, 永磁电机将在采油领域发挥更大的作用, 为能源产业的可持续发展做出贡献。而永磁隔离箱相对于传统常规隔离箱已有进一步提升, 但外形和传统的机械式井口隔离装置目前都还存在体积大、结构冗余、密封性能不足、耐腐蚀性不足等问题, 难以满足现代钻井作业的高标准要求。

油田井口防爆接线箱的发展趋势正随着油气开采技术的进步、智能化需求提升以及环保安全要求的严格化而不断演进。目前仍处于智能化水平较低, 依赖于人工操作, 在以后的技术研究中将会发展效率高、工作稳定、操作简便等特点, 能够满足现代钻井作业的安全需求。主要研究发展趋势有以下几个方面:

4.1 智能化与数字化集成

未来研究可进一步优化永磁材料的选择和磁路设计, 提高装置的极端环境适应性。同时, 开发智能监控系统, 实现隔离状态的实时监测和远程控制, 将进一步提升装置的安全性和便利性。永磁隔离技术在石油工程领域的应用前景广阔, 值得深入研究和推广。集成传感器和通信模块(如4G/5G), 实时监测箱内温度、湿度、气体浓度等数据, 并上传至云端平台, 实现故障预警和远程诊断。①与数字技术融合: 嵌入传感器, 内置边缘处理器, 对井口数据(如压力、流量)进行本地预处理, 减少传输延迟, 提升响应速度。集成先进的微处理器或可编程逻辑控制器(PLC), 能够实现复杂的自动化控制功能。通过触摸屏操作等智能化界面, 操作人员可以远程监控和控制油田设备, 减少了现场操作的需求, 从而提高了作业效率。②兼容工业: 实时采集油田设备的运行数据, 如速度、温度、压力等。通过数据分析, 可以及时发现设备故障或异常, 提前进行维护, 避免停机时间, 确保生产线的连续运行支持Modbus、Hart等协议, 与油田系统无缝对接, 推动“数字化”井口管理。

4.2 高等级安全防护

防爆技术升级, 采用更高防爆等级(如Ex dIIC T6), 适应页岩气、深海油气等极端环境。本质安全型设计, 通过限制电路能量(Ex ia/ib), 实现无需防爆外壳的轻量化方案, 降低维护成本。多重复合防护, 结合防爆、防腐(如纳米涂层)、防震(抗8级地震)功能, 延长设备寿命。

4.3 材料与结构创新

结构更加轻量化, 铝合金壳体替代传统铸铁, 兼顾强度与重量; 碳纤维复合材料在深海油井场景中试用, 可降低安装和维护难度。模块化设计: 采用模块化的设计, 插拔式端子、快拆结构, 缩短现场安装时间, 支持功能扩展(如增加无线模块), 可以根据油田作业的实际需求灵活配置功能组件。能够适应不同的作业场景, 提高了设备的利用率和作业效率。提高系统可靠性和维护便捷性。

4.4 未来挑战与机遇

极端环境(如超深井、北极)对材料性能的极限要求; 提升抗高压, 耐低温性能以及智能化带来的网络安全风险。未来井口接线箱将向智能、安全、绿色、高效方向发展, 成为油田物联网的关键节点, 同时推动油气行业向低碳化、自动化转型。

5 总结

随着工业科技的发展, 防爆井口隔离箱的设计和生产技术也在不断进步。新型材料的应用、结构的优化以及智能化技术的应用, 都使得防爆井口隔离箱的性能更加优越, 适用范围更加广泛。在当前全球倡导环保和可持续发展的背景下, 防爆井口隔离箱的生产和应用也更加注重环保和节能。例如, 采用更加环保的材料、优化结构设计以减少能耗等。此外, 防爆隔离箱在油田作业中的应用也有助于减少因爆炸事故造成的环境污染和经济损失, 推动油田开采的可持续发展。综上所述, 防爆井口隔离箱在油田的应用与发展具有重要意义。未来, 随着技术的不断进步和标准的不断完善, 防爆井口隔离箱的性能将更加优越, 应用也将更加广泛, 为油田的安全生产保驾护航。

参考文献:

- [1] 张伟. 永磁传动技术在油气井口设备中的应用研究[J]. 石油机械, 2021, 49(5): 78-83.
- [2] 闫博睿. 石油化工装置中隔爆型和增安型接线箱的选择[J]. 石油化工自动化, 2021(5): 32-36.
- [3] 范宝贤. 煤矿井下智能化设备技术的发展与应用探讨[J]. 冶金与材料, 2024(4): 127-129.
- [4] 杨振华. 通信网络技术在智能化油田建设中的应用[J]. 信息系统工程, 2022(4): 125-128.