钻井无线随钻测量仪器抗冲蚀研究与应用

郝　宁

中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆钻井总公司　陕西　西安　710021

摘　要：无线随钻测量（MWD）仪器作为石油钻井工程中实时获取井下轨迹、地层参数的核心装备，其工作可靠性直接决定钻井效率、井身质量与施工安全。在深井、超深井及大井眼钻井过程中，仪器长期处于高排量、高含沙、高转速的复杂工况，钻井液携带岩屑对仪器表面及关键部件的冲蚀作用，易导致仪器密封失效、结构损坏、信号传输异常，显著缩短仪器使用寿命并增加钻井成本。本文结合国内外研究现状，系统分析无线随钻测量仪器的冲蚀机理与影响因素，重点研究抗冲蚀防护技术的设计与优化，通过室内试验与现场应用验证防护方案的有效性，最后总结研究成果并展望未来发展方向，为石油钻井行业无线随钻测量仪器的抗冲蚀设计、现场应用及技术升级提供理论支撑与实践参考。

关键词：石油钻井；无线随钻测量仪器；冲蚀机理；抗冲蚀防护；现场应用

1 引言

无线随钻测量（MWD）技术作为定向钻井、水平钻井的核心支撑技术，可在不中断钻井作业的情况下实时传输井下井斜角、方位角、工具面角及地层特性等关键参数，为钻井轨迹精准控制、储层钻遇率提升提供可靠数据支撑，是实现钻井智能化、高效化作业的重要保障。

无线随钻测量仪器主要由井下测量短节、脉冲发生器、电源短节、打捞短节及地面接收系统组成，放置于钻具中空内部，导致钻具内空面积减小，钻井过程 MWD 仪器需长期浸泡于钻井液中，受钻井液及其携带岩屑的冲蚀作用[1]。受到排量，高钻压、高转速等钻井参影响，井下测量短节与脉冲发生器是易受冲蚀的主要部件。MWD 仪器的冲蚀按介质分磨粒冲蚀和气蚀冲蚀，气泡破裂时产生瞬时高压，对仪器表面造成冲击损伤，尤其在脉冲发生器等流道变化剧烈的部位，气蚀冲蚀现象更为明显。按冲蚀损伤过程分为初始磨损、损伤发展、失效三个阶段，第三阶段导致仪器外壳破损、密封件损坏、内部电子元器件进钻井液或损坏无法正常工作，仪器彻底失效需起钻更换影响钻井速度与效率，钻井液参数、岩屑特性、仪器结构，仪器材质、钻井工况是影响冲蚀损伤的五大大核心因素，各因素协同作用决定仪器冲蚀程度。

2 冲蚀的主要影响因素

（1）钻井液参数影响，钻井液的流速、密度、黏度是影响冲蚀的核心参数。高流速、高含沙，高密度，对仪器表面的冲击作用越强，冲蚀损伤越严重，同时增加仪器的负载加剧密封件的磨损，黏度适中的钻井液可有效包裹钻屑，降低岩屑的冲击速度，减少冲蚀损伤，相反无法有效包裹岩屑，仪器冲蚀加剧。

（2）岩屑特性影响，岩屑的硬度、粒径、形状对仪器冲蚀具有显著影响。岩屑硬度越高，对仪器表面的切削、冲击能力越强，冲蚀损伤越严重，岩屑粒径越大，冲击动能越大，冲蚀坑越深。

（3）仪器结构影响，仪器的结构设计直接影响钻井液的流动状态，仪器外壳的棱角、接口处、流道突变部位，是冲蚀损伤的高发区域，若结构设计不合理，会导致钻井液在仪器表面产生涡流、流速突变，形成冲蚀应力集中，加剧局部冲蚀损伤。

（4）材质影响，仪器材料的耐冲蚀性能是决定其抗冲蚀能力的基础，普通碳钢 Q235）抗冲蚀能力最低，其次为 304 不锈钢，再次为 YG8 硬质合金，Al_2O_3 陶瓷涂层，金刚石涂层耐冲蚀性能最高[5]，可有效降低冲蚀损伤。

（5）钻井工况影响，井深、转速、钻压等参数也会影响仪器的冲蚀损伤。钻井深度增加，导致井下压力、温度升高，钻井液的物理化学性质发生变化，冲蚀作用随之增强。

3 无线随钻测量仪器抗冲蚀防护技术研究

3.1 材料筛选与材料性能测试

对硬质合金、氧化铝或氧化锆涂的陶瓷涂层、三种

材料进行 24 小时冲蚀磨损试验，试验结果为金刚石复合涂层最优，陶瓷涂层其次，硬质合金（YG8）最差。金刚石复合涂层硬度超高、摩擦系数超低，耐冲蚀性能优于硬质合金和陶瓷涂层，但涂覆工艺复杂成本较高。所以优选“金刚石复合涂层+硬质合金”的复合防冲蚀方案。

3.2 外壳及流道结构优化

在流道内壁涂覆金刚石复合涂层，增强流道的耐冲蚀性能；在脉冲发生器蘑菇头部位增加导流结构，减少岩屑对蘑菇头的冲击作用；优化蘑菇头与孔板之间的限流设计；借鉴钻铤式结构设计原理，将测量模块与钻铤本体一体化集成，扩大过流面积，避免多短节串接导致流道不规则问题，降低冲蚀损伤[4]。

3.3 接口与密封结构优化

仪器各部件的接口处是冲蚀损伤的高发区域，采用台阶式密封接口，增加密封面长度；在接口处设置防冲蚀挡圈，阻挡岩屑直接冲击密封件；采用双密封结构，增加密封可靠性，防止钻井液渗入仪器内部，损坏电子元器件；密封圈采用耐老化的氟橡胶材料替代普通橡胶材质提高密封件的防冲蚀性。

3.4 防护涂层施工工艺优化

防护涂层的施工工艺直接影响涂层与基材的结合强度、涂层致密性，进而决定抗冲蚀性能[6]。对金刚石复合涂层的涂覆工艺进行优化，采用热丝化学气相沉积（HFCVD）工艺，优化涂覆参数：涂覆温度为 800～900℃，涂覆压力为 10～15kPa，甲烷浓度为 5%～8%，氢气浓度为 92%～95%，涂覆时间为 4～6 小时。在涂覆前对基材表面进行打磨、清洗、活化处理，去除表面氧化层与杂质，进一步提高涂层与基材的结合性能。

4 室内冲蚀试验验证与现场验证

4.1 试验条件与结果分析

采用自制的 MWD 仪器冲蚀试验装置，该装置主要由钻井液循环系统、冲蚀试验腔、岩屑添加系统、温度压力控制系统、数据采集系统组成。钻井液循环系统可灵活调节钻井液流速、流量，模拟不同钻井排量工况，钻井液流速为 8～12m/s，钻井液密度为 1.2～1.4g/cm³，黏度为 20～30mPa·s，含沙量为 8%～12%，岩屑粒径为 0.3～0.8mm，试验温度为 150℃，试验压力为 20MPa，模拟井下不同深度的工况；数据采集系统可实时采集试验过程中的冲蚀时间、磨损量、温度、压力等参数，数据采集精度：磨损量 ±0.001g，温度 ±1℃，压力 ±0.1MPa，采集频率 1 次/5min。试验时间为 72 小时，每组工况设置 3 组平行试验，取平均值作为试验结果，确保试验数据的可靠性[3]。

试验结果表明，优化后的 MWD 仪器样品与优化前相比，抗冲蚀性能得到显著提升，脉冲发生器蘑菇头，旋转阀组，外壳，密封件，总平均磨损量降低比例 82.1%，最低 80%。试验结果充分验证了本文设计的抗冲蚀防护方案的有效性，优化后的 MWD 仪器能够承受高排量、高含沙、高温高压的复杂冲蚀工况，抗冲蚀性能完全满足深井、超深井钻井的工作要求。

4.2 现场应用试验

在高 36 井进行试验，区域井深 4200m，排量为 40～55L/s，含沙量为 2%～3%，井下最高温度为 115℃，最高压力为 80MPa，岩屑石英岩占比 90%，，冲蚀作用极为剧烈。该区域前期钻井中 MWD 仪器故障率高达 27.3%，平均使用寿命 14.2 天，单次起钻更换仪器耗时约 24 小时，严重影响钻井效率。试验井平均使用寿命延长 30.8 天，未出现冲蚀故障。

应用结果表明，优化后的 MWD 仪器抗冲蚀性能与工作可靠性较传统仪器得到大幅提升，能够适应深井高含沙、大排量、高温高压的复杂冲蚀工况，有效解决仪器故障率高、使用寿命短的行业痛点，提升了钻井钻井效率。

5 结论与建议

（1）筛选出“金刚石复合涂层 + 硬质合金”的复合防护材料方案[2]，复合涂层耐冲蚀性能最优，硬质合金兼顾耐冲蚀性与经济性，氟橡胶密封件可有效提升密封部位抗冲蚀寿命，较传统 Y 型密封圈延长 3.4 倍[7]。

（2）通过流场仿真优化，完成了仪器外壳、流道、接口与密封结构的系统性设计，圆角过渡、流线型结构、渐变式流道等优化措施，有效减少了冲蚀应力集中，冲蚀速率平均降低 48%以上。

（3）室内冲蚀试验与现场验证了优化后防护方案的有效性，与优化前相比，仪器关键部件总平均磨损量降低 82.1%，平均划痕深度从 0.089mm 降至 0.011mm，密封性能完好无泄漏，抗冲蚀性能完全满足深井、超深井钻井的基础工况要求；同时明确了极端工况流速 12m/s 以上、岩屑粒径 0.8mm 以上的防护短板，后续需进一步优化涂层厚度与施工工艺，提升极端工况下的抗冲蚀性能。

（4）智能化抗冲蚀监测与预警：结合物联网、传感器技术，在 MWD 仪器关键冲蚀部位嵌入微型磨损传感器，实时采集传输冲蚀损伤数据，建立冲蚀损伤预测模

型，实现冲蚀状态的实时监测与故障预警，提前预判仪器损伤程度，构建“材料防护 + 结构优化 + 工况适配”的多因素协同抗冲蚀体系，通过钻井液配方改良、钻井参数动态调整，进一步降低冲蚀作用，实现 MWD 仪器长期稳定运行，助力石油钻井智能化、高效化发展。进一步提升钻井效率。

（5）低成本抗冲蚀技术研发：当前金刚石复合涂层成本较高，限制了其大规模推广应用，随着材料的发展，未来需要高性能的替代防护材料与工艺，降低制造成本。

参考文献

[1] 李建明, 赵振峰, 王强. 无线随钻测量仪器冲蚀损伤机理及防护技术研究 [J]. 石油机械, 2021, 49(7): 1-7.

[2] 王敏, 李勇, 张宏. 金刚石复合涂层在 MWD 仪器抗冲蚀中的应用研究 [J]. 表面技术, 2022, 51(3): 289-296.

[3] 大庆钻探工程技术研究院. 电磁波随钻测量仪器结构优化及抗冲蚀性能试验 [R]. 大庆: 大庆钻探工程技术研究院, 2021.

[4] 刘军, 陈勇, 王丽. 钻井液参数对 MWD 仪器冲蚀损伤的影响规律 [J]. 钻井液与完井液, 2021, 38(4): 478-483.

[5] 张磊, 李娟, 赵伟. HFCVD 工艺优化对金刚石涂层结合强度的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(8): 2876-2882.

[6] 中国石油集团钻井工程技术研究院. 深井超深井 MWD 仪器抗冲蚀技术规范 [S]. 北京: 中国石油天然气集团公司, 2022.

[7] 陈峰, 赵亮, 李丽. 氟橡胶密封件在 MWD 仪器中的抗冲蚀性能研究 [J]. 合成橡胶工业, 2021, 44(5): 389-393.