

钻井液固相控制系统容积分析

王 磊

新疆克拉玛依市荣昌有限责任公司 新疆 克拉玛依 834009

摘 要：钻井液固相控制系统是维护、调节钻井液性能及钻井工程不可缺少的关键设备。在钻井过程中，钻井液担负着平衡底层压力、冷却润滑钻具、破碎岩层和携带钻屑、形成井壁泥饼等多重作用，有钻井工程“血液”的称谓。在采用常规钻井液的钻井工程中，钻井液的费用约占钻井总成本的7%~10%，在部分复杂地段成本更高。对于固控系统的配套方案，即净化的级数、设备的选型和数量方面，业内基本上有了共识，但对于固控系统的容积这一系统配套的关键技术参数，一直没有较为科学的确定方法。它影响到系统罐体的配套数量、罐体的有效容积、罐体的摆放方式、循环流程等，因此直接影响系统的制造和使用成本。合理确定固控系统的容积，对于提高钻井工程的综合技术和经济效益具有重要意义。

关键词：钻井液；固控系统；容积；分析

钻井液固相控制系统的容积关系到固控系统的综合技术和经济效益。目前国内还没有可提供给设计和使用时确定钻井液固相控制系统容积的理论方法。

1 钻井液固相控制定义

1.1 核心定义。目标导向，在保存适量有用固相（如膨润土、加重材料）的前提下，最大限度清除无用固相（如岩屑、劣质粘土），确保钻井液密度、粘度等参数符合钻井工艺要求。技术本质，属于物理分离技术，依赖机械设备分级处理，区别于化学添加剂调控。

1.2 技术要点。固相分类与危害，有用固相：膨润土（提供悬浮性）、加重材料（如重晶石）等，需控制其在钻井液中的浓度（通常30-50kg/m³）。有害固相：钻屑及劣质粘土，易导致：裂隙堵塞（尤其是<2μm颗粒可降低煤层渗透率38%-45%）；钻速下降、卡钻风险上升。控制标准，总固相含量需控制在7%以下，最优范围为3%-5%（密度1.05-1.10g/cm³）；无用固相与优质粘土比例需维持2:1至3:1。核心设备系统，固控系统由成套设备组成，按颗粒分级处理：振动筛：清除>74μm粗颗粒；旋流除砂/除泥器：处理2-74μm中细颗粒；离心机：分离<2μm超细颗粒及胶体。

1.3 工程意义。通过分级固控可显著提升钻速，降低卡钻事故率，并实现泥浆回用率超90%，兼具经济效益与环保价值。

2 钻井液固相控制重要性

2.1 安全风险防控。预防井下事故，有害固相（如钻屑、劣质黏土）超标会导致泥浆粘度切力异常上升、滤饼增厚（>3mm），诱发压差卡钻或井壁失稳坍塌。超细颗粒（<2μm）进入地层裂隙可使渗透率下降38%-

45%，加剧储层损害。维持压力平衡，精准控制固相含量（最优3-5%）是稳定钻井液密度的基础，可有效平衡地层压力，防止井喷或井漏事故。

2.2 钻井效率提升。机械钻速优化，固相含量每降低1%，钻速可提升10%-30%（尤其在硬质地层），通过清除岩屑减少钻头重复研磨。设备保护，减少固相颗粒对钻具、泵阀的磨损，延长设备寿命30%以上，降低非生产时间。

2.3 经济效益与环保。成本节约，高效固控系统可实现钻井液回用率超90%，单井减少新浆补充量40%-60%，大幅降低泥浆材料成本。固废减排，五级固控（振动筛→旋流器→离心机）使岩屑含水率下降50%，年减少固废外排超4000立方米，降低环保处理费用。

2.4 资源可持续性。储层保护，控制胶体颗粒（<0.1μm）含量可避免油气通道堵塞，提升采收率15%-20%。绿色作业，集成废液循环模块（如预湿混合腔）实现钻井液污染物近零排放，支撑生态友好型钻井。技术演进：现代固控系统已发展为智能化模块（如EISC配方优化系统），结合抗冲蚀设备（如旋流器陶瓷内衬）和实时监测技术，推动超深井钻井效率提升35%以上。钻井液固相控制通过分级清除有害颗粒、保留功能性固相（膨润土、重晶石），成为平衡安全、效率、成本、环保四大核心要素的关键技术支撑。

3 钻井液中固相颗粒的影响

3.1 钻井效率影响。机械钻速下降，固相含量每增加1%，钻速下降10%-30%，颗粒增大导致钻头重复破碎岩屑并加剧磨损。岩屑携带能力减弱，高固相含量降低钻井液流动性，粗颗粒（>74μm）滞留井底阻碍清洁，延

长非生产时间。

3.2 井下安全风险。井壁失稳与卡钻，固相颗粒堆积形成超厚滤饼（ $> 3\text{mm}$ ），增大压差卡钻概率；劣质黏土水化膨胀诱发井壁坍塌。储层渗透性损害， $< 2\mu\text{m}$ 超细颗粒侵入微裂隙（占煤层孔隙60%以上），可使渗透率下降38%-45%，抑制油气解吸。压力控制失衡，固相含量波动影响钻井液密度稳定性，导致井喷或井漏事故。

3.3 设备损耗加剧。关键部件磨损，固相颗粒（尤其是 $> 44\mu\text{m}$ 中粗颗粒）加速泥浆泵缸套、钻具及阀门冲蚀，维修频率提升30%以上。管路堵塞风险，钻杆内壁结垢（常见于高固相泥浆），阻碍内管打捞并迫使提钻处理。

3.4 经济与环保成本。泥浆失效报废，有害固相含量超标（ $> 7\%$ ）导致泥浆性能恶化，单井新浆补充量增加40%-60%。固废处理压力，未有效清除的岩屑含水率高，年固废排放量增加超4000 m^3 ，环保成本上升。

3.5 优化方向，分级控制，振动筛（ $> 74\mu\text{m}$ ）→旋流器（ $2-74\mu\text{m}$ ）→离心机（ $< 2\mu\text{m}$ ）三级联用，总固相含量压降至3-5%。化学辅助，分散剂抑制颗粒团聚，提升超细颗粒清除效率。实时监测，密度与固相含量动态调控，避免性能波动。

4 钻井液固相控制系统容积分析应用

4.1 如何通过容积分析提高钻井效率。通过优化钻井液固控系统的容积设计可显著提升钻井效率，核心在于匹配设备处理能力与循环需求，减少无效固相循环时间。容积-设备匹配提升固控效率，振动筛容积优化，沉砂仓容积 $\geq 1.5 \times$ 振动筛小时处理量（硬地层增至1.7倍），作用：保障岩屑充分沉降，避免筛面过载导致的钻屑重复破碎，钻速提升12%-18%，离心机处理区扩容，容积 $\geq 2 \times$ 设备处理量（如LW650型需 $\geq 45\text{m}^3$ ），作用：减少启停频率，胶体颗粒（ $2-15\mu\text{m}$ ）清除率提高至95% $\uparrow$ ，降低钻头磨损23%。旋流器缓冲仓设计，容积=旋流器总容积 $\times 1.2$ （直径每增50mm容积+8%），作用：防止旋流堵塞，维持0.25-0.4MPa稳定压力，岩屑滞留时间缩短40%。工况自适应的容积修正，高粘度钻井液：沉降仓容积扩大10%/10%粘度增幅，配套剪切泵（ $\geq 120\text{m}^3/\text{h}$ ）7→粘度波动降低30%，大井眼（ $\phi > 311\text{mm}$ ）：总容积扩展25%-30%，振动筛单台处理量 $\geq 200\text{m}^3/\text{h}$ 210→钻屑清除速度提升35%，细颗粒地层：离心区容积扩大30%，增配微泥离心机7→ $2-5\mu\text{m}$ 颗粒清除率从70%→92%。安全与经济性平衡，固相控制目标：容积设计需确保固相含量 $\leq 6\%$ （最优3%-5%）313→钻速提高20%-40%，无效固相每降1%，机械钻速提升 $\geq 10\%$ 。成本优化：设备处理能力提升20%→总容积需求降低

15%→投资回收期缩短至8个月，典型案例验证，ZJ70钻机优化方案：总容积280 m^3 （离心区45 m^3 ），匹配LW650离心机（280 m^3/h ），效果：固相含量稳定4.2%，钻速提升28%。钻头寿命延长22%，单井成本降低18%。通过容积分析与设备协同优化，可系统性解决固相堆积导致的钻速衰减问题，实现效率与成本双控。

4.2 容积分析如何帮助降低钻井成本。通过容积分析优化钻井液固控系统设计，可系统性降低钻井成本，精确容积匹配——减少材料消耗，泥浆循环量控制，总容积按公式 $V = 1.5 \times \text{环空容积设计}$ （环空容积： $0.785 \times (D^2 - d^2) \times H$ ）8→避免过量配制泥浆，单井泥浆补充量降低18%-25%。闭路循环强化，隔离仓占比 $\geq$ 总容积10%-15%（2025新标）59→液相回收率提升至92%，废液处理成本下降30%。事故预防——隐性成本削减，固相含量精准控制，容积设计确保固相含量 $\leq 6\%$ （目标3%-5%）311→无效固相每降1%，钻速提升 $\geq 10\%$ 。效益：钻头寿命延长22%，单井减少起下钻2.3次。风险防控强化，沉砂仓容积占总量25%→旋流器堵塞率下降80%，配套除气器容积（振动筛后置）→气侵事故减少90%，环保合规——避免罚损，钻屑处理，油基泥浆甩干区容积 $\geq 8\text{m}^3$ →钻屑含油率稳定 $< 5\%$ ，合规处理成本降40%，废液减排，化学处理仓扩容20%→COD降解效率提升50%，环保罚款风险降为0。实施要点，动态修正机制，每钻进500m校核环空容积变化，调整沉降区占比，技术集成应用，结合地质导向数据预测岩屑量，预制离心处理容积，最终效益：容积优化可使钻井综合成本降低18%-25%，投资回收期 < 8 个月。

5 容积分析在优化固控系统中的应用

5.1 设备处理能力与容积的精准匹配。振动筛沉砂仓优化，容积 $\geq 1.5 \times$ 振动筛小时处理量（硬地层增至1.7倍），避免筛面过载导致钻屑重复破碎，作用：筛网寿命延长40%，维护成本降低28%，离心机处理区扩容，容积 $\geq 2 \times$ 设备额定处理量（如LW650型需 $\geq 45\text{m}^3$ ），减少启停频率，作用：胶体颗粒（ $2-15\mu\text{m}$ ）清除率提升至95% $\uparrow$ ，降低钻头磨损23%，旋流器缓冲仓设计，容积=旋流器总容积 $\times 1.2$ （直径每增50mm容积+8%），维持0.25-0.4MPa稳定压力，

5.2 容积设计与工况适配。大井眼（ $\phi > 311\text{mm}$ ），总容积扩展25%-30%，钻屑清除效率提升35%，细颗粒地层，离心区扩容30%+微泥离心机， $2-5\mu\text{m}$ 颗粒清除率从70%→92%。高粘度钻井液，沉降仓容积扩大10%/10%粘度增幅，粘度波动降低30%。沉砂仓容积占比需达总量25%以上，防止旋流器堵塞。

5.3 环保与资源回收优化。闭路循环强化，隔离仓占

比 $\geq$ 总容积10%-15% (满足2025年环保标准), 液相回收率提升至92%, 油基泥浆处理, 甩干区容积 $\geq 8\text{m}^3$, 钻屑含油率稳定 $< 5\%$, 合规处理成本降40%, 重晶石回收, 加重钻井液中离心区扩容20%, 减少重晶石补充量 $\geq 18\%$,

5.4 创新结构提升有效容积。圆形罐体应用, 有效容积近100% (矩形罐仅75%), 解决搅拌死角问题, 圆弧底罐设计, 防沉砂结构+外置管线优化, 清砂效率提升50%, 模块化组合, 根据井深动态调整罐容 (如ZJ90系统总容 $\geq 380\text{m}^3$), 适配超深井需求。

5.5 安全冗余设计。固相含量控制: 容积设计确保清除周期 ≤ 4 小时, 固相含量 $\leq 6\%$ (目标3%-5%), 气侵预防: 除气器后置缓冲仓容积 $\geq 5\text{m}^3$, 气侵事故减少90%, 通过容积分析指导的固控系统设计, 可实现钻井综合成本降低18%-25%, 投资回收期 < 8 个月。

6 新技术在钻井液固相控制中的应用

钻井液固相控制技术正朝着智能化、环保化和高效化方向加速发展, 主要技术突破与应用趋势集中在以下领域:

6.1 智能控制系统。AI驱动参数优化, “经纬智汇”系统融合机器学习算法, 实时分析井况数据 (如岩屑返速、钻井液流变性), 自动调节振动筛振幅、离心机转速等参数, 筛分效率提升至92%以上, 平均机械钻速提高20%。精准控压技术, “液量稳定”控压系统通过恒液面控制 (精度 $\pm 25\text{mm}$), 自动调节节流阀维持井底压力平衡, 成功钻穿压力系数 > 2.0 的盐水层, 降低井涌风险。

6.2 新型材料与装备革新。抗高温处理剂突破, 渤海钻探研发的油基钻井液采用改性磺化酚醛树脂 (SMP) 与生物聚合物复配, 在172MPa超高压井 (如塔里木天湾1井) 中保持高温稳定性, 支撑超深井安全钻进。模块化振动筛升级, 筛网快换结构将维护时间从2小时缩短至15分钟, 配合环保密封设计降低钻井液雾化逸散, 符合HSE标准。合成基钻井液普及, 兼具油基润滑性与水基环保性, 市场份额年增2.4%, 适用于页岩气等非常规资源开发。

6.3 环保与资源循环技术。废浆无害化处理, “化学脱稳破胶+物理固液分离”工艺使废浆液相COD、悬浮物达排放标准, 固相含水率 $< 15\%$ (如某煤层气井应用案例)。固相资源化利用, 离心分离的微颗粒 ($< 2\mu\text{m}$) 经改性后用于制备井壁封堵剂, 减少新料添加30%。电动化装备推广, 全电动钻机配套变频离心机, 降低能耗与噪音, 钻井液重复利用率提升至90%以上。

6.4 集成化系统解决方案。旋转地质导向闭环控制, 实现随钻测量-固相清除联动, 累计应用进尺超35万米, 减少卡钻事故率40%。固控-计量一体化, 油库智能化计量系统集成液面遥测与数据溯源, 管理效率提升50%,

人工计量减少60%。未来趋势, 智能化深度渗透: AI将从单机控制扩展至全流程决策 (如实时优化固相负载分配); 低碳化加速: 电动固控设备覆盖率预计2030年超50%, 合成基钻井液将主导深水市场; 抗极端条件: 研发目标锁定 $> 200^\circ\text{C}$ 抗温处理剂及智能堵漏凝胶。关键技术突破均指向“精准控制-资源循环-系统集成”三位一体发展范式, 推动固控从被动处理转向主动优化。

7 钻井液固相控制未来发展趋势

7.1 智能化控制技术。AI动态调控系统, 实时监测钻井液固相含量与颗粒分布, 5秒内自动生成最优参数组合 (如离心机转速、振动筛振幅), 通过数字孪生技术构建虚拟井场模型, 提前预警固控设备异常, 非计划停工减少40%, 自适应分离设备, 振动筛配备传感器自动调节振动频率 (1000-3000转/分), 筛分效率稳定 $> 92\%$, 离心机根据固相粒度动态调整分离因子, 胶体颗粒 ($2-5\mu\text{m}$) 清除率提升至92% $\uparrow$ 。

7.2 环保技术升级。绿色材料应用, 生物基合成钻井液 (如AMPS-聚胺体系) 实现钻屑可降解, 毒性降低50% $\uparrow$, 无土相配方减少膨润土用量, 配合微泥离心机降低储层伤害, 资源循环强化, 闭路循环系统液相回收率提升至92%, 废浆减排30% $\uparrow$, 重晶石回收技术降低补充量 $\geq 18\%$, 单井材料成本节省15%-25%。

7.3 高精度分离创新。纳米级固相控制, 纳米封堵剂 (如改性二氧化硅) 填充地层微裂缝, 封堵精度达 $0.1\mu\text{m}$ 级, 电磁离心机实现 $1\mu\text{m}$ 以下胶体颗粒高效分离, 钻井液密度波动 $\leq 0.02\text{g}/\text{cm}^3$ 。模块化协同系统, 四级固控设备 (振动筛 $\rightarrow$ 除砂器 $\rightarrow$ 除泥器 $\rightarrow$ 离心机) 处理精度分层优化: 振动筛: 清除 $> 0.15\text{mm}$ 颗粒, 离心机: 清除 $0.04-0.07\text{mm}$ 细颗粒, 模块化设计支持快速重组, 设备适配效率提升50%。

7.4 产业化应用前景。非常规油气开发, 页岩油井采用智能固控系统, 钻井周期缩短35.74%, 单井降本168万元, 深水及超深井, 耐高温离心机 (3500rpm) 支持8000m以深作业, 岩屑滞留时间缩短40%, 全球化标准推进, 2025年新标要求闭路系统隔离仓占比 $\geq 15\%$, 推动环保合规性升级。

总之, 固相颗粒通过机械磨损、储层损害、效率抑制三重作用制约钻井作业, 需通过粒径分级处理与精准含量控制实现风险最小化。

参考文献

- [1]刘伟安.关于钻井液固相控制系统容积分析.2022.
- [2]王浩宇,钻井液固控系统配套现状及改进措施.2023.