大牛地煤层气水平井钻井液技术应用

赵宽心
中石化中原石油工程有限公司钻井一公司　河南 濮阳　457000

摘　要　大牛地深层煤岩气水平井目的层太原组8#煤层埋藏深，非均质性强，钻井过程中存在机械钻速低、井壁易失稳垮塌、井下故障复杂频发等技术难点。为此，在分析太原组8#煤岩地层特征和钻井液技术难点的基础上，通过室内实验研究钾胺基聚合物防塌钻井液体系，形成了大牛地深层煤岩气水平井水平段钻井液关键技术。通过室内实验可知，该体系流变性良好，API滤失量小于2 mL，95 ℃高温高压滤失量不大于5 mL，体系以聚胺、氯化钾为井壁稳定主体，优选纳米、刚性和可变形8种封堵剂多元复合形成的高性能水基钻井液，具有抑制性和封堵性强的特点，对煤层及其夹矸的7天压力传递率为0.73%～10.8%，防膨率为32.74%～75.38%，可有效保证煤层气水平井的井壁稳定。

关键词　井壁失稳；煤层气；防塌钻井液；水平井

Application of Drilling Fluid Technology in Horizontal Wells for Coalbed Methane in Daniudi

Zhao Kuan-xin
Sinopec Zhongyuan Petroleum Engineering Co., Ltd. Drilling Division One, Puyang 457000, Henan Province, China

Abstract　In horizontal wells targeting the deep Taiyuan Formation 8# coal seam for coalbed methane in Daniudi, the reservoir is characterized by significant burial depth and strong heterogeneity. Drilling operations face technical challenges such as low rate of penetration, wellbore instability with high risk of collapse, and frequent downhole complications. To address these issues, this study analyzed the formation characteristics of the Taiyuan Formation 8# coal seam and the associated drilling fluid challenges. Through laboratory experiments, a potassium-amine polymer anti-sloughing drilling fluid system was developed, establishing key technologies for drilling fluid in the horizontal section of deep coalbed methane horizontal wells in Daniudi. Experimental results indicate that the system exhibits excellent rheological properties, with API filtration loss less than 2 mL and high-temperature, high-pressure filtration loss at 95°C not exceeding 5 mL. The system primarily uses polyamine and potassium chloride for wellbore stabilization and incorporates eight selected plugging agents—including nano, rigid, and deformable materials—in a composite high-performance water-based drilling fluid. This formulation demonstrates strong inhibitory and plugging capabilities, with a seven-day pressure transfer rate of 0.73%–10.8% for coal seams and associated partings, and an anti-swelling rate of 32.74%–75.38%, effectively ensuring wellbore stability in coalbed methane horizontal wells.

Key words　Wellbore Instability; Coalbed Methane; Anti-sloughing Drilling Fluid; Horizontal Well

大牛地煤岩裂缝发育、难致密封堵。煤层气孔、组织孔发育，阳煤1HF井端、面割理平均3～7条/5 cm，煤岩裂缝宽度52～231 μm，煤岩孔隙61.60 nm，裂隙发育、缝网复杂，难以有效封堵，井壁稳定性差，钻井液消耗量大。煤岩水平段钻进易坍塌、憋钻、托压，需强化轨迹平稳。高伽马煤层钻进易坍塌、托压，阳煤1HF井煤层钻进期间多次上提遇卡，憋顶驱，接单根需重复划眼多次才能安全施工，辅助时间长。煤层泥岩水敏性强，需强化轨迹平稳性。在低伽马（30～45 API）煤层钻进时安全平稳，在高伽马煤层钻进时井底易失稳坍塌，尤其是因轨迹变化调整及井眼随煤层起伏，井壁摩擦阻力、扭矩大、憋钻，托压严重，钻进困难[1]。

针对大牛地煤层气井太原组煤层井壁失稳技术难题，分析了矿物组成、微观结构及理化性能，揭示了井壁失稳机理，通过高效处理剂优选和配方优化，构建了适用于本区块的钾胺基聚合物防塌钻井液体系配方。

1　太原组井壁失稳机理分析

1.1 矿物组成分析

太原组8#煤层煤岩厚度12.0～13.0 m，上部以光亮煤、半亮煤为主，厚度7.0～8.0 m；下部以半暗煤、暗淡煤为主，煤层厚度4.0～6.0 m。选取伊金1HF井太原组8#号煤，利用XRD扫描进行全岩矿物及黏土矿物相对含量分析，主要组分为煤，含量76%，其次为黏土矿物高岭石，含量23.38%，含少量方解石，

占比0.62%，

1.2 微观结构分析

利用扫描电镜分析了太原组煤层岩心的微观结构、矿物类型及分布结果，太原组煤层有明显裂缝及微纳米裂缝发育，裂缝在17.837～231.857 μm之间，纳米级裂缝在839.1 nm左右，液相易侵入造成剥落坍塌。煤岩强度低、脆度较大，滤液侵入易失稳，煤层中煤矸力学敏感性强、易受机械扰动发生垮塌；同时，微纳米裂缝及孔隙发育、膨胀性及分散性黏土矿物含量高（20%以上），浸泡前后力学性质差异大，浸泡后煤层煤矸差异性膨胀分散，导致井壁失稳[2]。

2 室内钻井液体系配方实验

2.1 体系配方

针对太原组8#煤岩岩性特性，通过室内试验优选抑制剂、纳米封堵剂和成膜剂等高效材料，形成了钾胺基聚合物防塌钻井液体系，其配方为：2.5%坂土浆+4%有机硅腐殖酸钾+7%KCl+2%液体润滑剂+7%阳离子胶乳沥青（85 ℃软化点）+3%超细碳酸钙（800目）+3%复合超细碳酸钙QS-F+2%固体润滑剂+1%聚合铝AOP-1+1%微纳米封堵剂NWD+0.1%乳液包被剂+0.5%两性离子磺酸盐共聚物+2%封堵护壁剂FPS+3%阳离子沥青粉+0.5%支化聚醚胺PEA-1，使用重晶石粉加重至密度1.40 g/cm^3。

2.2 粒度分析

对配方样品进行粒度分析，通过TopSizer激光粒度分析仪，样品粒径分布0.4～632 μm，24～37 500目，具备优良的微裂缝、裂隙封堵性能与煤裂缝相匹配。配方试验30 min中温中压滤失量为2 mL，泥饼薄而致密，封堵性较好。

2.3 防膨胀性实验

分别取大牛地太原组层系中的煤岩、灰黑色泥岩、深灰色泥岩和碳质泥岩四类岩性，分别在清水和钻井液中浸泡0.5 h、8 h、16 h、24 h进行膨胀率实验，膨胀率实验结果见表1。

表1 膨胀率实验对比表

岩性	项目	膨胀率（%）				防膨率
	时间	0.5 h	8 h	16 h	24 h	（%）
煤岩	清水	0.111 6	0.375 8	0.416 9	0.446 3	38.65
	钻井液	0.068 5	0.218 3	0.261 4	0.273 8	
灰黑色泥岩	清水	3.184 4	4.307 0	4.455 9	4.524 6	75.38
	钻井液	0.375 1	0.961 3	1.078 5	1.113 7	
深灰色泥岩	清水	2.100 3	2.403 3	2.466 0	2.518 3	32.74
	钻井液	0.863 0	1.650 5	1.672 0	1.693 6	
碳质泥岩	清水	1.747 6	2.165 0	2.203 9	2.213 6	63.96
	钻井液	0.184 8	0.651 7	0.758 7	0.797 6	

3 现场实验运用

3.1 钻井液不同井段钻井液性能数据

分别在煤层气井DNSP1、DNSP2、DNSP3进行运用，在现场分别对三口井不同井段的钻井液性能进行现场数据的收集，性能数据见表2。

表2 性能数据表

井号	理念	井段	密度（g/cm^3）	黏度（s）	塑黏（mPa·s）	动切力（Pa）	初切（Pa）	终切（Pa）	API（mL）	HTHP（mL/90°）	pH
DNSP1	高黏高切	斜井段	1.19～1.41	45～68	14～30	4.5～13	0～2	1.5～3.5	2.8～2	9～6.5	10～9
		水平段	1.41～1.46	68～94	30～50	13～27	2～3.5	3.5～5.5	2～1.8	6.5	8～9
		完井	1.46	82	44	24	3.5	5	1.8	6.5	9.5
DNSP2	中黏强携	斜井段	1.19～1.42	42～60	16～38	4.5～15.5	0.5～2.5	1～4	1.4～4.1	5	9～10
		水平段	1.42～1.48	60～73	38～42	15.5～22.5	2.5～4	4～5.5	1.2～1.6	5	8～9
		完井	1.48	66	39	19	3.5	5	1.6	5	9
DNSP3		斜井段	1.19～1.44	40～70	20～45	10～17	1～2	2～3.5	2.8～1.4	5～3	10～9
		水平段	1.44～1.48	71～75	42～48	15～18	2.5～3	3.5～6	1.8～1.4	3～4.6	9
		完井	1.48	72	46	16	3	6	1.5	4.6	9

通过上述数据分析：API失水＜2.0 mL，高温高压失水＜7.0 mL，日消耗稳定10 m^{3}左右，3口评价井API滤失量1.2～1.8 mL、高温高压滤失量3～6.5 mL，1 500 m水平段一趟钻完钻。

3.2 煤层段钻井液维护措施

针对水平段煤层中钻井液性能分别从封堵、抑制、应力支撑、粘切控制、失水控制和润滑性能等方面进行了优化，保障水平段煤层的安全钻进。

1.封堵性能优化（强封堵）。维持乳化沥青含量3%～4%，沥青粉含量2%～3%，使总沥青含量保持在6%～7%。控制超钙含量在3%～4%，并配合微纳米乳液、封堵护壁剂及石灰石等材料，确保总封堵材料含量稳定在15%左右。每次补充钻井液时，须按配方同步补充封堵材料，以维持其有效含量[3]。

2.抑制性能优化（强抑制）。采用氯化钾体系，并配伍使用聚胺类抑制剂。将Cl^-浓度维持在11万～12万 mg/L，K^+浓度维持在约2万 mg/L，支化聚醚胺PEA-1含量为0.5%。

3.应力支撑与密度控制。斜井段进入5#煤层前，将钻井液密度提升至1.45 g/cm³，以防煤层坍塌。进入水平段前，进一步将密度提升至1.48 g/cm³。由于煤层气井烃值较高，需加强真空除气器使用，确保出入口密度平衡。

4.流变性控制（黏切控制）。维持黏度60～80 s，动切力14～16 Pa，动塑比0.3～0.4，以平衡井壁冲刷与携砂需求。若钻遇煤矸或井下出现大量掉块，则将黏度提升至80 s，动切力提至16～18 Pa。黏切提升主要依靠黄原胶和抗盐土。

5.滤失控制。进入水平段前，调整中压滤失量控制在＜2 mL。根据地层温度（80～90 ℃），控制高温高压滤失量（HTHP，90 ℃）控制在＜6 mL。中压滤失控制以低黏派克、两性离子磺酸盐共聚物为主，高温高压滤失控制以磺化酚醛树脂为主[4]。

6.固相含量控制。因使用氯化钾盐水体系并加入大量封堵材料，需控制膨润土含量在25～30 g/L。日常加强监测，如需补充或提升黏切，优先使用抗盐土。

7.固控设备使用。鉴于大量封堵材料的加入，需注重固控效率：振动筛使用200目筛布，卧式一体机每班运行1～2个循环周（2～4 h）。

8.润滑性能优化。液体润滑剂与固体润滑剂配合使用，以液体为主，液固比控制在（2～3）：1。逐步将含油量提升至2%以上，在强化润滑的同时利于消泡排气。

9.清砂作业。尽量避免使用稠塞清砂，以防环空憋堵。依靠日常排量与钻井液黏切性能即可满足清砂需求。

3.3 工程技术措施

1.参数优化。采用复合钻时，通过增降顶驱转速控制在40～60 r/min，煤层段控时钻进，机械钻速为2～4 min/m。

2.细化操作措施。起钻前操作：井底循环至钻压归零后缓慢上提；每完成一立柱后，倒划眼10～15 m，上提排量≤20 L/s，倒划时顶驱转速降至20 r/min。下钻操作：下放时先提高排量至正常值，再调整顶驱转速至50 r/min，正划眼至井底接立柱。摩阻监测：记录每次上提摩阻。完钻后处理：避免长时间循环；煤层段下钻每间隔不超过300 m顶通循环一次；开泵时避免连续转动钻具，必要时可降低排量以防环空憋堵[5]。

3.严防环空憋堵。维持钻井液黏切性能，防止岩屑沉积导致蹩泵。出现蹩泵（泵压升高≤2 MPa）时立即停泵、停顶驱，随后以小排量（1～2 L/s）缓慢开泵，恢复环空畅通后逐步恢复正常排量。

4.轨迹控制。与地质导向密切配合，通过控制钻时与转速，避免井斜短距内剧烈变化，保持轨迹平滑过渡，以降低摩阻与扭矩。

5.杜绝开泵过猛。推荐配置电动泥浆泵，实现平稳开泵，减少振动对煤层的扰动。遇阻卡开泵时，排量从1 L/s逐步提升至10～15 L/s，前提是泵压稳定。测斜时使用较低排量，避免钻具静止开泵导致井眼扩大。

6.工具配备。采用简化无扶正器钻具组合，增强稳斜与防卡能力。改进钻头切削齿，降低岩屑粒度，提升倒划眼防卡效果。煤层段非必要不装内防喷工具，可采用无磁承压钻杆替代无磁钻铤，以增大环空间隙，降低憋堵风险[6]。

7.确保井眼清洁。基于水平段岩屑运移与沉降机理，通过大排量、适配的钻井液密度及充分循环时间，实现井眼有效清洁，支撑水平段长延伸作业。

4 结束语

为保障煤层气水平段安全快速钻进，该钻井液体系确立了“强封堵、强抑制、强支撑、低失水”的井壁稳定原则。体系通过维持黏度65～70 s、动切力≤20 Pa、动塑比0.4～0.5，优化流变性以显著提升携岩能力。在井壁稳定方面，通过复配沥青、超钙等材料强化封堵，有效密封煤岩微裂缝，阻止滤液侵入；控制钾离子浓度并添加聚胺抑制剂，抑制黏土矿物水化膨胀；进入煤层前一次性加足封堵材料，形成致密泥饼，减少钻井液消耗与虚厚泥饼风险；同时采用合理密度平衡地层压力，实现对井壁的有效应力支撑。该体系API滤失量＜2 mL，95 ℃高温高压滤失量＜6 mL，整体表现出良好的抑制防塌性能与封堵能力。

参考文献

[1]冯义,任凯,刘俊田,等.深层煤层气水平井安全钻井技术[J].钻采工艺,2024,47(3):33-41.

[2]李士斌,王中华.煤层气水平井钻井液技术进展与挑战[J].钻井液与完井液,2023,40(2):156-165.

[3]张遂安,何鲜峰.鄂尔多斯盆地深层煤层气钻井工程技术[M].北京:石油工业出版社,2022:89-112.

[4]鲜保安,高德利.中国煤层气水平井钻完井技术研究进展[J].石油学报,2023,44(11):1974-1992.

[5]史配情,医华峰,智公作,等.鄂尔多斯盆地深层煤层气水平井水平段安全钻井关键技术[J].石油钻探技术,2025,53(1):17-23.

[6]蒋新立,李明忠.鄂北大牛地气田深层煤层气钻完井关键技术及应用[J].断块油气田,2025,32(5):863-868.

（本文编辑 曹 阳）