

基于暂堵转向压裂的煤层气井增产技术及运用

于永坤

中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 中国·天津 300452

摘要: 我国煤层气资源储量大, 低渗透、非均质的特征使煤层气的开采效率受到影响。临时性封堵压裂是通过封堵断面通道的方式使裂缝转向扩大的过程, 增大地质储量的利用率以及单井产量, 提高资源动用的程度。本文从技术原理、材料体系、工艺实施和应用要点等方面进行论述, 分析该技术对煤层气储层改造的适配性以及实施要点, 确定施工参数优化的方向及质量控制的要求, 为煤层气高效开发提供技术参考。

关键词: 暂堵转向压裂; 煤层气井; 储层改造; 增产技术

Coalbed Methane Well Production Enhancement Technology and Application Based on Diversion Fracturing

Yu Yongkun

Engineering & Technology Company, China National Offshore Oil Corporation, China Tianjin 300452

Abstract: China possesses vast reserves of coalbed methane (CBM), but the characteristics of low permeability and heterogeneity affect the extraction efficiency. Temporugging fracturing is a process that redirects fracture propagation by blocking fracture channel sections, thereby increasing the utilization rate of geological reserves, single-well production, and the degree of resource obilization. This paper discusses the technology from the perspectives of technical principles, material systems, process implementation, and application points. It analyzes the adaptability of this technology to CBM reservoir modition and its implementation points, determines the direction for optimizing construction parameters and quality control requirements, and provides a technical reference for the efficient development of CBM.

Keywords: Temporary plugging fracture irection; CBM well; Reservoir modification; Production enhancement technology

0 引言

煤层气为清洁的非常规天然气, 对于改善能源结构具有重要作用。我国部分煤储层渗透率低、天然裂缝分布不均匀, 常规压裂容易造成单一条裂缝, 无法覆盖未动用的储层。暂堵转向压裂可以实现裂缝系统复杂扩展, 提高储层动用程度。本技术应用到煤层气方面可冲破开采的限制, 改良单井产出及总体开发收益, 助力煤层气产业实现规模化、高效化发展。

1 煤层气储层开采现状与技术需求

1.1 煤储层地质特征对开采的影响

煤储层普遍呈现低孔低渗特性, 核心参数量化如下: 孔隙度通常为 1.2%~6.8%, 渗透率多处于 0.001~0.1 mD (毫达西), 天然裂缝密度为 0.3~2.7 条/m, 且裂缝走向离散度达 35°~80°, 层间非均质性系数为 1.8~5.2。煤层割理系统抗破坏能力弱, 传统压裂工艺下, 压裂液对割理的破坏率可达 45%~70%, 导致缝网均匀性差, 未动用储层体积占比高达 30%~55%。

煤层埋藏深度与地应力呈正相关关系, 拟合公式为 $\sigma_h = 0.023H + 1.25$ (其中 σ_h 为水平地应力, 单位: MPa; H 为埋藏深度, 单位: m), 当地应力差值超过 8 MPa 时, 裂缝延伸方向偏差可达 20°~40°, 导致单井初始产量降低 25%~40%, 稳产时间缩短 1.5~3.5 年。煤层气解吸与扩散速度满足菲克定律, 扩散系数为 $1.2 \times 10^{-8} \sim 8.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$, 传统改造手段下, 渗流通道有效半径仅为 0.8~2.3 m, 难以满足长期稳产需求。

1.2 常规压裂技术存在的局限

常规水力压裂以沿最大主应力方向发育主裂缝为主, 主裂缝占比达 75%~90%, 对次要方向及低渗透区 (渗透率 < 0.01 mD) 的改造覆盖率仅为 20%~35%。压裂液窜流速度为 1.2~3.8 m/min, 沿高渗通道的液量浪费率达 30%~50%, 改造不均匀系数为 1.6~4.3。常规压裂对煤层原始应力场的扰动幅度仅为 5%~12%, 隐蔽性天然裂缝激活率不足 25%, 储层动用程度维持在 40%~60%。受施工工艺限制, 裂缝实际长度仅为设计值的 60%~85%, 导流能力为 5~25 mD·m,

低于设计要求的 30~50 mD·m，导致气体运移阻力增大 40%~70%，严重制约煤层气田规模化、效益化开发。

2 暂堵转向压裂技术核心原理

2.1 暂堵转向的作用机制

暂堵转向压裂通过暂堵材料封闭已形成主裂缝或高渗透射孔孔眼，局部流体压力提升公式为 $\Delta P = \frac{2\sigma_t L}{D}$ （ ΔP 其中为压力增量，单位：MPa； σ_t 为暂堵材料抗压强度，单位：MPa；L 为封堵长度，单位：m；D 为裂缝宽度，单位：mm），当局部压力超过地层破裂压力 1.1~1.3 倍时，压裂液实现转向，进入未改造区。

封堵结构在地层压力作用下形成稳定封堵层，封堵强度需满足 $\sigma_{封} \geq 1.2 \sigma_h$ ，可使裂缝延伸路线改变 30°~70°，促进分支裂缝和次生裂缝发育，裂缝密度提升至 1.8~4.5 条/m，渗流连通性提升 60%~120%，煤层气解吸速率提高 35%~80%。

暂堵材料在裂缝内形成多级封堵结构，可承受 30~80 MPa 的高压流体冲击，引导压裂液向低应力（ $\sigma_h < 15$ MPa）、低渗透（ $K < 0.01$ mD）区域扩展，弥补传统压裂改造盲区。经过 2~4 次转向造缝，储层内部裂隙系统激发率达 75%~90%，吸附气转化为游离气的比例提升 40%~65%，为高效排采奠定基础。

2.2 裂缝拓展与储层改造逻辑

暂堵作业破坏原有裂缝扩展趋势，在不同应力区产生新裂缝，储层改造体积（SRV）计算公式为 $SRV = \pi R^2 h \phi$ （其中 R 为裂缝扩展半径，单位：m；h 为储层厚度，单位：m； ϕ 为孔隙度），改造体积较常规压裂提升 80%~150%。

可控转向技术可使煤岩破碎率降低 30%~55%，煤粉产出量减少 40%~70%，储层伤害风险降低 50%~65%。该技术通过精确控制裂缝发展方向（控制精度误差 $\leq 10^\circ$ ），实现储层立体式改造，主裂缝能量占比从 80%~90% 降至 40%~60%。多层叠置煤层中，转向压裂可使各层改造强度变异系数 ≤ 0.3 ，层间干扰系数降低 60%~80%，不同厚度（0.8~5.0 m）、不同性质储层的产气贡献率均 $\geq 10\%$ ，储层动用程度提升至 75%~90%。

2.3 暂堵材料适配性与施工调控原理

暂堵材料理化特性需与地层条件精准匹配，核心适配

公式为 $K_{适配} = \frac{\sigma_{材} \cdot v_{降}}{\sigma_h \cdot \phi}$ （其中 $K_{适配}$ 为适配系数， $\sigma_{材}$ 为材料抗压强度，单位：MPa； $v_{降}$ 为材料降解速率，单位：mg/h； σ_h 为水平地应力，单位：MPa； ϕ 为孔隙度），当 $K_{适配} \in [0.8, 1.2]$ 时，可实现高效转向且无永久性储层损害。

施工调控采用泵压（P）、排量（Q）实时监测，暂堵剂投加时间由泵压突变点控制，投加量计算公式为 $m = \frac{\pi D^2 L \rho \phi}{4}$ （其中 m 为投加量，单位：kg；D 为裂缝宽度，单位：m；L 为封堵长度，单位：m； ρ 为暂堵剂密度，单位：kg/m³； ϕ 为孔隙度），投加量误差 $\leq 10\%$ ，可准确控制裂缝起裂（起裂压力误差 ≤ 2 MPa）和延伸时间（延伸速度控制在 0.5~1.5 m/min）。合理选型与参数调节可使储层改造效果提升 60%~120%，施工安全性提升 40%~70%。暂堵剂选型与地层条件匹配表如表 1 所示：

3 暂堵转向压裂材料体系与选型

3.1 暂堵材料类型与性能要求

暂堵材料主要有颗粒型、纤维型、凝胶型和可降解球型材料^[1]。材料应具有良好的承压性和封堵稳定性，在地层温度和压力作用下能保持结构的完整性，在高闭合应力环境里不破碎、不移动，保持封堵界面的密封性以及持久性。材料应具有快速降解性，压裂后能自行溶解或者随返排液排出，不留堵塞渗流通道的障碍，降解产物粒径小、无固相沉淀，不污染煤岩基质和裂缝系统。材料粒径和强度要与煤层裂缝宽度和施工压力相适应，保证精准封堵和顺利转向，强度太低容易被压穿而造成封堵失败，强度过高会增大后期解堵的难度。

3.2 煤层气井材料适配性选择

浅层低温煤层优先选择水溶性可降解颗粒和纤维材料，降解速度快、返排效率高，在低温下仍能保持较好的分散性，注入后迅速起效并且后期解堵彻底。深层高温煤层采用耐高温复合暂堵材料，保证封堵效果一直稳定，能抵抗地层高温对材料结构的破坏，在长时间浸泡下仍然保持完整的封堵形态。薄互层煤层用多级粒径组合材料来完成层间精准封堵和均匀转向，利用不同的粒径材料一起对大到小的各种裂缝进行覆盖，从而避免出现单一粒径封堵的盲区。射孔孔眼封堵用匹配孔径的暂堵球，提高孔眼封堵的成功率，保证压裂液有效转向，球体回弹性能和密封

表 1 暂堵剂选型与地层条件匹配表

地层条件	水平地应力 σ_h (MPa)	煤层硬度 (MPa)	孔隙度 ϕ (%)	暂堵剂粒径 (mm)	暂堵剂抗压强度 (MPa)	降解速率 (mg/h)	适配系数 $K_{适配}$
浅层易改造储层	8~15	8.5~15.0	4.0~6.8	0.2~0.5	25~40	5~10	0.8~1.0
中层中等难度储层	15~25	15.0~22.0	2.5~4.0	0.5~0.8	40~60	4~7	0.9~1.1
深层难改造储层	25~40	22.0~28.6	1.2~2.5	0.8~1.0	60~80	3~6	1.0~1.2

贴合度可以有效地阻断液流通道。

4 暂堵转向压裂工艺实施要点

4.1 施工参数优化设计

施工排量应根据煤层渗透率、裂缝扩展能力来定，煤层渗透率 0.05~0.3mD 时，排量控制在 2.5~5.0m³/min，使暂堵材料能够顺利运移并封堵，排量小于 2.0m³/min 容易导致材料沉降堆积，大于 6.0m³/min 容易造成封堵结构被冲蚀。前置液用量以充分沟通天然裂缝为标准，单段前置液用量 180~320m³，占总液量 35%~45%，为转向造缝打下基础，用足量前置液压开原始裂缝网络，确定主裂缝延伸方向和扩展范围。暂堵剂的投放时间以压力上升信号来决定，当压力达到拐点即 3~5MPa 时进行投放，能迅速封堵住主裂缝，精确把握好压力拐点可以将封堵效率提高 20%~30%，避免出现过早或者过晚投放导致转向受到影响的情况。携砂液浓度和加砂量配合转向裂缝宽度，砂液浓度 8%~18%，单段加砂量 35~70m³，防止砂堵，保证裂缝长期支撑，根据裂缝动态开度 2~6mm 调节加砂程序，保证支撑剂均匀铺设^[4]。参数的设计要结合数值模拟结果，在地应力差 6~12MPa，煤岩弹性模量为 2.5~5.0GPa，储层含气饱和度为 75%~85% 的情况下进行施工，依靠模拟数据预估裂缝转向轨迹来提高参数设计的科学性。采用合适的调节排量、浓度配比提高暂堵剂的运移速度为 0.8~1.2m/s，保证裂缝转得很准可控，从而改善整体改造效果，使复杂的裂缝系统可以实现均匀动用、充分连通。

4.2 现场施工流程控制

施工前进行储层物性测试和地应力分析，测试煤层厚度 1.8~5.2m、渗透率 0.03~0.4mD、水平地应力差 5~15MPa，根据测试结果编制施工方案，掌握煤层厚度、渗透率、各向应力差异等资料，为材料选用及参数选取提供数据支撑。按照前置液注入、暂堵剂投放、转向造缝、携砂液充填、顶替液注入的步骤进行作业，前置液注入速率 2.5~4.5m³/min，暂堵剂分段投加量 0.5~1.2t/段，顶替液量 40~60m³，各个阶段按照设计节奏进行推进，使液流体系及封堵材料得以有序发挥作用。施工过程中压力、排量的变化进行实时监测，压力监测精度为 0.01MPa，排量采集频率为 1 次/s，根据压力反应调节投加量和注压速率，压力陡升 >10MPa/min 或者陡降 <5MPa/min 时立即干预，保证施工系统的正常运转。施工完成后立即进行返排作业，返排速率为 1.5~3.0m³/min，迅速排出压裂液和降解产物，使储层浸泡时间控制在 6~12h 内，减小液相滞留造成的煤岩水化损伤和产气通道堵塞的风险。现场施工严格按照

设计程序进行，各个环节衔接紧密，工序衔接延误时间不超过 10 分钟，防止因为操作延误导致封堵失效，加强岗位之间、指令执行配合速度。根据井下实时监测数据动态调节方案，应对地层的不确定性因素，保证裂缝转向角度 30°~60° 和充填效果达到预期效果，为之后的产气创造良好的条件，最大限度地发挥储层的产气潜力，煤层压裂施工关键参数表如表 2 所示。

表 2 煤层压裂施工关键参数

施工阶段	关键参数	参数范围
储层基础条件	煤层厚度	1.8 ~ 5.2m
	渗透率	0.03 ~ 0.4mD
	水平地应力差	5 ~ 15MPa
主体施工参数	前置液注入速率	2.5~4.5m³
	暂堵剂分段投加量	/min0.5~1.2t/ 段
	顶替液量	40~60m³
施工监测控制	压力监测精度	0.01MPa
	排量采集频率	1 次 /s
	压力陡升 / 陡降干预阈值	> 10MPa/min 或< 5MPa/min
返排及工序控制	返排速率	1.5 ~ 3.0m³/min
	储层浸泡时间	6 ~ 12h
	工序衔接延误时间	≤ 10 分钟
施工效果要求	裂缝转向角度	30° ~60°

4.3 质量管控与风险防控

创建全过程监测体系，对封堵压力变化、裂缝伸长做实时监测，地面压力传感器的采样率设为 5Hz，井下微裂缝探测间距设为 1m，地面仪器和井下检测装置一起获得信息，压力监测误差控制在 ±0.5MPa 以内。提前制定压力异常波动和砂堵风险应对方案，压力突升 >15MPa 立即降排量、砂堵风险段砂比降低 3% 到 5%，避免施工停工，对高压憋泵、砂堵卡钻等常见问题设置应急处理办法及备用措施，应急响应时间不大于 5min。颗粒级配为 30~80 目，每小时加入 20~40kg 封堵剂，防止过度堵塞或者堵不住。根据地层反应调节投加速度，达到良好的封堵强度和解堵作用，封堵的有效率 ≥ 90%。加强地面设备检修、材料质量检测，压裂机组完好率不低于 98%，暂堵剂溶解率不低于 95%，支撑剂圆度不小于 0.8，保证连续稳定施工，降低作业安全风险，防止由于设备故障或者材料不合格造成的施工事故。施工时专人记录关键数据，每次测量 5min 内读取压力、排量、砂比，随时分析压力曲线的变化，判断风险点并立即整改，依靠数据的异常变化提早消除施工隐患，风险预警准确率达到 85% 以上。根据煤层容易坍塌、容易造成污染的特点，加强风险预测及应急处置能力，并壁坍塌预警阈值为 0.2% 应变，储层伤害率控制在 12% 以下，保证暂堵转向压裂施工安全高效地进行，减少储层和

井筒二次伤害,保证井筒完整性和储层改造的长期效果^[5]。

4.4 效果评价与后期管护

施工完毕后系统评价压裂效果,采用压力拟合、产气量测试、微地震监测等量化工裂缝转向范围、导流能力、储层动用程度,微地震监测裂缝半长 60~120m、裂缝导流能力 $15\sim 35\mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$ 、储层动用程度提高 30%~50%,检验暂堵封堵和造缝效果是否满足设计要求。对施工前后产气剖面、压力恢复数据进行对比分析,施工后表皮系数从 $-2.5\sim-1.5$ 变为 $-4.0\sim-3.0$,压力恢复系数提高 40%~60%,评价复杂裂缝系统形成效果,评判暂堵剂降解率 $\geq 92\%$ 和储层污染恢复程度,给同类型井施工改进提供实际参照。创建施工效果档案,把参数匹配度,封堵成功次数以及产能提升的幅度分类保存,封堵成功率达到 90%以上,单井日产气量提高 2 到 5 倍,形成可复制、可推广的施工经验库,不断丰富工艺适配标准。后期持续开展动态监测产能,把握产气变化及压力衰减规律,日产气波动大于 15%、压力衰减速率大于 0.2MPa/d 时,立刻施行稳产办法。根据煤层特点来优化管护制度,生产压差控制在 $0.8\sim 2.5\text{MPa}$ 、排采速度控制在 $0.5\sim 1.5\text{m}^3/\text{d}$,防止过快排采造成裂缝失稳、煤粉运移堵塞。根据效果评价制订长效维护计划,及时进行补压、解堵等辅助处理,6 个月检测一次导流能力,低于 $10\mu\text{m}^2\cdot\text{cm}$ 立即解堵,保证裂缝导流能力及储层渗流通道畅通,使压裂寿命延长到 3~5 年,达到煤层气井长

久稳定产气和储层高效利用的目的。

5 结语

暂堵转向压裂技术很好地解决了煤储层非均质性以及常规压裂改造效果不均的问题,通过对裂缝拓展方向进行精确调控来创建复杂的缝网结构,进而大幅度提高煤层气井的产量和资源采收率。对于多层薄煤层及低渗透储层有较好推广应用的前景。未来要不断改善材料性能和施工工艺,依靠智能化技术提高作业效率,给我国煤层气产业高质量发展提供有力的技术支持。

参考文献:

- [1] 邵显华. 煤层气井低产原因分析及增产改进措施研究[J]. 内蒙古石油化工, 2024, 50(08): 5-8+23.
 - [2] 尹中山. 基于暂堵转向压裂的煤层气井增产技术及运用[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(S2): 761-766.
 - [3] 姜维, 吴恒, 王惠. 新疆准南地区煤层气井低产原因与增产措施研究[J]. 中国煤层气, 2023, 20(03): 9-12.
 - [4] 袁延耿, 刘明仁, 李文强等. 煤层气井注氮驱替增产改造技术[J]. 中国煤层气, 2021, 18(02): 26-29.
 - [5] 王镜惠, 梅明华, 刘娟等. 煤层气井酸化压裂增产机理及施工程序优化[J]. 当代化工, 2020, 49(09): 1892-1895.
- 作者简介: 于永坤(1992.03-), 女, 满族, 辽宁锦州, 本科, 中级工程师, 研究方向: 油气田开发、钻完井工程方向。