

储层保护技术在煤层气开采过程中的应用探讨

许晓晨¹，张亚楠¹，毕光辉¹，张 撰²

(1. 山西兰花煤层气有限公司，山西 晋城 048000;

2. 山西贝捷思能源技术开发有限公司，山西 晋城 048000)

摘 要 煤层气储层具有割理发育、压力敏感性强的特征，在钻井、压裂、排采等开发环节中，极易发生水锁、应力敏感、速敏等储层损害，进而导致储层渗透率显著下降。本文从开发全流程视角出发，系统探讨建井、压裂、排采三个核心阶段的储层保护技术：建井阶段重点聚焦低伤害钻井液体体系的研发与适配性完井方式的优选；压裂阶段围绕低伤害压裂液配方优化、支撑剂选型及施工工艺参数调控展开分析；排采阶段则强调缓慢降压制度、连续稳定排采模式及煤粉综合治理技术的应用。研究表明，对储层实施全生命周期的系统管控，是实现煤层气储层有效保护、保障开发效益的核心关键。

关键词 煤层气；储层保护；水锁效应；割理；全过程保护

中图分类号：TE258+.2

文献标志码：A

DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.23.037

0 引言

煤层气作为一种重要的非常规天然气资源，在我国能源结构中的地位日益凸显。与常规天然气藏不同，煤层气以吸附态赋存于煤岩基质孔隙中，其开采过程依赖排水降压实现气体解吸与运移^[1]。这一特殊的生产机理决定了储层渗透率的维持是获得经济产量的核心前提。然而，煤层自身具有割理发育、压力敏感、黏土矿物含量高、力学强度低等特点，使其在钻井、固井、压裂及排采等全生命周期工程作业中极易遭受不可逆的损害。水锁效应、应力敏感、固相侵入、速敏等多种损害类型相互叠加，往往导致储层渗透率大幅下降，直接影响单井产量与最终采收率^[2]。长期以来，储层保护工作在煤层气开发中常被分割为钻井、压裂、排采等独立环节分别考虑，缺乏系统性的整体把控。事实上，建井阶段钻井滤液与固相的侵入可能为后续压裂埋下隐患，压裂液的不合理使用又会加重排采阶段的煤粉运移与水锁问题，而排采制度的失当则可能使前期所有保护措施功亏一篑^[3]。因此，建立贯穿建井、压裂、排采全过程的储层保护技术体系，对于提高煤层气开发效益具有重要意义。

1 煤层气储层特性及损害机理

1.1 储层地质特征

煤岩作为一种双重孔隙介质，其基质孔隙尺度极小，通常在纳米级别，是气体吸附的主要空间；而割

理系统则由面割理与端割理构成，形成近乎正交的裂隙网络，是流体渗流的唯一通道。这套割理系统极为狭窄且形态曲折，开度往往在微米级别，对任何外部应力与固相侵入都异常敏感。从矿物组成来看，煤层中普遍含有高岭石、蒙脱石、伊利石等黏土矿物，其中蒙脱石的水化膨胀能力突出，一旦与外来流体接触，极易导致裂隙空间缩小甚至堵塞。此外，中国大部分煤层气藏属于低压、低饱和储层，原始压力系数多在 0.8 以下，储层自身能量严重不足，意味着任何工程作业造成的压力波动或流体侵入，都可能在缺乏足够驱替动力的情况下形成永久性伤害。煤体的力学强度同样不容乐观，杨氏模量低、泊松比高，使得煤层在应力变化条件下极易发生塑性变形，进一步加剧了渗流通道的收缩风险。

1.2 主要损害类型与机理

水锁效应是煤层气储层损害中最普遍且最难彻底消除的一类。由于割理尺度小、毛细管压力高，外来压裂液或钻井滤液进入裂隙系统后，会在孔喉处形成弯液面，产生巨大的毛细管阻力。这种阻力不仅阻碍气体解吸后向井筒运移，还会在井筒附近形成一个高含水饱和度的“水锁圈”，使气相相对渗透率大幅下降。应力敏感损害同样不容忽视。煤层割理在有效应力增加时会发生显著闭合，且这种闭合往往呈现不可逆特征。排采过程中过快降压或间歇性停采，都会造成有效应力反复波动，导致割理壁面错动、充填物脱落，

作者简介：许晓晨（1990-），男，本科，工程师，研究方向：煤层气开采。

渗透率出现断崖式下降。固相侵入主要发生在钻井与压裂阶段, 钻井液中的加重剂、岩屑颗粒或压裂液中的未破胶残渣, 尺寸与割理开度相当, 一旦进入裂隙便难以返排, 形成物理堵塞。敏感性损害方面, 水敏性体现为黏土矿物遇水膨胀, 缩小甚至封堵渗流通道; 速敏性则表现为流体流速过高时, 附着的煤粉或松散颗粒发生运移, 在裂隙喉部堆积形成桥堵。贾敏效应同样常见, 气泡在通过狭窄孔喉时因界面变形产生附加阻力, 多个气泡叠加后会造成显著的渗流阻碍。这些损害类型在工程作业中往往相互叠加, 最终表现为储层渗透率的综合下降。

2 建井过程中的储层保护技术

2.1 低伤害钻井液体系与工艺

建井阶段钻井液与储层的直接接触, 使得体系选择成为储层保护的第一道关口。针对煤层割理发育、水敏性强的特点, 现场逐步形成了以无固相、低滤失、强抑制为核心的钻井液体系。清水钻井液因其固相含量低、成本可控, 在结构完整、压力系数适中的煤层中应用较广, 但需配合聚合物增黏以控制滤失量。对于水敏性突出的区块, 甲酸盐钻井液体系表现出明显优势, 其抑制性强且固相含量可降至极低水平, 滤液与储层配伍性良好。泡沫钻井液则适用于低压、易漏失的煤层, 通过降低液柱压力实现欠平衡钻进, 从根本上减少滤液向割理系统的侵入深度。工艺控制方面, 严格控制钻井液密度是核心, 通常将密度设计在安全窗口下限, 避免过大的正压差驱动固相颗粒进入裂隙。同时采用屏蔽暂堵技术, 利用与割理开度匹配的暂堵粒子在井壁快速形成致密滤饼, 既维持井壁稳定又限制滤液侵入, 完井后通过破胶或返排解除堵塞。

2.2 固井质量优化

固井作业对储层的影响常被低估, 但水泥浆失水、收缩以及顶替不彻底带来的环空窜流, 往往成为后期压裂与排采中难以弥补的隐患。固井质量优化的核心在于降低水泥浆对储层的伤害并保证界面胶结的完整性。低密度水泥浆体系通过添加漂珠或微硅实现密度控制在 1.50 g/cm^3 至 1.70 g/cm^3 之间, 有效降低液柱压力, 减少水泥浆向煤层裂隙的滤失。韧性水泥浆的引入则解决了煤层与水泥石弹性模量差异过大的问题, 在后期压裂及排采的压力波动中, 水泥环能够与套管和地层保持协调变形, 避免微环隙的产生。顶替效率的提升同样关键, 通过合理设计套管居中度与注替排量, 确保钻井液被有效驱替, 避免在井壁与水泥环之间形成滞留带。固井前的井眼清洁与前置液冲洗也不

容忽视, 彻底清除井壁滤饼有助于水泥浆与煤层形成良好胶结, 从根源上阻断后期流体窜流的通道。

2.3 完井方式选择

对于煤体结构完整、割理发育且地层稳定的区块, 裸眼完井能够最大限度保留原始渗流通道, 避免射孔弹冲击对井周储层的压实损害, 同时为后期压裂提供更大的改造空间。但裸眼完井对井壁稳定性要求苛刻, 一旦煤层疏松或割理密集, 井壁垮塌风险显著增加。套管射孔完井适用性最广, 其关键在于射孔参数的优化。采用深穿透、大孔径射弹并严格控制射孔相位角, 可以在穿透井壁污染带的同时尽量减少对煤层结构的冲击破坏。对于煤体破碎、构造煤发育的煤层, 筛管完井成为有效手段。筛管在井筒内形成机械支撑, 既防止煤粉大量涌入井筒堵塞流道, 又避免了固井水泥浆对破碎煤体的进一步伤害。实际应用中常根据测井解释的煤体结构特征进行分段差异化设计, 在稳定段采用裸眼或射孔完井以获得更好的导流能力, 在破碎段下入筛管控制出煤粉风险^[4-5]。

3 压裂增产中的储层保护技术

3.1 低伤害压裂液体系

压裂液作为造缝与携砂的载体, 其与储层的配伍性直接决定了改造效果的下限。活性水压裂液是目前应用最广泛的体系, 其主体为清水加入少量降阻剂与助排剂, 成本可控且对储层的化学伤害较小, 但由于缺乏有效的防膨与降表面张力设计, 在强水敏储层中仍存在黏土膨胀与水锁风险。针对这一问题, 清洁压裂液以其无残渣、对割理无固相堵塞的优势在部分区块得到应用, 其依靠黏弹性表面活性剂形成可逆网状结构, 遇烃类或地层水自动破胶, 返排彻底, 但对温度敏感且携砂能力相对有限。低聚物压裂液则兼顾了携砂性能与残渣控制, 通过合成聚合物与高效破胶剂配合, 将不溶残渣含量控制在较低水平, 减少对裂隙导流能力的损害。添加剂配方上, 黏土稳定剂的选择需与煤层黏土矿物类型匹配, 阳离子型与暂堵型复配效果更佳; 表面活性剂的加入则通过降低界面张力缓解毛细管效应, 为压后快速返排创造条件。

3.2 支撑剂的优选与铺置

煤层割理开度小且煤岩质软, 支撑剂的优选需要同时考虑导流能力与嵌入控制两个维度。石英砂因其成本优势仍是主力支撑剂, 但对粒径分布有较高要求, 70/140目与40/70目的组合使用能够在造缝初期形成有效支撑, 避免细砂过早嵌入煤壁。在闭合压力较高的深部煤层或压裂规模较大的井次中, 覆膜砂或低密

度陶粒的应用逐渐增加,其圆球度高、抗压能力强,能够有效缓解支撑剂嵌入煤层后导流能力快速衰减的问题。铺置工艺方面,段塞式加砂通过交替泵入高砂比与低砂比段塞,在裂隙内形成非均匀支撑模式,既保证主缝的导流能力,又减少支撑剂在裂缝近井带的过度堆积。连续铺置则更注重铺砂浓度的均匀性,结合前置液造缝与携砂液连续注入,使支撑剂在裂缝延伸方向实现有效铺置,避免局部支撑空白区域在应力作用下闭合后形成流动瓶颈。

3.3 压裂工艺参数优化

施工排量的设定直接影响裂缝延伸形态与滤失程度,排量过低难以形成足够长度的有效裂缝,排量过高则可能压穿隔层或加剧压裂液向割理系统的滤失,实际设计中多采用 $4\text{ m}^3/\text{min}$ 至 $8\text{ m}^3/\text{min}$ 的阶梯式排量,根据压力响应动态调整。前置液比例是控制裂缝发育与液体效率的核心参数,煤层滤失系数普遍偏高,前置液比例通常控制在 30% 至 40% 之间,既保证足够裂缝长度又避免过多液体进入储层增加返排负担。砂比的设计则关系到裂缝导流能力的最终实现,采用逐步提砂比的模式能够有效降低砂堵风险,在裂缝延伸稳定后逐步将砂比提升至 15% 至 20%。大规模、小粒径、适度砂比的理念在煤层气压裂中逐渐形成共识,其本质是在满足裂缝导流需求的前提下,尽可能减少压裂液总量与支撑剂用量,从源头控制外来物质对储层的综合伤害。

4 排采过程中的动态保护技术

4.1 缓慢降压与连续排采

排采阶段是储层保护工作的最终检验环节,排采制度的合理性直接决定了前期建井与压裂成果能否有效转化为产量。缓慢降压的核心在于控制井底流压下降速率,使储层压力平稳传递至基质孔隙,为吸附气解吸创造充足时间。在实际操作中,见气前将降压速率控制在 0.05 MPa/d 至 0.10 MPa/d 范围内,能够有效避免压力降过快导致割理闭合或水锁加剧。连续排采则强调泵抽作业的稳定性,间歇性停采带来的压力波动会使已经张开的裂隙反复闭合与张开,每一次压力波动都会导致割理壁面的煤粉脱落和充填物重新分布,渗透率出现不可逆的衰减。排采曲线的形态往往能够直观反映制度合理性,稳定下降的动液面与平稳上升的套压是制度得当的标志,而频繁波动或长时间停滞则预示着储层正在遭受反复伤害。见气后的排采控制更需谨慎,产气量上升阶段不宜盲目提产,而应保持液面缓慢下降,使解吸前沿平稳推进,避免近井地带应力集中造成导流能力下降。

4.2 煤粉防治与流速控制

煤粉是煤层气井排采过程中最具挑战性的问题之一,其产生与运移与流体流速密切相关。速敏性评价结果表明,当产水流速超过临界流速时,附着于割理壁面的松散煤粉便会脱落,随流体向井筒运移,在裂隙喉部或射孔孔眼处堆积形成堵塞。流速控制因此成为煤粉防治的首要手段,通过控制泵排量将产水速率维持在地层临界流速以下,能够从源头上减少煤粉的启动与运移。对于已经产出的煤粉,井下防砂工具的选择至关重要,精密筛管与绕丝筛管能够有效拦截较大粒径煤粉,防止其进入泵筒造成卡泵或堵塞流道。排采中后期,煤粉堆积导致的产水产气下降难以完全避免,定期进行洗井作业或下入捞砂工具清理井底积存煤粉,成为恢复产能的必要措施。动态监测同样不可或缺,通过实时跟踪产水含砂量、动液面变化及泵效波动,可以及早发现煤粉异常并调整排采参数,将煤粉伤害控制在可接受范围内。

5 结束语

煤层气储层损害具有复合性,水锁、应力敏感、固相侵入、速敏等多种类型相互叠加,根源在于割理尺度小、黏土矿物含量高、压力系数低及煤岩强度不足。建井阶段采用无固相钻井液、低密度水泥浆及差异化完井方式,可有效减少固相与滤液侵入。压裂阶段需在造缝与保护间平衡,优选压裂液体系、支撑剂及工艺参数,控制外来物质总量。排采阶段实施缓慢降压、连续排采与流速控制,避免应力波动与煤粉堵塞。未来,储层保护技术将向智能化、材料化与一体化方向发展。智能排采系统通过实时数据与算法优化制度,减少人为误伤;新型暂堵与自修复材料可在作业后自主解除堵塞;地质-工程-排采一体化理念将储层保护从被动应对转向主动设计,实现全生命周期精准管控。

参考文献:

- [1] 任美洲.煤层气钻井过程中的储层保护技术研究[J].云南化工,2021,48(03):131-132.
- [2] 王林杰.煤层气钻井过程中的储层伤害及保护技术[J].云南化工,2021,48(02):160-161,164.
- [3] 李奇贤.叠置含气系统煤层气开采储层动态响应及其层间干扰机制研究[D].重庆:重庆大学,2021.
- [4] 李斌.煤层气开采过程中储层损害原因分析及保护措施[J].石化技术,2019,26(02):72-74.
- [5] 刘国卫.煤层气钻井过程中的储层伤害及保护技术研究[J].西部探矿工程,2019,31(06):53-55.