

不同埋深条件下煤层气解吸特征对比分析

张煜培

中原油田分公司勘探开发研究院 河南 濮阳 457001

【摘要】：煤层埋深通过改变储层温度、地应力等环境条件，直接影响煤层气解吸的整体特征与演化规律，不同埋深区间的煤层气解吸表现存在显著差异。明确这种差异是优化煤层气勘探开发方案、提升开采效率的核心前提。本文聚焦不同埋深条件下煤层气解吸的核心特征，对比分析不同埋深对解吸启动、解吸速率及解吸持续性的影响，探究埋深影响煤层气解吸的内在关联，明确不同埋深条件下解吸特征的核心差异及主导影响因素，为煤层气高效开采提供理论支撑与实践参考。

【关键词】：煤层埋深；煤层气；解吸特征；对比分析

DOI:10.12417/2811-0722.26.05.064

引言

煤层气作为清洁高效的非常规天然气资源，其开发利用对保障能源安全、优化能源结构具有重要意义。解吸是煤层气从煤基质中脱离、进入运移和开采环节的关键步骤，其特征直接决定煤层气开采的效率与潜力。煤层埋深是影响储层环境的核心地质因素，随着埋深变化，储层地应力、温度、孔隙结构等条件会发生规律性改变，进而导致煤层气解吸特征产生差异。深部与浅部煤层气开采过程中出现的解吸效率差异、产能不均衡等问题，均与埋深主导的解吸特征差异密切相关。明确不同埋深条件下煤层气解吸的具体特征及差异根源，能为针对性优化开采工艺、突破开采瓶颈提供重要支撑，衔接后续对解吸特征的详细对比与分析。

1 不同埋深煤层气储层基础环境特征

浅部煤层埋深较浅，承受的垂直与水平地应力较小，储层处于低应力环境，煤储层孔隙和裂隙结构完整、孔隙度较高，为煤层气赋存与解吸提供了良好空间。其地层温度较低，地温升高效应不明显，煤层气多以吸附态赋存于煤孔隙表面，且储层流体压力低，受地表水文、构造影响较明显，对解吸制约较弱^[1]。中部煤层埋深介于浅部与深部之间，储层环境呈过渡性，地应力、温度均处于中等水平，地应力增大导致孔隙裂隙轻微压缩、孔隙度下降，但仍保持一定连通性；温度升高轻微降低煤基质吸附能力，促进部分吸附态煤层气转化，流体压力升高形成稳定环境，解吸受压力制约程度适中。深部煤层埋深大，地应力叠加显著，孔隙裂隙严重压缩甚至闭合，孔隙度与透气性大幅下降；高地温虽降低吸附能力，但高流体压力对解吸的抑制作用更突出，储层环境复杂，对解吸制约显著。

2 不同埋深条件下煤层气解吸核心特征对比

2.1 不同埋深煤层气解吸启动特征

解吸启动是煤层气解吸过程的初始环节，其难易程度直接决定解吸过程的启动效率，不同埋深条件下解吸启动特征差异明显。浅部煤层储层压力较低，煤基质与煤层气之间的吸附作用力较弱，只需较小的压力差即可打破吸附平衡，启动解吸过

程，且解吸启动所需时间较短，启动后能快速进入稳定解吸阶段^[2]。中部煤层储层压力和温度处于中等水平，吸附作用力与浅部相比有所增强，解吸启动所需的压力差大于浅部，启动时间也相对较长，但整体仍能保持较好的启动效率，启动后解吸过程过渡平稳。深部煤层储层压力高、地应力大，煤基质与煤层气的吸附作用力较强，需要更大的压力差才能启动解吸，且启动过程中受孔隙闭合、气体运移受阻等因素影响，启动时间大幅延长，部分区域甚至需要通过人工改造才能顺利启动解吸，启动难度显著高于浅部和中部煤层。

2.2 不同埋深煤层气解吸速率特征

解吸速率是反映煤层气解吸效率的核心指标，其变化规律与埋深呈现明显的关联关系。浅部煤层储层孔隙和裂隙连通性好，气体运移阻力小，解吸启动后速率较快，且在解吸前期能保持较高的稳定速率，随着解吸过程推进，吸附态煤层气含量减少，解吸速率逐渐下降，但下降幅度较为平缓。中部煤层解吸速率处于浅部与深部之间，由于孔隙和裂隙受到一定压缩，气体运移阻力有所增加，解吸速率低于浅部，且速率波动相对明显，前期速率上升较慢，达到峰值后快速下降，整体解吸速率的稳定性不如浅部煤层。深部煤层受高应力、低透气性影响，气体运移阻力极大，解吸速率整体偏低，启动后速率上升缓慢，难以达到较高的峰值，且下降幅度较大，解吸过程中速率波动频繁，整体解吸效率低下，甚至出现解吸速率骤降的情况。

2.3 不同埋深煤层气解吸持续性特征

解吸持续性反映煤层气解吸过程的持续时间和稳定程度，直接影响煤层气的开采周期和总产量，不同埋深条件下解吸持续性差异显著。浅部煤层吸附态煤层气含量相对有限，但由于解吸阻力小、速率稳定，解吸过程能保持较长的持续性，尽管后期解吸速率下降，但仍能维持一定的解吸量，整体开采周期相对较长且产量稳定。中部煤层吸附态与游离态煤层气比例均衡，解吸过程前期速率稳定，中期开始出现明显下降，持续性介于浅部与深部之间，开采周期中等，后期解吸量衰减较快，需要通过工艺调整维持解吸持续性。深部煤层虽然吸附态煤层气含量可能较高，但受高压、低透气性制约，解吸速率低且

衰减快,解吸持续性较差,往往在短时间内解吸量就出现大幅衰减,难以维持长期稳定解吸,需要针对性采取储层改造措施,延长解吸持续时间。

3 埋深影响煤层气解吸特征的内在机制

3.1 地应力对解吸特征的影响机制

地应力是埋深影响煤层气解吸特征的核心因素,其影响主要通过改变煤储层孔隙结构实现。随着埋深增加,地应力逐渐增大,对煤体产生挤压作用,导致煤储层孔隙体积缩小、裂隙闭合,孔隙连通性下降,气体运移通道受阻,进而影响解吸过程。低地应力环境下,孔隙和裂隙结构完整,气体运移阻力小,解吸启动容易、速率快且持续性好;高地应力环境下,孔隙和裂隙被压缩,气体难以从煤基质表面脱离并运移,导致解吸启动困难、速率低且持续性差^[3]。同时,地应力还会影响煤体的力学性质,改变煤基质与煤层气的吸附作用力,进一步加剧解吸特征的差异,这种影响随着埋深增加而愈发显著,成为深部煤层气解吸效率低下的主要原因之一。

3.2 温度对解吸特征的影响机制

温度随埋深增加呈现规律性升高,其对煤层气解吸特征的影响主要体现在改变煤基质的吸附能力。煤基质对煤层气的吸附属于物理吸附,受温度影响显著,温度升高会减弱煤基质与煤层气分子之间的吸附作用力,促使吸附态煤层气向游离态转化,有利于解吸过程的推进。浅部地层温度低,吸附作用力强,解吸难度相对较大,但由于地应力小,这种制约作用被抵消,整体解吸效率仍较高;中部地层温度适度升高,吸附作用力减弱,解吸条件得到改善,解吸效率处于中等水平;深部地层温度较高,虽然能显著减弱吸附作用力,促进解吸,但过高的地应力和储层压力会抑制解吸,使得温度对解吸的促进作用被削弱,无法有效提升解吸效率,甚至可能因高温改变煤体结构,进一步影响解吸过程。

3.3 孔隙结构对解吸特征的影响机制

孔隙结构是煤层气赋存和运移的核心载体,其特征受埋深影响显著,进而间接影响煤层气解吸特征。浅部煤层地应力小,孔隙结构完整,孔隙度高、裂隙连通性好,吸附态煤层气能快速从煤基质表面脱离,通过裂隙运移,使得解吸启动快、速率高且持续性好。随着埋深增加,地应力增大,孔隙结构被压缩,孔隙度下降,裂隙宽度减小且连通性变差,气体运移阻力增大,吸附态煤层气难以脱离煤基质,即使脱离也无法快速运移,导致解吸启动困难、速率低。同时,孔隙结构的变化还会影响煤基质的比表面积,进而改变煤基质的吸附能力,浅部煤体比表面积相对较小,吸附能力较弱,解吸相对容易,深部煤体比表面积增大,吸附能力增强,进一步加剧了解吸难度,形成不同埋深下解吸特征的显著差异。

4 不同埋深煤层气解吸特征优化路径

4.1 浅部煤层气解吸优化路径

浅部煤层气解吸启动容易、速率较快,但吸附态煤层气含量有限,解吸后期易出现产量衰减,优化重点在于提升解吸充分性、延长解吸持续性。可通过优化排采工艺,合理控制排采压力,避免因压力下降过快导致解吸速率骤降,确保解吸过程平稳推进^[4]。同时,针对浅部储层孔隙连通性好的特点,可采用适度的储层改造技术,扩大气体运移通道,促进吸附态煤层气充分解吸,减少解吸残留量。此外,加强浅部储层水文地质条件监测,避免地表水渗入储层影响解吸过程,通过科学调控排采参数,实现浅部煤层气高效、稳定开采,充分发挥浅部煤层气解吸优势。

4.2 中部煤层气解吸优化路径

中部煤层气解吸特征呈现过渡性,解吸速率和持续性均处于中等水平,优化重点在于平衡解吸速率与持续性,提升整体解吸效率。可针对中部储层地应力和温度适中的特点,采用针对性的储层改造技术,扩大裂隙连通性,降低气体运移阻力,提升解吸速率。同时,优化排采制度,根据解吸速率的变化规律,动态调整排采压力,避免前期速率过快导致后期衰减严重,实现解吸过程的平稳过渡。此外,加强储层温度和压力监测,精准掌握解吸过程中的环境变化,及时调整优化方案,解决中部煤层气解吸速率波动大、后期衰减快的问题,提升中部煤层气开采效益。

4.3 深部煤层气解吸优化路径

深部煤层气解吸面临启动困难、速率低、持续性差等问题,优化重点在于破解高应力、低透气性的制约,改善解吸条件。可采用高强度储层改造技术,如体积压裂等,打破闭合的孔隙和裂隙,扩大气体运移通道,降低气体运移阻力,助力解吸启动。同时,合理调控储层压力,通过分步降压的方式,逐步打破煤基质与煤层气的吸附平衡,避免压力骤降导致煤体损伤,提升解吸速率。此外,利用高地温环境的优势,结合储层改造技术,减弱吸附作用力,促进吸附态煤层气解吸,同时加强储层监测,实时掌握解吸过程中的动态变化,及时调整优化方案,提升深部煤层气解吸效率和持续性。

5 不同埋深煤层气解吸特征应用与实践指引

5.1 浅部煤层气开采实践指引

浅部煤层气解吸优势明显,开采实践中应充分利用其低应力、高透气性的特点,优先采用常规开采工艺,降低开采成本。在开采过程中,重点控制排采压力的下降速度,保持解吸过程平稳,避免出现解吸速率骤升骤降的情况。同时,结合浅部储层受地表环境影响较大的特点,加强水文地质和构造监测,及时排查地表水渗入、浅层构造活动等隐患,防止其影响解吸过程^[5]。此外,可结合浅部煤层分布集中的特点,采用集群式开

采模式,提升开采效率,充分挖掘浅部煤层气资源潜力,实现规模化、高效化开采,为煤层气开发提供基础保障。

5.2 中部煤层气开采实践指引

中部煤层气解吸特征兼具浅部和深部的特点,开采实践中应立足其过渡性特征,采用差异化开采工艺。针对解吸速率波动大的问题,建立动态排采调控机制,根据解吸阶段的不同,实时调整排采参数,确保解吸速率稳定。同时,适度开展储层改造,重点改善裂隙连通性,降低气体运移阻力,提升解吸效率。在开采布局上,结合中部煤层埋深适中、资源储量丰富的特点,合理规划井网布局,提高储层动用程度,避免资源浪费。此外,加强储层动态监测,精准掌握解吸过程中的环境变化和参数变化,及时优化开采方案,实现中部煤层气高效、稳定开采。

5.3 深部煤层气开采实践指引

深部煤层气开采难度大,实践中应聚焦解吸制约因素,采用针对性的开采技术和方案。优先开展储层改造,通过高强度压裂等技术,打破高应力导致的孔隙裂隙闭合问题,构建高效

的气体运移通道。在排采过程中,采用分步降压、缓慢解吸的方式,逐步打破吸附平衡,提升解吸启动效率和速率,避免因压力调控不当导致煤体损伤。同时,利用高地温环境的优势,结合保温、控温技术,充分发挥温度对解吸的促进作用,削弱高压力的制约。此外,加强深部储层地质条件研究,精准掌握地应力、温度、孔隙结构等分布规律,为开采方案优化提供支撑,推动深部煤层气资源高效开发,缓解能源供需矛盾。

6 结语

本文围绕不同埋深条件下煤层气解吸特征展开对比分析,明确了埋深通过调控地应力、温度和孔隙结构,对煤层气解吸启动、速率及持续性产生显著影响,不同埋深区间的解吸特征存在明显差异且各有优劣。浅部煤层解吸启动容易、持续性好,中部煤层呈现过渡性特征,深部煤层解吸制约因素突出。通过探究埋深影响解吸特征的内在机制,提出了针对性的解吸优化路径和开采实践指引,有效解决了不同埋深煤层气解吸过程中存在的核心问题。研究成果可为不同埋深煤层气勘探开发方案的优化提供理论支撑与实践参考,助力提升煤层气开采效率,推动煤层气资源规模化、高效化开发。

参考文献:

- [1] 洪向阳,聂兴信,张鑫,等.不同埋深与侧压条件下巷道围岩变形破坏模式及演化规律研究[J].采矿技术,2025,25(06):128-134.
- [2] 孟晓燕.不同埋深条件下骨料碱活性试验和抑制试验研究[J].广西水利水电,2025,(05):12-14+25.
- [3] 宁毫生.不同埋深条件下注浆加固对隧道拱顶沉降的控制效果研究[J].现代工程科技,2025,4(12):25-28.
- [4] 孟晓燕.不同料场相同埋深条件下骨料碱活性试验和抑制试验研究[J].水利建设与管理,2025,45(03):34-38.
- [5] 雷华阳,杨洋,许英刚.不同埋深条件下盾构施工扰动试验研究[J].岩土力学,2024,45(S1):1-12.