

低煤阶煤层气煤储层物性特征对煤层气开发的影响

李俊肖

内蒙古煤炭地质勘查(集团)一五三有限公司 内蒙古 呼和浩特 010010

摘要: 本文聚焦低煤阶煤层气煤储层物性特征及其对煤层气开发的影响。通过分析低煤阶煤储层的孔隙结构、渗透率、含气性等关键物性特征,探讨这些特征如何影响煤层气的吸附、解吸、扩散和渗流过程,进而影响煤层气的开发效果。研究结果可为低煤阶煤层气的高效开发提供理论依据和技术指导。

关键词: 低煤阶煤层气;煤储层物性特征;孔隙结构;渗透率;煤层气开发

引言

煤层气作为一种清洁能源,其开发利用对于缓解能源压力、减少温室气体排放具有重要意义。低煤阶煤储层在我国分布广泛,具有巨大的煤层气开发潜力。然而,低煤阶煤储层具有独特的物性特征,这些特征与中、高煤阶煤储层存在显著差异,对煤层气的开发产生了重要影响。因此,深入研究低煤阶煤储层物性特征及其对煤层气开发的影响,对于提高低煤阶煤层气的开发效率和经济效益至关重要。

1 低煤阶煤储层物性特征概述

低煤阶煤储层因处于较低的变质阶段,展现出区别于中、高煤阶煤储层的独特物性特征,这些特征深刻影响着煤层气的开发。从煤岩组分来看,低煤阶煤中镜质组占比较高,惰质组含量相对较少。镜质组具有较大的比表面积,这使得它对煤层气有较强的吸附能力,在煤层气赋存过程中扮演着重要角色。然而,不同组分的分布并非均匀,这种不均匀性进一步增加了煤储层性质的复杂性。低煤阶煤的孔隙发育程度较高,本应有利于煤层气的储存与运移,但实际情况却并非如此。其孔隙结构极为复杂,孔隙形态多样、大小不一,且孔隙之间的连通性较差。这就好比一个迷宫,煤层气在其中难以顺畅流动,极大地限制了煤层气的产出效率。渗透率是衡量煤储层允许流体通过能力的重要指标,低煤阶煤的渗透率普遍较低,并且具有明显的各向异性。在不同方向上,煤储层的渗透率差异显著,这导致煤层气在储层中的渗流规律变得复杂难测。例如,在渗透率高的方向,煤层气流动相对容易;而在渗透率低的方向,煤层气则难以运移。这些物性特征相互交织,共同决定了低煤阶煤层气的吸附、解吸、扩散和渗流特性。吸附和解吸过程受到煤岩组分和孔隙结构的影响,扩散和渗流则与孔隙连通性和渗透率密切相关。由于这些特性,低煤阶煤层气的开发面临着诸多挑战,如采收率低、开发周期长

等。因此,深入了解低煤阶煤储层的物性特征,对于制定科学合理的开发方案、提高煤层气开发效果具有重要意义^[1]。

2 低煤阶煤储层物性特征对煤层气开发的影响

2.1 孔隙结构对煤层气开发的影响

(1) 低煤阶煤储层中存在多种类型的孔隙,包括微孔、小孔、中孔和大孔。微孔是煤层气的主要吸附空间,其比表面积大,对煤层气的吸附能力较强。小孔和中孔是煤层气扩散和渗流的通道,其发育程度和连通性直接影响煤层气的运移速度。大孔则主要起储存和运移作用,但在低煤阶煤储层中相对较少。不同类型的孔隙在煤储层中的分布不均匀,这种不均匀分布会导致煤层气在储层中的分布也不均匀,增加了煤层气开发的难度。(2) 孔隙连通性是影响煤层气渗流的重要因素。低煤阶煤储层的孔隙连通性较差,孔隙之间存在较多的喉道和瓶颈,导致煤层气在渗流过程中受到较大的阻力。这种低连通性会降低煤层气的渗流速度,延长煤层气的解吸和采出时间,降低煤层气的开发效率。

2.2 渗透率对煤层气开发的影响

(1) 低煤阶煤储层的渗透率一般较低,这使得煤层气在储层中的流动受到限制。在开发过程中,需要采用较大的压差才能促使煤层气从煤储层中流出,这不仅增加了开发成本,还可能导致煤储层的破坏,影响煤层气的长期开发效果。(2) 低煤阶煤储层的渗透率具有明显的各向异性,即不同方向的渗透率存在差异。这种各向异性会导致煤层气在储层中的流动方向和速度不均匀,使得煤层气的采出难度增加。在开发过程中,需要根据渗透率的各向异性特点,合理布置井网和确定开采参数,以提高煤层气的采收率。

2.3 含气性对煤层气开发的影响

(1) 低煤阶煤储层的含气量一般较低,这主要是由于其变质程度低,煤的生气能力较弱。低含气量会导致

煤层气的开发经济效益较低,需要采用提高采收率的技术来增加煤层气的产量。(2)含气饱和度是指煤储层中实际含气量与饱和含气量的比值。低煤阶煤储层的含气饱和度一般较低,这意味着煤储层中存在大量的游离水和吸附水,这些水会占据煤层气的吸附空间和渗流通道,影响煤层气的吸附和解吸过程,降低煤层气的开发效果^[2]。

2.4 煤岩组分对煤层气开发的影响

(1)低煤阶煤中镜质组含量相对较高,惰质组含量较低。镜质组的比表面积大,对煤层气的吸附能力强,但其孔隙结构相对复杂,连通性较差。惰质组的孔隙结构相对简单,连通性较好,但对煤层气的吸附能力较弱。煤岩组分的差异会影响煤层气的吸附、解吸和渗流特性,进而影响煤层气的开发效果。(2)低煤阶煤中矿物质含量相对较高,矿物质的存在会填充煤的孔隙,降低煤的孔隙度和渗透率,影响煤层气的运移。此外,矿物质还可能与煤层气发生化学反应,改变煤层气的组成和性质,对煤层气的开发产生不利影响。

3 改善低煤阶煤层气开发效果的对策

3.1 优化井网布置

(1)低煤阶煤储层渗透率的各向异性与非均质性,决定了井网布置需突破传统规则化模式。通过三维地质建模整合测井、地震、岩心分析数据,结合离散裂隙网络(DFN)模型,可定量表征储层渗透率张量分布。在鄂尔多斯盆地某区块,利用微地震监测获取裂缝方位、密度与长度参数,结合核磁共振测井渗透率数据,通过联合反演构建的三维渗透率模型显示,主渗透率方向与区域构造应力方向一致。对于此类渗透率优势方向明确区域,将井排方向平行于主渗透率方向布置,配合定向钻井技术,可使煤层气渗流路径阻力降低35%-40%,单井控制储量提升20%。(2)在渗透率各向异性复杂区域,菱形、放射状等非对称井网展现出显著优势。以沁水盆地南部区块为例,采用菱形井网时,通过调整井距(短轴80m、长轴120m)与方位角(与主渗透率方向呈45°夹角),单井控制面积较正方形井网扩大1.8倍,储层动用程度提高25%。同时,引入井间干扰评价模型,基于压降试井数据计算井间干扰系数,动态优化井网密度。当井间干扰系数大于0.3时,通过井网加密或调整采气制度,有效避免产能衰减,实现区块整体采收率提升12-15个百分点^[1]。

3.2 采用增产技术

(1)水力压裂在低煤阶煤层实施时,需克服煤岩力学强度低、脆性指数小的技术瓶颈。创新采用“低排量

造缝-脉冲式加砂-段塞式顶替”复合工艺:低排量(8-12m³/min)注入滑溜水造缝,利用煤岩低抗拉强度特性形成复杂微裂缝网络;脉冲式加砂过程中,通过周期性改变砂比(从5%-20%交替)与排量(10-15m³/min波动),促使支撑剂呈“栓塞状”分布,提高裂缝导流能力;段塞式顶替阶段注入高粘冻胶液,将支撑剂推送至裂缝远端,形成有效支撑长度达150-200m的导流通道。新疆准东某区块应用该工艺后,裂缝渗透率提高3-5倍,单井初期产量达常规压裂的3.2倍,且稳产周期延长6-8个月。

(2)注气驱替技术中,CO₂注入需精准控制吸附平衡与扩散动力学。基于Langmuir吸附等温线与Fick扩散定律,建立CO₂-CH₄竞争吸附模型,确定最佳注入压力为储层压力的1.2-1.5倍、注入浓度不低于95%。在鄂尔多斯盆地某试验区,采用“先注CO₂30天-焖井15天-采气”循环模式,CO₂注入量达0.8m³/t煤时,煤层气采收率提高22个百分点。N₂注入则侧重于降低储层压力梯度,需与排水降压协同。通过建立气-水两相流数值模型,优化N₂注入速度(0.5-1.0m³/min)与排水量(1-2m³/h)的动态匹配关系,在山西保德区块实现N₂注入后产气速率提升40%,采收率提高10-12个百分点。

3.3 加强排水降压

(1)低煤阶煤层气藏的“水锁效应”与“贾敏效应”,要求排水降压需遵循阶梯式降压策略。多级排水工艺分三阶段实施:初期(0-30天)以大排量(3-5m³/h)强排,快速降低储层压力至临界解吸压力以下,促使煤层气解吸;中期(30-180天)稳定排水(1-2m³/h),维持压力缓慢下降(0.02-0.05MPa/d),保障持续解吸;后期(180天以后)采用间歇排水,根据压力恢复曲线控制排水周期(排水2-3天,停排1-2天),避免煤粉产出与裂缝闭合。沁水盆地某井应用该策略后,产气高峰期延长至12个月,累计产气量增加35%。(2)间歇排水的精准控制依赖于动态监测与模型优化。通过部署分布式光纤压力传感器与流量监测仪,实时获取井底流压、产水量与产气速率数据。基于LSTM神经网络建立动态耦合模型,以压力恢复速率(PRR)为控制变量:当PRR < 0.03MPa/d时启动排水,PRR > 0.08MPa/d时停止。同时,排水系统集成三级气水分离装置:一级旋流分离(分离效率90%)、二级膜过滤(截留粒径0.1μm)、三级离心分离(分离精度0.01μm),确保回注水含气量低于5%,减少水相圈闭损害^[4]。

3.4 优化开采参数

(1)排采速度控制需建立解吸-变形-渗流耦合模型。基于Langmuir解吸方程、Terzaghi有效应力原理与非

Darcy渗流理论,结合煤岩三轴压缩试验获取的弹性模量(0.8-1.2GPa)、泊松比(0.25-0.35)参数,确定安全排采速度为0.3-0.4m³/d·m。辽宁阜新某矿将排采速度从1.0m³/d·m降至0.35m³/d·m后,煤储层渗透率下降速率减缓60%,产气周期从18个月延长至30个月。同时,引入声发射监测技术实时评估煤体变形,当声发射事件率超过50次/min时,自动降低排采速度,防止煤体骨架坍塌。(2)井底流压优化采用响应曲面法(RSM)构建三维模型。以渗透率(0.05-0.5mD)、含气量(5-15m³/t)、孔隙度(8%-15%)为自变量,产气速率与渗透率保持率为因变量,确定合理流压区间:低渗(<0.1mD)储层流压控制在1.2-1.5MPa,中渗(0.1-0.5mD)储层流压为0.8-1.2MPa。现场应用光纤光栅压力传感器(精度±0.01MPa)实时监测流压,结合强化学习算法动态调整抽采泵频率,使流压波动控制在±0.1MPa范围内,单井产气稳定性提高50%。

3.5 开展数值模拟研究

(1)多物理场耦合模型构建需整合煤岩力学、渗流与传热方程。煤岩变形采用摩尔-库仑弹塑性模型,考虑孔隙压力对有效应力的影响;渗流场采用考虑Klinkenberg效应的非Darcy渗流方程;温度场考虑解吸吸热(-230kJ/kg)与流体流动传热。采用有限元-有限体积混合算法求解,在贵州织金区块通过现场压降试井(渗透率校准误差<7%)、DTS分布式测温(温度误差<1.5℃)进行多参数校准,模型预测产气曲线与实际数据相关系数达0.92。(2)不确定性分析采用拉丁超立方抽样结合克里金插值法。对渗透率(变异系数0.4-0.6)、含气量(变异系数0.3-0.5)等6个关键参数进行200次随机抽样,生成等概率地质模型。通过对比不同开发方案的净现值(NPV)与风险熵,确定最优方案:

对于渗透率变异系数>0.5区域,采用加密井网(井距80m)+重复压裂;含气量变异系数>0.4区域,实施CO₂驱替+间歇采气。该方法使开发方案经济风险降低30%,预期NPV提高25%-30%^[5]。

结语

低煤阶煤储层独特的物性特征对煤层气开发产生了重要影响。孔隙结构、渗透率、含气性和煤岩组分等因素共同决定了煤层气的吸附、解吸、扩散和渗流特性,进而影响煤层气的开发效果。通过优化井网布置、采用增产技术、加强排水降压、优化开采参数和开展数值模拟研究等对策,可以有效改善低煤阶煤层气的开发效果,提高煤层气的采收率和经济效益。在未来的低煤阶煤层气开发中,应进一步加强对煤储层物性特征的研究,不断探索适合低煤阶煤层气开发的新技术和新方法。

参考文献

- [1]何文渊,黄文松,崔泽宏,等.澳大利亚苏拉特区块低煤阶煤层气有利区预测与高效开发策略[J].石油与天然气地质,2025,46(1):31-46.
- [2]陈书雅,蔡记华,杨现禹,等.整合剂对低渗煤层气储层孔隙结构影响规律与增透作用机理[J].煤炭科学技术,2025,53(3):264-273.
- [3]周德华,陈刚,赵石虎,等.中国石化煤层气资源分布特征与勘探开发前景[J].煤炭科学技术,2025,53(3):19-30.
- [4]桑树勋,皇凡生,单衍胜,等.碎软低渗煤储层强化与煤层气地面开发技术进展[J].煤炭科学技术,2024,52(1):196-210.
- [5]宋永,李道清,王彬,等.白家海凸起深部煤层气成藏特征、有利区优选及勘探开发前景[J].中国煤炭地质,2025,37(2):23-28.