

煤层气储层地质勘查方法探讨

倪月琴

宁夏回族自治区煤炭地质局 宁夏银川 750001

摘要: 煤层气储层地质特性分析是勘查的基础, 本文从岩石学特征、孔隙结构类型、吸附特性等地质特征, 深入剖析了构造、沉积、水文及地应力等主控地质因素对煤层气富集的影响。在此基础上, 构建了集基础地质调查、地球物理勘探、钻探取样与实验测试于一体的“地质-地球物理-钻探”综合勘查方法体系, 并详细论证了该体系在储层参数精准获取与“甜点区”综合评价中的应用。研究旨在为煤层气的高效勘探与开发提供一套系统、可靠的理论方法支撑。

关键词: 煤层气储层; 地质勘查方法; 储层评价

引言

煤层气作为一种清洁能源, 开发利用前景广阔。储层地质勘查是开发的关键前期工作, 其准确性直接影响开发效果。当前, 煤层气储层地质条件复杂, 不同地区差异大, 单一勘查方法难以满足需求。深入研究煤层气储层地质特征及主控因素, 构建科学合理的勘查技术方法体系, 对提高勘查精度、推动煤层气高效开发具有重要意义。

一、煤层气储层地质特征与控气因素

(一) 煤层气储层基本特征

1. 煤的岩石学与物理化学特征

煤是一种由有机质和矿物质组成的复杂多孔固体。其岩石学组成通过显微组分(镜质组、惰质组、壳质组)来表征。其中, 镜质组是生气能力和吸附能力最强的组分, 其含量直接影响煤的含气性^[1]。煤的物理化学特征核心是煤阶, 它反映了煤化作用的程度, 从低到高分褐煤、长焰煤、气煤、肥煤、焦煤、瘦煤、贫煤到无烟煤。煤阶控制了煤的生气历史、储气能力和力学性质, 通常中煤阶(焦煤、肥煤)阶段是煤层气生成与吸附的“黄金窗口”。

2. 双重孔隙结构特征

煤层具有独特的双重孔隙系统, 这是其最核心的储层特征。基质孔隙是煤体中被煤基质包围的微小孔隙(孔径<100 nm), 提供了巨大的内表面积, 是煤层气吸附存储的主要场所, 其数量决定了煤的储气能力。裂隙系统(割理系统)是煤层中发育的天然裂缝网络, 包括

面割理和端割理。裂隙系统是煤层气在储层内部渗流的主要通道, 其发育程度和连通性直接决定了煤层的渗透率, 是影响煤层气产能的关键。

这种“基质吸附、裂隙渗流”的双重孔隙模型, 决定了煤层气开发必须经历“解吸-扩散-渗流”三个环节, 与常规储层的“渗流”单环节有根本区别。

3. 吸附/解吸特性

煤层气主要以吸附态(约占80%~90%)赋存于基质孔隙表面, 少量以游离态分布于孔隙及裂隙中, 另有部分溶解于地层水。其吸附状态符合兰格缪尔方程, 表明煤层含气量不仅受孔隙度影响, 更取决于煤的兰格缪尔体积与兰格缪尔压力。煤层气产出的核心机制是降压解吸, 即通过排水降低储层压力, 促使吸附气体从基质表面解吸, 进而产出。

(二) 煤层气成藏与主控地质因素

1. 构造地质条件

构造运动对煤层气藏具有“建设性”和“破坏性”双重作用。一方面, 构造演化决定了煤层埋藏史、热史和生气史, 持续稳定沉降或后期适度抬升剥蚀的区域有利于气体保存^[2]。另一方面, 构造样式直接影响储层性能: 在简单构造区(如宽缓褶皱、单斜构造), 地层平缓、应力适中, 利于割理系统发育与保存, 是煤层气富集有利部位; 而在复杂构造区(如断层密集带、紧密褶皱), 强烈构造应力易破坏煤体结构, 形成构造煤, 导致裂隙系统被压实或堵塞, 造成渗透率急剧下降, 同时开放性断层成为气体逸散通道, 致使含气量显著降低。

2. 沉积环境与煤体结构

沉积环境决定了煤层的空间展布（厚度、连续性）和顶底板岩性。三角洲平原和滨海沼泽环境易于形成厚而稳定的煤层。当顶底板为泥岩、粉砂岩等致密岩性时，可形成有效的封盖层，利于气体保存。煤体结构则反映了煤的原始组成与后期改造程度：原生结构煤力学强度高，割理系统发育完整，是优质的储层；而构造煤虽具较高吸附能力，但因渗透性极差，不利于开采。

3. 水文地质条件

水文地质条件是控制煤层气藏封闭性的关键动态因素，主要表现为两种典型模式。水力封堵型煤层处于水文系统的“滞流区”，具有高层水矿化度与正常或偏高的压力系数，这种环境能有效阻止气体向外运移，形成良好的封闭保存条件。相反，水力运移逸散型煤层位于水文系统的“补给区”或“径流区”，活跃的淡水水流不仅稀释地层水矿化度，其动水压力还会驱动溶解气或游离气发生运移，导致气体散失，不利于气藏保存。

4. 地温场与地应力场

地温场通过控制微生物活动及热成因气生成过程，同时直接影响煤层气的吸附/解吸平衡。温度上升虽有利于气体解吸，但会显著降低煤体的吸附容量。现今地应力场，特别是水平主应力的方向与大小，主导着煤层裂隙系统的张开度与有效性——高地应力环境会压缩裂隙空间，导致储层渗透率下降；而地应力方向则直接控制人工压裂裂缝的扩展轨迹，对井网布局与开发效果具有决定性影响。

二、煤层气储层地质勘查技术方法体系

（一）基础地质调查与遥感技术

1. 区域地质填图与构造分析

通过系统的野外露头观测、地层剖面测量及已有地质资料的综合分析，可编制区域地质图、煤层底板等高线图与构造纲要图等关键图件^[3]。这一工作旨在明确含煤地层的时代、层序与展布范围，查明区域构造格架，识别大型褶皱与断层性质，划分构造单元，并恢复构造演化历史，进而初步评价其对煤层气保存条件的有利性与局限性。

2. 遥感（RS）技术在构造解译与地貌分析中的应用

遥感技术凭借其宏观视野与高效特性，为区域构造分析提供了独特的技术支撑。基于卫星遥感影像，通过图像增强、滤波与融合等处理方法，能够快速识别地表线性构造，并推断其向地下的延伸特征；结合地貌与水文标志，还可分析隐伏构造，并监测矿区地表沉降、植

被变化等环境指标，从而间接辅助勘查决策。需要指出的是，遥感技术属于间接推断手段，其解译成果需与地面调查及其他地球物理方法相互验证，方可确保解释结果的可靠性。

（二）地球物理勘查方法

1. 地震勘探技术

地震勘探通过人工激发并接收地下地层界面的反射波信号，构建高精度地下构造图像。其中，三维地震技术可获取高密度三维数据体，实现构造精细解释，准确刻画煤层埋深、起伏形态及断层与褶皱分布，为井位优化部署提供关键依据。进一步利用地震属性分析与反演技术，可将地震数据转换为波阻抗数据体，预测煤层厚度的空间变化，实现“地震储层预测”。相干、曲率等几何属性的提取则有助于识别裂隙发育带。更为先进的多波多分量地震技术通过同步接收纵波与横波信号，利用横波对裂隙和流体的高敏感性，能够更有效地评估煤层含气性并判断裂隙优势方向，为“甜点区”预测提供重要依据。

2. 测井技术

测井技术作为连接地震与岩心的关键桥梁，可提供垂向连续的高分辨率储层信息。常规测井通过综合解释伽马、电阻率、密度与声波时差等曲线，能够精确划分煤层厚度与结构，识别岩性差异，并基于密度-中子测井组合计算煤的工业分析组分^[4]。特殊测井方法则进一步深化储层表征能力：核磁共振测井可直接表征孔隙流体与渗透特性；成像测井能够清晰揭示裂缝与层理发育特征；偶极子声波测井通过横波信息反演岩石力学参数，支撑地应力分析与压裂设计；元素俘获测井则通过元素含量测定，实现矿物组分与灰分的精细评价。

（三）钻探与取样技术

勘查钻孔的部署遵循严格的科学原则，按照勘查网度要求，由区域探井到参数井再到评价井逐步加密，并基于地质和地震成果，有针对性地布置在构造关键部位和地球物理异常区。在取心技术方面，常规取心用于获取煤心进行观察描述和大部分实验分析；保压取心则通过使用密闭保压取心筒，使煤心在提升至井口的过程中保持原始储层压力，成为获取原始储层含气量最准确的方法，尽管其成本高昂、工艺复杂；绳索取心则着重于提高取心效率和收获率。与此同时，录井技术在钻井过程中发挥着实时监测的重要作用，地质录井通过记录岩屑、钻时等信息建立地层剖面，气测录井则通过监测钻

井液中的烃类气体含量和组分,为发现气显示、初步判断含气性提供重要依据。

(四) 储层实验测试与分析

获取岩心与煤心样品后,储层实验测试是获取精准储层参数的关键环节。工业分析与显微组分分析通过测定水分、灰分、挥发分与固定碳含量,评价煤级与工艺性质;同时借助煤岩显微鉴定,定量统计镜质组、惰质组与壳质组含量,以评估生烃与吸附潜力。等温吸附实验在恒温条件下测定不同压力对应的甲烷吸附量,绘制兰格缪尔曲线,获取兰格缪尔体积与压力参数,为评价煤体最大吸附能力与解吸特征提供定量依据。孔隙结构测试采用压汞法与低温液氮吸附法,分别表征大-中孔与纳米级基质孔隙的分布特征,揭示气体吸附空间与渗流路径。此外,通过三轴应力实验直接测定煤岩的抗压强度、弹性模量与泊松比等力学参数,为井壁稳定性评价与压裂方案设计提供基础数据支撑。

三、勘查方法的综合应用与储层评价

(一) “地质-地球物理-钻探”一体化勘查流程

煤层气勘查需遵循“地质-地球物理-钻探”一体化模式,形成多学科协同、迭代优化的系统工作流程。该流程始于区域优选阶段,以地质分析为主导,综合区域地质、遥感及重磁电等物探资料,划分盆地构造单元,初步圈定煤层埋深适中、构造稳定且资源潜力良好的远景区。

进入目标区圈定阶段后,地球物理技术尤其是地震勘探发挥核心作用。通过部署二维或三维地震,开展精细构造解释与属性分析,编制高精度煤层底板等高线图与构造图,并结合地质条件评价保存能力,进而筛选出有利目标区。此阶段地震技术已从传统构造解释延伸至储层预测领域。

在储层精细评价阶段,测井与钻探技术互为验证与补充。参数井提供的测井与取心资料是关键的第一手数据。通过建立可靠的测井解释模型,可精确获取单井的煤厚、煤质、含气量及力学参数等“点”上信息。进一步以测井数据为约束,对地震资料进行波阻抗等反演,形成地震-测井联合反演,实现由“点”至“面”的拓展,生成储层参数平面展布图。在此过程中,实验室测试获得的精确含气量、吸附及力学参数,对测井解释与地震预测结果起到关键校准作用,通过迭代修正,显著提升储层参数预测的可靠性。

(二) 储层综合评价与“甜点区”预测

在获取并校准各项储层参数后,勘查工作的核心任务转向“甜点区”综合预测与井位部署。“甜点区”是指在有利勘查区内兼具高含气量、高渗透率、易压裂性及良好构造-水文配置,能够实现高产高效开发的核心储集区块。

为实现精准预测,需构建层次化的综合评价指标体系。该体系通常涵盖资源潜力、渗流能力、工程适应性与保存条件等准则层,每一准则层下设相应的具体评价指标^[1]。基于地理信息系统或专业地质建模平台,采用加权叠加、机器学习等多信息融合方法,对各指标图件进行空间集成分析,最终生成分级显示的“甜点区”综合预测图(一般划分为I类、II类、III类等不同等级)。该成果为后续优化井位部署与制定开发方案提供了直观、可靠的决策依据。

结束语

煤层气储层地质勘查是保障煤层气高效开发的关键基础。本文系统分析了煤层气储层的地质特征与主控因素,构建了以“地质-地球物理-钻探”为核心的一体化勘查技术体系,并通过多信息融合方法实现了储层综合评价与“甜点区”精准预测。研究表明,未来煤层气勘查将向多学科深度融合、高精度探测装备与智能化分析方向发展,这些技术进步将为煤层气勘查开辟新的前景。持续创新勘查方法体系、提升勘查技术水平,将为推动我国煤层气产业实现高质量可持续发展提供重要支撑。

参考文献

- [1] 黄继, 赵文峰. 煤层气储层及其主要充水含水层富水性评价方法初探[J]. 四川地质学报, 2024, 44(01): 63-66+79.
- [2] 霍晓燕, 侯美玲. 煤层气储层地质研究进展[J]. 中国矿业, 2024, (01): 10-15.
- [3] 路萍. 关于煤层气储层地质特征及勘探开发探讨[J]. 内蒙古煤炭经济, 2023, (09): 166-168.
- [4] 许建涛, 王晓博. 煤田勘查区煤层气地质建模研究[J]. 科学技术创新, 2025(19): 181-184.
- [5] 孙林, 郭鸿. 海孜煤矿深部勘查区中组煤层气储层物性特征分析[J]. 河南科技, 2024, 51(5): 39-42.