

湘东南永耒向斜构造特征及其对煤层气富集的控制作用

曾平平

湖南省工程地质矿山地质调查监测所, 湖南长沙, 410000;

摘要: 永耒向斜地处华南加里东褶皱带攸兰断坳, 为受双重断裂控制的复式向斜, 呈“S”形展布, 断裂系统发育且多期构造叠加明显。构造特征通过三重机制控制煤层气富集: 构造变形分带改造储层物性, 构造格局导向煤层气运移路径, 断裂褶皱组合实现气藏封控。基于此, 划分出向斜北部宽缓段等三大有利勘探区带, 为区域煤层气勘探开发提供科学依据。

关键词: 永耒向斜; 构造特征; 煤层气富集

DOI: 10.69979/3041-0673.26.04.047

引言

我国北方广泛发育中生代断陷型含煤盆地^[1]。而南方则以褶皱带内的复式向斜等构造单元为主要赋煤载体。湘东南是我国南方重要赋煤区, 永耒向斜作为区域核心赋煤构造单元, 其复杂构造演化对煤层气富集影响深远。明确该向斜构造发育特征及控气机制, 是解决煤层气勘探突破的关键。本文基于区域地质资料, 系统分析永耒向斜构造背景与发育特征, 揭示构造对煤层气储层、运移及封控的多重作用, 为优质勘探区带优选提供支撑。

1 永耒向斜区域构造背景与发育特征

永耒向斜位于华南加里东褶皱带攸兰断坳中部, 属耒耒凹陷三级构造单元, 受长寿街~双牌断裂带与茶陵~临武断裂带控制, 处于扬子板块与华夏板块碰撞拼贴的构造动力学环境。该向斜为复式向斜, 构造线主体南北向, 北部北北东向, 轴向整体呈“S”形展布, 倾向东且北宽南窄, 北部宽缓并发育次级褶曲, 南部狭窄。西翼地层倾角平缓, 东翼较陡且局部倒转, 浅部地层倾角大于深部, 呈不对称构造形态。断裂系统发育, 西翼F1推覆断裂长达140km, 断层走向与地层同步弯曲呈“S”型及反“S”型, 倾向与地层一致, 断失部位集中于龙潭组上段, 破坏煤层完整性; 东翼分布F4等逆断层, 泉滩断层F3斜交地层走向, 由数条次级断裂组成, 部分区段构造反转, 具压扭性特征。构造多期叠加改造, 印支期东西向挤压形成南北向隔挡式褶皱, 燕山期转为自外缘向隆起核部逆冲推覆, 局部伴随岩浆岩侵入, 部分向斜区域被中生代红层覆盖, 构成复杂独特的构造发育格局。

2 构造特征对煤层气富集的多重控制机制

2.1 构造变形对煤储层物性的改造

煤层气是成煤作用过程中形成的伴生气体产物, 煤层及其所在的含煤岩系构成了煤层气的主要赋存载体^[2]。构造变形作为储层物性改造的核心动力, 通过改变煤储层孔隙结构的形态与分布、裂隙的发育密度与连通程度, 以及煤体的宏观完整度, 从根本上主导储层渗透性能的优劣与储气空间的有效容量, 这种改造效应可通过地震勘探、岩心测试、测井解释等地质勘探手段精准量化, 为富集区预测提供数据支撑。永耒向斜作为典型的复式向斜构造, 受多期构造运动叠加影响, 褶皱变形呈现显著的空间差异, 进而造就储层物性的分带性特征, 为煤层气富集划定了明确的靶向区域。核部受南北向挤压应力集中影响, 地层压实强烈, 原始孔隙度降至3%~6%, 长期构造弯曲引发的拉伸作用促使顺层裂隙密集发育, 密度达8~12条/m, 呈网状连通, 发育近南北向张性裂隙与东西向剪切裂隙, 构成储气与渗流主要通道, 是煤层气富集的优势区域。

向斜翼部倾角差异使物性改造出现明显分异, 进而影响煤层气富集潜力。西翼倾角20°~30°, 构造变形较弱, 煤体以原生结构为主, 孔隙度6%~9%, 裂隙以剪切型为主, 密度3~5条/m, 连通性中等, 煤层气富集条件相对均衡; 东翼倾角30°~60°, 局部直立或倒转, 受强烈挤压剪切作用, 煤体结构破坏严重, 多为碎裂煤或鳞片煤, 孔隙度虽达10%~13%, 但原生孔隙多被破碎颗粒充填, 有效渗透率较低, 导致煤层气难以在孔隙中滞留富集, 仅局部裂隙发育区存在少量聚集。破碎煤储层需采用“预处理+精准压裂”组合方案, 先注入低黏度前置液冲洗孔道, 再以滑溜水携砂压裂, 将支撑剂粒径降至40~70目, 提升支撑剂嵌入稳定性, 配套水力割缝技术在井眼周围形成3~4条径向割缝, 长度5~8m, 破除近井地带煤体堵塞, 改善流体流通通道。

断裂构造为煤储层物性改造关键载体, 永耒向斜西翼F1推覆断裂绵延140km, 破碎带宽50~80m, 由断层

泥、碎裂岩、糜棱岩构成，碎裂岩段孔隙度 15%~18%，裂隙密度 20~30 条/m，属物性最优改造段，为煤层气富集提供了优质储集空间。推断后期工程实践中，通过钻孔岩心观察破碎带岩性组合，结合成像测井识别碎裂岩分布区间，于断裂影响带内部署定向井，井眼与断裂走向呈 30°~45° 夹角，应用体积压裂技术注入胍胶压裂液，添加 0.3%~0.5%黏土稳定剂与 0.2%~0.3%破胶剂，施工中监测压力曲线变化，压力突降 10~15MPa 即判定裂缝穿透破碎带，此时提升砂比至 30%~40%，强化裂缝支撑效果。东翼 F1 逆断层北段倾角 35°~60°，严重破坏浅部煤层完整性，可以采用“跨断层压裂”技术，断层两侧各部署一口分支井，井距 300~400m，同步压裂促使裂缝穿过断层泥带，沟通两侧储层，压裂液中添加纤维材料，封堵断层泥缝，避免压裂液漏失。泉滩断层 F3 中段为背冲式逆冲构造，发育构造透镜体与糜棱岩化带，透镜体间连通通道成为煤层气富集的关键场所，而糜棱岩致密段则阻碍煤层气富集。

2.2 构造格局对煤层气运移的导向

永未向斜构造格局构建煤层气“生成-运移-聚集”有序路径，解析构造形态、断裂性质与应力场分布，可明确煤层气运移通道与聚集区域，为勘探区带优选提供核心依据^[3]。向斜轴向“S”形展布主导煤层气侧向运移方向：北部北东向区段宽缓，次级褶曲发育形成多个局部低洼构造，成为煤层气聚集“汇流区”；南部近南北向区段狭窄，构造挤压强烈，运移通道单一。实践中可用 Surfer 软件绘制龙潭组煤层构造等高线图，结合煤层气含量测试数据计算气藏压力梯度，梯度值小于 0.01MPa/m 时判定为聚集区，沿轴向部署长水平井，水平段长度 1500~2000m，井眼轨迹贴合构造等高线走向，确保始终处于气藏高势区。大地电磁测深技术探测向斜两翼地层导电性差异，西翼相对平缓区导电性均匀，指示运移通道稳定，部署平行于轴向的井组，井距 800~1000m；东翼陡倾区导电性突变段对应断裂发育带，部署斜交井捕捉断裂疏导的煤层气。

断裂系统性质与产状决定煤层气垂向及侧向运移效率，主导富集区域差异。F1 推覆断裂为区域性压扭性断裂，北段倾角 50°~65°，破碎带以碎裂岩为主、连通性良好，可作为垂向运移通道，使深部煤层气向浅部聚集；中段倾角 30°~40°，发育前展式叠瓦扇，断裂带内构造透镜体形成局部遮挡，促使煤层气在透镜体圈闭内富集；南段发育顺层滑褶构造，限制煤层气横向运移，形成局部富集区。F2 逆断层中段地层倒转、呈构造弧展布，错断 1、2、5、6 号主力煤层，成为煤层气横向运移的重要通道，断层下盘因构造遮挡成为煤层气聚集优选区域。F3 泉滩断层呈北东走向，中段具压

扭性右型特征、南段发生构造反转，通过断层封闭性评价（断层泥厚度/断距比值大于 0.3 为有效封闭）可划分疏导段与封闭段：疏导段引导煤层气运移，封闭段促使煤层气聚集，直接控制煤层气富集区域边界。

区域构造应力场演化是控制裂隙发育方向与连通性的核心动力学因素，不仅为煤层气运移提供持续动力导向，更通过调控储层渗流能力深刻影响煤层气富集格局。永未向斜经历多期构造应力叠加：印支期受扬子板块与华夏板块碰撞引发的东西向挤压，奠定基底应力框架；燕山期转为强烈的北西-南东向挤压，使早期裂隙进一步改造重组，最终形成现今以北西-南东向为最大主压应力的分布特征。该主压应力与区域主要裂隙走向呈 45°~60° 最优夹角，既保障裂隙网络保持良好连通性，又避免应力过大导致裂隙闭合，为煤层气高效运移创造有利条件。龙潭组煤岩镜质体反射率 1.5%~2.5%的构造热异常区，煤层气生成量丰富，叠加应力场驱动的高效运移，成为煤层气富集高潜力区；中生代红层覆盖区的天窗区，因构造完整性被破坏，成为煤层气逸散通道，周边区域煤层气富集程度受影响。

2.3 断裂褶皱组合对气藏的封控作用

断裂与褶皱的不同组合造就多样化气藏封控模式，直接决定煤层气富集规模与稳定性，是划分有利勘探区带的核心依据。永未向斜“复式向斜+区域性逆断层”构成一级封控单元，向斜核部充任储气中心，两侧 F1、F2 逆断层形成侧向遮挡，构成完整圈闭。利用地震剖面与钻孔资料划分封控边界，西抵 F1 断裂、东达 F2 断裂、北始观音阁、南迄邝家，面积约 1200km²。根据“圈闭评价-储层分级-井位部署”三步法推进，构造建模计算圈闭容积（大于 10×10⁸m³为有效），再依孔隙度、渗透率、含气量划分为 I 类（≥8%、≥1×10⁻¹⁵m²、≥12m³/t）、II 类（6%~8%、0.5×10⁻¹⁵~1×10⁻¹⁵m²、8~12m³/t）、III 类（<6%、<0.5×10⁻¹⁵m²、<8m³/t），I 类区部署五点法井网（井距 500~600m），II 类区加密布井，III 类区布设探井。I 类区煤层气富集规模大、稳定性强，是最优勘探目标。

“次级褶曲+层间断裂”构成二级封控单元，主要分布于向斜北部宽缓段，黄泥塘向斜、黄腊池向斜等次级褶曲与层间滑动断裂配合形成局部圈闭。通过高精度三维地震识别次级褶曲核部与翼部，结合钻孔岩心观察，断距小于 50m、延伸长度小于 5km 的为有效封控断裂。采用“断裂封闭性+褶曲紧闭度”双指标评价，断裂封闭性看泥质含量（>30%）与抗压强度（>15MPa），褶曲紧闭度看翼部倾角与核部宽度比值（>0.8 为强）。强封控单元煤层气富集稳定性高，中等封控单元富集规模受构造完整性影响，弱封控单元因封控能力不足导致

煤层气易逸散，富集程度较低。

“背冲式断裂+褶皱核部”以泉滩断层 F3 中段为典型构造组合，其形成与燕山期北西-南东向挤压动力学环境密切相关：两条相向逆冲的背冲式断层构成刚性侧向遮挡边界，有效阻断煤层气横向逸散通道，而褶皱核部受构造拉伸作用影响，顺层裂隙与网状裂隙密集发育，既扩大了储气空间，又改善了储层连通性，为煤层气高效聚集提供双重保障。实测数据显示，含气量大于 $15\text{m}^3/\text{t}$ 、渗透率大于 $2 \times 10^{-15}\text{m}^2$ 的优质封控区，因储层物性与封控条件完美匹配，煤层气富集程度远超其他区域，成为区域内高潜力富集区块。

部分区域发育“复式向斜+F1 推覆断裂+次级褶曲”三重构造叠加模式，其封控强度居所有组合类型之首：复式向斜提供宏观储气框架，F1 推覆断裂的逆冲作用形成深部遮挡，次级褶曲进一步分割圈闭、增强局部封闭性，三重构造的协同作用大幅降低气藏逸散风险。通过地震属性反演、测井储层参数解释与构造应力场模拟等多学科融合技术建立封控评价模型，可精准锁定复合封控中心。该区域不仅煤层保存完整、储层裂隙发育均衡，且构造稳定性强，煤层气富集规模与长期稳产能力均居区域首位，是实现煤层气勘探突破的核心靶区。

3 煤层气富集规律与有利勘探区带划分



图 1：构造控气到有利区带划分核心流程

4 结语

永来向斜构造特征对煤层气富集的控制具有显著规律性，复式向斜形态、断裂系统分布及多期构造叠加共同构成控气核心。构造变形主导储层物性分异，构造格局决定运移路径，断裂褶皱组合形成差异化封控。三大有利勘探区带的划分，凝练了“构造-储层-气藏”协同富集规律，可为湘东南地区煤层气高效勘探提供重要技术参考与实践指导。

参考文献

- [1]王勃,王宁,文建东,徐凤银,李长兴,屈争辉,史鸣剑.旋卷压扭构造作用控制下煤层气富集地质控制模式——以河西走廊东部魏家地煤矿为例[J].煤炭科学技术,2025,53(3):139-150
- [2]郑超,陈跃,雷武林,姜生玲,蔺亚兵.构造控制煤层

气开发的研究进展[J].矿业安全与环保,2025,52(3):123-129

[3]唐书恒,郝兆栋,张松航,孙粉锦,段利江,田文广,王明珠.深部煤层气赋存相态与含气性演化[J].煤炭科学技术,2025,53(3):91-100

[4]郭晓娇,王雷,姚仙洲,李旭,张林科,王晓双.深部煤岩地质特征及煤层气富集主控地质因素——以鄂尔多斯盆地东部M区为例[J].石油实验地质,2025,47(1):17-26

[5]李鸿磊,郭志军,易同生,秦勇,杨通保,金军.黔西北地区上二叠统煤层气富集机理与有利区优选评价[J].中国地质,2025,52(2):597-612

目前，对深部煤岩地质特征和煤层气富集成藏理论的研究已取得一定进展^[4]。永来向斜煤层气富集规律与构造演化、煤层发育及储层改造效应耦合，核心受控于“向斜形态-断裂组合-煤层物性”协同作用。向斜北宽南窄的“S”形展布形成差异化富集格局，北部宽缓段次级褶曲发育，龙潭组上段含煤带厚度 250~639m，含煤层数 7~13 层，5、6 号主力煤层孔隙度与裂隙密度最优，叠加印支-燕山期构造应力形成的网状裂隙，成为煤层气聚集核心区；南部狭窄段挤压强烈，煤层完整性受 F1 逆断层破坏，富集呈条带状分布。不同煤层含气量的区域分布规律相似，只是下部煤层高含气量分布范围略大于上部煤层^[5]。断裂系统封控与疏导分异明显，F1 推覆断裂中段顺层滑覆形成的构造透镜体与向斜核部耦合，构建封闭性储气空间，东翼陡倾区断裂破碎带因连通过强导致气藏逸散，仅局部透镜体遮挡区存在富集。有利勘探区带划分聚焦构造与储层匹配优势区域：向斜北部北北东向宽缓段，次级褶曲与层间断裂组合形成多重圈闭，龙潭组含煤性好且储层改造潜力大；西翼 F1 断裂影响带内侧，碎裂岩段与煤层耦合发育，既保障储气空间又具备一定渗透性；永来向斜与黄泥塘向斜过渡区，构造变形中等，煤层保存完整且远离大型断裂破坏带，封控条件稳定，是兼顾储量与开采效益的优选区带。见图 1

气开发的研究进展[J].矿业安全与环保,2025,52(3):123-129

[3]唐书恒,郝兆栋,张松航,孙粉锦,段利江,田文广,王明珠.深部煤层气赋存相态与含气性演化[J].煤炭科学技术,2025,53(3):91-100

[4]郭晓娇,王雷,姚仙洲,李旭,张林科,王晓双.深部煤岩地质特征及煤层气富集主控地质因素——以鄂尔多斯盆地东部M区为例[J].石油实验地质,2025,47(1):17-26

[5]李鸿磊,郭志军,易同生,秦勇,杨通保,金军.黔西北地区上二叠统煤层气富集机理与有利区优选评价[J].中国地质,2025,52(2):597-612

作者简介：曾平平（1990.05-），女，汉族，湖北省仙桃市人，本科学历，职称：工程师。