

东濮凹陷西部斜坡带山西组煤层气地震预测

汪学胜

中国石化股份中原油田分公司勘探开发研究院 河南 濮阳 457001

【摘要】：东濮凹陷西部斜坡带山西组二1煤层具有厚度大、展布稳定、构造保存条件优越等特点，具备良好的煤层气勘探潜力。然而，该区老二维地震资料品质差、地层厚度变化大、速度场复杂等问题严重制约了煤层气地震预测的精度。本研究通过精细地层对比、测井特征分析、岩石物理参数研究、正演模拟、井震标定及叠后约束稀疏脉冲反演等技术手段，系统开展了煤层厚度与含气性预测。结果表明，二1煤层在地震剖面上表现为波谷强反射，波阻抗值范围为 $2.8e+006 - 3.8e+006 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{m/s}$ ，具备良好的识别基础。采用流体因子含气性检测技术，成功识别了两个有利含气区。同时，结合虚拟井插值约束与VSP资料，建立了高精度速度场模型，指导水平井成功入靶，水平段钻遇率达100%。研究成果为东濮凹陷西部斜坡带煤层气的高效勘探开发提供了重要技术支撑。

【关键词】：东濮凹陷；山西组；煤层气；叠后反演；含气性检测；速度场建模

DOI:10.12417/2705-0998.26.02.087

1 研究背景

东濮凹陷及其周缘上古生界煤系烃源岩自1978年文23气田发现以来，已陆续揭示户部寨等煤成气田，证实了该区域优良的生烃条件。通过39口探井的钻探实践，31口井获得气测数据，其中26口井见明确油气显示，充分验证了东濮凹陷具备煤层气勘探的基础地质条件。

1.1 目前的技术现状及存在的主要技术问题

区域地质研究表明，构造保存条件分析表明，东濮凹陷发育5个稳定构造块体，其中西部斜坡带受喜山期构造活动影响微弱，形成继承性稳定的单斜构造，面积3083平方公里。该区地层东倾，倾角3-8度，煤层埋深主要分布在1500-3500米区间，处于煤层气开发的经济埋深范围。综合煤层厚度、埋深及保存条件，西部斜坡带展现出煤层厚度大、热演化适中、构造保存条件优越的特点，具备大规模煤层气勘探开发潜力，是未来增储上产的重要方向。

东濮西斜坡山西组煤层气地震预测面临诸多挑战，其中老二维地震资料品质差和地层厚度发育变化大、速度场难以预测是两个尤为突出的难点。

针对这些难点，可以采用一系列的技术和方法。老二维地震资料品质差的问题，可以应用叠前地震资料噪声压制、地表一致性处理、压缩子波展宽有效波频谱、高精度同相叠加以及叠后f-x域信号方向束去噪等处理技术。这些技术有助于提高地震资料的信噪比和分辨率，从而提升储层预测精度。此外，还可以考虑引入新的地震属性分析技术，如地震振幅属性分析、频率属性分析等，以更全面地提取地震资料中的信息，提高预测的准确性。

东濮凹陷及其周缘上古生界煤系烃源岩自1978年文23气田发现以来，已陆续揭示户部寨等煤成气田，证实了该区域优良的生烃条件。通过39口探井的钻探实践，31口井获得气测

数据，其中26口井见明确油气显示，充分验证了东濮凹陷具备煤层气勘探的基础地质条件。西部斜坡带构造稳定、保存条件好，且二1煤层厚度大、含气性好，煤层气资源量大，据此认识系统评价东濮凹陷煤层气条件，明确西部斜坡带煤层气勘探潜力好，并部署第一口煤层气井。但由于地震预测精度受限，因此开展东濮西斜坡山西组煤层气地震预测，通过二维地震资料开展井区速度场分析，煤层预测等工作，提高水平段煤层钻遇率，利用确保该井顺利完钻。

1.2 目前存在问题

(1) 老二维地震资料品质差，地震轴连续性差，断点、断面不清晰，部分煤层边界难以可靠刻画，难以识别，不利于煤层预测。

(2) 地层厚度发育变化显著，受地质构造和沉积环境影响明显，导致速度场复杂多变，难以准确预测。

1.3 研究目的意义

针对东濮西斜坡山西组煤层气地震预测的难点和问题，通过研究明确储层地震-地质模式，精细刻画煤层边界，利用二维地震资料开展速度场分析，利用叠后约束稀疏脉冲反演预测煤层厚度，提高水平段煤层钻遇率，利用确保该井顺利完钻。

2 取得的主要技术成果

2.1 针对二维地震资料采用叠后约束稀疏脉冲反演技术，开展西斜坡山西组二1煤层厚度预测，钻井结果验证预测符合率达98%。

本次研究综合运用多种地球物理与地质分析方法，对山西组二1煤层展开了系统且深入的研究，旨在精确刻画其地质特征与分布规律。

(1) 煤层地质特征

通过高精度的精细地层对比工作，综合分析区域地质构造

演化、沉积环境变迁以及地层接触关系等多方面因素，精准落实了山西组二 1 煤层的展布特征。该煤层作为西斜坡上古生界厚度最大的煤层，其横向展布具有极高的稳定性。在平面分布上，煤层连续性良好，未出现明显的尖灭或断缺现象；在纵向厚度上，单层厚度主要集中在 6-8m 这一区间，厚度变化相对较小，反映出沉积环境在该区域的相对均一性。

(2) 二维地质模型煤层正演模拟分析

为深入理解煤层厚度变化与地震响应之间的关系，建立了煤层楔状模型进行正演模拟。模拟过程中，充分考虑了煤层及其围岩的岩石物理参数，精确模拟了地震波在煤层中的传播过程。模拟结果显示，随着煤层厚度的逐渐增加，煤底波峰的振幅呈现出明显的增强趋势。这是因为煤层厚度的变化改变了地震波的传播路径和能量分布，导致反射波的振幅发生变化。同时，由于山西组二 1 煤层的波阻抗远低于其顶底的砂泥岩，顶界面反射系数为负，底界面反射系数为正。当地震资料呈现正极性剖面时，煤层在地震剖面上表现为位于最大波谷与最大波峰之间的特征形态。

(3) 煤层井震关系标定

标定结果显示，主要标志层的井震对应关系良好，中生界底界在地震剖面上呈现为波峰中强反射特征，山西组二 1 煤层则表现为波谷强反射，且在地震上连续可追踪，石炭系底界呈现为波峰强反射。这种良好的井震对应关系为后续的地震解释和煤层预测提供了坚实的基础。此外，再次利用已有钻井进行精细合成记录标定，进一步验证了主要标志层井震对应关系的准确性，其中 T_p （中生界底界）为波峰中强反射，山西组二 1 煤为波谷强反射且地震上连续可追踪， T_g （石炭系底界）为波峰强反射。

(4) 过井地震剖面反演预测西斜坡二 1 煤厚度分布

为提高对低波阻抗煤层的识别精度，对研究区的多条二维地震测线开展了多井联合子波叠后约束稀疏脉冲反演。反演过程中，充分利用了多口钻井的测井资料和地震资料，通过建立初始地质模型，结合地震子波信息，采用稀疏脉冲反演算法对地下波阻抗分布进行反演计算。反演结果表明，该方法能够较为有效地区分出低波阻抗的煤层，反演得到的波阻抗数据体与实际地质情况吻合度较高。从预测结果可以看出，西部斜坡带中部的山西组二 1 煤层展布稳定，预测厚度与实际钻井揭示的厚度高度吻合。

2.2 利用流体因子含气性检测技术预测西斜坡山西组二 1 煤层含气性，落实两个有利区

在煤层气资源勘探与评价工作中，准确预测煤层含气性并圈定有利区是提高勘探开发效率、降低风险的关键环节。本研究聚焦于西斜坡山西组二 1 煤层，采用先进的流体因子含气性检测技术，对该煤层的含气性展开系统研究，旨在精准落实具

有开发潜力的有利区域。

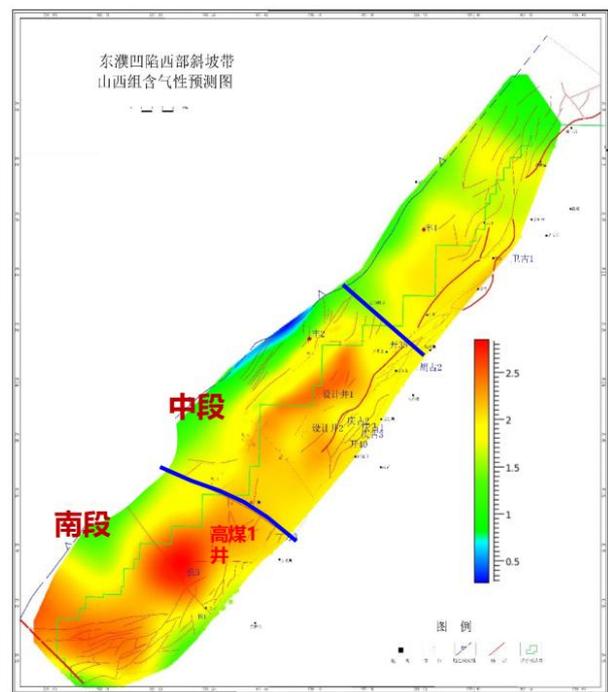
(1) 煤层气井含气量预测

在含气性预测过程中，流体流度因子是一个关键的参数。理论研究表明，流体流度因子与反射系数随频率变化率的平方成正比关系。这一关系揭示了流体流度因子与储层含气性之间的内在联系，即流度因子的大小能够较好地反映储层的含气性状况。流度因子越大，表明储层中流体的流动能力越强，通常意味着含气性较好；反之，则含气性较差。

基于上述理论，对目标井区的山西组二 1 煤层进行了含气性预测。结合地质、地球物理等多方面资料综合判断，认为该井区山西组二 1 煤层含气性较好。这一预测结果与后续的勘探开发实践具有一定的吻合度，验证了该方法在该区域的适用性和有效性。

(2) 西斜坡二 1 煤含气性分布预测

为了全面了解西斜坡山西组二 1 煤层的含气性分布情况，在单井分析的基础上，对整个西斜坡区域开展了含气性预测工作。采用多种地球物理反演和属性分析技术，结合地质构造、沉积环境等因素，建立了适合该区域的含气性预测模型。通过对模型的计算和分析，得到了西斜坡二 1 煤层的含气性分布预测情况。



2.3 针对西斜坡地层速度横向变化快，采用虚拟井插值约束，结合 VSP 资料，准确建立速度场，引导水平井并成功入靶，支撑水平段钻遇率达 100%。

在东濮凹陷西斜坡的煤层气勘探开发进程中，地层速度的横向快速变化给钻井工程的精准入靶带来了巨大挑战。为有效应对这一难题，本项目采用虚拟井插值约束技术，并结合 VSP

资料,成功构建了高精度的速度场模型,为该井的顺利入靶提供了坚实保障,最终实现了水平段钻遇率 100% 的优异成果。

(1) 部署第一口煤层气井

基于前期对东濮凹陷西斜坡地质构造、沉积环境以及煤层气赋存条件的深入研究,综合分析各项地质、地球物理资料后,决定在西斜坡中段部署实施。该井的主要勘探目标为东濮凹陷山西组的深层煤层气资源。然而,该区域的地质条件极为复杂,新生界沙河街组与中生界地层剥蚀残留厚度的变化幅度较大,这种显著的地层厚度差异直接导致了横向地层速度的剧烈变化,给速度场的准确建立和钻井轨迹的精准控制带来了极大困难。

(2) 建立设计井水平段空间速度场

为准确刻画井区的速度分布特征,首先在研究区域的测线上精心选取了 10 个可连续追踪的标志层。这些标志层具有良好的稳定性和可识别性,能够为速度场的构建提供可靠的层位约束。以这些标志层为基础,构建了精细的层位网格模型,该模型能够准确反映地层在空间上的起伏变化。随后,充分利用导眼井的测井资料和 VSP 资料,结合地震层位解释结果,通过先进的反演算法和速度分析技术,建立井区的初始空间速度场模型。该模型在一定程度上反映了地层的速度分布规律,但受限于资料的有限性和地质条件的复杂性,其精度仍有待进一步提高。

(3) 增加虚拟井完善速度场

在第一次侧钻填井作业完成后,为进一步提升速度场的精度,在 Walkway 地震剖面上增加了两口虚拟井。虚拟井的引入

相当于为速度场的构建增加了额外的约束条件,通过合理设定虚拟井的速度参数和位置信息,利用插值算法对初始速度场进行优化调整。优化后的速度场能够更好地拟合实际地层速度的变化情况,减少了因速度误差导致的地层位置预测偏差。

在后续的钻井过程中,根据水平段煤顶垂深的实时变化情况,对速度场进行了持续的动态优化。通过不断调整速度场模型中的参数,使其更加符合实际地质条件,从而实现了对地层倾角的准确预测。这种动态优化的方法有效克服了地质条件复杂多变带来的不确定性,为钻井轨迹的精准控制提供了可靠依据。

3 结语

(1) 明确了煤层地震响应特征。通过岩石物理参数分析,确认山西组二 1 煤层具有低速度、低密度、低波阻抗 ($2.8e+006-3.8e+006 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{m/s}$) 的典型特征,与围岩存在显著的波阻抗差异。在地震正极性剖面中,煤层表现为位于最大波谷与最大波峰之间的特征反射形态,为地震识别提供了可靠依据。

(2) 东濮凹陷西部斜坡带地层速度纵横向变化快,需要用虚拟井插值约束,地震解释层位网格加以控制,可以得到更加准确的地质速度场模型。

(3) 形成了适用于复杂地质条件的煤层气地震预测技术系列。本研究集成应用了地震资料目标处理、岩石物理分析、正演模拟、叠后反演、含气性检测、速度场建模等多种技术方法,形成了从煤层识别、厚度预测、含气性评价到钻井轨迹设计的完整技术链条,对类似地质条件的煤层气勘探开发具有重要的参考价值 and 推广应用前景。

参考文献:

- [1] 陈书平,邹玉璇,韩旭,等.东濮凹陷濮城断展褶皱形成演化及与油气关系[J].石油地球物理勘探,2015,50(3):512-518.
- [2] 李令喜,王生朗,蒋飞虎,等.东濮凹陷构造特征及古生界有利勘探区带评价[J].岩性油气藏,2022,34(6):45-53.
- [3] 邵龙义,郑明泉,侯海海,等.山西省石炭一二叠纪煤系层序—古地理与聚煤特征[J].煤炭科学技术,2018,46(2):1-8.
- [4] 秦勇.中国煤系气共生成藏研究进展[J].天然气工业,2018,38(4):26-36.
- [5] 李丹,赵伟波,胡琮,等.鄂尔多斯地区南部早二叠世山西组源—汇系统差异与构造—沉积格局[J].沉积学报,2025,43(4):1412-1428.
- [6] 邹才能,杨智,黄士鹏,等.煤系气资源类型、形成分布与发展前景[J].石油勘探与开发,2019,46(3):433-442.
- [7] 柯沛,王彦春,孙赞东,等.沁水盆地煤层气地震资料处理技术[J].非常规油气,2024,11(2):9-20.
- [8] 刘畅.鄂尔多斯盆地东缘上古生界煤系气共生组合模式[J].复杂油气藏,2022,15(2):1-7.
- [9] 陈尚斌,侯晓伟,屈晓荣,等.煤系气叠合含气系统及其天然气成藏特征——以沁水盆地榆社—武乡示范区为例[J].天然气工业,2023,43(5):12-22.
- [10] 马龙,石强,肖玉峰,等.基于 Russell 流体因子疏松砂岩含气性评价研究[J].中国石油勘探,2011,16(2):49-51,78.
- [11] 李勇,王延斌,孟尚志,等.煤系非常规天然气共采理论基础及前景展望[J].煤炭学报,2020,45(4):1406-1418.
- [12] 杨新乐,张永利,李惟慷.超短半径径向水平井抽采煤层气渗流规律的数值模拟[J].防灾减灾工程学报,2011,31(1):50-55.
- [13] 李惠,马遵敬,王旭东,等.沁水盆地南部砂体与煤层空间叠置特征及其对煤层气与致密气合采的启示[J].科学技术与工程,2019,19(7):70-77.