

鄂尔多斯盆地DJ区块深部煤储层地质-工程甜点测井评价技术

王舵^{1,2},刘之的^{2,3},王成旺⁴,刘天定^{5,6},陈高杰⁴,郝晋美^{5,6},孙博文^{5,6}

(1. 西安石油大学石油工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 陕西省油气田特种增产技术重点实验室, 陕西 西安 710065; 3. 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 4. 中石油煤层气有限责任公司工程技术研究院, 陕西 西安 710082; 5. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710018; 6. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安 710018)

摘要:深部煤层气由于储层非均质性强、应力大、压力高和可改造性差,因此,其规模化开发要求对甜点开展精细评价。基于层次分析法(AHP)提出了深部煤储层地质-工程甜点的12项评价指标,建立了测井评价模型,利用该模型对鄂尔多斯盆地DJ区块20余口井的深部煤储层甜点进行了评价。研究结果表明:①煤储层地质-工程甜点主控因素与产能施工压力比(I_p)存在良好的相关性。DJ区块深部煤储层的上部甜点类别普遍优于中、下部,上部主要为Ⅰ类甜点,中部为Ⅲ类甜点,下部为Ⅱ类甜点。②含气量和脆性指数分别是储层及工程品质的主控因素。③煤储层顶、底板发育较厚的灰岩和泥岩,煤储层与灰岩和泥岩的力学特性差异较大,能有效封隔压裂缝在煤储层中扩展。压裂工况和试气结果表明所构建的地质-工程甜点测井评价方法应用效果良好,可用于深部煤储层压裂射孔选段和测井优选评价。

关键词:产能施工压力比;含气量;脆性指数;地质-工程一体化;甜点评价;深部煤储层气;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Logging-based evaluation for geological-engineering sweet spots in deep coal reservoirs of the DJ block, Ordos Basin

WANG Duo^{1,2}, LIU Zhidi^{2,3}, WANG Chengwang⁴, LIU Tianding^{5,6}, CHEN Gaojie⁴, HAO Jinmei^{5,6}, SUN Bowen^{5,6}

[1. College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Advanced Stimulation Technology for Oil & Gas Reservoirs, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 3. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 4. Engineering Technology Research Institute of PetroChina Coalbed Methane Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi 710082, China; 5. Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 6. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an, Shaanxi 710018, China]

Abstract: The deep coal seams rich in coalbed methane (CBM) resources feature strong heterogeneity, high stress, high pressure, and challenging stimulation, rendering the accurate sweet spot evaluation crucial to the large-scale production of deep CBM. This study focuses on the logging-based evaluation of integrated geological-engineering sweet spots in deep coal seams, establishing an evaluation model with 12 evaluation indices using the analytic hierarchy process (AHP) method. Employing this model, we carry out sweet spot assessment of deep coal seams in over 20 wells in the DJ block. The results indicate that the major determinants of the geological-engineering sweet spots are strongly correlated with the ratio of a CBM well's daily gas production to its construction pressure in the proppant transport stage (I_p). The upper part of deep coal seams in the DJ block generally exhibits superior sweet spots compared to its middle and lower counterparts. Specifically, the upper, middle-lower, and lower parts predominantly exhibit Class I, III, and II sweet

收稿日期:2024-02-24;修回日期:2024-09-04。

第一作者简介:王舵(1996—),男,博士研究生,岩石力学及非常规测井评价、煤层气地质-工程一体化。E-mail: 1218808185@qq.com。

通信作者简介:刘之的(1978—),男,博士、教授,非常规油气藏测井评价、复杂储层地质-工程一体化测井评价等。E-mail: liuzhidi@xsyu.edu.cn。

基金项目:中石油煤层气科技项目(2022-GCYKJ-02);陕西省重点研发计划项目(2022GY-130)。

spots, respectively. Gas content and brittleness index are identified as the primary factors controlling high-quality reservoirs and engineering sweet spots. The coal seams' roofs and floors consist of thick limestones and mudstones, which exhibit significantly different mechanical properties from the coal seams and thus effectively block the propagation of induced fractures across the coal seams. The fracturing conditions and production test results indicate promising outcomes of the logging-based evaluation model. Therefore, this model can be applied to the logging-based selection and evaluation of the optimal perforation sections for the hydraulic fracturing of deep coal seams.

Key words: ratio of daily gas production to construction pressure (I_p), gas, content, brittleness index, geological-engineering integration, sweet spot evaluation, deep coalbed methane (CBM), Ordos Basin

引用格式:王舵,刘之的,王成旺,等.鄂尔多斯盆地DJ区块深部煤储层地质-工程甜点测井评价技术[J].石油与天然气地质,2024,45(6):1772-1788. DOI:10.11743/ogg20240620.

WANG Duo, LIU Zhidi, WANG Chengwang, et al. Logging-based evaluation for geological-engineering sweet spots in deep coal reservoirs of the DJ block, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(6): 1772-1788. DOI: 10.11743/ogg20240620.

鄂尔多斯盆地东缘煤层气资源丰富,随着勘探开发的不断深入,中、浅层中-高煤阶煤层气可供规模效益开发的区块越来越少,曾被视为勘探开发禁区的深部煤层气逐渐成为保障国家能源安全的重要接替领域^[1],DJ区块正是鄂东深部煤层气勘探开发的热点地区。甜点评价是深部煤层气资源高效勘探开发的前提和基础,基于富集区地质评价的深部煤层气开发效果欠佳^[2],究其原因,深部煤层气藏储层地质条件复杂,勘探开发面临非均质性强、应力大、压力高和可改造性差等诸多挑战,地质-工程综合评价技术体系尚未形成^[3]。因此亟需探索DJ区块深部煤层气地质特征,开展生产特征和高产主控因素研究,明确深部煤层气地质-工程甜点,为深部煤储层增产改造提供坚实的技术支撑。

业界相关领域的专家学者针对煤层气甜点评价相继开展过卓有成效的研究工作。张亚飞等采用层次分析和灰色定权聚类方法构建评价模型,从煤储层含气量、厚度、地应力环境和岩石力学性质等角度探讨了储层可改造性,以原生结构煤和碎裂煤占比、临储比和储层原始渗透率评价储层可采性,最终采用聚类方法分级划分了煤层气开发甜点^[4];董银萍等翔实剖析了能够有效表征煤储层渗透性的流体活动因子,并采用高精度匹配跟踪算法从地震信号中提取了该因子,进而精细刻画了煤层气甜点^[5];Ahmad Helman Hamdani等根据地震资料提供的良好断层和煤储层地层学图像,并结合测井和声阻抗反演来分析煤储层分布和割理方向,该法已成功圈定了煤层气甜点区^[6];Liu Zhidi等利用测井解释模型结合煤储层岩心实验数据,构建了煤体结构指数、脆性指数、裂隙发育程度和地应力等4个参数计算模型,进而建立了煤层气储层工程甜点定量化表征模型^[7];刘高峰等从煤层气富集高产选区角度出发,优选了影响煤

层气高效开发的地质-工程甜点评价参数,并采用模糊模式识别模型评价了煤层气开发地质甜点^[8];闫霞等系统分析了煤层气地质、测-录井、压裂和生产等动、静态资料,发现微观构造对煤层气高产起关键作用,进而提出了基于微幅度构造差异特征的煤层气甜点预测方法^[9];Zhao Chengqiang等基于梯度结构张量(GST)方法,在三维空间中展示了煤储层的裂缝网络,用阈值滤波直方图表征了裂缝网络的频率响应,发现裂缝网络交错密集区域即为煤层气的理想甜点区^[10];桑树勋等认为裂缝发育程度是预测深部煤层气地质甜点的关键因素,而储层可改造性则是深部煤层气工程甜点评价的核心因素^[11];杨磊等分析了煤储层测井响应特征,筛选了敏感性测井参数,构建了煤体结构指数、含水产气指数、含气量、含气饱和度和临界解析压力等参数的测井解释模型,由此组关键参数建立了煤层气甜点划分标准^[12]。

综上所述,业界相关领域的专家学者针对深部煤层气地质-工程甜点优选开展了卓有成效的研究,在各自的研究区块取得了良好的应用效果。然而,从地球物理测井角度,开展深部煤层气甜点优选的研究成果相对较少,且评价精度仍有待提升^[13-14];再者,地质-工程一体化测井评价技术尚需完善^[15]。鉴于此,本研究基于地质-工程一体化的思想,实现鄂尔多斯盆地DJ区块深部煤储层地质-工程甜点测井评价,以期深部煤层气开发过程中压裂射孔选段提供测井技术支撑。

1 地质概况

DJ区块行政上隶属于河东地区山西省永和、大宁、吉县和隰县,地质上位于晋西挠褶带南端与伊陕斜坡东南缘,北与石楼西区块、长庆子洲—清涧区块相接,南临宜川—黄龙区块和延川南区块,西边为延安—

延长区块^[16],黄河从区块西部穿过(图1)。该区块位于华北地台之上,属过渡性质的台地型构造盆地,古近纪末发生了以断裂为主的喜马拉雅运动,使本区的构造进一步复杂化,出现了更多的断裂^[17],构成了现代地貌的基本轮廓;中生代以来先后主要经历了印支期、燕山期和喜马拉雅期构造应力场作用。

区块整体表现为自东向西倾向的巨大单斜构造,具有“一坳、一隆、两斜坡带”的构造形态特征,即中部的薛关-峪口坳陷和古驿-窑渠隆起以及东、西2个斜坡带。中部坳陷带贯穿整个区块,且在坳陷带周围发育大量断层,但总体规模较小,产状一致性程度高,倾角分布在 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$;薛关-峪口向斜总体走向为NNE向,全长约40.0 km;古驿-窑渠背斜位于薛关-峪口向斜西北方向约3.5 km处,与之相互平行。东缘发育SN向紫荆山断裂带,东南缘发育乡宁断裂带,受边界断裂带的影响,东缘和东南缘发育NE-SE向系列构造^[18]。地层由老至新依次为中奥陶统马家沟组、上石炭统本溪组、上石炭统-下二叠统太原组、下二叠统山西组、中二叠统石盒子组、上二叠统石千峰组、下三叠统刘家沟组和第四系。主要含煤地层为太原组和山西组,主力煤储层是山西组5#煤层和太原组8#煤层,主体埋深

在2 000~2 400 m,5#煤储层厚度较薄,为1~3 m;8#煤储层厚度较大,为5~12 m,是主要勘探目的层,其煤储层构造简单,断层不发育^[19],局部地区小背斜发育,顶板发育2~3套灰岩,直接顶板灰岩厚度为4~8 m;底板发育泥岩,直接底板泥岩厚度4~14 m。区块埋深大于1 500 m的区域煤储层分布广、连续稳定,厚度为4~12 m,平均厚度(垂厚)7.5 m,厚度变异系数为68.50%,夹矸0~2层,见煤率100%;煤储层以原生结构煤为主,割理裂隙发育。结合煤心照片和岩心描述,对数百块取心资料进行整理发现,8#煤层主要以原生结构煤为主,浅层主要以构造煤为主,煤热演化程度高,以贫煤和无烟煤为主;孔隙度为5.95%~7.45%,平均值为6.79%,按天然气藏分类属于低孔气藏,封盖条件好、水动力弱,整体处于承压区。

2 煤层气储层及工程品质主控因素

2.1 主控因素优选及测井获取方法

深部煤储层多因素相互耦合作用决定了煤层气资源的富集程度,进而控制着煤层气的开发效果。煤体

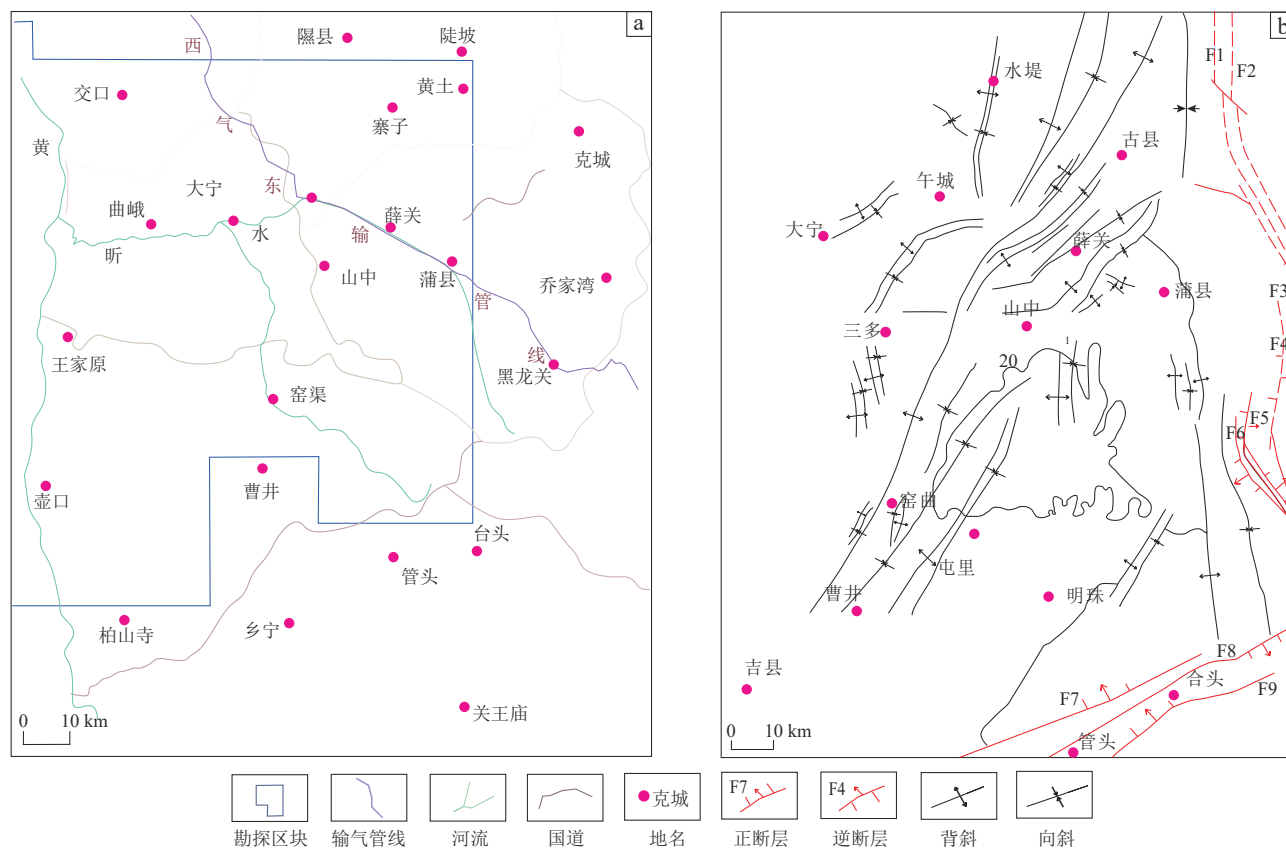


图1 鄂尔多斯盆地DJ区块地理位置(a)和构造分布(b)

Fig. 1 Geographic location (a) and structural distribution (b) of the DJ block, Ordos Basin

结构、煤工业组分、煤层物性及含气性等特征参数,是地质甜点预测应该考虑的主控因素^[20];工程甜点预测的挑战在于特殊的岩石力学性质增加了水力压裂缝网的形成难度^[21-22],但深部煤储层原生煤体结构和割理、裂隙发育的地质特点又为压裂射孔提供了有利的地质条件,大规模体积压裂是深部煤层气高效开发的关键^[23]。因此筛选能够直接反映深部煤储层地质-工程双甜点的评价指标显得十分重要,需要综合考虑地应力特征、煤岩基质结构、微裂隙的发育、非均质性及顶、底板与煤储层的力学特性等多重因素^[21,24]。

归纳梳理深部煤层气甜点评价和有利区优选相关文献,结合研究区勘探开发生产实践,得到的共识是影响煤层气高效开发的2大因素为储层及工程品质,探明其主控因素是进行深部煤储层地质-工程甜点区精准评价的关键。地质甜点预测以寻找煤层气资源的相对富集区为目标,主要以煤储层有效厚度、埋深、热演化程度、煤体结构、含气性、天然裂隙、圈闭条件、孔隙结构、储层压力、非均质性强弱、渗流能力、生烃潜力、岩性密度和工业组分等地质参数作为评价指标^[19];工程甜点预测以优选适合射孔压裂的层段为目标,主要以岩石力学参数(脆性指数、断裂韧性、弹性模量、泊松比、抗压强度、抗拉强度)、应力差异特征、裂缝展布规律、顶-底板与煤储层的模量差、侧压系数和有效应力等工程参数作为评价指标^[14]。为此,总结出与地质-工程甜点评价相关的33项具体指标,其中储层品质相关指标18项,包括煤体结构、含气量、含气饱和度、孔隙压力、孔隙结构指数、有效厚度、埋深、裂缝发育指数、非均质性指数、孔隙度、渗透率、裂缝孔隙度、裂缝渗透率、固定碳含量、灰分含量、全烃含量、光电吸收截面指数和总有机碳含量;工程品质相关指标15项,包括脆性指数、断裂韧性、弹性模量、切变模量、体积模量、泊松比、抗压强度、抗拉强度、水平应力差异系数、侧压系数、煤储层与围岩应力差、破裂压力、顶-底板与煤储层的弹性模量比、闭合压力和有效应力。

本研究基于SPSS数据统计分析平台,利用皮尔逊相关性分析法对上述33项相关指标进行优选,以获取最能够反映深部煤储层品质及工程品质的若干指标,作为地质-工程甜点评价的主要指标。皮尔逊相关性分析是一种用来衡量2个连续变量之间线性关系强度和方向的统计方法,该法适用于连续变量,且假定变量之间的关系是线性的,可用来检验2个变量之间是否存在相关性,以及相关性的强度和方向^[25],其计算的基本原理和步骤如下。

① 样本协方差

皮尔逊相关性分析中,首先计算2个变量的样本协方差。样本协方差度量了2个变量的变化趋势是否一致。如果变量同时增加或减少,则协方差为正;如果一个变量增加而另一个减少,则协方差为负。样本协方差Cov(X, Y)的计算公式如下:

$$\text{Cov}(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n - 1} \quad (1)$$

式中: X_i 和 Y_i 分别为2个变量的第*i*个观测值,无量纲; $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 分别为2个变量的样本均值,无量纲; n 为样本容量,无量纲。

② 样本方差

样本方差度量的是一个变量的观测值如何分散在其均值周围。样本方差计算的是每个观测值与均值之差的平方和的平均值。样本方差的计算公式如下:

$$\text{Var}(X) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1} \quad (2)$$

$$\text{Var}(Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n - 1} \quad (3)$$

③ 皮尔逊相关系数

计算皮尔逊相关系数时,将样本协方差除以2个变量的标准差的乘积,以消除变量的量纲影响^[26-28]。皮尔逊相关系数*r*的计算公式为:

$$r = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{Var}(X)\text{Var}(Y)}} \quad (4)$$

式中: r 介于 $[-1, 1]$,无量纲,其绝对值越大,代表相关性越高。

基于上述方法原理和步骤,对地质-工程甜点相关的33项指标进行优选。实际优选中,储层品质参数与日产气量、工程品质参数与压裂时携砂液阶段的施工压力进行相关性分析。基于SPSS平台分2类进行定量化相关性*P*值(*Pear*)和显著性*S*值(*Sig*)判定:①18项储层品质相关指标与日产气量逐个计算*P*值和*S*值;②15项工程品质相关指标与携砂液阶段的施工压力逐个计算*P*值和*S*值,进而根据*P*值的绝对值筛选储层品质及工程品质的主控因素。计算结果如表1所示。

根据皮尔逊相关性分析法判断规则,可以明确的是所列出的33项地质-工程甜点相关指标均与产能或施工参数具有显著性及相关性,但各指标对应的*P*值和*S*值差异性明显(表1),这充分说明进行主控因素的合理优选是提高地质-工程甜点评价精度的重要前提。首先通过 $S \leq 0.002$ 规则,筛选出与储层及工程品

表1 DJ区块地质-工程甜点相关指标计算统计结果

Table 1 Statistics for the calculated indices related to geological-engineering sweet spots

序号	储层品质相关指标	Pear	Sig	序号	工程品质相关指标	Pear	Sig
1	煤体结构指数(I_{cs})	+0.807***	0	1	脆性指数(BI)/%	+0.801***	0
2	含气量(V_g)/(m ³ /t)	+0.844***	0	2	断裂韧性(K_{Ic})/(MPa·m ^{1/2})	-0.712***	0.001
3	含气饱和度(S_g)/%	+0.545**	0	3	弹性模量(EML)/MPa	-0.615**	0.003
4	孔隙压力(p)/MPa	+0.637**	0.002	4	切变模量(GML)/MPa	-0.596**	0.009
5	孔隙结构指数(P_{si})	+0.792***	0	5	体积模量(KML)/MPa	-0.588**	0.010
6	有效厚度(H_e)/m	+0.507**	0.001	6	泊松比(μ)	+0.439*	0
7	埋深(Dep)/m	+0.625**	0.006	7	抗压强度(S_c)/MPa	-0.474*	0.002
8	裂缝发育指数(I_f)	+0.821***	0	8	抗拉强度(S_t)/MPa	-0.587**	0.002
9	非均质性指数(I_{hr})	-0.629**	0.001	9	水平应力差异系数(K_h)	-0.698**	0.002
10	孔隙度(Φ)/%	+0.550**	0.018	10	侧压系数(λ)	+0.653**	0
11	渗透率(K)/(10 ⁻³ μm ²)	+0.531**	0.023	11	煤储层与围岩应力差(Y_{lc})/MPa	+0.508**	0.001
12	裂缝孔隙度(Φ_f)/%	+0.535**	0.005	12	破裂压力(p_t)/MPa	-0.496*	0.036
13	裂缝渗透率(K_f)/(10 ⁻³ μm ²)	+0.496*	0.036	13	顶底板与煤储层弹性模量比(E_{df})	+0.766***	0
14	固定碳含量(FC)/%	+0.331*	0.040	14	闭合压力(p_c)/MPa	-0.604**	0.008
15	灰分含量($VASH$)/%	-0.509**	0.001	15	有效应力(σ_e)/MPa	-0.647**	0.004
16	全烃含量(qt)/%	+0.602**	0.038				
17	光电吸收截面指数(Pe)/(b/eV)	-0.477*	0.045				
18	总有机碳含量(TOC)/%	+0.548**	0.019				

注: *Pear*代表*P*值,即相关性系数(“+”表示正相关;“-”表示负相关)。*Sig*代表*S*值,即显著性系数(皮尔逊显著性检验用于确定相关系数是否在总体中是显著不同于零的,以确定两个变量之间的关系是否真实,或排除由于抽样误差所导致的随机现象,若*S*≤0.05,则两个指标具有显著性关系,其中*S*≤0.002表示强显著性;若*S*>0.05,则两个指标不具有显著性关系)。“*”表示弱相关,0.3<*P*<0.5;“**”表示中等相关,0.5≤*P*<0.7;“***”表示强相关,0.7≤*P*<1。

质相关的强显著性参数,然后通过比较*P*值绝对值大小,筛选出强相关及部分中等相关参数(*P*≥0.6)。根据对数据的综合分析,本研究最终优选出12项地质-工程主控因素(评价指标)。储层品质共6项主控因素,分别是煤体结构、储层压力、孔隙结构指数、含气量、裂缝发育指数和非均质性指数;工程品质共6项主控因素,分别是脆性指数、断裂韧性、抗拉强度、水平应力差异系数、侧压系数和顶、底板与煤储层的弹性模量比。

2.1.1 储层品质主控因素测井获取方法

1) 煤体结构指数

煤体结构是煤储层构造演化过程的反映,影响煤储层气井压裂射孔层位的优选,以及储层内煤层气的高效渗流。煤体结构反映了煤储层的完整性程度,深层煤可分为原生结构煤、裂隙煤、碎粒煤和糜棱煤^[20],其中原生结构煤储层通常保存完好、含气量高、易于水力压裂改造以及产气量高;碎裂煤和碎粒煤呈现破碎和粒状结构,煤储层已严重受损,导致含气量低;糜棱煤则为粉末状,不具备生产潜力。基于前人对煤体结构量化研究的基础,本研究重点对不同煤体结构测

井响应特征及室内分析化验资料进行了对比,发现密度、声波时差、电阻率和井径等测井参数针对不同煤体结构煤储层具有良好的响应关系,总体呈现“两高两低”的响应特征,即煤体结构越接近于原生结构煤,则密度和电阻率呈高值,声波时差和井径呈低值;反之,则呈相反特征。该类响应特征被室内分析化验的结构及节理分析所证明(表2)。

根据前人研究结果及测井曲线对不同煤储层中煤体结构呈现的差异化响应特征,认为不同测井信息(密度、声波时差、电阻率和井径)对煤储层煤体结构的区分具有较为显著的效果。刘之的等利用密度、声波时差、电阻率和井径等测井参数构建煤体结构指数模型^[29],其计算公式为:

$$I_{cs} = 100 \frac{\rho_b}{\Delta t_c} \lg \frac{RT}{CAL}$$

(5)

式中: ρ_b 为煤储层密度, g/cm³; Δt_c 为纵波时差, μs/ft; RT 为原状煤储层电阻率, Ω·m; CAL 为井径, in。

2) 储层压力

Eaton模型综合考虑了地层的压实作用机制,总结和参考了钻井测量压力与各种测井信息之间的联系^[30]。但是,当实际测井数据偏离正常压实趋势线

表2 DJ区块不同煤体结构测井响应特征及室内分析化验资料对比结果

Table 2 Comparison of logging responses with laboratory test results for different coal structures

煤体结构	结构和节理特征	密度	声波时差	电阻率	井径	照片
		DEN/(g/cm³)	AC/(μs/ft)	RT/(Ω·m)	CAL/in	
		13	50180	22000	168	
糜棱煤	煤体呈粉末状、鳞片状，原生层理及裂隙消失，煤体极疏松无法识别结构面，裂隙无法观测，含大量鳞片状褐灰色泥岩矸石					
碎裂煤	煤心较完整，主要呈短柱状，样品呈灰黑色、深棕色条痕，总体光泽弱，煤岩成分以暗煤为主，棱角状断口，煤体性脆易碎					
碎粒煤	煤体较破碎，以粒径小于5 mm粒状为主，约占60%，少量呈块状碎粒结构，样品呈灰黑、棕黑色条痕，煤岩成分以暗煤为主					
原生结构煤	煤心完整且呈柱状，样品呈黑色、深棕色条痕，总体光泽弱，煤岩成分以暗煤为主，棱角状断口，煤体疏松					

时,该模型从正常压实开始计算砂、泥岩地层的孔隙压力,然而砂、泥岩与煤储层在孔隙结构、应力-应变关系和岩性特征等3个方面存在显著差异,导致地层压实规律出现偏差。砂、泥岩孔隙结构相对均匀且较为稳定,其地层压实趋势线为线性或接近线性^[31];煤储层受其弱脆性、较高塑性及煤体结构的影响,同时煤储层与顶板灰岩和底板泥岩之间存在明显岩性变化,在地层压实过程中呈现出较为离散的应力-应变行为,使其压实趋势线出现较大的不均匀性。因此从理论上明确了Eaton模型求取储层压力的关键在于获取煤储层正常压实趋势的纵波时差,即变指数纵波时差,结合DJ区块深部煤储层特征,建立了改进的变指数伊顿模型,其计算公式为:

$$p = \sigma_v + (p_w - \sigma_v) \frac{QSAC}{\Delta t_c} \frac{1}{C} \quad (6)$$

式中: σ_v 为上覆岩层压力,MPa; p_w 为静液柱压力,MPa; $QSAC$ 为煤储层基于正常压实趋势的纵波时差,μs/ft; C 为地层压实系数,无量纲。

利用变指数Eaton模型求取煤储层压力,需要根据

地层压实趋势理论和实际区块的测井资料,建立适用于研究区的变指数纵波时差获取方法。通过提取DJ区块多口典型井深部煤储层的声波时差及垂深数据,得到 $\ln(AC)$ 与 TVD 的线性回归关系(图2),由此得到

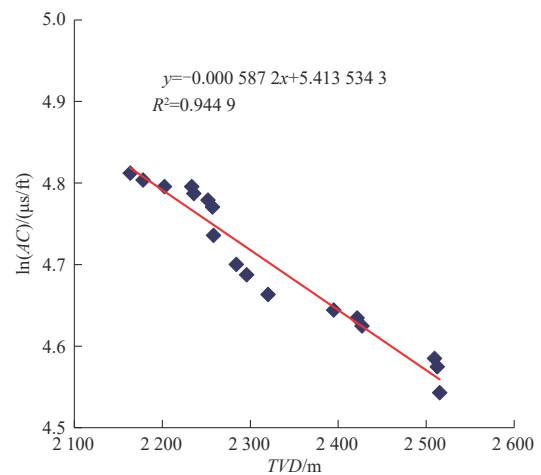


图2 $\ln(AC)$ 与 TVD 的线性回归关系图版

Fig. 2 Chart showing the linear regression between $\ln(AC)$ and TVD

QSAC,见公式(7)。

煤储层的压实系数与砂、泥岩也存在显著区别,砂、泥岩的结构可以分为以骨架形式存在的砂及以基质形式存在的碎屑和黏土,骨架和基质的不同组合比例决定了压实系数的大小,它决定着储层压力对地应力的影响能力。传统的压实理论认为纯砂岩的骨架刚度足够抵消孔隙压力的影响,压实系数以因子形式给出,常介于0.9~1.0^[32],而煤储层中固定碳作为主要成分,弱脆性明显、泊松比较高、弹性模量低,传统的压实理论无法正确描述煤储层骨架的刚度。因此假设相同储层压力对岩石应力的影响因弹性模量的不同而有所变化,则可以根据动态泊松比和杨氏模量获取煤储层的压实系数 C ,见公式(7):

$$\begin{cases} \ln(AC) = -0.0005872TVD + 5.4135343 \\ QSAC = e^{-0.0005872TVD + 5.4135343} \\ C = \frac{3(1 - 2\mu_d)}{E_d} \end{cases} \quad (7)$$

式中: TVD 为未测密度测井的地层垂深,m; μ_d 为煤储层动态泊松比,无量纲; E_d 为煤储层动态杨氏模量,MPa。

利用密度测井曲线获取垂向应力(上覆岩层压力),张美玲等发现它是随着地层密度和深度而变化的^[33],采用分段求和的方法计算 σ_v ,见公式(7):

$$\sigma_v = 0.00981 \left[\rho_b \times TVD + \sum_{i=1}^n (\rho_i \times \Delta D_i) \right] \quad (8)$$

式中: ρ_b 为未测井段的地层平均密度(常取2.31),g/cm³; ρ_i 为动态密度测井值,g/cm³; ΔD_i 为垂直深度采样间隔,m; n 为采样间隔数量,无量纲。上述获取公式中涉及的动态数据即是来源于测井资料,这有区别于实验室获取的静态资料。

3) 孔隙结构指数

深部煤储层孔隙结构较为复杂,属于典型的双重孔隙结构介质(基质孔隙和裂隙网络),该结构的形状、

大小、孔隙度和连通性决定了煤层气的储存、运移和生产。在反映储层品质方面,孔隙结构为储层提供了储存空间,也影响了渗透率特征,储层的微观孔隙结构比宏观物理性质的影响更大,进而影响储层的测井响应特征。孔隙结构指数集中反映了储层渗透率与孔隙度之间的关系^[34],能够从宏观上清楚表征储层的渗流特性,且无需通过扫描电镜、薄片观察和压汞等实验手段就能描述产能潜力,其计算公式为:

$$P_{si} = \sqrt{\frac{K}{\Phi}} \times 100\% \quad (9)$$

式中: K 为煤储层总渗透率,10⁻³ μm²; Φ 为煤储层孔隙度,%。

4) 含气量

含气量是反映煤层气生产、成藏和保存效果的最直接参数,是影响煤层气井产能的重要因素,随着含气量的增加煤层气井产能呈增加趋势^[35]。含气量的获取可以根据岩心刻度测井的原理,使用室内实测含气量数据与常规测井参数之间的相关性,建立回归模型,进而确定出含气量测井计算方法,刘之的发现密度测井能够较好地反映深部煤储层的含气量,而声波时差和补偿中子孔隙度测井亦具有一定的敏感性^[20]。本研究在该响应特征的基础上,利用DJ区块室内含气量分析实测资料与密度、声波时差和补偿中子孔隙度等测井参数建立回归图版(图3),进一步验证了3条孔隙度测井曲线与含气量之间确实存在良好的相关性,可以用于含气量建模。

因此利用密度、声波时差和补偿中子孔隙度3个测井参数,在煤心含气量分析化验及资料归位的基础上,构建了深部煤储层多参数含气量测井解释模型,其计算公式为:

$$V_g = -6.401\rho_b + 0.033\Delta t_c + 0.232CNL - 4.844 \quad (10)$$

式中: CNL 为补偿中子孔隙度,%。

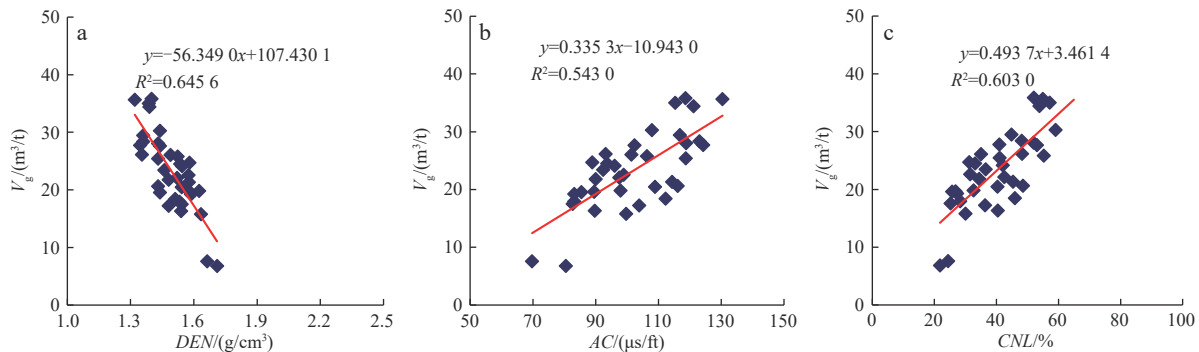


图3 DJ区块煤层三孔隙度测井曲线与实测含气量(V_g)的相关性回归图版

Fig. 3 Regression charts showing the correlation between three porosity logging curves and measured gas content

a. 补偿密度(DEN); b. 声波时差(AC); c. 补偿中子孔隙度(CNL)

5) 裂缝发育指数

不同类型的测井曲线对储层中裂缝的响应机理与敏感程度存在差异,由裂缝所导致的分形维数异常在总异常中所占的比重是不同的。黄沛铭发现由于钻井泥浆等低速液体物质的充注,声波传播速度会在地层中裂缝发育的位置发生显著的变化,从而导致声波时差测量值具有明显增大乃至发生周波跳跃现象^[36];此外,当地层中存在天然裂缝尤其是未充填裂缝时,也会使其所在位置的密度和电阻率的测量值显著减小,所以这3条测井曲线的分形维数对煤储层裂缝的存在具有较强的刻画能力。本研究在该思想的基础上,为了明确声波时差、密度和电阻率对裂缝发育程度的具体贡献度,引入泊松比来量化裂缝发育指数,具体机理是裂缝的形成会导致岩石内部的孔隙结构和应力分布状态发生变化,一是增加的孔隙率或孔隙连通性会降低岩石的泊松比;二是在裂缝周围应力会大幅度集中,这种局部变形会引起岩石的非线性行为,从而影响泊松比^[37]。故根据公式(11)来量化DJ区块的裂缝发育程度(裂缝发育指数标定值),利用声波时差、密度和电阻率等测井参数与该值建立线性关系,以明确3条测井曲线对裂缝发育程度的具体贡献度,从而得到高精度的裂缝发育指数获取方法。

$$I_{\mu} = \frac{\mu_0 - \mu}{\mu_0} \times 100\% \quad (11)$$

式中: I_{μ} 为裂缝发育指数标定值,无量纲; μ_0 为无裂缝状态下的泊松比,小数; μ 为有裂缝状态下的泊松比,小数。

通过建立线性关系,明确了密度、声波时差和电阻率等测井参数与裂缝发育指数标定值的相关性分别约为0.18、0.29和0.53,由于该数据来自DJ区块同一层位,可将其相关性类比为反映裂缝发育程度的具体贡献度。因此本研究根据密度、声波时差和电阻率测井参数构建了煤储层裂缝发育指数,该值越大表示裂缝越发育,其计算公式为:

$$k_f = 0.18k_{DEN} + 0.29k_{AC} + 0.53k_{RD-RS} \quad (12)$$

式中: k_{DEN} 为标准化的密度测井值,无量纲; k_{AC} 为标准化的声波时差,无量纲; k_{RD-RS} 为标准化的深、浅侧向电阻率差值,无量纲。

6) 非均质性指数

煤层气开采中的夹矸(夹石)是指煤储层中夹带的非煤岩性物质,受沉积环境、成岩作用及构造作用的影响,在空间分布及内部各种属性上都存在不均匀的变化,它对煤储层的非均质性和煤层气的产能有一定的影响。夹矸相比煤储层通常具有较低的孔隙度和渗透率,这导致了煤储层内部渗透性的差异,影响煤层气的

储集和渗流;另外夹矸与煤储层相互交错时,可能形成一些裂缝或断层,这些裂缝会影响煤层气的流动路径,而裂缝的分布对煤层气的采收和注入有一定的影响。因此本研究借鉴砂岩的非均质性表达思想(砂岩以渗透率参数描述非均质性,包括渗透率变异系数、突进系数和极差)^[38],定义了煤储层非均质性指数,即利用夹矸取代渗透率来定量描述煤储层非均质性程度,这是根据上述理论并结合生产实践经验总结而来,对夹矸变异系数、突进系数、极差以求取乘积的方式进行数学融合,目的是综合考虑夹矸的厚度、层数和煤储层的平均厚度对煤层气富集程度的影响,该值越大表示煤储层非均质性越强,其计算公式为:

$$I_{hr} = \frac{h_{d,max}^2}{H_{cav} h_{d,min} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(h_i - H_{cav})^2]}} \quad (13)$$

式中: h_i 为某单层夹矸厚度,m; H_{cav} 为各煤储层厚度的平均值,m; n 为夹矸总层数,无量纲; $h_{d,max}$ 为夹矸最大厚度,m; $h_{d,min}$ 为夹矸最小厚度,m。

2.1.2 工程品质主控因素测井获取方法

1) 脆性指数

脆性是岩石在外力作用下直至破碎而无明显的形状改变,是反映岩石破碎前不可逆形变中没有明显吸收机械能量的参数。脆性煤储层在压裂时容易破碎而形成复杂裂缝,在裂缝闭合阶段支撑剂的嵌入会使导流能力大幅上升,进而形成明显的增产效果,所以煤储层的脆性越大,起裂压力越小,裂缝越容易延伸,压裂效果越好。张亚飞提出采用泊松比和杨氏模量1:1贡献的比例,使用闭合因子法求取煤储层脆性指数^[4],其计算公式为:

$$BI = \frac{1}{2} \left(\frac{E_d - E_{d,min}}{E_{d,max} - E_{d,min}} + \frac{\mu_d - \mu_{d,min}}{\mu_{d,max} - \mu_{d,min}} \right) \quad (14)$$

其中,动态泊松比和动态杨氏模量根据测井资料进行求取。范宜仁等根据波动理论,利用偶极阵列声波测井得到的纵、横波时差和密度测井得到的体积密度来计算这些表征岩石力学特征的参数^[39]。

$$\begin{cases} \mu_d = (0.5 \frac{\Delta t_s^2}{\Delta t_c^2} - 1) / (\frac{\Delta t_s^2}{\Delta t_c^2} - 1) \\ E_d = \frac{\rho_b (1 + \mu_d) (1 - 2\mu_d)}{(1 - \mu_d) \Delta t_c^2} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $E_{d,max}$ 和 $E_{d,min}$ 分别为煤储层动态杨氏模量的最大值和最小值,MPa; $\mu_{d,max}$ 和 $\mu_{d,min}$ 分别为煤储层动态泊松比的最大值和最小值,小数; Δt_s 为煤储层横波时

差, $\mu\text{s}/\text{ft}$ 。

2) 抗拉强度

煤储层抗拉强度是指煤岩在单轴拉应力作用下达到破坏时所承受的最大拉应力,直接决定了压裂改造的难易程度,是评价煤储层工程品质的力学参数之一。由于煤岩节理和割理较为发育,以试验方法获取煤储层抗拉强度较为困难,经生产实践发现,煤储层抗拉强度与杨氏模量和泥质含量密切相关,其中抗拉强度采用实验室测试值,共33个数据点,据此进行非线性曲面拟合(图4a),其计算公式为:

$$S_t = 0.000375E_d(1 - 0.78V_{sh}) \quad (16)$$

式中: V_{sh} 为煤储层泥质含量, %。

3) 断裂韧性

断裂韧性是一项表征储层改造难易程度的重要因素,该参数的准确获取对工程品质评价具有重要意义。当深部煤储层具有较小的断裂韧性时,天然裂缝(不在水力裂缝延伸路径上)极有可能在水力诱导应力作用下发生剪切破坏,一旦压裂缝有效地沟通天然裂缝就会造成复杂缝网^[40]。因而较小的断裂韧性对深部煤储层的可压性具有积极作用。根据DJ区块生产实践发现,煤储层断裂韧性与抗拉强度和泥质含量存在良好的相关性,其中断裂韧性指数亦采用实验室测试值,共33个数据点,据此进行非线性曲面拟合(图4b),其计算公式为:

$$K_{ic} = (0.1344 + 0.2196V_{sh})S_t - 0.1984 \quad (17)$$

式中: K_{ic} 为断裂韧性指数, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$ 。

4) 水平应力差异系数

地应力对裂缝形态的控制主要体现在水平主应力

差的大小上,Keshavarz等研究发现煤储层在压裂过程中压裂液进入割理及微裂缝的同时形成新的裂缝,如果水平主应力差小,裂缝将在多个方向上延伸,最大水平主应力与最小水平主应力之差与最小水平主应力之间的比值定义为地应力差异系数^[41-42]。在天然裂隙存在的情况下,压裂缝在不同水平主应力差条件下的延伸和扩展规律存在显著差异,当最大水平主应力与最小水平主应力差异很大时,压裂将形成沿最大水平主应力方向的窄长裂缝;当最大水平主应力与最小水平主应力差异很小时,压裂将形成方向性较差的复杂裂缝网络^[43],这对工程品质评价具有重要意义。其计算公式为:

$$K_h = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{\sigma_h} \quad (18)$$

式中: σ_H 为最大水平主应力, MPa; σ_h 为最小水平主应力, MPa。

其中,水平主应力利用组合弹簧(Shannon)模型求取。Shannon假定地层在构造运动过程中位置相对固定,则水平方向的应变均为常数,这一假设实质上克服了黄氏模型的不足,据此,引入弹性参数和水平应变后提出了组合弹簧(Shannon)模型^[42]。

$$\begin{cases} \sigma_H = \frac{\mu_d}{1 - \mu_d} (\sigma_v - \alpha p) + \alpha p + E_d \frac{\varepsilon_H + \mu_d \varepsilon_h}{1 - \mu_d^2} \\ \sigma_h = \frac{\mu_d}{1 - \mu_d} (\sigma_v - \alpha p) + \alpha p + E_d \frac{\varepsilon_H + \mu_d \varepsilon_h}{1 - \mu_d^2} \end{cases} \quad (19)$$

式中: α 为有效应力系数,无量纲; ε_H 为最大水平主应力方向的应变, mm; ε_h 为最小水平主应力方向的应变, mm。

5) 侧压系数

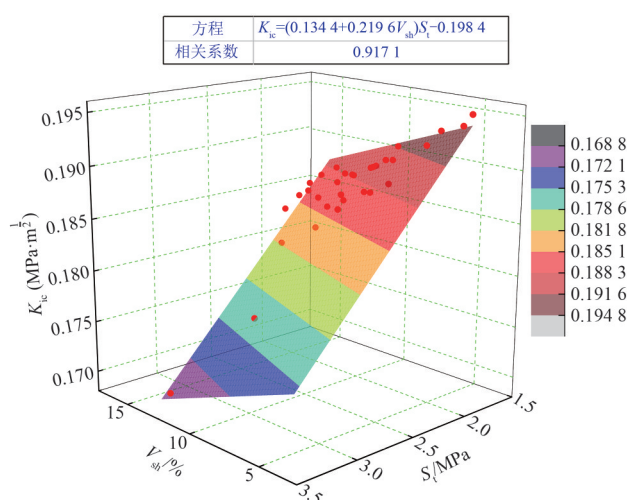
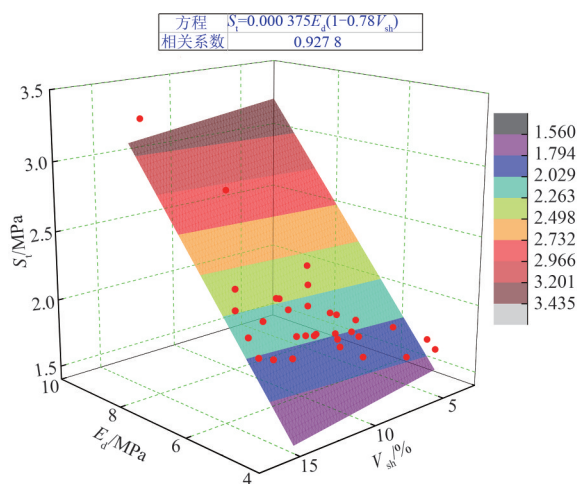


图4 抗拉强度参数与断裂韧性指数的非线性曲面拟合求取图版

Fig. 4 Regression- charts showing the non-linear surface fitting of tensile strength and fracture toughness

a. 杨氏模量、泥质含量与实测抗拉强度非线性拟合关系;b. 泥质含量、抗拉强度与实测断裂韧性指数非线性拟合关系

侧压系数是指对煤储层在进行水力压裂时,为了煤岩能够破裂并形成优质缝网,需要施加足够的水力应力来克服岩石的强度,为使压裂施工作业顺利推进,需要调整侧向应力和水力应力的比值,即侧压系数来控制岩石的破裂情况。钱鸣高等研究发现施加在岩石上的侧向应力越大,岩石就更容易受到剪切和破裂,因此压裂时追求较大的侧压系数^[44],其计算公式为:

$$\lambda = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2\sigma_v} \quad (20)$$

式中: λ 为侧压系数,无量纲。

6) 顶、底板与煤储层弹性模量比

煤储层与顶、底板间力学参数的差异对煤储层增产改造有很大影响,特别是弹性模量对工程品质评价及可压性的影响尤为突出^[30]。在水力压裂过程中,围岩的高弹性模量对控制缝高较为有利,随围岩与煤储层弹性模量差异的增大,裂缝高度逐渐减小,后期逐渐平稳。陈同刚等研究发现煤储层与顶、底板岩石的弹性模量存在较大差异时,水力压裂裂缝更易控制在煤储层中,且延伸更长更远,因此该比值越大对缝高的控制越有利,利于裂缝在煤储层内延展^[43,45],其计算公式为:

$$E_{rf} = \frac{E_{dr} + E_{df}}{2E_d} \quad (21)$$

式中: E_{dr} 煤储层顶板弹性模量,MPa; E_{df} 为煤储层底板弹性模量,MPa。

2.2 主控因素相关性排序

根据上述优选出的12项地质-工程甜点主控因素,通过大量的资料调研和测录井及试气资料分析,并结合DJ区块生产实践经验,总结发现地质-工程甜点(实际开发甜点)主控因素与产能施工压力比(煤层气井日产气量与携砂液阶段施工压力的比值, I_p)存在良好的相关性。 I_p 反映煤层气井实际生产能力与压裂改造间的量化关系,数值越大,表明生产效能越好,其计算公式如下:

$$I_p = \frac{Q_d}{p_c} \quad (22)$$

式中: I_p 为产能施工压力比,无量纲; Q_d 为日产气量, m^3 ; p_c 为压裂作业时携砂液阶段的施工压力,MPa。

为确定地质-工程甜点主控因素与 I_p 的相关程度,需要做出12项主控因素与 I_p 的相关性图版,从而分析并确定 I_p 与各因素之间的相关程度,为基于层次分析法(AHP法)建立深部煤储层地质-工程甜点测井评价模型提供赋权依据。地质-工程甜点主控因素与 I_p 的相关性如图5所示,储层品质主控因素中,含气量、裂

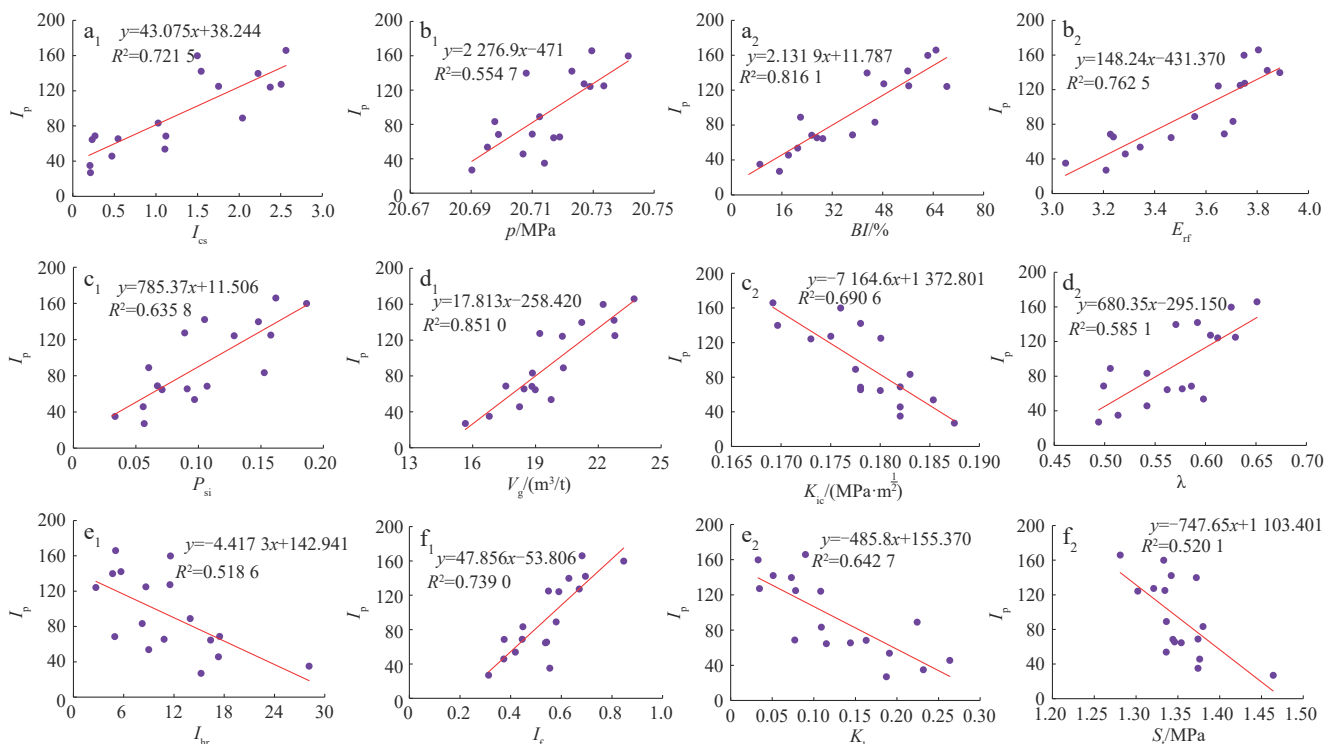


图5 DJ区块地质-工程甜点主控因素与产能施工压力比(I_p)的相关性回归图版

Fig. 5 Regression charts showing the correlations between the major determinants of geological-engineering sweet spots and I_p
a₁. 煤体结构指数; b₁. 储层压力; c₁. 孔隙结构指数; d₁. 含气量; e₁. 非均质性指数; f₁. 裂缝发育指数; a₂. 脆性指数; b₂. 顶、底板与煤储层的弹性模量比; c₂. 断裂韧性; d₂. 侧压系数; e₂. 水平应力差异系数; f₂. 抗拉强度

缝发育指数、煤体结构指数、孔隙结构指数、储层压力和非均质性指数与 I_p 的相关性依次降低;工程品质主控因素中,脆性指数、顶-底板与煤储层的弹性模量比、断裂韧性、水平应力差异系数、侧压系数和抗拉强度与 I_p 的相关性依次降低。

3 地质-工程甜点测井评价模型的建立

3.1 建模原理及流程

由于上述优选的地质-工程甜点主控因素与 I_p 存在不同的相关性,本研究采用层次分析法(AHP法)对各因素(指标)进行赋权,其确定依据即是相关系数越大则所对应的权重系数亦越大。利用AHP法确定的各评价指标的权重系数,采用加权法构建DJ区块深部煤储层地质-工程甜点测井评价模型。结合煤心分析测试、测、录井、压裂和生产动态等,确定了DJ区块深部煤储层的地质-工程甜点分类评价标准,并在Forward. Net测井解释平台上将该评价模型和标准程序化,实现对研究区深部煤储层地质-工程甜点可视化逐点处理与评价。

3.2 AHP法确定权重

AHP(Analytic Hierarchy Process)法是一种多因素决策方法,它可以在不同的因素之间进行权重分配。该方法的原理是将决策问题分解为若干个层次,每个层次上包含若干个因素,最终通过对各层次因素的比较,确定各因素的权重分配,从而得出最终的决策结果^[46],AHP法包括以下5个步骤。

1) 确定层次结构

将决策问题分解为若干个层次,并确定各层次之间的关系。

根据决策目标、考虑因素(决策标准)以及决策目标的相关性,将其划分为最高层、中间层和最底层,绘制出一个层级的图表。“最上层”是决定的目标,决定要解决的问题;“底层”是在做决定时的选择;中层为考量因素,决策准则。此外,对2个相邻的层次,把上层称为对象层次,把下层称为因子层次。

2) 构建判断矩阵

建立一个判断矩阵 A ,其中矩阵中的每个元素表示2个因素之间的比较结果。

判断矩阵是关键的计算工具,矩阵中的每个元素是一个数字,表示2个因素之间的比较结果。通常使用1~9度标度法进行判断,其中1度表示2个因素完

全相等,9度表示2个因素之间的差距非常大。通过对判断矩阵进行计算,可以得出各因素的权重向量,从而确定各因素在最终决策中的权重分配。对于每个层次的因素,用 a_{ij} 表示第 i 个因素相对于第 j 个因素的比较结果,其表达式如下:

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{Bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{Bmatrix} \quad (23)$$

3) 计算权重向量

通过计算判断矩阵而得出各因素的权重向量,以此确定各因素在最终决策中的权重分配。将矩阵 A 的各行向量进行几何平均(方根法),然后进行归一化,即得到各评价指标权重和特征向量 W :

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{W}_i}, W = \begin{Bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{Bmatrix} \quad (24)$$

4) 一致性检验

通过对各个层级的评价矩阵的一致性检查,保证各个层级的评价结果的合理性。判断矩阵的一致性检测就是判断思想在逻辑上的一致性。其中,最大特征根 $\lambda_{\max}$ 的计算以及相容指数 CI 的计算都是其中的一部分。

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{W_i} \quad (25)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (26)$$

如果 $CI=0$ 时,存在完全的相容性; CI 值与0相近,且符合度较好;当 CI 较大时,不一致性会较大,此时需要引进一个随机一致性指数 RI 来度量 CI 的值:

$$RI = \frac{CI_1 + CI_1 + \cdots + CI_n}{n} \quad (27)$$

其中,随机一致性指数 RI 与判断矩阵的级数相关,通常来说,矩阵级数越大,发生一致性随机偏离的概率也就越大。鉴于相容性的偏差可以归结为随机性的因素,为了验证判定矩阵的相容性,需要定义测试因子 CR ,即是相容指数 CI 与随机一致性指数 RI 的比值,其计算公式为:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (28)$$

如果 $CR < 0.1$,则认为该判断矩阵通过一致性检验,否则就不具有满意一致性。

5) 综合决策

根据各因素的权重分配,对决策问题进行综合分析,得出最终的决策结果。

利用AHP法对上述12项评价指标进行权重计算,最终得出每一项指标对应的权重,为地质-工程甜点测井评价模型的建立提供理论数据支撑,其赋权运算结果如表3所示。

3.3 地质-工程甜点测井评价模型及分类标准

3.3.1 地质-工程甜点测井评价模型

综合考虑优选出的各评价指标的相关性及赋权结果,建立基于层次分析加权数学准则的储层品质评价因子和工程品质评价因子计算方程,并将双因子标准化,最终形成DJ区块深部煤储层地质-工程甜点测井评价模型,如式(29)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} RQ = 0.296V_g + 0.249I_f + 0.167I_{cs} + \\ \quad 0.126P_{si} + 0.105p - 0.057I_{hr} \\ CQ = 0.318BI + 0.232E_{ef} - 0.172K_{ic} - \\ \quad 0.135K_h + 0.092\lambda - 0.051S_t \\ RQI = \frac{RQ - RQ_{\min}}{RQ_{\max} - RQ_{\min}} \\ CQI = \frac{CQ - CQ_{\min}}{CQ_{\max} - CQ_{\min}} \end{array} \right. \quad (29)$$

式中: RQ 和 CQ 分别为储层品质因子和工程品质因子,无量纲; $RQ_{\max}$ 和 $RQ_{\min}$ 分别为储层品质因子最大值和最小值,无量纲; $CQ_{\max}$ 和 $CQ_{\min}$ 分别为工程品质因子最大值和最小值,无量纲; RQI 和 CQI 分别为储层品质标准

化因子和工程品质标准化因子,小数。

3.3.2 地质-工程甜点相关指标划分标准

利用测井资料对地质-工程甜点12项主控因素进行计算,进而代入DJ区块深部煤储层地质-工程甜点测井评价模型进行试算,在系统对比现场实际压裂效果监测和动态排采资料的基础上,参考常规石油天然气储层甜点的划分要求,给出了地质-工程甜点相关指标划分标准及评价判别表(表4)。

由表4可知,本研究将深部煤储层地质-工程甜点划分为3类:I类表示优质甜点,煤层气最富集、可压性强;II类表示一般甜点,煤层气富集程度较好、具备一定的可压性;III类表示劣质甜点,煤层气富集程度较差、难以成功压裂。

在具体评价地质-工程甜点类型时,根据排列组合情况,一般会出现9种组合类型。若地质甜点类别与工程甜点类别一致时,则地质-工程甜点类别并无争议;若地质甜点类别与工程甜点类别不一致时,则需给出明确的判别办法,以便该法具有实际推广应用价值,根据广泛的文献调研并结合DJ区块实际压裂工况及生产实践经验,以煤储层优先、工程提升为准则,总结出不一致的6种组合类型所对应的地质-工程甜点:I类地质甜点与II类工程甜点应归结为I类地质-工程甜点;II类地质甜点与I类工程甜点、I类地质甜点与III类工程甜点应统一归结为II类地质-工程甜点;III类地质甜点与I类工程甜点、II类工程甜点、III类工

表3 DJ区块深部煤储层地质-工程甜点评价指标赋权结果

Table 3 Weighted results of indices for geological-engineering sweet spot assessment in deep coal seams, DJ block

储层品质 评价指标	V_g	I_f	I_{cs}	P_{si}	p	I_{hr}	权重	工程品质 评价指标	BI	E_{ef}	K_{ic}	K_h	λ	S_t	权重
V_g	1	2	3	4	5	6	0.296	BI	1	2	3	4	5	6	0.318
I_f	—	1	2	3	4	5	0.249	E_{ef}	—	1	2	3	4	5	0.232
I_{cs}	—	—	1	2	3	4	0.167	K_{ic}	—	—	1	2	3	4	0.172
P_{si}	—	—	—	1	2	3	0.126	K_h	—	—	—	1	2	3	0.135
p	—	—	—	—	1	2	0.105	λ	—	—	—	—	1	2	0.092
I_{hr}	—	—	—	—	—	1	0.057	S_t	—	—	—	—	—	1	0.051

表4 DJ区块地质-工程甜点相关指标划分标准

Table 4 Classification of geological-engineering sweet spots using related indices

相关指标 甜点类型	$V_g/(m^3/t)$	I_f	I_{cs}	P_{si}	p/MPa	I_{hr}	$BI/\%$	E_{ef}	$K_{ic}/(MPa \cdot m^2)$	K_h	λ	S_t/MPa	RQI	CQI
I类甜点	>19.74	>0.674	>1.66	>0.11	>20.74	<8.99	>57	>3.84	<0.17	<0.07	>0.55	<1.38	>0.65	>0.62
II类甜点	14.14 ~ 19.74	0.436 ~ 0.674	1.15 ~ 1.66	0.07 ~ 0.11	19.23 ~ 20.74	8.99 ~ 16.79	45 ~ 57	3.25 ~ 3.84	0.17 ~ 0.26	0.07 ~ 0.12	0.43 ~ 0.55	1.38 ~ 1.79	0.36 ~ 0.65	0.39 ~ 0.62
III类甜点	<14.14	<0.436	<1.66	<0.07	<19.23	>16.79	<45	<3.25	>0.26	>0.12	<0.43	>1.79	<0.36	<0.39

程甜点,Ⅱ类地质甜点与Ⅲ类工程甜点应统一归结为Ⅲ类地质-工程甜点。

4 应用实例

根据所建立的DJ区块深部煤储层地质-工程甜点测井评价模型,将其程序化,挂接在Forward. Net测井精细解释平台上,实现研究区深部煤储层地质-工程甜点测井可视化逐点处理与评价。图6为研究区X-5井深部煤储层地质-工程甜点测井评价成果图,该深部煤储层埋深超过2 000 m,厚度约7 m,煤储层致密程度高,渗透性相比浅层普遍更低,以原生结构煤为主。测井响应显示声波时差分布在116.8~126.7 μs/ft、密度分布在1.32~1.49 g/cm³、补偿中子孔隙度分布在43.06%~58.52%、自然伽马值分布在23.14~65.09 API,煤储层上部深、浅侧向电阻率出现双轨现象,下部则重

合度较高,以上响应特征表明煤储层上部张性裂隙较为发育、渗透性相对较高,在压裂改造后,裂缝将会延伸连通天然裂隙,形成良好的运移通道。

该井深度2 232.1~2 238.8 m煤储层段中,2 232.1~2 235.0 m煤储层为Ⅰ类甜点,2 237.1~2 238.8 m煤储层为Ⅱ类甜点,2 235.0~2 237.1 m煤储层为Ⅲ类甜点。根据成像测井、岩石力学实验结果和煤储层取心分析(图7)、现场测试地层压力和闭合压力等多项数据,用于验证各评价指标计算结果的正确性。成像测井显示煤储层上部裂缝发育程度优于下部,双井径曲线重合度较高,并无明显扩径,自然伽马值上部明显低于下部,煤心呈完整柱状,无破碎现象,为原生结构煤。深度2 234.5 m煤心测试含气量为18.39 m³/t,孔隙度为5.18%,渗透率为0.062×10⁻³ μm²,地层压力为20.98 MPa;深度2 235.0 m煤心岩石力学实验测试分析的应力差异系数为0.149 5、计算值0.156 4,

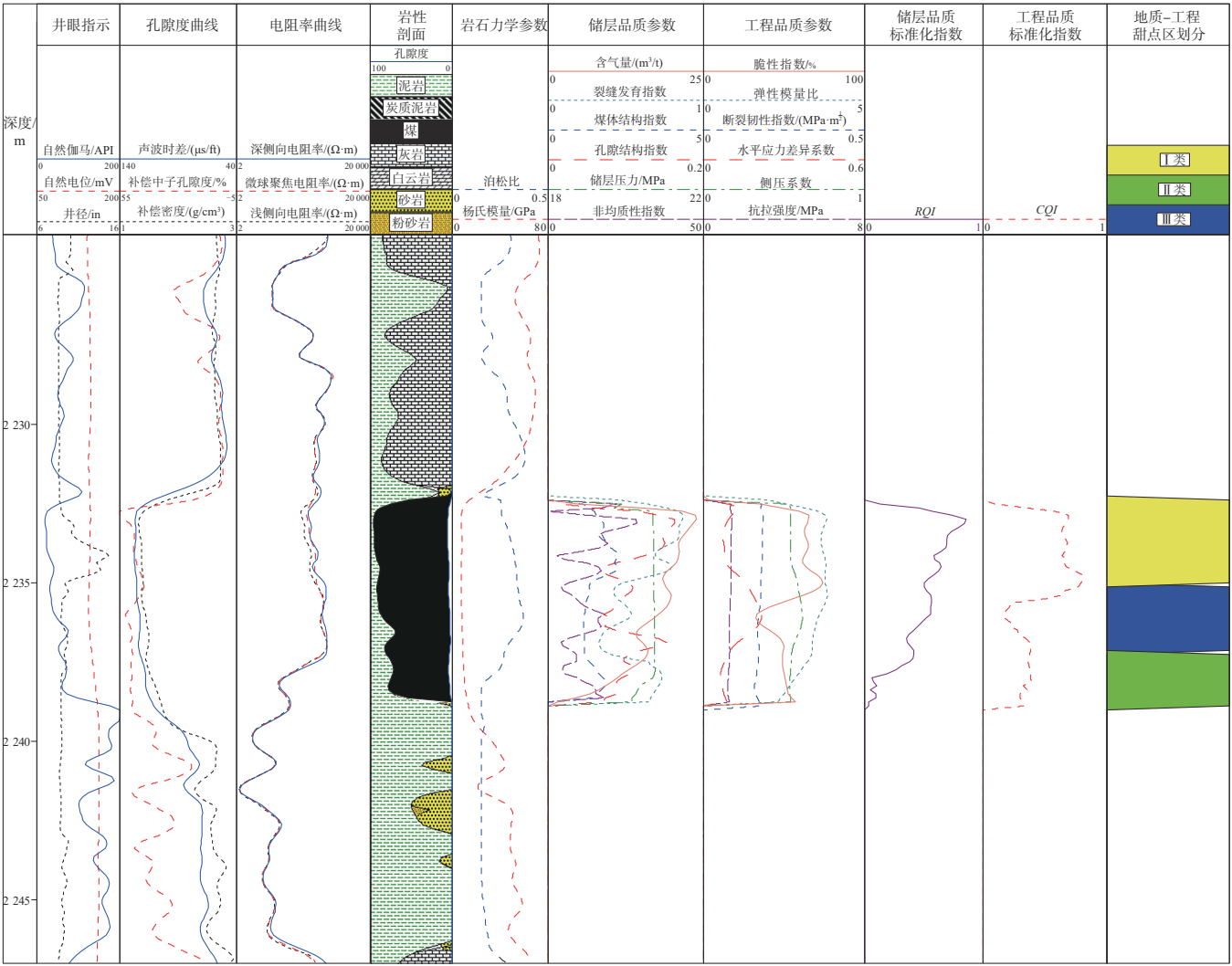


图6 DJ区块X-5井深部煤储层地质-工程甜点测井评价成果
Fig. 6 Logging-based evaluation results of geological-engineering sweet spots in deep coal seams in well X-5, DJ block

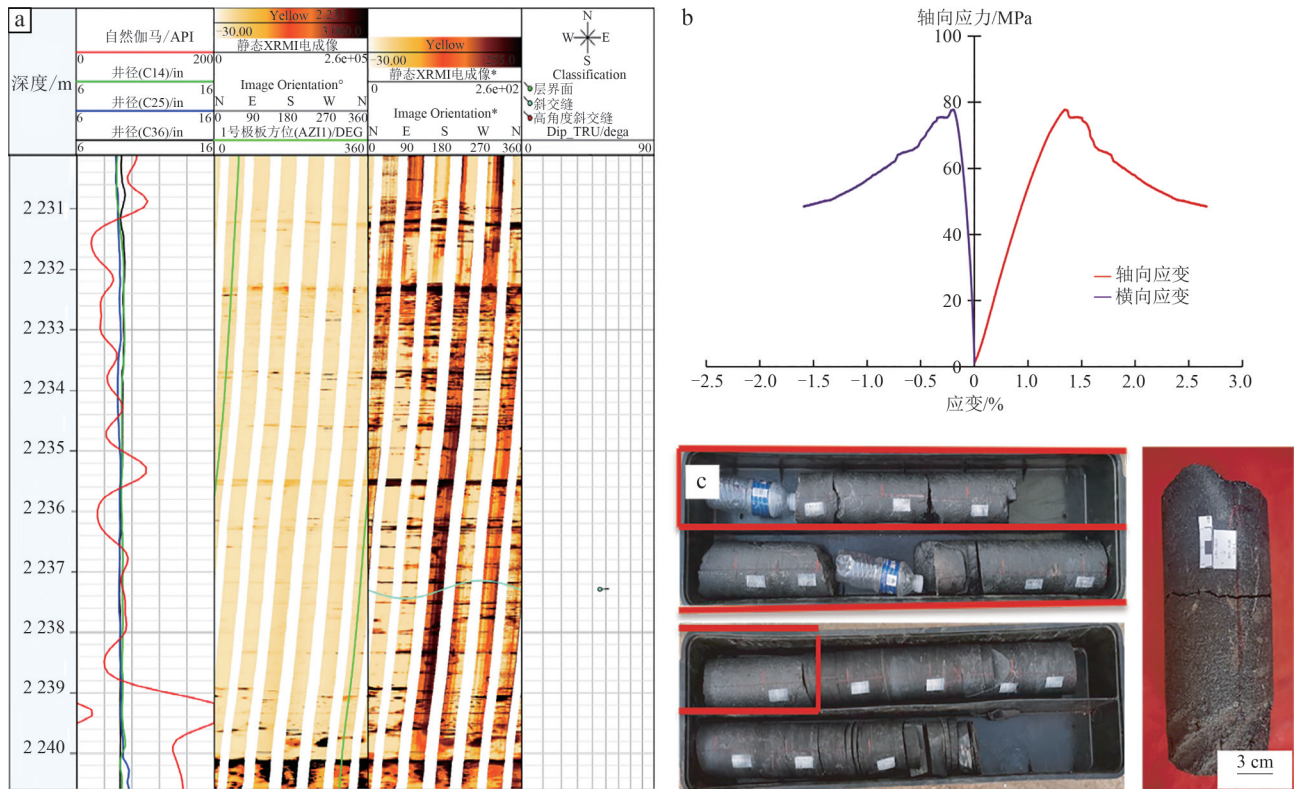


图7 DJ区块X-5井深部煤储层非常规测井解释、实验及取心资料

Fig. 7 Data from unconventional logging interpretations, experiments, and cores of deep coal seams in well X-5, DJ block

a. FMI电阻率成像测井资料;b. 8#煤储层取心样品的三轴压缩应力-应变曲线;c. 8#煤储层岩心照片

侧压系数为0.593、计算值为0.617, I型断裂韧性为0.184、计算值为0.178, 巴西劈裂抗拉强度为1.49、计算值为1.34, 测试弹性模量为7.6 MPa, 泊松比为0.339。上述部分参数的验证结果表明, 计算的评价指标总体精度较高, 平均误差为7.83%, 满足模型所需精度。如图8所示, 根据压裂设计总体要求, 2020年5月对DJ X-5井深部深度2231.5~2236.0 m煤储层

段进行压裂施工, 使用滑溜液+活性水+石英砂/陶粒光套管压裂, 前置液727 m³, 携砂液1055 m³, 顶替液97 m³, 破裂压力47.90 MPa, 施工压力20.80~48.00 MPa, 施工排量8.0~12.1 m³/min, 入井砂量53 m³, 平均砂比4.8%, 停泵压力16.8 MPa, 入地总液量1879 m³, 入井总液量1907 m³, 同时试气结果显示该井日产气量达5006 m³, 属优质高产井。该法评价结果与实际压裂工况及试气

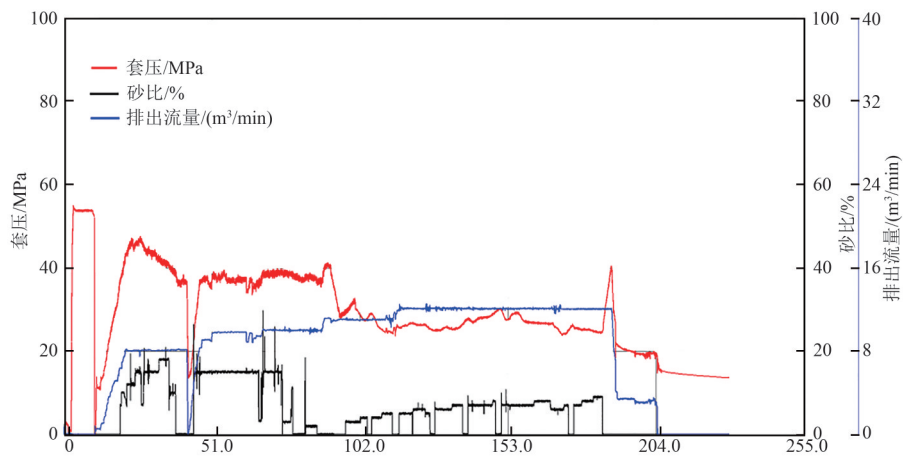


图8 DJ区块X-5井深部煤储层现场压裂施工曲线

Fig. 8 Field fracturing curves of deep coal seams in well X-5, DJ block

结果对比表明,地质-工程甜点测井评价结果与实际压裂射孔位置一致,且压后产量较高,由此印证了该法可为深部煤储层压裂射孔选段提供测井技术支撑。

研究区20余口井深部煤储层地质-工程甜点测井评价结果表明,在纵向上深部煤储层甜点的上部普遍优于下部,上部甜点多为Ⅰ类,中部以Ⅲ类为主,下部多为Ⅱ类。

5 结论

1) 基于地质-工程一体化的思想,构建了深部煤层气地质-工程甜点测井评价模型,并结合煤心分析测试、测-录井、压裂和生产动态等数据资料,确定了DJ区块深部煤储层的地质-工程甜点分类评价标准,在DJ区块取得了良好的应用效果。

2) DJ区块深部煤储层纵向上甜点表现出上部普遍优于下部,上部甜点多为Ⅰ类,中部以Ⅲ类为主,下部多为Ⅱ类;含气量和脆性指数分别为储层及工程品质的主控因素,在评价地质-工程甜点时应作为优选指标;顶板灰岩和底板泥岩的各项力学性质与煤储层差异明显,压裂缝封隔效果较好。

3) 深部煤层气地质-工程甜点评价应以地质甜点为基础、工程甜点为重点,即重点针对Ⅰ类和Ⅱ类地质甜点来开展工程甜点评价,在动态刻度静态的基础上,构建有机融合煤储层品质及工程品质的甜点综合评价模型和分类评价标准。

参 考 文 献

- [1] 王成旺,甄怀宾,陈高杰,等. 大宁—吉县区块深部8号煤储层特征及可压裂性评价[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(2): 1-5.
WANG Chengwang, ZHEN Huaibin, CHEN Gaojie, et al. Assessment of coal No. 8 reservoir features and fracturability in Da'ning-Jixian block deep part[J]. Coal Geology of China, 2022, 34(2): 1-5.
- [2] 聂志宏,巢海燕,刘莹,等. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤储层气生产特征及开发对策——以大宁—吉县区块为例[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6): 1738-1746.
NIE Zhihong, CHAO Haiyan, LIU Ying, et al. Development strategy and production characteristics of deep coalbed methane in the east Ordos Basin: Taking Daning-Jixian block for example[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1738-1746.
- [3] 余杰,秦瑞宝,梁建设,等. 煤储层气“甜点”测井判别与产量预测——以沁水盆地柿庄南区块为例[J]. 新疆石油地质, 2017, 38(4): 482-487.
YU Jie, QIN Ruibao, LIANG Jianshe, et al. Sweet spot Identification with well-logging data and production prediction for coalbed methane: A case study from southern Shizhuang Block in Qinsui Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(4): 482-487.
- [4] 张亚飞,张松航,邓志宇,等. 基于层次分析灰色定权聚类的煤储层气开发甜点预测方法——以柿庄北区块为例[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(5): 166-175.
ZHANG Yafei, ZHANG Songhang, DENG Zhiyu, et al. Sweet spot prediction method for coalbed methane development based on analytic hierarchy process grey weighted clustering: A case study of shizhuang North block[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(5): 166-175.
- [5] 董银萍,刘勇,申有义,等. 基于匹配追踪分解的流体活动因子预测煤储层气甜点区[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(5): 90-96, 101.
DONG Yinping, LIU Yong, SHEN Youyi, et al. Prediction of CBM sweet spots via matching trace decomposition-based fluid activity factor[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(5): 90-96, 101.
- [6] HAMDANI A H, HAMDIANA D P, RAMADHAN W A. Well log and seismic application in delineating CBM sweet spot in Berau Basin, East Kalimantan[J]. AIP Conference Proceedings, 2013, 1554(1): 253-256.
- [7] LIU Zhidi, TANG Xiaoyan, LIU Hongzhuang, et al. Predicting the engineering sweet spot of coal-bed methane reservoirs: A case study from Central China[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, 15(7): 638.
- [8] 刘高峰,刘欢,鲜保安,等. 煤储层气开发地质“甜点区”模糊模式识别模型[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(4): 808-815.
LIU Gaofeng, LIU Huan, XIAN Baoan, et al. Fuzzy pattern recognition model of geological sweetspot for coalbed methane development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(4): 808-815.
- [9] 闫霞,徐凤银,聂志宏,等. 深部微构造特征及其对煤储层气高产“甜点区”的控制——以鄂尔多斯盆地东缘大吉地区为例[J]. 煤炭学报, 2021, 46(8): 2426-2439.
YAN Xia, XU Fengyin, NIE Zhihong, et al. Microstructure characteristics of Daji area in east Ordos Basin and its control over the high yield dessert of CBM[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(8): 2426-2439.
- [10] ZHAO Chengqiang, ZHOU Yubang, LI Yong, et al. Application of gradient structure tensor method in CBM fracture identification and sweet spot prediction[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(20): 641.
- [11] 桑树勋,郑司建,王建国,等. 岩石力学地层新方法在深部煤储层气勘探开发“甜点”预测中的应用[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1840-1853.
SANG Shuxun, ZHENG Sijian, WANG Jianguo, et al. Application of new rock mechanical stratigraphy in sweet spot prediction for deep coalbed methane exploration and development[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1840-1853.
- [12] 杨磊,王建,高博禹,等. 利用测井信息评价煤储层气“甜点”技术与方法——以沁水盆地南部某区块为例[J]. 新疆有色金属, 2023, 46(1): 37-41.
YANG Lei, WANG Jian, GAO Boyu, et al. Evaluation of coalbed methane “sweet spot” technology and methods using logging

- information: A case study of a certain block in the southern part of the Qinshui Basin [J]. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 2023, 46(1): 37-41.
- [13] 程建, 周小进, 刘超英, 等. 中西部大盆地重点勘探领域战略选区研究[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(2): 229-237.
CHENG Jian, ZHOU Xiaojin, LIU Chaoying, et al. Strategic area selection and key exploration fields in central and western large basins [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45(2): 229-237.
- [14] 余海波. 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): 72-79.
YU Hai-bo. Tectonic characteristics and favorable exploration zones of Paleozoic in Dongpu Sag [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2022, 34(6): 72-79.
- [15] 葛祥, 刘伟, 孙鑫, 等. 测控技术在深层、常压页岩气勘探开发中的应用[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(6): 1221-1230.
GE Xiang, LIU Wei, SUN Xin, et al. Application of measurement and control technology in deep and normal pressure shale gas exploration and development [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45(6): 1221-1230.
- [16] 聂志宏, 时小松, 孙伟, 等. 大宁-吉县区块深层煤储层气生产特征与开发技术对策[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(3): 193-200.
NIE Zhihong, SHI Xiaosong, SUN Wei, et al. Production characteristics of deep coalbed methane gas reservoirs in Daning-Jixian Block and its development technology countermeasures [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(3): 193-200.
- [17] LI Yang, YANG Jianghao, PAN Zhejun, et al. Unconventional natural gas accumulations in stacked deposits: A discussion of Upper Paleozoic coal-bearing strata in the east margin of the Ordos Basin, China [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2019, 93(1): 111-129.
- [18] 王以城. 鄂尔多斯盆地东缘大宁-吉县地区山西组页岩沉积相与储层特征研究[D]. 西安: 西北大学, 2022.
WANG Yicheng. Shanxi shale sedimentary facies and reservoirs characteristics in Daning-Jixian area of east margin of Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwest University, 2022.
- [19] 李曙光, 王成旺, 王红娜, 等. 大宁-吉县区块深层煤储层气成藏特征及有利区评价[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(9): 59-67.
LI Shuguang, WANG Chengwang, WANG Hongna, et al. Reservoir forming characteristics and favorable area evaluation of deep coalbed methane in Daning-Jixian Block [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(9): 59-67.
- [20] 刘之的, 杨秀春, 陈彩红, 等. 鄂东气田煤储层气储层测井综合评价方法研究[J]. *测井技术*, 2013, 37(3): 289-293.
LIU Zhide, YANG Xiuchun, CHEN Caihong, et al. Comprehensive log evaluation for coalbed methane reservoir in eastern block of Ordos Basin [J]. *Well Logging Technology*, 2013, 37(3): 289-293.
- [21] 郭旭升, 周德华, 赵培荣, 等. 鄂尔多斯盆地石炭系-二叠系煤系非常规天然气勘探开发进展与攻关方向[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(5): 1013-1023.
GUO Xusheng, ZHOU Dehua, ZHAO Peirong, et al. Progresses and directions of unconventional natural gas exploration and development in the Carboniferous-Permian coal measure strata, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(5): 1013-1023.
- [22] 刘成林, 刘新菊, 张洪军, 等. 鄂尔多斯盆地安塞地区页岩油地质-工程一体化技术实践[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(5): 1238-1248.
LIU Chenglin, LIU Xinju, ZHANG Hongjun, et al. Application of an integrated geology-reservoir engineering approach to shale oil development in Ansai area, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(5): 1238-1248.
- [23] 白斌, 戴朝成, 侯秀林, 等. 松辽盆地白垩系青山口组页岩层系非均质地层特征与页岩油甜点评价[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(4): 846-856.
BAI Bin, DAI Chaocheng, HOU Xiulin, et al. Geological heterogeneity of shale sequence and evaluation of shale oil sweet spots in the Qingshankou Formation, Songliao Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(4): 846-856.
- [24] 印森林, 陈旭, 杨毅, 等. 细粒沉积岩典型低阻油层成因及甜点分布[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(4): 946-961.
YIN Senlin, CHEN Xu, YANG Yi, et al. Origin and sweet spots of typical low-resistivity oil reservoirs of fine-grained sedimentary rocks [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(4): 946-961.
- [25] 张鉴, 张成林, 赵圣贤, 等. 多元非线性矿物解释模型在页岩分析中的应用[J]. *断块油气田*, 2023, 30(2): 222-229.
ZHANG Jian, ZHANG Chenglin, ZHAO Shengxian, et al. Application of interpretation models of multivariate non-linear mineral in shale formation analysis [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2023, 30(2): 222-229.
- [26] 张玉涛, 杨杰, 李亚清, 等. 煤自燃特征温度与微观结构变化及关联性分析[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(4): 80-87.
ZHANG Yutao, YANG Jie, LI Yaqing, et al. Correlation analysis between characteristic temperature and microstructure of coal spontaneous combustion [J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(4): 80-87.
- [27] 王雪, 张新荣, 刘嘉康, 等. 松嫩平原现代浅水湖泊藻类组合与水体、底泥的耦合关系[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(1): 80-88.
WANG Xue, ZHANG Xinrong, LIU Jiakang, et al. Coupled relationship between algal assemblages and water, surface sediments in modern shallow lakes of the Songnen Plain [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45(1): 80-88.
- [28] 唐昱哲, 柴辉, 王红军, 等. 中亚阿姆河右岸东部地区侏罗系盐下碳酸盐岩储层特征及预测新方法[J]. *岩性油气藏*, 2023, 35(6): 147-158.
TANG Yuzhe, CHAI Hui, WANG Hongjun, et al. Characteristics and new prediction methods of Jurassic subsalt carbonate reservoirs in the eastern right bank of Amu Darya, Central Asia [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(6): 147-158.
- [29] 刘之的, 赵靖舟, 时保宏, 等. 煤储层气储层“三品质”测井定量评价方法研究——以鄂尔多斯盆地东缘韩城矿区为例[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(5): 966-978.
LIU Zhide, ZHAO Jingzhou, SHI Baohong, et al. Study on the method of quantitative evaluation for “three qualities” of CBM reservoir using logging data: A case study from the hancheng mine at the eastern edge of the ordos basin [J]. *Natural Gas*

- Geoscience, 2015, 26(5): 966-978.
- [30] 臧艳彬, 王瑞和, 王子振, 等. 利用Eaton法计算地层孔隙压力的不确定性分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, 34(4): 55-61.
- ZANG Yanbin, WANG Ruihe, WANG Zi Zhen, et al. Evaluation of uncertainties for pore-pressure taking eaton method as an example[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2012, 34(4): 55-61.
- [31] 孙建孟, 张颖, 王跃祥, 等. 基于测井资料的地层压力预测方法研究进展[J]. 测井技术, 2023, 47(2): 119-128.
- SUN Jianmeng, ZHANG Ying, WANG Yuexiang, et al. Research progress in formation pressure prediction methods based on logging data[J]. Well Logging Technology, 2023, 47(2): 119-128.
- [32] 郭东明. 欠压实理论在随钻地层压力预测中的应用——以X油田A1-1构造为例[J]. 石油地质与工程, 2021, 35(3): 80-83, 88.
- GUO Dongming. Application of under compaction theory in formation pressure prediction while drilling-By taking A1-1 structure of X Oilfield as an example[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2021, 35(3): 80-83, 88.
- [33] 张美玲, 牟立伟, 蔺建华. 地层主应力综合计算方法及其在套损预测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(3): 1281-1288.
- ZHANG Meiling, MU Liwei, LIN Jianhua. Comprehensive calculation method of formation principal stress and its application in prediction of casing damage [J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(3): 1281-1288.
- [34] 周丽艳, 罗少成, 林伟川, 等. 基于孔隙结构综合评价指数的致密砂岩储层分类方法[J]. 测井技术, 2022, 46(6): 707-713.
- ZHOU Liyan, LUO Shaocheng, LIN Weichuan, et al. Classification method of tight sandstone reservoir based on comprehensive evaluation index of pore structure [J]. Well Logging Technology, 2022, 46(6): 707-713.
- [35] 何发岐, 董昭雄. 深部煤储层气资源开发潜力——以鄂尔多斯盆地大牛地气田为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 277-285.
- HE Faqi, DONG Zhaoxiong. Development potential of deep coalbed methane: A case study in the Daniudi Gas Field, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 277-285.
- [36] 黄沛铭. 库车坳陷博孜-大北区带超深致密砂岩储层裂缝特征与定量预测[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- HUANG Peiming. Characteristics and quantitative prediction of fractures in ultra-deep tight sandstone reservoirs, Bozi-Dabei zone, Kuqa Depression [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [37] 曾治平, 刘震, 马骥, 等. 深层致密砂岩储层可压裂性评价新方法[J]. 地质力学学报, 2019, 25(2): 223-232.
- ZENG Zhiping, LIU Zhen, MA Ji, et al. A new method for fracability evaluation in deep and tight sandstone reservoirs [J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(2): 223-232.
- [38] 李功权. 数字油藏理论与实践[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2014: 214.
- LI Gongquan. Digital reservoir theory and practice [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2014: 214.
- [39] 范宜仁, 魏周拓, 陈雪莲. 基于测井资料的地层应力计算及其影响因素研究[J]. 测井技术, 2009, 33(5): 415-420.
- FAN Yiren, WEI Zhoutuo, CHEN Xuelian. Study on formation stress calculation and its influential factors based on logging data [J]. Well Logging Technology, 2009, 33(5): 415-420.
- [40] 金衍, 陈勉, 张旭东. 利用测井资料预测深部地层岩石断裂韧性[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 454-456.
- JIN Yan, CHEN Mian, ZHANG Xudong. Determination of fracture toughness for deep well rock with geophysical logging data [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 454-456.
- [41] KESHAVERZ A, BADALYAN A, CARAGEORGOS T, et al. Enhancement of CBM well fracturing through stimulation of cleat permeability by ultra-fine particle injection [J]. The APPEA Journal, 2014, 54(1): 155-166.
- [42] 赵毅鑫, 赵良辰, 杨东辉, 等. 基于改进组合弹簧模型的矿井地应力场计算方法[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2024, 6(1): 103-116.
- ZHAO Yixin, ZHAO Liangchen, YANG Donghui, et al. Calculation of mine in-situ stress field based on the improved composite spring model [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2024, 6(1): 103-116.
- [43] 高向东, 孙昊, 王延斌, 等. 临兴地区深部煤储层地应力场及其对压裂缝形态的控制[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(8): 140-150.
- GAO Xiangdong, SUN Hao, WANG Yanbin, et al. In-situ stress field of deep coal reservoir in Linxing area and its control on fracturing crack [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(8): 140-150.
- [44] 钱鸣高, 石平五, 许家林, 等. 矿山压力与岩层控制[M]. 2版. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010: 44.
- QIAN Minggao, SHI Pingwu, XU Jialin, et al. Mine pressure and rock formation control [M]. 2nd ed. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2010: 44.
- [45] 陈同刚, 汪启年, 朱将波, 等. 煤储层及其顶、底板岩石力学性质对水力压裂缝延伸的控制[J]. 华东地质, 2018, 39(3): 212-217.
- CHEN Tonggang, WANG Qinian, ZHU Jiangbo, et al. Control of mechanical properties of coal seam and its roof and floor rocks over the crack extension during hydraulic fracturing [J]. East China Geology, 2018, 39(3): 212-217.
- [46] 任官宝, 陈雷, 计玉冰, 等. 昭通东北地区五峰组—龙马溪组龙一1亚段页岩岩相类型及其储层特征[J]. 石油实验地质, 2023, 45(3): 443-454.
- REN Guanbao, CHEN Lei, JI Yubing, et al. Shale lithofacies types and reservoir characteristics from Ordovician Wufeng Formation to the first sub-member of the first member of Silurian Longmaxi Formation, Northeast Zhaotong area [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2023, 45(3): 443-454.

(编辑 董奕含)