

引用格式:王相春,刘皓,王超,等.大数据方法评价绒囊钻井流体储层伤害程度[J].油气藏评价与开发,2021,11(4):605-613.

WANG Xiangchun, LIU Hao, WANG Chao, et al. Big data method for evaluating reservoir damage degree of fuzzy ball drilling fluid[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(4): 605-613.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.04.017

大数据方法评价绒囊钻井流体储层伤害程度

王相春¹, 刘皓¹, 王超¹, 陈步高², 张鹏¹

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249; 2. 中国石化胜利油田分公司鲁明公司, 山东 东营 257000)

摘要:矿物多采用表皮系数表征钻井流体的储层伤害程度,但无法定量表征工作流体具体性能指标与储层伤害程度的关系,不能有效指导现场钻井流体性能优化和调整。而大数据方法在多因素分析上优势明显,基于此,建立多参数钻井流体储层伤害模型,实现工作液优化以保护储层。为此,收集9口绒囊钻井流体完钻井及邻井6口其他钻井流体完钻井的现场数据,以绒囊钻井流体完钻井与邻井平均日产量差为目标函数表征储层伤害程度,以钻井流体密度、表观黏度、塑性黏度、漏斗黏度、动塑比、动切力、pH值7项参数为自变量,首先运用多元回归方法建立多参数模型,然后利用剥茧算法寻找储层伤害主控因素后建立钻井流体储层伤害数学模型,明确绒囊钻井流体性能与平均日产量差之间的定量关系。研究发现,表观黏度、密度、动塑比、pH值是决定储层伤害的主控因素,其回归系数分别为-1.561、0.428、-0.535、1.60,表明随着表观黏度、动塑比的增加绒囊钻井流体储层伤害程度加深,随着密度、pH值的增加绒囊钻井流体储层伤害程度减小。利用钻井流体储层伤害数学模型指导延5-V1井水平段钻井流体性能调整,投产后的平均日产气量提高近800 m³。结论认为,相比试井等矿场评价方法,大数据方法既能准确诊断伤害程度又能为现场钻井流体性能优化提供理论依据,同时也为矿场评价储层伤害提供一种方法,现场应用效果明显。

关键词:大数据;储层伤害;绒囊钻井流体;性能;产量差

中图分类号:TE357

文献标识码:A

Big data method for evaluating reservoir damage degree of fuzzy ball drilling fluid

WANG Xiangchun¹, LIU Hao¹, WANG Chao¹, CHEN Bugao², ZHANG Peng¹

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China;

2. Luming Company, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257000, China)

Abstract: The epidermal coefficient is mostly used to describe the reservoir damage degree of drilling fluid, but cannot quantitatively characterize the relation between the specific performance index and the reservoir damage degree, and effectively guide the optimization and adjustment of field drilling fluid performance. However, for the big data method, it has obvious advantages in multi-factor analysis. Based on this, a multi-parameter drilling fluid reservoir injury model is established to realize the working fluid optimization to protect the reservoir. To this end, the on-site data of nine completion wells with fuzzy ball drilling fluid and six other adjacent completion wells are collected. The average daily output difference is taken as the target function, with seven parameters of drilling fluid density, apparent viscosity, plastic viscosity, funnel viscosity, dynamic plastic ratio, dynamic shear force, and pH value as the independent variables. Firstly, the multiple regression method is used to establish a multi-parameter model. Then the mathematical model of drilling fluid on reservoir damage is established by the main controlling factors found by cocoon stripping algorithm. Finally, the quantitative relationship between the fluid performance and the average daily yield is defined. The study found that the regression coefficients of apparent viscosity, density, dynamic plastic ratio, and pH

收稿日期:2021-04-08。

第一作者简介:王相春(1981—),男,博士研究生,高级工程师,主要从事钻完井工艺及储层保护等方面的研究工作。地址:北京市昌平区府学路18号中国石油大学(北京)石油工程学院,邮政编码:102249。E-mail:wxch8888@163.com

通信作者简介:陈步高(1983—),男,硕士,工程师,主要从事储层改造及油田开发管理工作。地址:山东省东营市济南路57号大明大厦,邮政编码:257000。E-mail:94211031@qq.com

value are -1.561 , 0.428 , -0.535 , 1.60 , respectively, indicating that the apparent viscosity of fuzzy ball drilling fluid caused greater damage to the reservoir, density, dynamic plastic ratio, while the density and pH value have the protection effect of reservoir. In the case of the adjustment of drilling fluid performance of the horizontal section in Well-Yan5-V1 guided by the regression model, the average daily production after commissioning is increased by nearly 800 m^3 . In conclusion, compared with the on-site evaluation methods such as well testing, the big data method can only accurately diagnose the damage degree but also provide theoretical basis for the optimization of site drilling fluid performance. Meanwhile, it also provide a method for evaluating reservoir damage, and the application effect on site is obvious.

Keywords: big data, reservoir damage, fuzzy ball drilling fluid, performance, poor production

储层保护是一项保护油气资源的重要技术^[1],提高储层保护效果既可以提高产量又节能环保。明确钻完井作业过程中储层伤害因素及程度,有针对性采取措施减小或避免储层伤害是储层保护的关键所在。国内外的矿场评价方法包括试井评价、产量递减分析及测井评价等方法,主要评价指标为表皮系数。

利用试井资料计算得到表皮系数评价钻井流体储层伤害最为常用,但是表皮系数只能诊断储层伤害程度,无法给出钻井流体性能指标的储层伤害程度,不能用于指导钻井流体的性能^[2]。试井解释方法评价油气井储层伤害必须有试井资料,但是它的来源不广泛,因此学者们研究测井资料^[3]、产量递减方法来计算表皮系数评价储层伤害的方法^[4]。

但是,不管试井、测井还是产量递减的方法依然没有解决目前矿场评价方法,只能定量诊断钻井过程中钻井流体储层伤害程度,不能给出钻井流体性能与储层伤害程度的定量关系。

那么,学者们试图收集生产过程中实测的钻井流体数据及排采数据,利用多元回归、神经网络法等数据挖掘方法,解决钻井流体具体性能与储层伤害之间的定量关系,指导改进性能控制储层伤害。

剥茧算法是一种大数据思想的算法,该方法最初用于钻井流体配方的优化^[5],随后用于定量优化柳林煤层气产量主控参数、建立NM油田压裂工艺参数同压裂后产油增量间的关系来优化压裂施工参数,进而提出了“剥茧寻根”数学算法。该算法不仅强调数据量大,还要求数据类型多,每个类型下的数据要全,采用无人干预削元、优选贡献率之和大于90%各因素、关联因素合并为泛函形式3个步骤确定主控因素,上述特点符合大数据思想。之后,其他学者进一步扩大了该方法的应用范围。任宜伟等^[6]通过建立产量与工程参数的多元模型,以各参数回归系数

为多因素“耦合”下的产量影响因子,定量评价工程参数对产量的影响。陶杉等^[7]建立井径扩大率与影响因素的数学模型,确定了顺北油田储层开采过程中井塌主控因素。

绒囊钻井流体流变性较好且密度可调,防漏堵漏且井壁稳定,提高地层承压能力,在煤层气钻井中已广泛应用,作业过程中积累了大量的生产数据。收集钻完井过程中绒囊钻井流体性能参数及开采过程中的生产参数作为模型建立的基础数据,利用无人为干预的剥茧算法寻找主控因素并建立煤层气井钻井流体储层伤害模型,利用该模型定量分析钻井流体性能对储层伤害的程度,指导现场施工过程钻井流体性能的调整,可以减小储层伤害进而提高产量。

1 钻井流体储层伤害模型建立

在煤层气田开发过程中,单井产量一直是关注的重点。而钻完井流体污染储层会导致产量降低。绒囊钻井流体广泛应用于煤层气井施工中,产生大量现场资料。收集绒囊钻井流体在煤层钻进过程中的性能参数、排采数据及其邻井的排采数据,利用剥茧算法建立多参数数学模型,可以定量评价绒囊钻井流体的储层伤害性能。

1.1 变量确定

在油气田勘探开发过程中产生了丰富的现场数据,如钻完井过程中的钻井工程参数、钻井液性能参数、井眼参数等,排采过程中的日产气量、累积产气量、日产水量、累积产水量、排采时间等排采参数。

绒囊钻井流体在陕西彬县、山西柳林、山西沁水、山西乡宁、西大宁—吉县、贵州织金等煤层气井储层段现场施工中,成功解决了煤层机械强度低、割

理发育、均质性差,钻完井过程中极易发生井壁坍塌、卡钻等难题^[8-9],完成了DFS-02-H2井三开恶性漏失水平井段、鄂尔多斯盆地吕梁复背斜西翼FL-H2-L五分支水平生产井水平段、沁平12-11-3H六分支水平井三开水平段等高难度煤层气井的施工。

统计了9口绒囊钻井流体钻完井及邻井施工过程中的性能参数、排采参数及邻井排采参数,由于现场提供井钻井井史、钻井液井史、完井报告、排采数据等资料丰富、记录多样,需进行数据清洗处理,完成漏值、错值及野值等数据的筛除与修正,保证后续建模、数据提取、计算的便捷性和统一性,保障数据分析的合理性及高效性,整理后的数据见表1。

从表1中可以看出,9口绒囊钻井流体完钻井中,仅有1口井的平均日产量低于非绒囊完钻的邻井,而平均日产气量最高的DFS-02井,其产量达到了8 134.25 m³/d,说明在相同条件下,绒囊钻井流体的储层保护效果较好,但仍有优化空间。

钻井流体的固相含量、黏度、密度、失水量、抑制性等性能与钻井流体的储层伤害程度相关,但受条件限制施工现场无法测量钻井流体抑制性及固相含量,而绒囊钻井流体是无固相钻井流体体系,其封堵机理与常规钻井流体不同失水量现场无需测量^[9],所以选择密度、漏斗黏度、表观黏度、动切力、塑性黏度、动塑比、pH值作为模型自变量。在目标井与邻井的井型、目的层、井身结构、排采措施大都相同而钻井流体体系不同时,两口井的产量差可以表征钻井流体性能差异对储层伤害程度,所以选择绒囊流体完钻井与邻井的平均日产量差作为因变量。

1.2 数据标准化

若数据相差较大时,直接用原始值进行分析,就会突出数值较高的因素在综合分析中的作用,相对削弱数值水平较低因素的作用,所以在数据处理前应进行数据标准化。从表1中可以看出,密度、塑性黏度、表观黏度、漏斗黏度、动切力、动塑比、pH值、产量差平均值分别为:1.026 g/cm³、13.556 mPa·s、22.5 mPa·s、42 s、9.052 Pa、0.621 Pa/(mPa·s)、8.944、1 747.58 m³/d,因素之间数值相差较大。为数据运算方便,利用SPSS软件将所有数据进行了z-score标准化,结果如表2所示。

从表2中可以看出,数据标准化处理后,同一因素的均值为0,标准差为1,单一因素间数据差值变小;整个表格中最大数据为2.543,最小数据为-1.74,同样数据差值较小,故将原始数据标准化后,可以忽略数值差异给模型带来的影响。

1.3 多参数储层伤害模型建立

回归分析是对客观事物数量依存关系的分析,是一种重要的统计分析方法,广泛地应用于社会经济现象变量之间的影响因素和关联的研究。由于客观事物的联系错综复杂,某一因素的变化往往受到两个或多个因素的影响。为了全面揭示这种复杂的依存关系,需建立多元回归模型进行深入、系统的分析^[10]。同时利用多元回归方法建立的方程具有确定的表达式,且各自变量参数有明确的物理意义,也方便进行削元、确定各参数的贡献率。建立的产量差

表1 绒囊钻井流体性能参数以及排采数据统计

Table 1 Statistics of fuzzy ball drilling fluid performance parameters and production data of velvet drilling

井号	ρ (g/cm ³)	PV (mPa·s)	AV (mPa·s)	FV (s)	YP (Pa)	YP/PV Pa/(mPa·s)	pH	Q_e (m ³ /d)	Q_{ie} (m ³ /d)	邻井井号
CLY-34	1.00	11.50	17.50	18	8.15	0.44	7.50	896.83	394.88	CLY-36
CLY-37	0.97	6.00	9.00	18	3.80	0.63	8.00	310.37	486.78	CLY-38
DFS-02	0.92	4.00	6.25	22	2.75	0.69	10.00	8 134.25	41.16	DFS-01
吉U2	1.17	17.00	27.00	47	10.00	0.60	8.50	4 046.73	155.70	吉U1
延1-U1	1.08	13.00	19.00	39	6.25	0.48	7.50	410.05	263.33	延6-4-28U
延3-U1	1.07	24.00	41.00	60	17.50	0.72	9.00	1 095.33	263.33	延6-4-28U
延3-V1	1.02	18.50	31.50	56	12.39	0.74	10.50	1 030.92	263.33	延6-4-28U
延1-52-38U	0.99	17.00	32.75	73	12.45	0.57	11.00	1 125.91	263.33	延6-4-28U
樊试U2	1.01	11.00	18.50	45	8.18	0.72	8.50	1 399.83	590.13	ZP02-1V

注: ρ 为密度,g/cm³;PV为塑性黏度,mPa·s;AV为表现黏度,mPa·s;FV为漏斗黏度,s;YP为动切力,Pa;YP/PV为动塑比,Pa/(mPa·s); Q_e 表示绒囊钻井流体完钻井平均日产气量, Q_{ie} 表示邻井非绒囊钻井流体完钻井平均日产气量;因延川南区块非绒囊钻井流体完井只收集到了延6-4-28U这一口井的排采数据,所以延川地区4口井均与该井进行比较。

表2 绒囊钻井流体性能参数以及排采数据标准化结果

Table 2 Performance parameters and standardized results of production discharge data of fuzzy ball drilling fluid

井号	ρ	PV	AV	FV	YP	YP/PV	pH	ΔQ
CLY-34	-0.418	-0.446	-0.544	-1.336	-0.291	-1.745	-1.225	-0.505
CLY-37	-0.851	-1.291	-1.283	-1.336	-1.242	0.107	-0.816	-0.77
DFS-02	-1.572	-1.599	-1.523	-1.126	-1.472	0.692	0.816	2.543
吉U2	2.033	0.400	0.283	0.189	0.114	-0.185	-0.408	0.831
延1-U1	0.735	-0.215	-0.413	-0.231	-0.706	-1.355	-1.225	-0.692
延3-U1	0.591	1.476	1.501	0.873	1.754	0.985	0.000	-0.405
延3-V1	-0.130	0.630	0.674	0.663	0.636	1.180	1.225	-0.432
延1-52-38U	-0.562	0.400	0.783	1.557	0.650	-0.478	1.633	-0.392
樊试U2	-0.274	-0.523	-0.457	0.084	-0.284	0.985	-0.408	-0.278

与影响因素之间的数学关系如式(1):

$$\Delta Q = a_1\rho + a_2PV + a_3AV + a_4FV + a_5YP + a_6YP/PV + a_7pH + C \quad (1)$$

式中: a_1 — a_7 表示待定系数, C 表示常数。

将资料处理后的9口井数据输入到SPSS软件中进行线性多元回归,得到多参数钻井流体储层伤害模型,见式(2):

$$\Delta Q = 1.165\rho + 4.662PV - 11.081AV + 0.556FV + 5.103YP - 0.372YP/PV + 1.975pH + 1.04 \times 10^{-15} \quad (2)$$

1.4 多参数模型准确性评价

相关系数、决定系数是反应模型准确性的常用指标。相关系数反映了所有自变量 X 与因变量 Y 之间的线性相关程度,其值越接近于1,说明线性相关越密切。决定系数(R^2)是指在线性回归中,回归平方和与总离差平方和之比值,其数值等于相关系数的平方,是对估计的回归方程拟合优度的度量。钻井流体储层伤害模型相关系数为0.877,反映出模型中7个自变量与目标函数的值相关性较低。决定系数为0.778,表明表示回归模型可以解释因变量的方差的77.8%,说明模型受到部分非主控因素干扰精度较低,需要进行主控因素查找。

1.5 削元寻找主控因素及模型建立

利用剥茧算法进行削元以去除非主控因素带来的影响,使模型准确度提高。具体是分别利用削去密度(ρ)、塑性黏度(PV)、表观黏度(AV)、漏斗黏度(FV)、动切力(YP)、动塑比(YP/PV)、pH值后,再进行系数排序,如系数排序发生变化则为主控因素,反之,系数排序不发生变化则为非主控因素,具体排序情况见表3。

从表3中可以看出,分别削去AV、PV、YP、 ρ 、pH、YP/PV后,各因素回归系数的大小排序发生了变化,说明该因素对目标函数影响较大。削去FV后,各因素排序未发生变化,说明是非主控因素,所以首先削去FV这一因素。削去FV后再进行削元,利用剥茧算法经过3次削元,去除了FV、PV、YP这3个非主控因素。

以 ρ 、pH值、YP/PV、AV为自变量,以煤层气井邻井平均日产量差为因变量,利用SPSS软件拟合得到绒囊钻井流体储层伤害模型如下:

$$\Delta Q = 0.428\rho - 1.561AV - 0.535YP/PV + 1.600pH - 0.35 \quad (3)$$

模型中可以看出,绒囊钻井流体的密度、pH值与平均日产量差成正比,有利于减小储层伤害,而表观黏度、动塑比与平均日产量差成反比,是在施工过程中应该注意减小的因素。

1.6 钻井流体储层伤害模型准确性分析

利用剥茧算法找到主控因素,建立了煤层气钻井流体储层伤害模型后,需要对各因素间进行Person相关分析,分析各因素之间的相关程度。若各因素间存在明显的线性相关性,则模型会受到多重共线性影响而准确性降低^[11]。利用SPSS软件对模型中各自变量进行Person相关分析的结果见表4。

从表4可以看出,各自变量之间相关程度均低于0.36,表明各因素间无明显的线性相关性,避免多重共线性的出现,模型可以进行储层伤害定量分析。

除去非主控因素后建立的钻井流体储层伤害模型的相关系数 R 为0.937,决定系数 R^2 为0.879,表明利用剥茧算法去除非主控因素后,模型的精度较为准确,该模型可以进行储层伤害程度定量分析。

表3 削元后回归系数排序情况
Table 3 Ranking of regression coefficients after cutting

	YP	PV	pH	ρ	FV	YP/PV	AV
未削元	5.103	4.662	1.975	1.165	0.556	-0.372	-11.801
未削元	5.103	4.662	1.975	1.165	0.556	-0.372	-11.801
去掉AV	0.306	-0.707	1.309	0.918	-1.111	0.074	
去掉PV	2.23		1.555	1.175	-0.66	-0.103	-3.203
去掉FV	4.001	3.348	1.897	1.152		-0.272	-8.915
去掉YP		0.71	1.281	0.732	-0.847	0.1	-1.233
去掉 ρ	1.49	4.62	1.093		0.338	-0.058	-7.069
去掉YP/PV	2.682	2.805	1.593	14.018	-0.126		-6.781
去掉pH	-1.821	-1.045		0.923	-0.492	0.446	2.812

表4 平均日产气量模型参数偏相关性分析
Table 4 Partial correlation analysis of average daily gas production model parameters

控制变量		ρ (g/cm ³)	AV (mPa·s)	YP/PV [Pa/(mPa·s)]	pH
ρ	相关性	1.000	0.352	-0.067	-0.203
	显著性(双尾)		0.288	0.846	0.549
AV	相关性	0.352	1.000	0.208	0.474
	显著性(双尾)	0.288		0.539	0.141
YP/PV	相关性	-0.067	0.208	1.000	0.473
	显著性(双尾)	0.846	0.539		0.142
pH	相关性	-0.203	0.474	0.473	1.000
	显著性(双尾)	0.549	0.141	0.142	

2 模型应用效果评价

储层伤害程度的评价及储层伤害类型的确定是保护储层的基础,利用钻井流体储层伤害模型,将现场数据带入其中就可以确定储层伤害的程度及类型,为减小储层伤害提供指导。

2.1 评价储层伤害程度

利用该模型计算结果可以表征钻井过程中钻井流体的储层伤害程度,将标准化后的9口井数据代入模型计算得到的平均日产量差如图1所示。

从图1中可以看出,9口井拟合得到的平均日产量差可以分成2类:CLY37、DFS-02、吉U2、延3-V1、

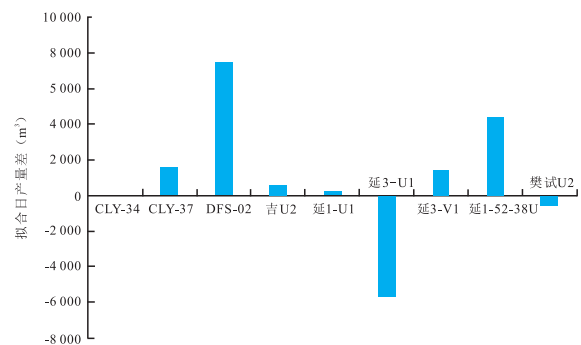


图1 9口煤层气井储层伤害程度拟合
Fig. 1 Reservoir damage degree fitting of nine CBM wells

延1-52-38U、延1-U1 6口井拟合结果为正,表明缝囊钻井流体在钻井过程中的储层保护效果较好,单井产量较理想;CLY-34、樊试2、延3-U1等3口井拟

合结果为负,表明绒囊钻井流体在钻井过程中产生了部分储层伤害,单井产量还有提升空间。从整体拟合情况来看,绒囊钻井流体完钻井的储层保护效果好的井占总数的66.67%,说明绒囊钻井流体整体的储层保护效果较好。拟合值最高的DFS-02井平均日产量为8 134.25 m³/d,拟合最低的延3-U1平均日产量仅为1 095.33 m³/d,同样也证明了模型的正确性。

2.2 储层伤害因素定量评价

CLY-34、延1-U1、延3-U1等3口井储层伤害较为严重,利用模型对这3口井具体的储层伤害情况进行了分析,各因素对目标函数的影响情况见表5。

从表5中可以看出,3口井绒囊钻井流体性能对产量的影响程度各不相同。CLY-34井pH值和密度对储层伤害的影响较大。pH值影响处理剂的性能,进而影响体系的封堵性能,封堵性能好,储层保护效果好。密度与储层的应力敏感相关,说明在钻井过程中随着井眼在储层中的延伸,煤层发生了应力敏感。樊试2井pH值、动塑比对储层伤害的影响较大。动塑比与钻井流体产生的激动压力相关,动塑比高激动压力越大,钻井流体进入地层中量越大越容易引起储层伤害。延3-U1井表观黏度对产量的负面影响较大,表观黏度与钻井流体中总的固相含量相关,表观黏度大表明体系固相含量高,过多的固相容易随钻井流体进入储层进而引起储层伤害。由以上分析可知CLY-34井是由于体系封堵能力不理想、应力敏感产生储层伤害,樊试2井是由于体系封堵能力不理想、激动压力高正压差大引起的储层伤害,而延3-U1是由于固相颗粒堵塞引起的储层伤害。

3 结果讨论

钻井流体储层伤害模型给出了钻井流体性能与储层伤害的定量关系。利用该模型既可以定量评价

表5 储层伤害单因素影响效果拟合结果
Table 5 Fitting results of single factor effect

井号	AV	YP/PV	ρ	pH
CLY-34	0.85	1.64	-0.18	-1.96
樊试2	0.71	-0.53	-0.12	-0.65
延3-U1	-2.34	-0.53	0.25	0.00

钻井流体性能对平均日产量差的影响进而评价模型中各因素的储层伤害情况,同时还可以指导钻井施工中绒囊钻井流体的性能调整,以减小储层伤害提高单井产量。

3.1 解决了目前储层伤害评价方法未与钻井流体性能建立关系难以指导其改进的难题

目前常用的储层伤害矿场评价方法只能定量的诊断储层伤害的程度,而无法给出钻井流体具体性能与储层伤害的关系,利用剥茧算法建立的钻井流体储层伤害模型可以定量给出各基础参数与单井产量的关系。模型中各因素对产量影响的回归系数大小如图2所示。

从图2中可以看出,4个因素中表观黏度回归系数为-1.561,与固相颗粒堵塞产生的储层伤害相关。固相含量是影响表观黏度的主要因素之一,其值越高,表观黏度越大。而煤层地层压力系数较低,钻井流体中固相会在正压差作用下侵入煤岩的孔隙或微裂缝中产生较大的储层伤害。

pH值回归系数为1.6,与绒囊流体的封堵性能相关。绒囊钻井流体中的主处理剂在碱性条件下才能更好的发挥其作用而使绒囊钻井流体封堵性能良好,及时封堵煤岩的孔隙及微裂缝,进而减小储层伤害。

密度回归系数为0.428,与应力敏感相关。煤层气储层天然裂隙发育明显,孔隙度、渗透率等物性对应力十分敏感。钻井过程中随着钻井流体密度的增加减小了井眼附近煤层的应力敏感程度,进而减小了储层伤害。

动塑比回归系数为-0.535,与激动压力、固相颗粒堵塞产生的储层伤害相关。动塑比越大,钻井流

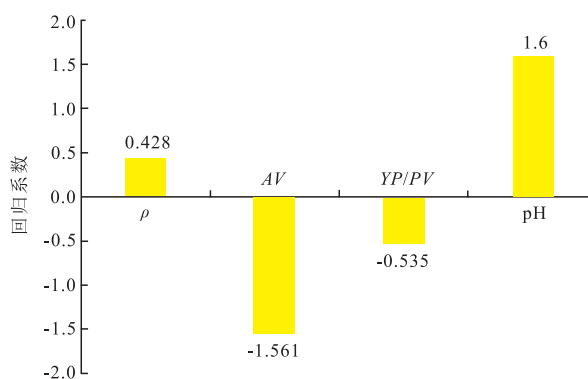


图2 各因素回归系数对比

Fig. 2 Comparison of regression coefficients of various factors

体容易产生较大的激动压力使钻井流体的固相、液相向煤层侵入增加进而增大储层伤害。

目前常用的试井、测井及生产曲线递减法只能通过计算得到表皮系数诊断储层伤害程度,利用大数据方法可以得到绒囊钻井流体性能指标的储层伤害程度,更利于指导现场工作液的配制。

延川南煤层气田位于鄂尔多斯盆地东南缘,构造上属于晋西挠褶带南端、汾渭地堑的西北部,主力含煤层系为二叠系山西组,整体为一倾向北西的单斜构造,中部西掌断裂带将气田分为谭坪、万宝山2个构造带^[2]。绒囊钻井流体先后施工了延1-52-38UP、延3-V1、延5-V1、延1-52-38UP、延3-U1P等5口生产井。

延5-V1是延3V1的邻井,地处山西省乡宁县昌宁镇神底村小武春延5井平台,位于谭坪构造带,目的层为山西组2#煤层。该井组由1口直井(延5-V1)、2口水平井(延5V1-P1、延5V1-P2)组成,完井后由2口水平井提供泄流通道,直井进行排采生产。在2口水平井水平段施工过程中,根据回归模型在延3-V1施工过程中钻井流体性能的基础上适当调整了绒囊钻井流体性能,具体见表6。

从表6中可以看出延5-V1井密度提高了0.04 g/cm³,表观黏度减小了0.5 mPa·s,动塑比减小了0.1 Pa/(mPa·s),pH值减小0.5,而单井日产量提高了近800 m³,取得了较好的效果。

3.2 大数据方法考虑因素多、并实现多因素同时调整

基于大数据方法的钻井流体储层伤害模型在建立过程中收集整理了绒囊钻井流体性能参数、排采参数等基础数据共81个,考虑了现场能够收集到与储层伤害相关的钻井流体密度、表观黏度、塑性难度、漏斗黏度、动切力、动塑比、pH值7个性能参数,并统计了18口井在排采过程中的平均日产量,充分考虑了全套的钻井流体性能与整个排采周期的产量情况。而以往的矿场评价方法主要考虑表皮系数这一个参数。由此可知,大数据方法考虑更多的因素,因此更全面、系统,能更好地指导现场。

在实际的现场施工过程中,各个工程参数受设备、技术、材料等条件的制约,有其固定的取值范围,在相同的目标产量下,单因素分析后对现场进行指导所取数值有时会超出实际的取值范围,且钻井流体各性能间相互影响,所以制定的技术方案没有实

际意义,而多因素可以将更多因素进行同时调整避免了上述问题的出现。

从表7中可以看出,CLY-34井产量差均调整为1763 m³/d的条件下,单因素方案需将动塑比调整到0.31 Pa/(mPa·s),常规水基钻井液动塑比一般不低于0.36 Pa/(mPa·s)否则将影响钻井流体的携岩性,而多因素方案在保持密度不变的情况下,只需将动塑比调整到0.51 Pa/(mPa·s),pH值提高到9、表观黏度提高到25.24 mPa·s即可,且各性能参数均在现场可调整范围内,使得多因素方案更具有可操作性。由此可见,大数据方法考虑更多的因素,因此,此方法更全面、更系统。

3.3 方法的适用性

利用大数据方法研究具体问题,首先要保证收集现场数据的真实性,否则后期的数据处理无论多么完美都无意义,甚至产生错误结论。在研究某一方面的问题时,要保证其他方面是成功的,否则其实际意义也不大。在顺利完钻且已经进入开发阶段生产井的前提下,研究了钻井液性能与储层伤害之间的关系,钻井流体的性能满足工程方面携岩、井壁稳定等需求,只是生产过程中发现部分井在钻井施工过程中存在储层伤害,所以收集资料建立模型进行分析,就单井而言其他的方面是成功的,这就避免了其他工程问题对研究对象的干扰。所以在利用大数据

表6 延3-V1、延5-V1井钻井流体性能统计
Table 6 Drilling fluid performance statistics of Well-Yan3-V1 and Well-Yan5-V1

井号	ρ	AV	YPI/PV	pH
延3-V1	1.02	31.5	0.74	10.5
延5-V1	1.06	30.5	0.60	10.0

表7 CLY-34井单因素、多因素不同方案结果对比
Table 7 Comparison of single factor and multiple factor results of Well-CLY-34

数据类型	ρ	AV	YPI/PV	pH	ΔQ	方案
标准值	-0.418	-0.544	-3.065	-1.225	0	单因素
实际值	1.000	17.498	0.305	7.500	1763.934	
标准值	-0.400	-0.920	-1.880	-1.200	0	多因素
实际值	1.000	25.244	0.509	9.122	1763.197	
标准值	-0.540	-1.750	-0.420	-1.220	-0.540	原数据
实际值	17.500	0.440	1.000	7.500	501.950	

方法研究现场问题时,数据收集是基础也是比较关键的部分。

4 结论及建议

1) 利用现场数据建立了缝囊钻井流体储层伤害数学模型,明确了表观黏度、密度、动塑比、pH值4个主控因素与储层伤害程度之间的关系,并利用该模型分析了低产井储层伤害严重的原因,指导现场缝囊钻井流体性能的改进,解决了表皮系数等储层伤害评价方法只能诊断不能有效指导现场的难题。

2) 该方法是基于现场数据建立模型指导现场施工的方法,还可以应用于修井、压裂等施工过程中流体性能、施工参数优化,也为其他施工过程的工艺参数、工作流体性能优化提供了一种可借鉴的新思路。

3) 数据只收集了9口符合条件井的资料,数据量相对较少,仅使用了大数据的方法研究现场问题,为了使模型预测或者评价结果更准确,模型中还需要引入更多数据。

参考文献

- [1] 郑力会,刘皓,曾浩,等.流量替代渗透率评价破碎性储层工作流体伤害程度[J].天然气工业,2019,39(12):74-80.
ZHENG Lihui, LIU Hao, ZENG Hao, et al. Evaluation of working fluid damage in fractured reservoirs using flow rate instead of permeability[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(12): 74-80.
- [2] 刘波涛,王新海,王钊.储层损害定量评价软件研制与应用[J].计算机工程与设计,2014,35(4):1439-1446.
LIU Botao, WANG Xinhai, WANG Zhao. Development and application of reservoir damage quantitative evaluation software [J]. Computer Engineering and Design, 2014, 35(4): 1439-1446.
- [3] 张鹏,牛纪颖,王相春.利用常规测井信息计算储层伤害表皮系数初探[J].油气井测试,2010,19(2):32-35.
ZHANG Peng, NIU Jiling, WANG Xiangchun. Preliminary study on calculation of formation damage skin factor by conventional well-logging data[J]. Well Testing, 2010, 19(2): 32-35.
- [4] 刘晓华,邹春梅,姜艳东,等.现代产量递减分析基本原理与应用[J].天然气工业,2010,30(5):50-54.
LIU Xiaohua, ZOU Chunmei, JIANG Yandong, et al. Theory and application of modern production decline analysis[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(5): 50-54.
- [5] 郑力会,鄢捷年,陈勉,等.油气井工作液成本控制优化模型[J].石油学报,2005,26(4):102-105.
ZHENG Lihui, YAN Jienian, CHEN Mian, et al. Optimization model of working fluid cost control in oil and gas wells[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 26(4): 102-105.
- [6] 任宜伟,楼宣庆,段宝江,等.工程参数对L区煤层气直井产量影响的定量研究[J].石油钻采工艺,2016,38(4):487-493.
REN Yiwei, LOU Xuanqing, DUAN Baojiang, et al. Quantitative analysis on the effect of engineering parameters on production rate of CBM vertical well in Block L[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 38(4): 487-493.
- [7] 陶杉,余星,宋海,等.大数据方法寻找顺北碳酸盐岩储层开采过程中井壁坍塌主控因素[J].石油钻采工艺,2020,42(5):627-631.
TAO Shan, YU Xing, SONG Hai, et al. Using big data method to find the main controlling factors of wellbore collapse in the production process of Shunbei carbonate reservoir[J]. Petroleum drilling and production technology, 2020, 42(5): 627-631.
- [8] 郑力会.仿生缝囊钻井液煤层气钻井应用效果与发展前景[J].石油钻采工艺,2011,33(3):78-81.
ZHENG Lihui. Application state and prospects of bionic fuzzy-ball drilling fluids for coalbed methane drilling[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(3): 78-81.
- [9] 郑力会,曹园,韩子轩.含缝囊结构的新型低密度钻井液[J].石油学报,2010,31(3):490-493.
ZHENG Lihui, CAO Yuan, HAN Zixuan. Novel low-density drilling fluid containing fuzzy ball structure[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 31(3): 490-493.
- [10] 包凤达,翁心真.多元回归分析的软件求解和案例解读[J].数理统计与管理,2000,19(5):56-61.
BAO Fengda, WENG Xinzhen. The software solving of multiple regression and correlation analysis and case explanation[J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2000, 19(5): 56-61.
- [11] 王娟,梁登星.岭回归在修正多重共线性中的应用[J].四川理工学院学报(自然科学版),2013,26(3):98-100.
WANG Juan, LIANG Dengxing. Application of ridge regression on revising multicollinearity[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition), 2013, 26(3): 98-100.

(编辑 徐佩)