

引用格式:郑力会,徐燕东,邱子瑶,等.完整作业信息定量分析顺北油田钻完井漏失因素[J].油气藏评价与开发,2021,11(4):597-604.
ZHENG Lihui, XU Yandong, QIU Ziyao, et al. Quantitative analysis on drilling and completion loss factors by all data in Shunbei Oilfield[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(4): 597-604.
DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.04.016

完整作业信息定量分析顺北油田钻完井漏失因素

郑力会¹,徐燕东²,邱子瑶³,耿云鹏²,董省委⁴,杨煦旻¹

(1. 中国石油大学(北京),北京 102249;2. 中国石化西北油田分公司,新疆 乌鲁木齐 830011;
3. 中国石油新疆油田分公司采油一厂,新疆 克拉玛依 834000;4. 中国石化中原油田分公司濮东采油厂,河南 濮阳 457001)

摘要:针对解析法等定性研究方法指导现场防漏堵漏缺乏针对性,定量预测法在预测漏失时使用的工程数据不完整且在预测出漏失程度后未提出如何通过调整相关参数定量控制漏失的难题,提出了引入剥茧算法解决。选取顺北油田记录了平均漏失速率的29口井中的27口的全部测量参数,以平均漏失速率为目标函数,井深、钻完井液密度等作自变量,建立多元一次回归方程并求解方程的待定系数。理论上,运用T检验和F检验证明方程满足工程分析要求;实践中,用未参与方程建立的两口井的数据检验方程误差,计算值与实际值相对误差均在6%左右,满足工程控制需要。使用贡献率法和削元法简化目标方程,最终筛选出17个影响平均漏失速率的因素,其中10个钻井流体因素的贡献值在50%以上,即通过调整钻井流体性能可以控制一定的平均漏失速率。为现场控制方便,将钻井流体的性能用六速黏度计300 r/min读数换元,使得钻井流体的主控参数减少到pH值和六速黏度计300 r/min读数两项,通过分析该三元方程预测出最小平均漏失量为2.3 m³/h。针对顺北区块的特点,通过定量分析发现顺北油田漏失涉及地质、工程等作业环节并找到了钻完井漏失主控因素,通过削元、贡献率等方法筛选并计算出通过控制漏斗黏度、六速黏度计300 r/min读数得到的最小平均漏失速度。在指导堵漏现场实践方面,可以为后续施工措施获得理想的控漏效果提供基础数据支撑,为决策提供可选择的手段。

关键词:钻井;完井;钻井液;井漏;漏失速率;主控因素;剥茧算法;大数据;顺北油田

中图分类号:TE21

文献标识码:A

Quantitative analysis on drilling and completion loss factors by all data in Shunbei Oilfield

ZHENG Lihui¹, XU Yandong², QIU Ziyao³, GENG Yunpeng², DONG Shengwei⁴, YANG Xumin¹

(1. University of petroleum of China(Beijing), Beijing 102249, China; 2. Sinopec Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 3. No.1 Oil Production Plant, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China; 4. Pudong Oil Production Plant, Sinopes Zhongyuan Oilfield Company, Puyang, Henan 457001, China)

Abstract: The analytical method and other qualitative research methods to guide the field leakage prevention and plugging lack of pertinence. Meanwhile, the engineering data used by the quantitative prediction method in the prediction of leakage is incomplete and how to control the leakage quantitatively by adjusting the relevant parameters is not proposed after the loss degree is predicted. In order to solve the above problems, the cocoon stripping algorithm is proposed. Selecting all measurement parameters of 27 of 29 wells in Shunbei Oilfield with average loss rate recorded, and then taking the average loss rate as the objective function, the well depth and drilling and completion fluid density as the independent variables, the multiple linear regression equation is established, and the undetermined coefficients of the equation are solved. Theoretically, T test and F test are used to prove that the equation can meet the requirements of engineering analysis. In practice, the relative error between the calculated value and the actual value of two wells that did not participate in the equation establishment is about 6 %, proving that the equation meets the needs of engineering control. Finally, 17 factors affecting the average loss rate have been screened out by the target equation simplified by

收稿日期:2021-05-08。

第一作者简介:郑力会(1968—),男,教授,研究员,高级工程师,主要从事破碎储层产量伤害防治的理论、方法和工艺等科学技术工作。
地址:北京市昌平区府学路18号,邮政编码:102249。E-mail: zhenglihui@foxmail.com

基金项目:中国石化重大科技项目“顺北一区采输关键技术研究与应用”(P18022)。

the contribution rate method and the cutting element method, among which 10 drilling fluid factors contribute more than 50 %, indicating that a certain average loss rate could be controlled by adjusting the performance of drilling fluid. For the convenience of field control, the performance of drilling fluid is changed by the reading of six-speed viscometer at 300 r/min, so that the main controlling parameters of drilling fluid are reduced to two, which are pH value and the reading of six-speed viscometer at 300 r/min. The minimum average loss is predicted to be 2.3 m³/h through the analysis of the three-element equation. Considering the characteristics of Shunbei block, the leakage in Shunbei oilfield involves geological, engineering, and other operation links is found out through quantitative analysis, and so does the main controlling factors of drilling and completion leakage. By means of cutting elements, contribution rate and other methods, the minimum average leakage rate obtained by controlling the funnel viscosity and the reading of six-speed viscometer at 300 r/min is calculated. In the aspect of guiding the field practice of plugging leakage, it can provide basic data support for the subsequent construction measures to obtain the ideal leak control effect, and provide an optional means for decision-making.

Keywords: drilling, well completion, drilling fluids, lost circulation, loss rate, main controlling factors, cocoon peeling algorithm, big data, Shunbei

顺北油田是近年来塔里木盆地的重大发现,但钻完井过程中漏失频繁、漏失量大、钻井周期长、储层伤害可能性大^[1]。为加快钻井进度,提高油井效益,必须加强防漏堵漏工作。而提高防漏堵漏成功率的前提和基础是准确确定漏失主控因素,获得针对性强的防漏堵漏措施。因此,分析漏失因素成为研究的重点。

初期,学者从地层岩性出发,定性地认为地层内存在的裂缝、孔洞和孔隙是钻完井过程中漏失的主要原因,推荐采用裂缝封堵材料或者孔隙封堵材料防漏堵漏^[2-4]。尽管防漏堵漏的材料种类很多^[5],但无法针对漏失因素提供封堵材料性能和指出施工工艺参数。这主要是由于地下漏失通道的尺度和形态无法量化描述,指导防漏堵漏的作用并不大。为解决定性研究指导现场缺乏针对性的难题,定量预测漏失程度成为热点。

定量预测漏失程度的数学计算方法较多,主要有故障树法、支持向量回归方法、机器学习法、决策树法、随机森林法、多元线性回归法等^[6-11]。尽管使用的数学计算方法不同,但都是用作业过程中的部分数据预测漏失量。至于预测出漏失程度后,如何通过定量控制参数以控制漏失,还没有看到有关文献的报道。特别是,有的方法利用的是无法测量的井下因素计算漏失程度,再通过历史拟合模拟地层漏失。虽然这些方法可以很好地符合过去漏失状况,但没有改变与定性指导一样,缺乏针对主控因素的具体性能参数,难以采取有效措施实现防漏堵漏。因此,有必要尝试利用所有的能够测量信息作为自变量参数的思想,预测漏失程度,提出治理措施。

但是,石油工程数据类型多、数据量分布不均衡、数据记录误差大,利用所有数据求解数值解法,会遇到数据计算方法不易选择、影响因素太多无法现场施工、无法控制等难题。因此,大多数研究采用解析法,而鲜有人使用全面的数据运用数值法去预测。这里引入的剥茧算法使用数值法预测漏失,解决了计算过程中运算速度慢,可控制的因素太多等难题,而应用于石油工程诸多方面。

剥茧算法始于2004年。最初是郑力会等利用全部的实验数据优化钻井液成本^[12],后进一步发展用于优化给定目标钻井液流变参数下处理剂加量^[13]。使用过程中发现,改变整个因素中的某个因素会影响整个体系性能。同时,因素自身的作用也会变化。因此,可以通过所有参数的变化寻找处理剂的最佳加量。还发现,数据处理过程需要数学计算方法和专业知识结合,并考虑因素之间的相互逻辑关系。因此,把这种将数学方法和逻辑关系结合在一起优化方法,称为剥茧寻优算法。

后来,储层伤害控制研究和应用需要利用所有工程信息,通过权重系数排序确定因素的重要性,解决储层伤害控制对策的不定量性。例如,在2016年用于评价柳林煤层气田开发过程中工程参数对产量的影响程度^[14],2018年用于评价绒囊钻井流体伤害煤层气的主要性能^[15]以及2019年利用室内实验所有信息确定流量代替渗透率用于评价储层伤害的可行性^[16],2020年用于寻找顺北油田开采过程中井壁失稳因素^[17]。这些工作,发现许多从专业知识看没有关系的影响因素,计算后发现有一定关系,并定量求出了影响因素的控制范围,并在实际工作中取得明显

的效果,由此将剥茧寻优算法进一步发展成寻找主控因素。把通过非人为干预逐个筛查所有因素对结果造成的影响程度,根据排序、贡献率确定主控因素的方法,称为剥茧寻根算法。

寻优是优化工艺,寻根是寻找机理。剥茧寻优和剥茧寻根的共同之处是,不采取人为赋值的方法,通过计算机技术、利用数学计算方法逐个别除非主控因素,从而获得主控因素的定量参数,将各因素逐一分析,最终找到人为可以控制的因素并给出控制范围。就像剥茧抽丝,故称为剥茧算法(Cocoon Peeling Algorithm,简称CPA)。

顺北油田为断溶体油藏,地质情况复杂,井下漏失是由地质、工程和流体诸多因素共同作用造成的^[18],不可能用少数的因素控制钻完井漏失。众多因素共同作用的结果就是很难用解析法预测漏失程度或者寻找主控因素,而剥茧算法则是从完整信息中寻找漏失诸多控制因素,非常适合这一地区的漏失因素预测。

寻找主控因素的具体思路是,首先全面分析顺北地区油气田的地质、工程和流体资料,将可以表征漏失程度的有测量结果的资料作为因变量和自变量,建立目标函数与自变量数学方程并求解待定系数,在评价方程合理性后筛选出主控因素。整个分析过程中,将顺北油田的钻完井工程所有测量结果都参与计算,从而体现出整个区块的趋势、发现自变量间有相互关系,是一种具有大数据思想的,用于寻找石油工程信息之间关系的方法。

1 钻完井漏失因素分析

顺北油田钻完井过程中漏失影响因素多^[19],为了从众多的因素中找到人为可控制的因素,进而通过人为可控因素实现漏失控制,首先要从寻找漏失的影响因素入手。

1.1 漏失数学方程变量确定

根据收集的顺北油田SHB1、SHB2等48口已完钻井现场资料,发现顺北地区测量的信息中与井漏可能相关的资料包括地质、钻完井工程和钻井流体性等3个方面测定的数据。其中井深、垂深、大地坐标 X 、大地坐标 Y 、井斜角、方位角、孔隙度、渗透率、岩性等地质因素9项,泵压、钻压、转速、钻时、排量等

工程因素5项,漏斗黏度、初切力、终切力、六速黏度计(600,300,200,100,6,3 r/min)读数、钻完井液失水量、固相含量、钻完井液密度、钻完井液pH值等流体因素13项,总计27项。

进一步分析发现,48口井中有的仅记录了漏失的总量,没有相关时间。只有29口井记录了平均漏失速率或者记录了一定时间内的漏失量。可见,平均漏失速率不仅可以表征漏失程度,还有足够的数据用于计算,因此,用平均漏失速率作目标函数,即因变量。因漏失量是平均漏失速率的时间积分,所以漏失量不作为自变量。单井总漏失量、平均漏失速率和漏失时间等3个漏失相关的参数,都可以用平均漏失速率来代替,所以用平均漏失量作为因变量,即可表征漏失程度。这样,27个参数变成25项,1项作目标函数,24项作自变量,就可建立数学方程。

1.2 漏失数学方程建立

方程建立前首先选择数学方法。由于使用多元回归法建立数学关系具有表达直观、自变量参数物理意义明确、方程合理性验证方法成熟等优势,多元回归法在钻井工程预测钻速^[20]、钻井液预测流变模式等^[21]工作中多有应用。所以,利用多元回归方法建立平均漏失速率与影响因素之间的数学关系。

从有平均漏失速率记录的29口井中,任意选择27口,建立方程并求解待定系数,得到顺北地区平均漏失速率预测模型。再用剩余的2口井,估算相对误差大小。

$$Y=(0.029 6G_1+\dots+0.011 6G_6)+(0.094 7E_1+\dots+0.140 0E_3)+(0.035 4F_1+\dots+0.019 7F_{13})+0.003 9 \quad (1)$$

式(1)是用27口井24个自变量建立的平均漏失速率方程,除了常数项外, G 为地质因素, E 为工程因素, F 为流体因素,下角标表示因素的序数,具体参数类型见前文叙述。

1.3 方程合理性评价

方程的合理性评价方法主要有两大类。一是从理论上利用数学方法检验方程合理性,二是从实际作业中,利用现场数据检验方程的相对误差。

1) 理论上,评价方程的合理性,可以用单因素作用可信度评价和多因素共同作用可信度评价2种方法。单因素作用可信度评价采用T检验法,离差(检验值)计算值越大,方程可信度越低。多因素共

同作用可信度评价一般采用F检验法,方差比越大,模型准确度越高,各因素共同作用对目标预测可信度越高。

利用SPSS软件计算方程(1)发现,绝大多数单因素的T检验值都小于40,相对较小;超过40的因素分别为:六速黏度计200 r/min时的读数41.503,钻完井液密度632.953,钻完井液失水量124.587,排量94.242。这可能是由诸如测量误差、泵上水效率等多原因造成的。24个自变量中只有这4类因素的离散程度较大,方程整体上可信度较高。

利用SPSS软件计算式(1)发现,平均漏失速率模型F检验值为96.6%,即误差在5%以内,可以认为各因素与目标函数的显著性明显,方程比较准确。

2) 实践上,评价方程的可信度,用相对误差法最为常见。现场利用29口井剩余的两口井SHB3和SHB4的地质信息、工程信息和流体信息,代入顺北地区平均漏失速率预测模型方程(1)。预测两口井的全井平均漏失速率分别为22.664,35.036 m³/h,实际平均漏失速率分别为24.23,37.41 m³/h。两口井的平均漏失速率计算值与实际值相差分别为-1.566,-2.374 m³/h,误差分别为6.90%,6.35%,可以看出方程符合率相对较好。

2 钻完井漏失主控因素分析

全因素方程建立后,需要采用数学方法寻找主控因素。剥茧算法一般采用削元法、泛函数法寻找影响因素。如果影响因素还较多,现场无法实施控制,采用影响因素对目标函数的贡献率之和大于90%这一指标,确定主控因素。

2.1 削元法分析主控因素

削元法在室内筛选主控因素^[29]和室内优化工作流体^[29]中都使用过,关键是对方程中任意因素赋0,再拟合方程。若剩余因素系数绝对值排序无变化,表明此因素对井漏影响较小,或是方程中的其他因素已经包括其作用,故为非主控因素,可以剔除。这样从27个因素中筛选出了17个因素,包括垂深、大地坐标X、大地坐标Y等3个地质因素,泵压、转盘转速、钻时、钻压等4个工程因素,钻井流体的pH值、漏斗黏度、初切力、终切力、六速黏度计(600,300,200,100,6,3 r/min)读数等10个流体因素。

2.2 贡献率法分析主控因素

进一步分析发现,井深和大地坐标对于具体的井位是有确定数据的,一旦确定,现场是不可能更改的,故为非人为因素。钻时可以用泵压、钻压等因素来表征,正常钻井的钻时是相对确定的,可以说是有限度的非人为因素或者不完全的人为因素。剩余因素是钻井流体日常测量性能,通过处理剂是可以控制的。因此,可以将方程进一步变形为式(2):

$$S = 0.6678G_1 + \dots + 0.5639G_3 + 2.2605E_1 + \dots + 0.1184E_4 + 0.5574F_1 + \dots + 1.6597F_{10} + 0.0913 \quad (2)$$

式中:S为用贡献率法得到的平均漏失速率,m³/h;G为地质因素,无法人为控制;E为工程因素,人为可一定限度内控制;F为流体因素,通过调整配方可以人为控制;下角标为因素的数量。

式(2)表明,如果控制好钻井流体的日常测量性能,就有可能实现漏失量最小。当然,如果在钻井流体性能难以满足时,也可以调整工艺参数以实现漏失最小化。但是,在未钻开地层前,不可能对工程参数进行调整。同样,理论上也可以改变地质因素,通过调整井位控制井漏速度,但这在生产中是完全不可行,因为钻井是为了达到地质目的而非工程目的。

贡献率是指用单个因素系数除以所有因素系数之和。贡献率法在石油工程中经常用到,如计算裂缝对产量贡献^[24]。17个影响因素中,除了大地坐标X、Y和转盘转速、钻压等4个因素外,垂深、泵压等剩余13个因素对平均漏失速率的贡献率大于90%,其中钻井流体相关的10个因素对平均漏失速率的贡献率之和达到53.6%,即只要把与钻井流体相关的10个因素控制好,就有可能将平均漏失速率控制在一定范围内。

3 因素分析结果讨论

计算表明,钻井流体的漏失是多因素的,除了无法人为控制的地层因素,还包括正常钻井时的工艺参数,分析钻井流体的流变参数,有可能为钻完井工程提供更有针对性的建议。

3.1 剥茧算法利用全面信息实现钻完井流体漏失影响因素定量化

钻完井过程中的漏失是多因素共同作用的结

果,自身也是影响因素。为了更有效地控制漏失,需要找到式(2)中人为可控的漏失因素并加以量化,为控制漏失提供基础。

现在通常使用的预测漏失程度,判断漏失影响因素的方法主要有解析法、定量预测法和剥茧算法。和其他两种方法相比,剥茧算法使用完整的工程参数做自变量,通过逐步筛选出漏失的影响因素和人为可控因素,以实现漏失影响因素的量化。剥茧算法和其他两种方法分析的参与处理因素、漏失影响因素和人为可控的漏失因素具体见表1,数量对比见图1。

1) 剥茧算法使用完整的工程信息做自变量参与处理,比定性预测漏失情况的解析法和只使用作业中部分信息进行漏失分析的定量预测法,考虑的因素更全面。

从表1和图1中可以看出,剥茧算法将顺北油田

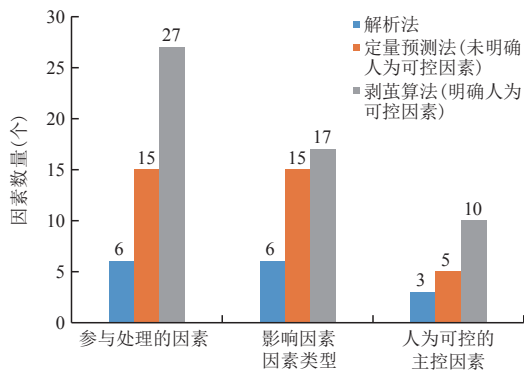


图1 剥茧算法和其他预测方法使用的处理因素数目对比
Fig. 1 Comparison of number of processing factors used by peeling algorithm and other prediction methods

48口完钻井的所有地质、钻井、流体测量信息都加以应用,共27类因素,与以往的定量预测时使用的解析法6类、定量预测法15类^[25]相比,筛选主控因素的范围更大,传统的定量预测法相比,预测结果更加全面。

2) 剥茧算法使用无人干预的方法筛选出了漏失的影响因素,所计算出的影响因素更符合漏失是诸多因素共同作用的结果这一客观事实。

从图1中可以看出,文献[6]中使用的机器学习法筛选出影响漏失的因素有15类,文献[7]中使用的解析法筛选出的影响因素有6类。筛选的结果等同于使用的因素数量。人为设定的处理因素直接作为漏失程度的影响因素不但取决于处理者的专业水平,而且还不够严谨。剥茧算法使用削元法、贡献率法等非人为干预的方法对27类参与处理的因素分析,通过计算最终筛选出了17类钻完井漏失的主控因素。综上,解析法和定量预测法所得出的主控因素是人为设定的,具有一定的主观性。剥茧算法得到的主控因素是通过数学方法逐步筛选出来的,所以剥茧算法考虑的因素数量更多、更全面,获得主控因素的步骤也相对科学。

3) 剥茧算法通过分析排除了影响因素中非人为可控的地质因素和工程因素,获得的主控因素能够给现场控制漏失提供工程可以实现的性能。

从表1和图1中可以看出,和使用解析法获得的3类,使用定量分析法获得的5类人为可控的主控因素相比,使用剥茧算法获得了10类可控的主控因素,筛选出了一些从专业知识看没有关系,但实际上会对漏失造成影响的因素,不但在数量上优于其他两

表1 剥茧算法和其他预测方法使用的处理因素

Table 1 Processing factors used by peeling algorithm and other prediction methods

预测方法	参与处理的因素	影响因素	人为可控的主控因素
解析法	裂缝发育、地层承压能力、井筒压力、钻井液黏度、钻井液浓度、pH值	裂缝发育、地层承压能力、井筒压力、钻井液黏度、钻井液浓度、pH值	钻井液黏度、钻井液浓度、pH值
定量预测法	井深、孔隙度、破裂压力、渗透率、温度、最小水平主应力、单轴压缩强度、抗拉强度、原生裂缝方向、杨氏模量、钻井液密度、塑性黏度、漏斗黏度、钻井液固相含量、钻井液静切力	井深、孔隙度、破裂压力、渗透率、温度、最小水平主应力、单轴压缩强度、抗拉强度、原生裂缝方向、杨氏模量、钻井液密度、塑性黏度、漏斗黏度、钻井液固相含量、钻井液静切力	钻井液密度、塑性黏度、漏斗黏度、钻井液固相含量、钻井液静切力
剥茧算法	井深、垂深、大地坐标X、大地坐标Y、井斜角、方位角、孔隙度、渗透率、岩性、泵压、钻压、转速、钻时、排量、漏斗黏度、初切力、终切力、六速黏度计(600, 300, 200, 100, 6, 3 r/min)读数、钻完井液失水量、固相含量、钻完井液密度、钻完井液pH值	垂深、大地坐标X、大地坐标Y、泵压、转盘转速、钻时、钻压、钻完井液pH值、漏斗黏度、初切力、终切力、六速黏度计(600, 300, 200, 100, 6, 3 r/min)读数	钻完井液pH值、漏斗黏度、初切力、终切力、六速黏度计(600, 300, 200, 100, 6, 3 r/min)读数

种方法,而且预测结果也相对会更全面。

4) 剥茧算法除主控因素外还有一个常数项,体现了剥茧算法寻找主控因素的动态性。

从图1中可以看出,剥茧算法通过常数项筛选出了更多主控因素,体现了漏失现象不是一类或几类因素作用的结果,而是由多因素共同控制的。定量预测法通常只采用固定因素对漏失程度预测,实际上是解析法的发展。但现场实践证明,漏失是由多因素共同作用的结果,用单一或是少量因素进行漏失控制的话,预测结果就会出现一定的不稳定性。随着技术进步,可能会发现更多的特征参数,加入到计算中来,常数项也会随着参数计算的样本数变化。

可见剥茧算法考虑的因素数量更多、更全面,获得主控因素的步骤也相对科学。

3.2 剥茧算法获得的性能可以针对性地指导钻完井流体漏失控制

在筛选出10类可控的漏失因素后,就可以使用数学方式论证通过如何调整钻井流体的性能将漏失控制到最小。

首先只改变单因素控制漏失,漏失速度变化不大,反映钻井流体漏失的复杂性。先保持常数项、不可控的因素、不完全可控的因素不变,从10项人为可控的主控因素中选择能够代表动态数据的漏斗黏度和代表静态数据的终切力两类主控因素做自变量,分别求取漏失程度和这两种单因素的关系,以说明只改变单个因素并不能很好地控制漏失。单因素变化和漏失程度改变的关系见图2。

从图2中可以看出,漏失速率和漏斗黏度、终切力负相关,且纵坐标的漏失量均为负数,漏失量应该是钻井液从井筒流入地层的量,负数只是数学计算的角度获得的量,因此,纵坐标漏失量小于0。漏斗黏度无论怎么调整,漏失量在600 m³/h以上,而终切力则在700 m³/h以上,都难以控制到工程建立循环的漏失速度10 m³/h以下。同样,其他8项参数也是如此。

将方程(2)右边的常数项、非人为可控项和部分人为可控项移到方程左侧与漏失速率共同作为因变量并记做Y,得到方程(3):

$$Y = 0.5574F_1 + \dots + 1.6597F_{10} \quad (3)$$

方程(3)中, F_1 至 F_{10} 代表钻井流体的10个影响因素。由于钻井流体性能测试所用六速黏度计的300 r/min读数是其他黏度值的基准值,且其读数都

可以推导现有黏度计的其他读数,即将代表六速黏度计在其他转数时读数的 F_5 — F_{10} 按照与 F_6 的比例化简,把 F_5 — F_{10} 这6个流变参数都用300 r/min的读数来表达,所以将六速黏度计300 r/min的读数作为多因素方程的一个自变量。pH值是一项可人为调控的独立因素,计算表明pH值对漏失程度影响较大,所以将pH值作为方程的另一个自变量保留。因为通过建立了一个新函数减少了主控因素,称为函数法,即利用自变量之间的关系,减少自变量数量,从而得到式(4):

$$Y = 0.5574F_1 - 0.03177F_6 \quad (4)$$

为寻找两因素的最小值,可用最小二乘法计算^[26],计算漏失程度趋势,由于现场中常用的钻井液pH值大于7,塑性黏度调整范围一般为30~50,因此,漏失速率与pH值、塑性黏度的关系,见图3。

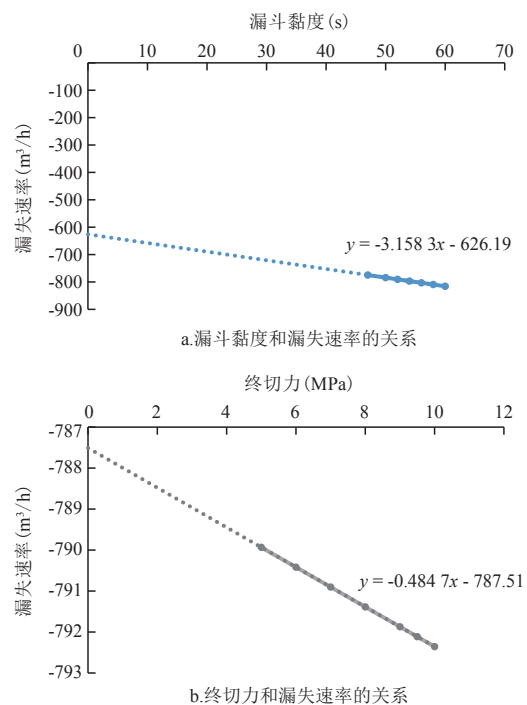


图2 单因素控制漏失速率趋势

Fig. 2 Loss rate controlled by single factor

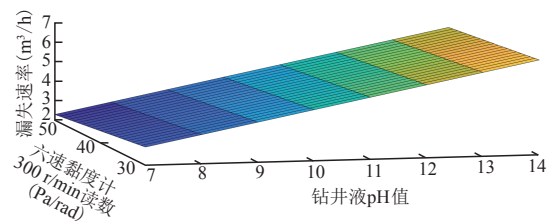


图3 多因素控制漏失速率趋势

Fig. 3 Trend of loss rate controlled by multi-factor

从图3中可以看出,钻井液pH值从7增加到14,六速黏度计300 r/min时的读数从30 Pa/rad增加到50 Pa/rad时,漏失速率数值从2.948 7变化到6.215 1;钻井液pH从7增加到14,六速黏度计300 r/min时的读数从50 Pa/rad减小到30 Pa/rad时,漏失速率从2.313 3变化到6.850 5。也就是说,只有钻井液塑性黏度在该范围内升高、钻井液pH值控制较低时,漏失程度才会降低。

1) 结合图2和图3可以看出,剥茧算法能够提出具有可操作性的控制对策。剥茧算法预测漏失时所用的主控因素都和钻井液的性能密切相关,且都是人为可控的。因此,可以通过调整钻井液的各项性能来控制钻井流体漏失,从而提出有可操作性的对策。

2) 结合图2和图3可以看出,漏失是由多因素共同控制的。以图2的漏斗黏度为例,只使用单因素对漏失进行控制时,即使将漏斗黏度从47 s调整至60 s,纵坐标也仅仅变化了41.057 9,可见若只使用单个或少数几个因素对漏失程度进行预测和分析,其结果很可能会存在较大的误差,达不到控制漏失的效果。

3) 结合图2和图3可以看出,剥茧算法预测漏失考虑更全面,需要对特定的主控因素整体调整才能达到控制漏失的目的。漏失是多因素共同作用的结果,仅调整单个目标值不能很好的控制漏失,同样有限的几个因素也未必能够控制钻井流体的漏失。

4) 结合图2和图3可以看出,有些地质情况下,单独靠钻井流体本身是无法控制漏失的。同样,由于方程中常数项的存在,工程上无法将漏失量控制为0的。但如果把对平均漏失速率贡献率之和达到53.6%的这10类可控因素控制好,就有可能将平均漏失速率控制在满意的范围内。

利用最小二乘法,优化钻井流体的10个性能参数发现,无论如何调整,其平均漏失量最小为2.3 m³/h,这说明该地区的漏失是由于地质因素造成的。建议将平均漏失量控制在2.3 m³/h时,认为满意,此时要将漏斗黏度控制在60 s、六速黏度计300 r/min时的读数控制为100 Pa/rad。这样,为生产提出明确的指导性建议。

4 结论

1) 针对顺北地区的特点,利用地质、工程、流体

等完整作业信息分析钻完井漏失因素,获得了17个主控因素,并通过削元、提取贡献率、构造新函数等方法提供了漏斗黏度控制在60 s、六速黏度计300 r/min时的读数控制为100 Pa/rad可以控制钻井流体的平均漏失速度2.3 m³/h,为后续施工措施获得理想的控漏效果提供了基础数据支撑,为决策提供可选择的手段。

2) 剥茧算法涉及数据类型多、数据量大,相对于解析方法,或者部分数据的定量法,计算速度较慢,需要根据数据特点,优化数学方法,加速计算过程。

3) 剥茧算法需要在不丢失可控因素的前提下,研究自变量间的定量关系,简化计算数据类型数量,完成计算后,再恢复原始自变量种类,加快计算速度,逐渐趋于完善。

参考文献

- [1] 李冬梅,柳志翔,李林涛,等.顺北超深断溶体油气藏完井技术[J].石油钻采工艺,2020,42(5):600-605.
LI Dongmei, LIU Zhixiang, LI Lintao, et al. Well completion technologies for the ultra-deep fault-dissolved oil and gas reservoir in Shunbei Oil and Gas Field[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(5): 600-605.
- [2] 冯英,王骁男.杭锦旗工区井漏机理分析与防漏堵漏技术[J].西部探矿工程,2017,29(10):82-85.
FENG Ying, WANG Xiaonan. Analysis of lost circulation mechanism and lost circulation prevention and plugging technology in Hangjinqi work area[J]. Western Exploration Engineering, 2017, 29(10): 82-85.
- [3] 李占军.大港油田南部油区防漏堵漏机理与对策[J].中国石油石化,2017,20(10):113-114.
LI Zhanjun. Mechanism and countermeasures of leak prevention and plugging in southern Dagang Oilfield[J]. China Petrochem, 2017, 20(10): 113-114.
- [4] 李宁,李龙,王涛,等.库车山前盐膏层与目的层漏失机理分析与治漏措施研究[J].广州化工,2020,48(11):101-103.
LI Ning, LI Long, WANG Tao, et al. Leakage mechanism analysis and leakage control measures of salt gypsum layer and target layer in front of Kuqa mountain[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2020, 48(11): 101-103.
- [5] 郑力会,吴通,陶秀娟,等.稳定井壁封堵材料分类的研究进展[J].石油机械,2021,49(4):1-9.
ZHENG Lihui, WU Tong, TAO Xiujuan, et al. Progress of research on classification of plugging materials for stabilizing borehole wall[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(4): 1-9.
- [6] 王海彪.井漏智能识别及处理决策研究[D].成都:西南石油大学,2017.
WANG Haibiao. Study of intelligent recognition and management decisions of lost circulation[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [7] 刘彪,李窈晓,李双贵,等.基于支持向量回归的井漏预测[J].钻采工艺,2019,42(6):17-20.

- LIU Biao, LI Chenxiao, LI Shuanggui, et al. Lost circulation prediction based on support vector regression[J]. *Drilling and Production Technology*, 2019, 42(6): 17-20.
- [8] HOU X X, YANG J, YIN Q S, et al. Lost circulation prediction in South China Sea using machine learning and big data technology[C]// Paper OTC- 30653- MS presented at the Offshore Technology Conference, 4- 7 May, 2020, Houston, Texas, USA.
- [9] SABAH M, TALEBKEIKHAH M, AGIN F, et al. Application of decision tree, artificial neural networks, and adaptive neuro-fuzzy inference system on predicting lost circulation: A case study from Marun oil field[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 177: 236-249.
- [10] LI Z J, CHEN M, JIN Y, et al. Study on intelligent prediction for risk level of lost circulation while drilling based on machine learning[C]// Paper ARMA-2018-105 presented at the 52nd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, Seattle, Washington, June 2018.
- [11] AL-HAMEEDI A T, ALKINANI H H, NORMAN S D, et al. Insights into mud losses mitigation in the Rumaila Field, Iraq [J]. *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*, 2018, 9(1): 1-10.
- [12] 郑力会,张莉,张广清,等.低碳有机酸盐水溶液成本数学模型及其应用[J]. *江汉石油学院学报*, 2004, 26(1): 71-73.
ZHENG Lihui, ZHANG Li, ZHANG Guangqing, et al. Mathematical model of low carbon organic salt aqueous solution cost and its application[J]. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 2004, 26(1): 71-73.
- [13] ZHENG L H, WANG J F, LI X P, et al. Optimization of rheological parameter for micro-bubble drilling fluids by multiple regression experimental design[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2008, 15(s1): 424-428.
- [14] REN Y W, NIE S S, DUAN B J, et al. A novel method for quantitative analysis of engineering factors influencing CBM production[J]. *International Journal of Engineering and Technical Research*, 2016, (1): 1-10.
- [15] 聂帅帅. 储层伤害控制参数剥离方法构建[D].北京:中国石油大学(北京), 2018.
NIE Shuaishuai. A method for prediction, diagnosis and control of reservoir damage[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.
- [16] 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 reservoir using flow rate instead of permeability[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(12): 74-80.
- [17] 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. Application of the big data method to search for the main factors controlling the hole collapse in the production process of Shunbei carbonate reservoir[J]. *Petroleum Drilling and Production Technology*, 2020, 42(5): 627-631.
- [18] 范胜,宋碧涛,陈曾伟,等.顺北5-8井志留系破裂性地层提高承压能力技术[J]. *钻井液与完井液*, 2019, 36(4): 431-436.
FAN Sheng, SONG Bitao, CHEN Zengwei, et al. Technology for enhancing pressure bearing capacity of fractured silurian system in Well Shunbei 5-8[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2019, 36(4): 431-436.
- [19] 黄知娟,潘丽娟,路辉,等.大数据分析顺北油田SHB-X井试采产液量骤降原因[J]. *石油钻采工艺*, 2019, 41(3): 341-347.
HUANG Zhijuan, PAN Lijuan, LU Hui, et al. The reasons for sudden production drop by big data analysis in trial production for Well SHB-X in Shunbei oilfield[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2019, 41(3): 341-347.
- [20] 李昌盛. 基于多元回归分析的钻速预测方法研究[J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(7): 1740-1744.
LI Changsheng. Study of method for predict rate of penetration based of multiple regression analysis[J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(7): 1740-1744.
- [21] 王越之,邝明聪.用曲线回归确定钻井液的流变模式[J]. *钻井液与完井液*, 1993, 10(2): 11-13.
WANG Yuezhi, KUANG Mingcong. Selecting Rheological model for drilling fluid by curvilinear regression method[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 1993, 10(2): 11-13.
- [22] 郑力会,李秀云,苏关东,等.煤层气工作流体储层伤害评价方法的适宜性研究[J]. *天然气工业*, 2018, 38(9): 28-39.
ZHENG Lihui, LI Xiuyun, SU Guandong, et al. Applicability of working fluid damage assessment methods for coalbed methane reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(9): 28-39.
- [23] WANG J F, ZHENG L H, LI B W, et al. A novel method applied to optimize oil and gas well working fluids[J]. *International Journal of Engineering and Technical Research*, 2016, 5(1): 2454-4698.
- [24] 樊建明,屈雪峰,王冲,等.鄂尔多斯盆地致密储集层天然裂缝分布特征及有效裂缝预测新方法[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(5): 740-748.
FAN Jianming, QU Xuefeng, WANG Chong, et al. Natural fracture distribution and a new method predicting effective fractures in tight oil reservoirs in Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration & Development*, 2016, 43(5): 740-748.
- [25] 刘敏,曲鹏飞,郭华才.考虑多因素影响的钻井液漏失模型[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2020, 40(24): 32-34.
LIU Min, QU Pengfei, GUO Huacai. Drilling fluid loss model considering multiple factors[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2020, 40(24): 32-34.
- [26] 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 for cost control of working fluids in oil and gas wells[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(4): 102-105.

(编辑 黄颖)