



中国科学引文数据库 (CSCD) 来源期刊
全国中文核心期刊
美国《化学文摘》(CA) 收录期刊
俄罗斯《文摘杂志》(AJ) 收录期刊
EBSCO学术数据库收录期刊 (美)
AAPG协会期刊出版平台收录期刊 (美)
中国科技论文统计源期刊
RCCSE中国核心学术期刊

基于自然语言处理与大数据分析的漏失分析与诊断

曾义金 李大奇 陈曾伟 张杜杰 崔亚辉 张菲菲

Loss Analysis and Diagnosis Based on Natural Language Processing and Big Data Analysis

ZENG Yijin, LI Daqi, CHEN Zengwei, ZHANG Dujie, CUI Yahui, ZHANG Feifei

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023108>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大数据技术在石油工程中的应用现状与发展建议

Application Status and Development Suggestions of Big Data Technology in Petroleum Engineering

石油钻探技术. 2021, 49(2): 72–78 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020134>

人工智能钻井技术研究方法及其实践

Research Method and Practice of Artificial Intelligence Drilling Technology

石油钻探技术. 2021, 49(5): 7–13 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020136>

基于分形理论的粗糙裂缝钻井液漏失模型研究

Drilling Fluid Loss Model in Rough Fractures Based on Fractal Theory

石油钻探技术. 2017, 45(4): 46–52 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201704008>

基于声波时差数据波动性识别异常压实地层的方法

A Method for Identifying Abnormally Compacted Strata Based on the Fluctuation of Interval Transit Time Data

石油钻探技术. 2019, 47(6): 111–115 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019136>

基于测井-地震信息的碳酸盐岩储层裂缝预测方法

Fracture Prediction in a Carbonate Reservoir Based on Logging–Seismic Data

石油钻探技术. 2017, 45(5): 118–126 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201705021>

漏失循环条件下井筒温度预测与漏层位置判断

The Prediction of Wellbore Temperature and the Determination of Thief Zone Position under Conditions of Lost Circulation

石油钻探技术. 2019, 47(6): 54–59 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019119>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀专家视点▶

doi:10.11911/syztjs.2023108

引用格式：曾义金，李大奇，陈曾伟，等. 基于自然语言处理与大数据分析的漏失分析与诊断 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(6): 1-11.

ZENG Yijin, LI Daqi, CHEN Zengwei, et al. Loss analysis and diagnosis based on natural language processing and big data analysis [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(6): 1-11.

基于自然语言处理与大数据分析的漏失分析与诊断

曾义金^{1,2}, 李大奇^{1,2}, 陈曾伟^{1,2}, 张杜杰^{1,2}, 崔亚辉³, 张菲菲³

(1. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102206; 2. 中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206; 3. 油气钻采工程湖北省重点实验室(长江大学), 湖北武汉 430100)

摘要: 塔里木盆地西部 A 区块以溶蚀孔洞型、裂缝性储层为主, 18 条断裂带发育, 断裂带附近天然裂缝分布复杂, 地层承压能力低, 容易发生井漏。为准确规避井漏风险, 优化井漏处理技术措施, 利用自然语言处理技术, 提取了 A 区块全部完钻井的钻井资料和井漏信息, 基于大数据分析汇总了易漏地层实际地层压力和实际破裂压力当量密度不确定性的分布情况, 计算出了易漏地层的裂缝发育程度、裂缝宽度不确定性范围和井漏风险系数, 建立了钻前井漏风险诊断方法。实例分析表明, 利用所建立的钻前井漏风险诊断方法, 可以在钻前诊断井漏风险, 为钻完井过程中规避井漏风险和制定井漏处理技术措施提供依据。

关键词: 自然语言处理; 大数据; 漏失诊断; 当量循环密度; 裂缝发育程度

中图分类号: TE28⁺³ 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2023)06-0001-11

Loss Analysis and Diagnosis Based on Natural Language Processing and Big Data Analysis

ZENG Yijin^{1,2}, LI Daqi^{1,2}, CHEN Zengwei^{1,2}, ZHANG Dujie^{1,2}, CUI Yahui³, ZHANG Feifei³

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing, 102206, China;
2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering Co., Ltd., Beijing, 102206, China; 3. Hubei Key Laboratory of Drilling and Production Engineering for Oil and Gas(Yangtze University), Wuhan, Hubei, 430100, China)

Abstract: The Block A in the western part of the Tarim Basin are mainly karst-vuggy and fractured reservoirs. Eighteen fault zones are developed in the block. The natural fractures located near the fault zones have complex distribution and low bearing capacity of the formation, which are prone to lost circulation. In order to accurately avoid the risk of lost circulation and optimize the technical measures to deal with the lost circulation, natural language processing technology was used to extract all the drilling and completion data and lost circulation information of Block A. Based on big data analysis, the uncertainty distribution of the equivalent density of the actual formation pressure and the actual fracture pressure in the leaky formation was summarized. The uncertainty range of fracture development and fracture width, as well as the lost circulation risk coefficient of the leaky formation were calculated, and the pre-drilling lost circulation risk diagnosis method was established. The case analysis showed that the proposed method could be used to diagnose the risk of lost circulation before drilling, which can provide a basis for avoiding the risk of lost circulation and developing the technical measures for lost circulation treatment during drilling and completion.

Key words: natural language processing; big data; loss diagnosis; equivalent circulating density; degree of fracture development

收稿日期: 2022-11-17; 改回日期: 2023-11-13。

作者简介: 曾义金 (1964—), 男, 江西吉水人, 1985 年毕业于江汉石油学院钻井工程专业, 2003 年获石油大学 (北京) 油气井工程专业博士学位, 正高级工程师, 博士生导师, 中国石化集团公司首席专家, 主要从事深层超深层钻完井基础理论研究及关键技术研发与应用工作。系本刊编委会副主任。E-mail: zengyj.sripe@sinopec.com。

通信作者: 李大奇, lidq.sripe@sinopec.com。

基金项目: 国家重点研发计划项目“井筒稳定性闭环响应机制与智能调控方法”(编号: 2019YFA0708303) 和中国石化科技攻关项目“井筒安全风险智能诊断与调控技术研究”(编号: P21065-5) 部分研究内容。

塔里木盆地西部 A 区块油气资源丰富, 油气藏具有超深、超高压等特点, 储层平均埋藏深度超过 7 300 m, 勘探开发难度大。实钻资料证实, 该区块钻井过程中发生过漏失的井占比 69.5%, 是对井漏进行大数据分析与钻前诊断研究的理想区块。井漏不仅会使钻井成本增加、建井周期增长, 而且会诱发缩径、井壁失稳和地层破坏等一系列井下故障或复杂情况^[1-3]。

近年来, 井漏影响因素分析为钻前漏失诊断提供了大量思路: S. Al Menhali 等人^[4]认为, 易发生井漏的主要原因是高渗透性弱固结地层、裂缝性碳酸盐岩储层和低含水地层; A. T. Al Hameedi 等人^[5]利用机器学习算法分析了钻井参数对漏失速度的敏感性, 回归了包含塑性黏度、屈服强度、当量循环密度、钻井液相对密度、喷嘴总流动面积、钻压、钻速等 7 个参数的漏失速度计算公式; H. B. Wibowo 等人^[6]进行了包括地层孔隙压力、地层破裂压力、最小水平应力、最大水平应力、垂直应力、上覆岩层压力和剪切破坏梯度的地下压力分析, 将井筒压力大于地层最小水平应力作为井漏的必要条件。

塔里木盆地西部 A 区块内走滑断裂带发育规模大, 各类天然裂缝十分发育且分布复杂^[7], 且断裂带附近地层承压能力低, 容易发生漏失。为此, 笔者针对该区块钻井过程中出现的漏失问题, 提出利用地层破裂压力与地层孔隙压力当量密度的重合程度来表征地层裂缝发育程度, 并在此基础上建立了结合裂缝发育程度、裂缝宽度的井漏风险系数计算方法, 综合分析了 A 区块易漏地层的裂缝发育程度、裂缝宽度不确定性范围及井漏风险系数, 实现了钻前井漏风险诊断, 为该区块钻井过程中防漏技术措施的制定提供了依据, 为易漏地层提供了风险提示。

1 A 区块地质概况

1.1 地层构造特征

A 区块位于塔里木盆地东北坳陷区西部, 横跨阿瓦提断陷的北斜坡、顺托果勒低隆起西北部与沙雅隆起的西南部倾末端, 自下而上可划分为奥陶系—志留系、泥盆系—二叠系、中生界、新生界等 4 套构造层。奥陶系地层发育齐全, 自下而上发育有 O₁₋₂y, O₂yj, O₃q, O₃l 和 O₃s 等 5 个地层; 二叠系仅发育 P₂ 层, 志留系有 S₁t 和 S₁k 等 2 个地层; O₁₋₂y 和 O₂yj 发育碳酸盐岩缝洞型断溶体油藏^[8], 是主要的

目的地段。

1.2 断裂体系特征

A 区块内断裂体系主要由多组北西向、北东向、近南北向断穿基底的走滑断裂构成, 断裂发育规模大, 断穿层位多^[9]。断裂带及断裂带附近的碳酸盐岩受应力作用改造破碎, 岩体周围以盖层滑脱为主, 平面上断裂延伸距离较短、垂直断距较小, 地层变形较弱, 后期活动弱^[10-12]。区块内分布有 18 条断裂带, 依据断裂等级可分为为主干一级断裂(8 条)、主干二级断裂(10 条)2 种^[13], 其中, 主干一级断裂基底断裂特征明显, 变形强, 断距大; 主干二级断裂基底断裂特征不明显, 变形较弱^[9]。

1.3 井漏分析

实际钻井资料证实, 2015 年以来, A 区块北东向走滑断裂主干一级断裂带上的 13 口井和主干二级断裂带上的 12 口井在钻井过程中均发生过井漏, 在地震剖面上呈“断裂+串珠”反射特征。对 A 区块各地层发生井漏的次数和占比进行了统计, 结果如图 1 所示。

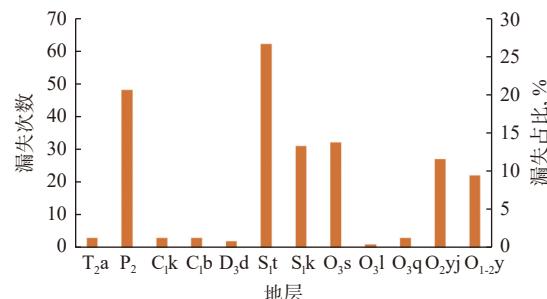


图 1 A 区块各地层井漏次数统计

Fig.1 Statistics of the lost circulation of each layer in Block A

从图 1 可以看出, P₂, S₁t, S₁k, O₃s, O₂yj 和 O₁₋₂y 等 6 个地层的漏失次数占比高达 93.66%。因此, 选取这 6 个地层作为 A 区块井漏分析与诊断的研究对象。

2 基于自然语言处理的钻井漏失信息挖掘

自然语言处理方法(natural language processing, NLP)^[14]利用词法分析器和解析器, 将文本转换为标记, 并用解析器验证标记序列。文本信息检索方法(IR)^[15]采用高度可扩展统计方法搜索大量文本, 而 NLP 的分析器是将正则表达式和 Backus-Naur 规范作为输入, 生成确定词法或解析决策的代码和查

找表, 方便通过编程语言实现。基于自然语言处理算法的井漏信息挖掘技术, 可以快速从各类钻井报表中提取与井漏相关的关键信息。首先分析各类钻井报表, 总结其中涉及到井漏描述以及漏失的位置。首先, 基于正则表达式筛选井漏信息, 得到关键信息并提取展示; 然后, 将离散信息进行聚合关联, 设计数据库表结构, 为构建大规模的井漏案例库奠定基础。其主要逻辑顺序如下:

1) 对各类钻井报表进行差异化分析和关键词总结, 提取各类钻井报表中的差异化部分和“锚点”(见图 2)。“锚点”指的是钻井报表中可作为定位关键信息的内容。



图 2 信息提取

Fig.2 Information extraction

2) 根据提取内容, 设计基于 Python 的提取模板,

再将提取的内容根据正则表达式进行过滤筛选。

3) 将收集的离散信息进行聚合关联, 如提取到某天某时间段发生什么故障或井下复杂情况, 并匹配出当时的钻具组合和钻井液等信息。

4) 将提取出来的信息存储到漏失数据库中, 做永久化存储。漏失数据库主要包含静态数据、动态数据和结论数据。静态数据包括案例编号、井深、区块、井漏时作业工况、漏失层岩性、漏失层裂缝发育情况、漏失速度、漏失类型、钻井液性能、漏失通道尺寸、孔隙压力、破裂压力; 动态数据包括钻井液池中钻井液的体积、出口流量、入口流量、立管压力、大钩载荷、扭矩、钻速、转速、泵压; 结论数据包括井漏原因和处理措施。

3 基于大数据分析的漏失分析与诊断

3.1 井漏分析

3.1.1 漏失数据处理

针对 A 区块 P₂, S_{1t}, S_{1k}, O_{3s}, O_{2yj} 和 O_{1-2y} 等 6 个易漏地层, 利用大数据分析技术, 汇总分析了该区块 59 口完钻井的井漏信息, 包括了漏失次数、漏失率、钻井液密度、平均漏失量、平均损失周期、最大漏失速度、平均漏失速度, 结果见表 1。由表 1 可知, P₂, S_{1t}, S_{1k}, O_{3s}, O_{2yj} 和 O_{1-2y} 等 6 个易漏地层都属于平均漏失量大于 100 m³ 的大型漏失, 漏失速度也都属于 10~30 m³/h 的中速漏失。

表 1 A 区块井漏信息统计结果

Table 1 Information statistics of lost circulation in Block A

地层	漏失次数	漏失率, %	钻井液密度/(kg·L ⁻¹)	平均漏失量/m ³	平均损失周期/h	最大漏失速度/(m ³ ·h ⁻¹)	平均漏失速度/(m ³ ·h ⁻¹)
P ₂	48	37.29	1.22~1.42	176.942	90.637	27.115	25.818
S _{1t}	62	20.34	1.27~1.40	115.674	69.352	27.098	14.952
S _{1k}	31	18.64	1.27~1.44	221.714	237.366	25.204	18.590
O _{3s}	32	20.34	1.29~1.87	136.866	37.015	12.352	9.411
O _{2yj}	27	35.59	1.16~1.72	320.344	104.641	19.975	14.558
O _{1-2y}	22	33.90	1.10~2.00	296.999	129.677	9.162	11.416

P₂ 为火成岩地层, 岩性主要为英安岩、凝灰岩、玄武岩, 岩性硬、脆, 在构造运动和风化作用下形成了气孔、孔隙、裂缝, 构成了主要漏失通道, 局部裂缝、缝洞发育, 地层承压能力低^[16], 该地层共漏失 48 次, 漏失率高达 37.29%, 最大漏失速度和平均漏失速度也都位列第一。S_{1t} 和 S_{1k} 含有断层和裂缝, 地层薄弱, 承压能力低, 其中 S_{1t} 漏失了 62 次, 漏失率为 20.34%, 最大漏失速度位列第二, 平均漏失速

度位列第三; S_{1k} 漏失了 31 次, 漏失率为 18.64%, 最大漏失速度位列第三, 平均漏失速度位列第二, 平均损失周期最长。A 区块由于受到的应力相对较小, 主要断裂发育在 O_{3s} 之下, 产状近直立, 平面呈“X”分支断裂数量较多^[17], 地层变形较弱, 断距较小, 后期活动弱, O_{3s} 漏失了 32 次, 漏失率为 20.34%, 平均漏失速度最小; O_{2yj} 漏失了 27 次, 漏失率为 35.59%, 平均漏失量最大; O_{1-2y} 漏失了 22 次, 漏失率

为 33.90%，平均漏失量和平均损失周期都位列第二。

3.1.2 漏失影响因素分析

利用大数据分析技术，统计了 A 区块 59 口完钻井 6 个易漏地层的钻井数据、钻井液数据、井漏数据和地层数据。钻井数据包括事故编号、井号、井深、开次、钻头直径；钻井液数据包括其密度、漏斗黏度、屈服应力、流性指数、稠度系数；井漏数据包括漏失开始时间、漏失结束时间、漏失量、漏失速度、漏失时间、漏失类型、漏失原因；地层数据包括地层代号、实际井筒压力、孔隙度、地层压力和破裂压力。地层数据中的实际井筒压力是根据钻井日报中的钻井液密度计算得到的，预测地层压力和预测破裂压力是根据钻前工程设计中的预测地层压力当量密度和预测破裂压力当量密度计算得到的，实际地层压力和实际破裂压力是根据钻井地层破裂压力试验和地层压漏试验得到的。

提取井漏信息中的压力信息，分析破裂压力、地层压力、井筒压力与每次井漏中漏失量的相关性，结果如图 3 所示（图 3 中，一个红色半透明圆点代表一次井漏的漏失量，圆点越大，漏失量越大）。从图 3 可以看出：井筒压力高于地层压力时，由于存在天然裂缝，容易出现漏失量较小的天然裂缝性井漏；井筒压力位于破裂压力与地层压力重合范围时，容易出现漏失量中等的渗透性井漏；井筒压力高于破裂压力时，容易出现漏失量较大的压裂井漏。将破裂压力与地层压力的当量密度重合程度类比为裂缝发育程度，其与裂缝宽度及井筒压力与地层压力、破裂压力之间的差值确定为井漏风险系数的 3 大影响因素。

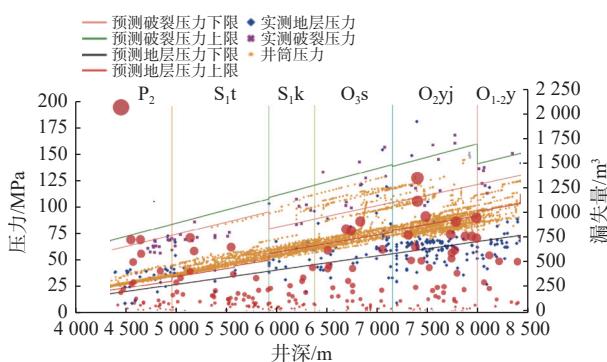


图 3 破裂压力、地层压力、井筒压力与漏失量的相关性

Fig.3 Correlation among fracture pressure, formation pressure, wellbore pressure, and leakage

3.2 裂缝发育程度分析

3.2.1 实际地层压力当量密度分布情况

地层压力是地层孔隙中地层水所产生的液柱压

力，A 区块的实际地层压力大部分是在钻井过程中通过 dc 指数法利用机械钻速与压差的负相关原理检测得到，其余则是利用地层破裂压力试验、地层压漏试验、当量密度预测法、关井套压折算法、试油静压、射孔测试等得到，当量密度预测法多用在 O_{2yj} 和 O_{1-2y} 地层，关井套压折算法多用在 O_{1-2y} 地层。

基于大数据分析理论，分析了 6 个易漏地层钻井过程中监测到的实际地层压力数据，并将其转换为地层压力当量密度，以消除井深的影响。以位于 1 号断裂带上的 23 口井为例（见图 4），6 个易漏地层压力当量密度不确定性分布范围的重合度较大。

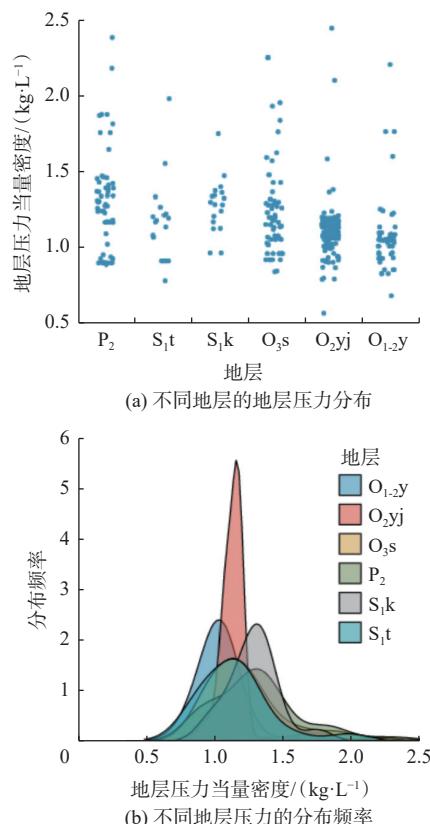


图 4 地层压力当量密度分布

Fig.4 Equivalent density distribution of the formation pressure

3.2.2 实际破裂压力当量密度分布情况

破裂压力是使地层产生水力裂缝或使原有裂缝张开时的井底压力。利用地层压漏试验测量 A 区块的实际破裂压力。一般在二开、三开钻进套管鞋以下第 1 个砂层 3~5 m 时进行地层压漏试验，将不再随注入量增大而增大或随注入量增大而减小时的压力作为地层破裂压力，或将达到井口承压设备中的最小额定工作压力或套管承受压力达到套管最小

抗压强度 80% 时的压力作为地层破裂压力。

基于大数据分析理论, 分析了 A 区块 59 口井 P_2 , S_1t , S_1k , O_3s , O_2yj 和 $O_{1-2}y$ 等 6 个易漏地层在钻井过程中监测到的实际破裂压力, 并将其转换为破裂压力当量密度, 以消除井深的影响。以位于 1 号断裂带上的 23 口井为例, 综合分析 6 个易漏地层, 发现破裂压力当量密度不确定性的重合度较大(见图 5)。由于大部分已完钻井只进行了 2 次地层压漏试验, 实际破裂压力当量密度数据较少, 不确定性分布范围对比地层压力当量密度较差。

3.2.3 压力当量密度不确定性分布范围分析

由于地层破裂压力试验和地层压漏试验次数较少, 且无法得到井漏时的地层孔隙压力和破裂压力, 所以汇总各个地层的实际地层压力当量密度和破裂压力当量密度进行分布范围分析。为了消除超出物理边界的值, 将其拟合为正态分布, 将正态分布中 95.449 974% ($\mu-2\delta \sim \mu+2\delta$) 的概率范围类比为各地层实际地层压力和破裂压力当量密度的不确定性分布范围, 以 1 号断裂带上 23 口井为例进行统计分析, 将各地层的实际压力当量密度先分箱处理, 再计算每个分箱的分布频率, 结果见图 6、图 7。图 6、

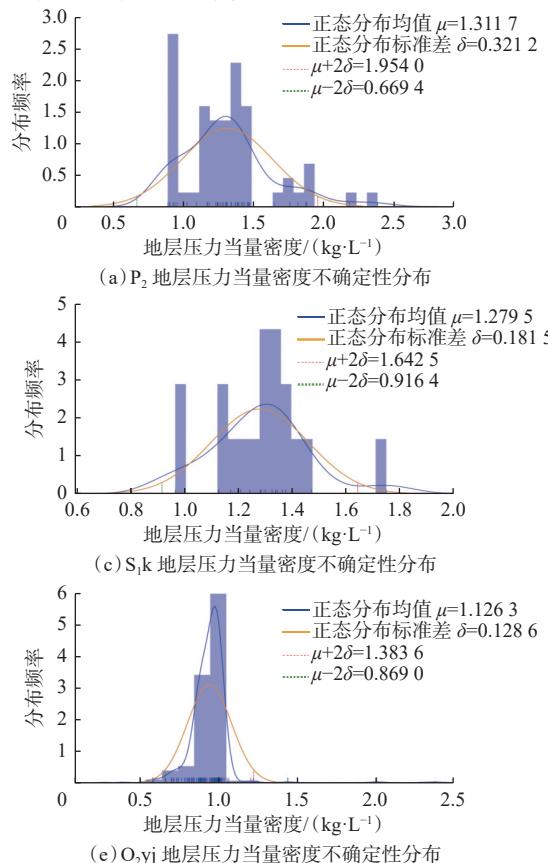


图 6 各地层压力当量密度不确定性分布

Fig.6 Uncertainty distribution of equivalent density of formation pressure in each layer

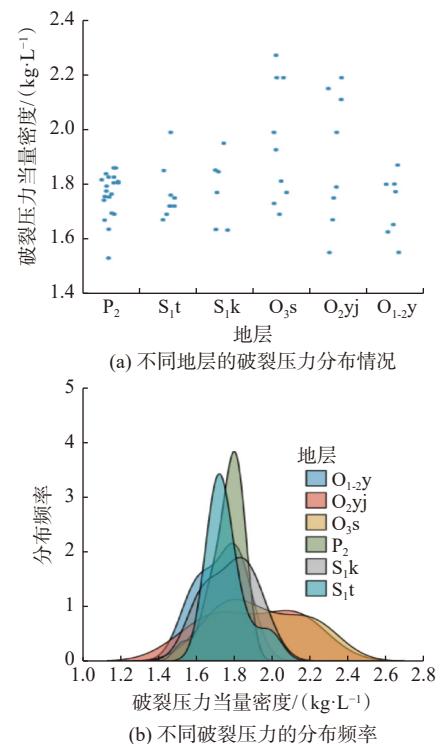
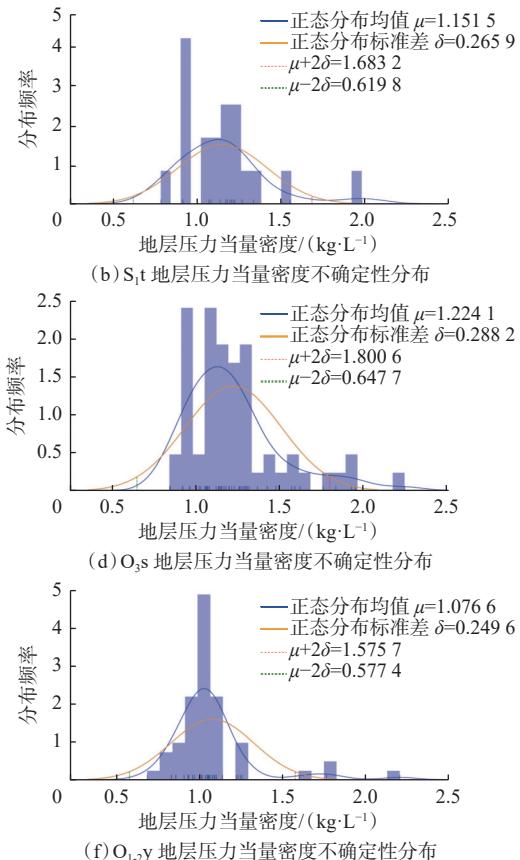


图 5 破裂压力当量密度分布

Fig.5 Equivalent density distribution of the fracture pressure



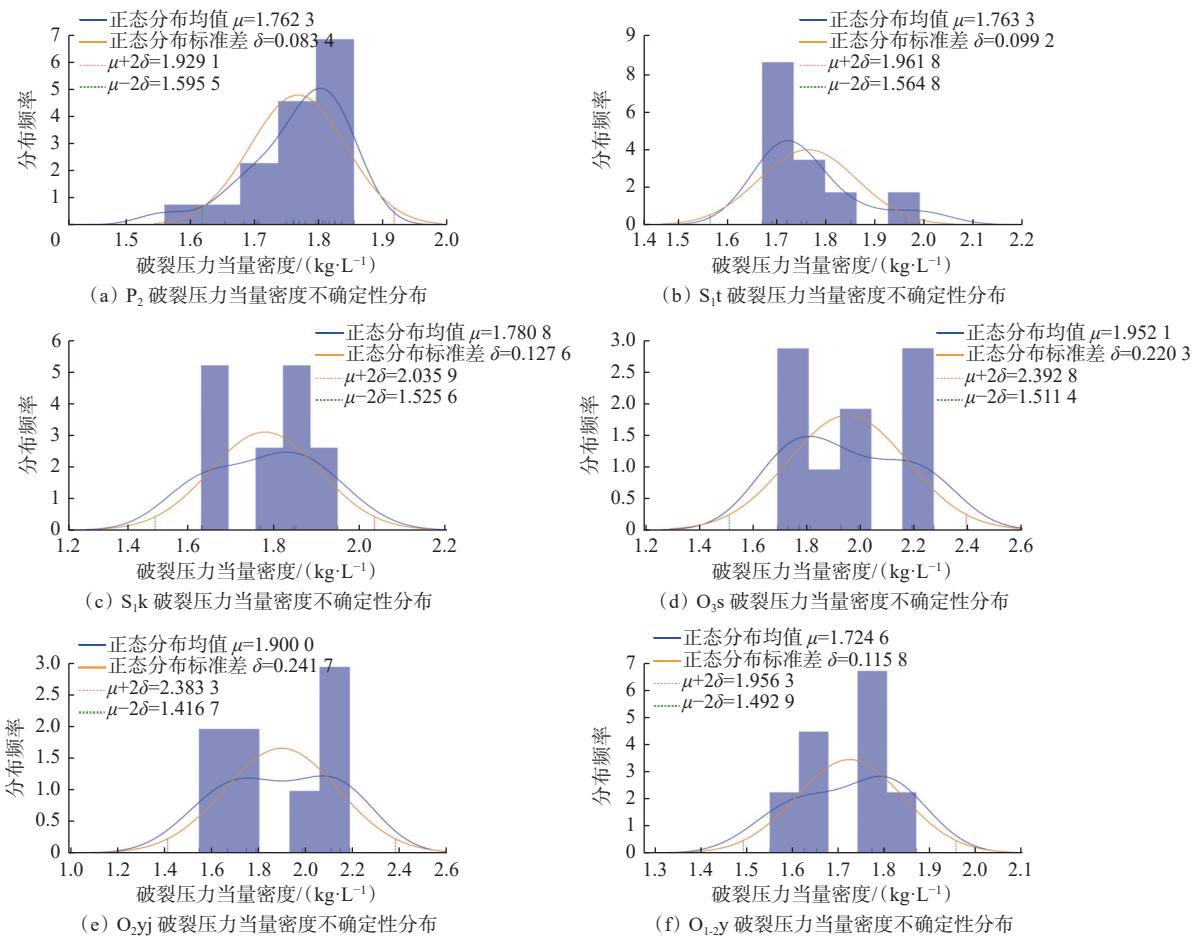


图 7 各地层破裂压力当量密度不确定性分布

Fig.7 Uncertainty distribution of equivalent density of the fracture pressure in each layer

图 7 中, 蓝色曲线为高斯核密度估计曲线, 横轴上方蓝色小细条为实际压力当量密度数据分布, 橙色曲线为正态分布曲线, 可直观地评估其与实际压力当量密度数据的对应关系。

表 2 和表 3 为 1 号断裂带上 23 口井 6 个易漏地层实际地层压力、破裂压力当量密度不确定性分布统计结果。由表 2 和表 3 可知: 地层埋藏深度越大,

地层压力当量密度均值越小, 其中 S_{1t} 的数据较少导致均值偏小; 破裂压力当量密度的均值和离散程度呈现先增大后减小的趋势, 均值峰值在厚度最大的 O_{3s} , 离散程度峰值在厚度较小、深度较大的 O_{2yj} ; 除 O_{2yj} 外, 地层压力当量密度的离散程度普遍比破裂压力当量密度高, 破裂压力当量密度由于数据较少导致其不确定分布幅度小, 分布较集中。

表 2 各地层实际地层压力当量密度分布统计结果

Table 2 Statistics of actual equivalent density distribution of the formation pressure in each layer

地层	均值/(kg·L ⁻¹)	标准差/(kg·L ⁻¹)	分布范围下限/(kg·L ⁻¹)	分布范围上限/(kg·L ⁻¹)
P_2	1.311 692 221	0.321 164 305	0.669 363 610	1.954 020 831
S_{1t}	1.151 520 157	0.265 860 717	0.619 798 723	1.683 241 592
S_{1k}	1.279 467 735	0.181 530 373	0.916 406 989	1.642 528 481
O_{3s}	1.224 136 368	0.288 242 768	0.647 650 831	1.800 621 904
O_{2yj}	1.126 302 960	0.128 635 852	0.869 031 257	1.383 574 664
O_{1-2y}	1.076 552 962	0.249 590 264	0.577 372 434	1.575 733 490

3.2.4 裂缝发育程度分析

预先了解区块内同一断裂带的天然裂缝发育特

性, 可以提高漏失量的预测准确度和目的储层的整体生产能力^[18-20]。通过分析漏失影响因素, 提出利

表 3 各地层实际破裂压力当量密度分布统计结果

Table 3 Statistics of actual equivalent density distribution of the fracture pressure in each layer

地层	均值/(kg·L ⁻¹)	标准差/(kg·L ⁻¹)	分布范围下限/(kg·L ⁻¹)	分布范围上限/(kg·L ⁻¹)
P ₂	1.762 290 617	0.083 384 714	1.595 521 189	1.929 060 044
S _{1t}	1.763 333 333	0.099 247 166	1.564 839 001	1.961 827 666
S _{1k}	1.780 773 826	0.127 570 246	1.525 633 335	2.035 914 317
O _{3s}	1.952 118 014	0.220 338 077	1.511 441 860	2.392 794 168
O _{2yj}	1.900 000 000	0.241 660 919	1.416 678 161	2.383 321 839
O _{1-2y}	1.724 581 876	0.115 840 777	1.492 900 323	1.956 263 429

用地层压力与破裂压力当量密度不确定性分布范围的重合程度来表征地层的裂缝发育程度。通过计算各地层的裂缝发育系数来表征地层的裂缝发育程度: 分别将某一地层的地层压力和破裂压力的当量密度范围映射到(-5, 5)区间内, 利用双曲正切函数将裂缝发育程度系数集中在(0, 1)区间内, 则裂缝发育系数为:

$$Y = \frac{\tanh(F_{pu} + 1) - \tanh(F_{fd} + 1)}{2} \quad (1)$$

式中: Y 为裂缝发育系数; F_{pu} 为某一地层内的地层压力当量密度不确定性分布范围上限, kg/L; F_{fd} 为某一地层内的破裂压力当量密度不确定性分布范围下限, kg/L。

以 1 号断裂带上的 23 口井为例, 将表 2 中的地层压力当量密度和表 3 中的破裂压力当量密度不确定性分布范围代入式(1), 计算得 6 个易漏地层的裂缝发育系数, 发现: O_{3s} 的裂缝发育程度最高, 发育系数为 0.486 475; O_{2yj} 的裂缝发育程度最低, 发育系数为 -0.020 127; 其他 4 个地层的裂缝发育程度由低到高依次为 P₂(0.011 860)、S_{1t}(0.013 689)、O_{1-2y}(0.025 093) 和 S_{1k}(0.243 685)。

3.3 裂缝宽度分析

自然裂缝大小的估计是否可靠对井漏处理至关重要^[21], 也可以用其表征自然裂缝储集层, 为完井设计提供依据。R. Majidi 等人^[22-23] 将裂缝中钻井液的损失假设为 2 个平行圆盘之间流体的径向层流流动, 建立了基于屈服-幂律流变学理论的模型。利用裂缝中瞬态径向流的质量和线性动量的守恒原理, 假设裂缝宽度恒定, 利用数值方法可以求得该模型闭合形式的近似解, 获得流动方向上任意 2 点之间压降的闭合控制方程:

$$\frac{dp}{dr} = \frac{Kq^n}{w \left(\frac{4\pi rn}{2n+1} \frac{w}{2} \right)^n} + \frac{2n+1}{n+1} \frac{2\tau_y}{w} \quad (2)$$

式中: K 为钻井液的稠度系数, Pa·sⁿ; q 为漏失速度, m³/h; n 为钻井液的流性指数; w 为地层裂缝的宽度, m; r 为裂缝到井的径向距离, m; τ_y 为钻井液的屈服应力, Pa。

式(2)等号右侧的第一项是由流体的剪切减薄/增稠效应产生, 径向发散流的速度降低会引起钻井液(非牛顿流体)的剪切速率和表观黏度显著变化, 特别是在井漏初期剪切变稀大大提高了压降损失率。式(2)等号右侧的第二项由流体的屈服应力产生, 表明具有屈服应力的流体只有压力梯度达到特定值时才能流动, 而最终压降损失也由流体屈服应力控制。

由于 A 区块大多深井存在裂缝, 且多为垂直缝或斜裂缝, 所以采用考虑裂缝宽度、深度、长度的漏失控制方程^[24]。假设流体损失期间过平衡压力恒定, 施加在整个钻井液液柱中, 从井筒半径 r_w 积分到裂缝中钻井液侵入深度 r_f , 整个钻井液液柱的局部压降为:

$$p_w - p_p = \frac{Kq^n(r_f^{1-n} - r_w^{1-n})}{\frac{w}{2} \left[\frac{n}{2h} \frac{n}{2m+1} \left(\frac{w}{2} \right)^2 \right]^n} + \frac{2n+1}{n+1} \frac{2\tau_y}{w} (r_f - r_w) \quad (3)$$

式中: p_w 为井筒压力, MPa; p_p 为钻井液入侵前沿压力(地层压力), MPa; r_f 为钻井液侵入前沿的径向长度, m; r_w 为井筒半径, m; h 为裂缝长度, m。

以 1 号断裂带上的 23 口井为例, 利用式(3)定量分析这 23 口井的井漏信息, 计算得到 6 个易漏地层的裂缝宽度分布情况, 如图 8 所示。计算分析用到的漏失速度为井漏初期且未泵入堵漏浆时的瞬时漏失速度^[25], 地层压力为图 7 中的地层压力不确定性分布范围。由图 8 可知, 6 个易漏地层的裂缝宽度都比较集中, 且都有明显离群点出现, S_{1t} 地层的离群点最少, O_{1-2y} 地层的离群点最多, S_{1t}、O_{3s} 和 O_{2yj} 等 3 个地层的裂缝宽度分布较为集中。

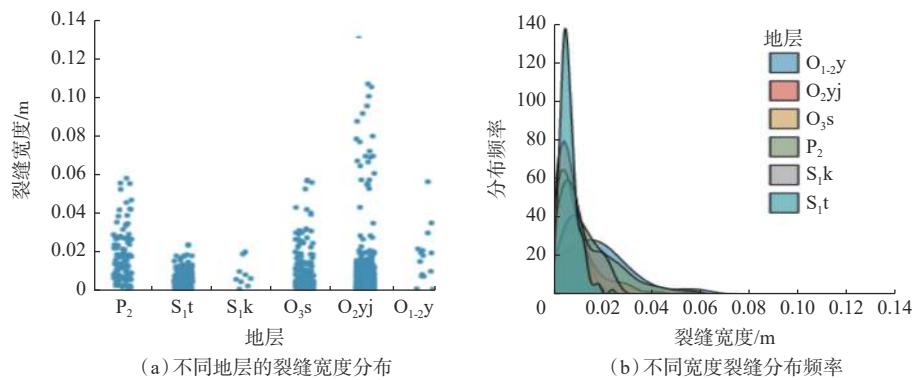


图 8 裂缝宽度分布

Fig.8 Fracture width distribution

汇总各地层的所有裂缝宽度^[26], 进行分布范围分析, 并将其进行正态分布拟合, 各地层裂缝宽度的不确定性分布范围统计结果如图 9、表 4 所示。基于裂缝宽度的物理性质, 将正态分布的起始裂缝

宽度值都设定为 0。6 个易漏地层裂缝宽度的最大值和上限值相差较大, 其他参数均相差不多。其中 O_{2yj} 裂缝宽度的最大值最大, O_{1-2y} 的最大值最小; P_2 裂缝宽度的上限值最大, O_{1-2y} 的上限值最小。

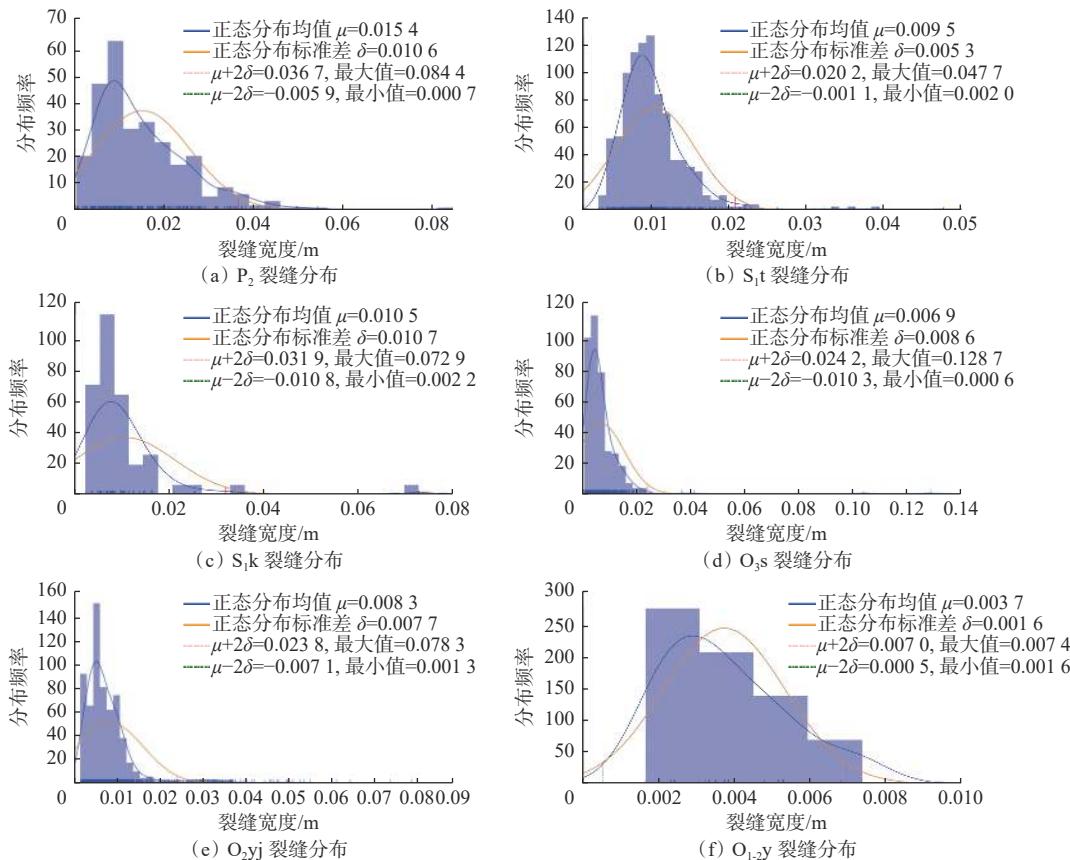


图 9 裂缝宽度不确定性分布

Fig.9 Uncertainty distribution of the fracture width

3.4 井漏风险诊断

井漏的风险系数受井筒压力与地层压力及破裂压力的差值、裂缝宽度及裂缝发育程度的影响, 结合这 3 个影响因素的不确定分布范围, 提出了井漏

风险系数不确定分布范围的计算公式:

$$K = 10w^3 \left(|P_w - P_p| + \frac{0.001}{w} \right) + \frac{Y}{100} \quad (4)$$

式中: K 为井漏风险系数。

表 4 裂缝宽度不确定性分布统计
Table 4 Statistics of uncertainty distribution of fracture width

地层	最大裂缝宽度/m	最小裂缝宽度/m	裂缝宽度均值/m	裂缝宽度标准差/m	裂缝宽度上限95%/m
P ₂	0.058 90	0.001 6	0.016 70	0.012 70	0.042 00
S _{1t}	0.024 30	0.000 8	0.006 70	0.003 90	0.014 50
S _{1k}	0.020 60	0.001 3	0.009 10	0.006 80	0.022 70
O _{3s}	0.057 90	0.000 4	0.009 80	0.001 09	0.031 60
O _{2yj}	0.131 60	0.001 1	0.008 30	0.013 20	0.034 70
O _{1-2y}	0.005 71	0.001 2	0.001 86	0.014 50	0.004 75

针对所有记录了泵入堵漏浆前瞬时漏失速度的井漏, 利用式(4)计算得到井漏风险系数, 并分析井漏风险系数与瞬时漏失速度的相关性, 结果如图 10 所示。

从图 10 可以看出, 井漏风险系数与瞬时漏失速度具有统计学上的关联性, 符合正相关关系, 表明利用井漏风险系数可以较好地评价井漏的严重程度, 实现钻前漏失诊断。

3.5 钻前井漏风险诊断实例分析

以 1 号断裂带 A 区块的 8 井为例进行钻前井漏风险诊断。由 8 井的《钻井工程设计》得知: 该井位于塔里木盆地顺托果勒低隆北缘, 目的层位为奥陶系中一下统鹰山组(O_{1-2y}), 提取地层孔隙压力、

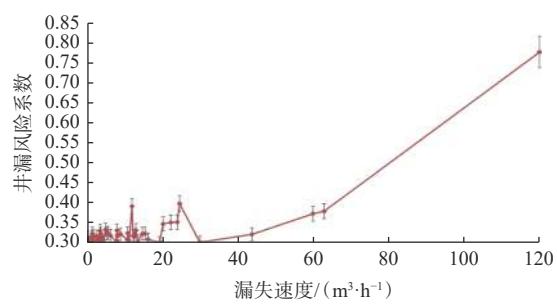


图 10 井漏风险系数与瞬时漏失速度的相关性

Fig.10 Correlation analysis of lost circulation risk coefficient and instantaneous leakage velocity

破裂压力的预测当量密度和设计钻井液密度^[27](见表 5), 预测该井地层的孔隙压力破裂压力(见表 6)。

表 5 A 区块 8 井的预测当量密度
Table 5 Predicted equivalent density for eight wells in Block A

层位	井深/m	预测地层孔隙压力当量密度/(kg·L ⁻¹)	预测地层破裂压力当量密度/(kg·L ⁻¹)	设计钻井液密度/(kg·L ⁻¹)
P ₂	4 507~4 991	1.17~1.20	1.89~1.96	1.22~1.26
S _{1t}	5 393~6 161	1.20~1.24	1.89~1.96	1.26~1.30
S _{1k}	6 161~6 541	1.20~1.24	1.89~1.96	1.26~1.30
O _{3s}	6 541~7 415	1.20~1.24	1.89~1.96	1.26~1.30
O _{2yj}	7 450~7 572	1.15~1.18	1.65~1.85	1.21~1.29
O _{1-2y}	7 572~7 814	1.15~1.18	1.65~1.85	1.21~1.29

表 6 A 区块 8 井的预测压力
Table 6 Predicted pressure for eight wells in Block A

层位	井深/m	预测地层孔隙压力/MPa	预测地层破裂压力/MPa	设计井筒压力/MPa
P ₂	4 507~4 991	51.677~58.694	83.479~95.867	53.886~61.628
S _{1t}	5 393~6 161	63.422~74.868	99.889~118.340	66.592~78.491
S _{1k}	6 161~6 541	72.453~79.486	114.114~125.639	76.076~83.332
O _{3s}	6 541~7 415	76.922~90.107	121.152~142.427	80.768~94.467
O _{2yj}	7 450~7 572	83.962~87.563	120.466~137.280	88.342~95.725
O _{1-2y}	7 572~7 814	85.336~90.361	122.439~141.668	89.789~98.785

8 井预测压力与实测压力不确定性的分布情况如图 11 所示(图 11 中,绿色填充区域为实测地层压力分布范围,粉色填充区域为实测破裂压力分布范围,粉色与绿色中间重合的灰绿色为破裂压力和地层压力的重合范围)。从图 11 可以看出:预测地层孔隙压力都在实测地层压力分布范围内;S_{1t} 的预测破裂压力比实测破裂压力高,P₂ 和 S_{1k} 的预测破裂压力与实测破裂压力接近。

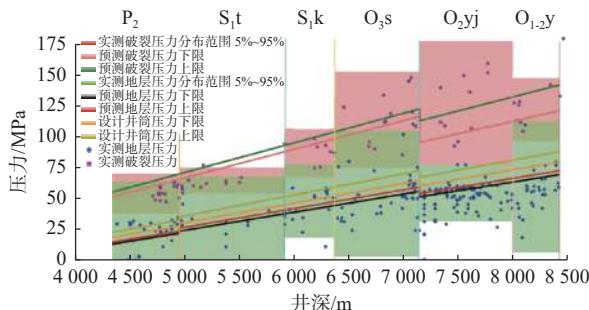


图 11 预测压力与实测压力不确定性分布范围对比

Fig.11 Comparison of uncertainty distribution ranges of predicted pressure and measured pressure

将设计井筒压力、预测破裂压力、地层裂缝宽度和地层裂缝发育系数代入式(4),计算 P₂, S_{1t}, S_{1k}, O_{3s}, O_{2yj} 和 O_{1-2y} 的井漏风险系数和预测漏失速度,结果见表 7。从表 7 可以看出:P₂ 井漏风险系数为 0.40~0.77,最可能发生漏失,预测的漏失速度为 43.27~82.98 m³/s;其他 5 个地层发生漏失的概率都较小,按井漏风险系数和预测漏失速度从大到小依次为 O_{3s}, S_{1k}, O_{1-2y}, S_{1t} 和 O_{2yj}。

表 7 钻前井漏风险诊断结果

Table 7 Pre-drilling lost circulation risk diagnosis

地层	厚度/m	井漏风险系数	预测漏失速度/(m ³ ·s ⁻¹)
P ₂	484	0.245 0~0.475 8	26.464~51.390
S _{1t}	768	0.000 2~0.000 3	0.020~0.029
S _{1k}	380	0.004 3~0.004 4	0.463~0.470
O _{3s}	874	0.011 5	1.242~1.246
O _{2yj}	122	0~0.000 1	0.006~0.012
O _{1-2y}	240	0.001 0~0.001 1	0.114

4 结 论

1)针对塔里木盆地 A 区块井漏问题,利用自然语言处理技术,挖掘了 A 区块所有完钻井的井漏信息,提出用地层破裂压力与地层压力不确定范围的

重合程度来表征地层裂缝发育程度的方法。

2)利用大数据分析技术,分析了 A 区块易漏地层实际地层压力和实际破裂压力的不确定性分布情况,通过处理漏失数据和分析影响漏失的因素,将裂缝发育程度、裂缝宽度和井筒压力与破裂压力之间的差值确定为影响井漏风险系数的 3 大因素。

3)漏失影响因素的不确定性分析结果表明:井漏风险系数与瞬时漏失速度具有统计学上的关联性,符合正相关关系;利用井漏风险系数可以较好地评价井漏的严重程度,实现钻前漏失诊断。

参 考 文 献

References

- [1] 汪蓬勃. 基于巨厚盐膏层以及碳酸盐储层的钻井技术研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
WANG Pengbo. Research on the drilling technique based on the layer of thick salt paste and carbonate reservoir[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [2] 房超, 张辉, 陈朝伟, 等. 地质工程一体化漏失机理与预防措施: 以塔里木库车山前古近系复合盐层为例 [J]. 石油钻采工艺, 2022, 44(6): 684~692.
FANG Chao, ZHANG Hui, CHEN Zhaowei, et al. Geology-engineering integrated investigation of leakoff mechanisms and prevention measures: a case study of the Palaeogene composite salt layer in the Kuqa piedmont zone, Tarim Basin[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(6): 684~692.
- [3] 马磊, 袁学强, 张万栋, 等. 乌石 17-2 油田强封堵合成基钻井液体 [J]. 钻井液与完井液, 2022, 39(5): 558~564.
MA Lei, YUAN Xueqiang, ZHANG Wandong, et al. A synthetic based drilling fluid with strong plugging capacity for Block Wushi17-2[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2022, 39(5): 558~564.
- [4] AL MENHALI S, KASHWANI G, SAHWANI A. Safety engineering controls of lost circulation during cementing in onshore oil construction projects[J]. International Journal of Materials Engineering, 2015, 5(3): 46~49.
- [5] AL-HAMEEDI A T, ALKINANI H H, DUNN-NORMAN S, et al. Mud losses estimation using partial least squares algorithm[R]. SPE 193266, 2018.
- [6] WIBOWO H B, JULIANTO C, BUNTORO A, et al. Mud weight evaluation based on safe mud window in drilling Well “X-1” to overcome caving and partial loss problems in the oil field[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 830: 012074.
- [7] 李双贵, 罗江, 于洋, 等. 顺北 5 号断裂带南部压力剖面建立及井身结构优化 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(1): 9~15.
LI Shuanggui, LUO Jiang, YU Yang, et al. Establishing pressure profiles and casing program optimization in the Southern Shunbei No.5 Fault Zone[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(1): 9~15.
- [8] 何成江, 姜应兵, 文欢, 等. 塔河油田缝洞型油藏“一井多控”高效开发关键技术 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(4): 37~44.

- HE Chengjiang, JIANG Yingbing, WEN Huan, et al. Key technologies for high-efficiency one-well multi-control development of fractured-vuggy reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(4): 37–44.
- [9] 马永生, 蔡勋育, 云露, 等. 塔里木盆地顺北超深层碳酸盐岩油气田勘探开发实践与理论技术进展 [J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 1–17.
- MA Yongsheng, CAI Xunyu, YUN Lu, et al. Practice and theoretical and technical progress in exploration and development of Shunbei ultra-deep carbonate oil and gas field, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 1–17.
- [10] 林波, 云露, 李海英, 等. 塔里木盆地顺北 5 号走滑断层空间结构及其油气关系 [J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1344–1353.
- LIN Bo, YUN Lu, LI Haiying, et al. Spatial structure of Shunbei No.5 strike-slip fault and its relationship with oil and gas reservoirs in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1344–1353.
- [11] 马海陇, 王震, 邓光校, 等. 塔里木盆地和田河东地区断裂特征及其油气地质意义 [J]. 断块油气田, 2021, 28(3): 329–334.
- MA Hailong, WANG Zhen, DENG Guangxiao, et al. Fault features in eastern Hetianhe Area, Tarim Basin and its petroleum geological significance[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2021, 28(3): 329–334.
- [12] 瞿长, 赵锐, 李慧莉, 等. 塔里木盆地顺北 5 断裂带储集体地震反射与产能特征分析 [J]. 特种油气藏, 2020, 27(1): 68–74.
- QU Chang, ZHAO Rui, LI Huili, et al. Seismic reflection and productivity of reservoirs in the fault-zone 5 of Shunbei, Tarim Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoir, 2020, 27(1): 68–74.
- [13] 刘雨晴, 邓尚, 张荣, 等. 深层火成岩侵入体和相关构造发育特征及其石油地质意义: 以塔里木盆地顺北地区为例 [J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 105–117.
- LIU Yuqing, DENG Shang, ZHANG Rong, et al. Characterization and petroleum geological significance of deep igneous intrusions and related structures in the Shunbei Area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 105–117.
- [14] CHOWDHARY K R. Natural language processing[M]//CHOWDHARY K R. Fundamentals of artificial intelligence. New Delhi: Springer, 2020: 603–649.
- [15] MANNING C D, RAGHAVAN P, SCHÜTZ H. Introduction to information retrieval[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [16] 潘军, 李大奇. 顺北油田二叠系火成岩防漏堵漏技术 [J]. 钻井液与完井液, 2018, 35(3): 42–47.
- PAN Jun, LI Daqi. Technology of preventing and controlling mud losses into the Permian igneous rocks in Shunbei Oilfield[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2018, 35(3): 42–47.
- [17] 林波, 张旭, 况安鹏, 等. 塔里木盆地走滑断裂构造变形特征及油气意义: 以顺北地区 1 号和 5 号断裂为例 [J]. 石油学报, 2021, 42(7): 906–923.
- LIN Bo, ZHANG Xu, KUANG Anpeng, et al. Structural deformation characteristics of strike-slip faults in Tarim Basin and their hydrocarbon significance: a case study of No. 1 Fault and No. 5 Fault in Shunbei Area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(7): 906–923.
- [18] LEE H P, OLSON J E, SCHULTZ R A. Interaction analysis of propagating opening mode fractures with veins using the discrete element method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 103: 275–288.
- [19] 王贵. 提高地层承压能力的钻井液封堵理论与技术研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2012.
- WANG Gui. Theory and technology on drilling fluids for wellbore strengthening[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012.
- [20] 许成元. 裂缝性储层强化封堵承压能力模型与方法 [D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- XU Chengyuan. Models and methods to strengthen wellbore pressure containment by fracture plugging in fractured reservoirs[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [21] RAZAVI O, VAJARGAH A K, VAN OORT E, et al. Comprehensive analysis of initiation and propagation pressures in drilling induced fractures[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 149: 228–243.
- [22] MAJIDI R, MISKA S Z, YU M, et al. Quantitative analysis of mud losses in naturally fractured reservoirs: the effect of rheology[J]. SPE Drilling & Completion, 2010, 25(4): 509–517.
- [23] MAJIDI R, MISKA S Z, AHMED R, et al. Radial flow of yield-power-law fluids: Numerical analysis, experimental study and the application for drilling fluid losses in fractured formations[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, 70(3/4): 334–343.
- [24] 王斌. 裂缝性漏层钻井液漏失与堵漏计算机模拟研究 [D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
- WANG Bin. Computer simulation of drilling fluid loss and plugging in fractured formation[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.
- [25] 陈曾伟, 刘四海, 林永学, 等. 塔河油田顺西 2 井二叠系火成岩裂缝性地层堵漏技术 [J]. 钻井液与完井液, 2014, 31(1): 40–43.
- CHEN Zengwei, LIU Sihai, LIN Yongxue, et al. Lost circulation control technology for fractured Permian igneous rock formation in Well Shunxi 2 of Tahe Oilfield[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2014, 31(1): 40–43.
- [26] 黄诚, 云露, 曹自成, 等. 塔里木盆地顺北地区中-下奥陶统“断控”缝洞系统划分与形成机制 [J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 54–68.
- HUANG Cheng, YUN Lu, CAO Zicheng, et al. Division and formation mechanism of fault-controlled fracture-ug system of the Middle-to-Lower Ordovician, Shunbei Area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 54–68.
- [27] 彭军, 夏梦, 曹飞, 等. 塔里木盆地顺北—区奥陶系鹰山组与一间房组沉积特征 [J]. 岩性油气藏, 2022, 34(2): 17–30.
- PENG Jun, XIA Meng, CAO Fei, et al. Sedimentary characteristics of Ordovician Yingshan Formation and Yijianfang Formation in Shunbei-1 Area, Tarim Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(2): 17–30.