

创新点/亮点: 应用文献统计法定量预测绒囊流体未来主要应用方向, 解决现场应用工艺优化方向不明的难题, 应用于钻井最多, 较其它领域热点率至少高 10%; 绒囊在压裂领域发展潜力较大, 线性拟合系数 0.11, 其他领域为负数, 预测未来绒囊在压裂领域应用增加, 其他领域应用减少。

引用格式: 戴勇, 赵俊淇, 郭秦, 金龙, 李宏宏, 郑力会. 文献统计预测油气井用绒囊流体应用发展方向 [J]. 石油钻采工艺, 2024, 46(6): 651-666. // DAI Yong, ZHAO Junqi, GUO Qin, JIN Long, LI Honghong, ZHENG Lihui. Literature statistics predict the development direction of the application of fuzzy ball fluids for oil and gas wells [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2024, 46(6): 651-666.

文献统计预测油气井用绒囊流体应用发展方向

戴勇, 赵俊淇*, 郭秦, 金龙, 李宏宏, 郑力会**

中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京昌平

*通信作者: 赵俊淇, 电子邮箱: 3025350493@qq.com

**通信作者: 郑力会, 电子邮箱: zhenglihui@cup.edu.cn

摘要: (目的意义) 绒囊流体自 2009 年首次应用于磨溪气田老井侧钻水平井以来, 密度低于以油水为连续相的工作流体, 体系比泡沫更稳定, 以及作业后能够提高油气产量、降低产水, 被广泛应用于钻井、修井等石油工程的六个领域。但由于业内缺乏系统的应用报道, 导致部分从业者仅了解单一领域的应用情况, 难以借鉴以往经验解决实际难题并推动绒囊流体技术进步, 通过文献统计法预测绒囊流体应用方向, 明确其技术热点与潜在价值, 促进其更广泛、更高效的工程应用。(方法过程) 回顾绒囊流体十年来的现场应用过程, 结合文献统计法和时间序列法, 用热点率对比过去应用的分布, 用待定系统的大小预测未来应用的领域。(结果现象) 绒囊流体文章在钻井、修井、压裂、稳油控水、酸化、聚合物驱替领域中的热点率分别为 33%、23%、19%、13%、6% 和 6%, 钻井领域热点率较高主要得益于绒囊流体在井壁稳定、防漏堵漏等方面的粘接提高岩石强度特征。利用时间序列法拟合的线性方程斜率在钻井、修井、压裂、稳油控水、酸化、聚合物驱替领域中的线性方程斜率分别为 -0.20、-0.10、0.11、-0.05、-0.09 和 -0.10, 只有压裂是正值。反映目前石油工程的工作重点, 也明确了绒囊流体在压裂领域具有较大的发展潜力。(结论建议) 文献统计定量化方法, 不仅克服传统方法识别热点领域多依赖经验, 准确性和科学性较弱的问题, 还指明了文献综述的一种方法, 为研究者提供一种预测未来发展方向的可选择途径。

关键词/主题词: 新质生产力; 人工智能; 数字化转型; 绒囊流体; 钻井; 修井; 压裂; 酸压; 提采; 调驱; 封堵; 稳油控水; 剥茧算法; 储层伤害

中图分类号: P74; TE28 文献标识码: A DOI: 10.13639/j.odpt.202501021

收稿日期: 2024-07-03; 修回日期: 2024-08-20; 录用日期: 2024-10-09; 编辑: 杨春莉

Literature statistics predict the development direction of the application of fuzzy ball fluids for oil and gas wells

DAI Yong, ZHAO Junqi*, GUO Qin, JIN Long, LI Honghong, ZHENG Lihui**

College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Changping, Beijing, 102249, China

*Corresponding author. ZHAO Junqi, E-mail addresses: 3025350493@qq.com

**Corresponding author. ZHENG Lihui, E-mail addresses: zhenglihui@cup.edu.cn

Abstract: Since it was first used in sidetracking horizontal wells of old wells in Moxi Gas Field in 2009, the working fluid with density lower than oil-water as the continuous phase, the system is more stable than foam, and it can increase oil and gas production and reduce water production after operation. It is widely used in six fields of petroleum engineering, such as drilling and workover. However, due to the lack of systematic application reports in the industry, some practitioners only understand the application situation in a single field, making it difficult to learn from past experience to solve practical problems and promote the progress of velvet sac

fluid technology. By using literature statistical methods to predict the application direction of velvet sac fluid, clarify its technical hotspots and potential value, and promote its wider and more efficient engineering applications. Reviewing the field application process of velvet sac fluid over the past decade, combined with literature statistics and time series methods, comparing the distribution of past applications using hotspot rates, and predicting future application areas using the size of the undetermined system. The hot spot rates of velvet sac fluid in the fields of drilling, well repair, fracturing, oil stabilization and water control, acidification, and polymer displacement are 33%, 23%, 19%, 13%, 6%, and 6%, respectively. The high hot spot rate in the drilling field is mainly due to the adhesive properties of velvet sac fluid in wellbore stability, leak prevention and plugging, which improve rock strength characteristics. The slope of the linear equation fitted by time series method in the fields of drilling, well repair, fracturing, oil and water stabilization, acidification, and polymer displacement is -0.20 , -0.10 , 0.11 , -0.05 , -0.09 , and -0.10 , respectively, with only fracturing being positive. Reflecting the current focus of petroleum engineering work, it also clarifies the significant development potential of capillary fluid in the field of hydraulic fracturing. The quantitative method of literature statistics not only overcomes the problem of traditional methods relying too much on experience, weak accuracy and scientificity in identifying hot fields, but also points out a method for literature review, providing researchers with an alternative way to predict future development directions.

Key words: New quality productivity; Artificial intelligence; Digital transformation; Fuzzy-ball fluids; Drilling; Workover; Fracture; Acid; Enhanced oil recovery; Profile control; Sealaplug; Water control; Algorithm of Big-Data Cocooning; Formation damage

<https://doi.org/10.13639/j.odpt.202501021>

Received 3 July 2024; Revised in revised form 20 August 2024; Accepted 9 October 2024

0 引言

2006 年,文昌油田修井使用海水压井,漏失严重,修井后产量恢复慢,提出开发低密度压井流体,降低漏失量,保护储层尽快复产。提到低密度压井流体,必然会关联到可循环泡沫类工作流体。但是,可循环泡沫体系稳定性和在井下静止时的承压能力受到质疑。因此要开发稳定性更好,承压能力更强,保持低密度特征的工作流体^[1]。

经过 3 年努力,初步开发出膜更密,层更厚,还长毛的泡。此泡与普通的泡不同,是仿照细菌微观结构,由聚合物和表面活性剂在物理、化学作用下自然形成的仿生囊状物,称为囊泡(Ball)。囊泡的外围吸附聚合物好像长有短毛,称为绒毛(Fuzzy)。称之为囊泡是因为相比普通的泡,它有吸附层,从而显得更厚;称之为绒毛是因为囊泡外围吸附的聚合物,虽然有毛但较短类似动物的绒毛。

囊泡分散在聚合物胶体中,因此叫绒囊流体(Fuzzy Ball Fluids)。绒是聚合物分散于水中的称谓,囊则是囊泡的简称。封堵时用一定尺度的囊泡封堵一定尺度范围的漏失通道,符合模糊数学(Fuzzy Mathematics)集合的思想,从而实现针对不同尺度的流动通道采用模糊的封堵方式。利用具有封堵性能的绒囊流体,研制了能够形成绒囊特种性质的处理剂。当然,封堵为绒囊流体提供了粘接的环境,封堵不是目的,目的是提高地层的强度。

肉眼观察下,绒囊流体似糊状流体,显微镜下则是分散于流体中的非均匀气泡。现场应用的绒囊流体肉眼可以看出囊泡,是因为流体的黏度包裹着泡,循环均匀后就消失,现场工作人员经常称绒囊流体为可循环泡沫流体、微泡流体等,也有根据自己的感觉命名为微囊、毛囊等,都是方便自己工作的说法。经过多种性能评价,现场试用的条件基本具备。同时,为了解决绒囊流体优化配方困难的难题,提出了多元回归拟合的方法^[2]。这是剥茧算法(Algorithm of Big-Data Cocooning, ABDC)在应用中的初级阶段。

但是,海上作业需要考虑更多因素。如运输、环保等,试验难度较大。首次应用一直到 2009 年才得以在磨溪气田 M80C 井实施老井侧钻。绒囊流体调整妥当后,通过井下压力计实际测试了绒囊流体在液柱压力下 2500 m 井深的压力,表明在井下的密度由 1.01 g/cm^3 变为 1.03 g/cm^3 ,考虑水被压缩,表明囊泡的大小基本不变。此后,通过对钻井前绒囊流体性能及钻井后性状的分析,发现其具有较强的承压能力,能够有效解决井下作业中其他工程所面临的承压不足问题。先后用于柳林地区煤层气储层封堵保护^[3]、FL-H2-L 煤层气

五分支水平井钻井过程中的储层伤害^[4], 诸多地区的成功应用, 说明能够根据问题调整绒囊流体组分, 以达到满足工程需要。煤层气应用中, 其承压能力较高, 表明绒囊流体还可以用于固井和储层改造^[5], 并在奈曼油田固井过程中防止地层漏失, 保证固井质量^[6], 在海上 SZ361 油田的修井过程中, 绒囊流体被用作压井液, 有效防止漏失并减少储层伤害^[7], 在长庆油田储气库井中, 绒囊流体通过暂堵转向酸化工艺, 显著提高了气井的注采能力。在辽河油田, 绒囊流体用于老井封堵优势通道后进行重复压裂, 成功提升了油井产量, 同时还发现其在高含水油井堵水中具有提高采收率的潜力^[8], 此外, 在新疆油田的两个井区, 绒囊流体被用于辅助聚合物深部调驱^[9], 这些都表明绒囊流体有广泛的适用性。应用前后, 室内也不断认识作用机理, 并不断完善其应用工艺。

2010 年, 通过室内温度压力联合实验和现场压力计测试进一步验证绒囊流体在钻井、完井和修井的封堵承压能力^[10], 还研究了绒囊封堵后, 封堵对象岩石力学参数的变化^[11]。根据流动通道的大小和囊泡变形特点, 推测绒囊流体的防漏堵漏机理为堆积、拉伸和填塞, 以此为几何模型从作用力的角度解释囊泡实现分压、耗压和撑压的机理^[12]。

2011 年, 吉 X 井因严重漏失问题, 原钻井液已无法满足施工需求, 改用绒囊钻井液体系, 顺利完钻。室内实验与现场应用表明, 绒囊钻井液技术显著提升低压目的层的承压能力, 克服同一裸眼中不同压力系统共存的工程挑战^[13]。同年, 模拟细菌结构研发了含仿生绒囊的钻井液。现场测试显示, 该钻井液在低剪切速率下具备高黏度特性, 而在高剪切速率下表现出低黏度特性, 既能提升井眼清洁效率与机械钻速, 又可增强低压井段的承压能力, 从而满足动态窄密度窗口地层的安全钻井要求^[14]。还是这一年, 基于泡沫类工作液研发的绒囊工作液, 解决了泡沫在液柱压力下易消失的缺陷, 并在煤层气钻井中展现出密度可调、承压能力强、封堵性能优异及储层保护效果明显等优势。实例表明, 绒囊工作液对地层裂缝及孔道大小、形状有较强的自适应封堵能力, 可有效阻断渗流通道。其自适应封堵地层渗流通道的作用机制表明, 该工作液在煤层气欠平衡钻井、低密度水泥浆固井、提升地层承压能力及储层改造等领域有广阔的应用前景^[15]。

2012 年, 室内用多元回归方法^[16]和 BP 神经网络方法^[17]对比外推发现实测井下任意井深处绒囊流体密度变化不大, 进一步说明囊泡的抗压缩能力非可循环泡沫可以比拟, 达到开发之初的目标。并且研究了废弃绒囊钻井液的无害处理方法, 实现无害化处理废弃绒囊钻井液^[18]。

2013 年, 奈曼油田奈 1 井储层钻井过程中漏失严重, 固井质量较差, 影响试井作业。钻进至 2367 m 时发生井漏, 漏失风险较大, 为保证固井质量, 采用绒囊前置液封堵漏层提高地层的承压能力。用泥浆泵以 1.8 m³/s 的排量将配制好的绒囊前置液打入井中, 对漏失地层进行封堵, 再用水泥车进行注水泥浆、替浆等工艺, 最后水泥浆返出井口固井成功, 在整个固井过程中返浆正常未发生漏失^[19]。同年, 磨溪气田雷一段地层修井中出现严重漏失问题, 针对磨 80-C1 侧钻水平井地层孔隙裂缝发育、地层压力系数偏低以及钙侵与高矿化度等复杂特点, 采用了绒囊钻井液技术。现场应用结果显示, 绒囊钻井液具有稳定的流变性能, 能够实现随钻封堵地层。钻井施工过程中, 在 2564~2906 m 井段完成钻进, 总用时 19 d, 增斜段机械钻速达到 1.95 m/h, 水平段机械钻速为 2.38 m/h, 全井过程无明显漏失现象^[20]。

2014 年, 针对页岩气成藏特性及钻井过程中可能出现井漏、页岩水化膨胀导致井壁垮塌等问题, 开展油基绒囊钻井液技术研究工作。通过室内实验, 成功研发出油基绒囊钻井液配方。该钻井液密度可调范围为 0.65~0.88 g/cm³, 具备良好的流变性能, 抗温能力可达 150 ℃, 稳定性可维持 60 h 以上, 同时润滑性能出色, 并表现出优异的抗水、抗钙污染以及防漏堵漏能力, 能够满足页岩气井钻井的要求。该技术还适用于低压低渗透储层及低压盐膏层的钻井作业, 展现出良好的推广与应用前景^[21]。统计 SZ36-1 油田修井后两年多的采油数据对比, 发现产液量减少, 产油量却增加, 说明绒囊流体具有优秀控水、增产效果^[22]。同年, 煤层气井樊试 U1 井组中的工艺井, 在三开 $\Phi 152.4$ mm 井段施工中, 采用清水钻井液钻进至 772 m 时, 井内发生坍塌并伴随大量掉块, 导致井下出现复杂情况。随后, 改用绒囊钻井液体系, 按照接近煤层压力系数的密度进

行钻进。全井过程中未发生煤层垮塌、漏失等复杂问题,成功解决了煤层气井水平段的井眼清洁及井壁失稳、垮塌等技术难题,很好地满足了钻井施工的要求^[23]。

2015年,利用流变仪测试了绒囊流体在不同温度下的流动能力,发现它不受温度影响的流变特性,适用于海上深水钻井^[24]。但是,没有得到应用。同年,研究了绒囊暂堵液原缝无损重复压裂技术,在辽河油田得以应用^[25]。这一年,在12-11-3H煤层气六分支水平井钻井过程中,因掉块、垮塌、漏失及卡钻等问题导致成功率较低。根据不同井下条件及固控设备的实际情况,优化添加了成核剂、成膜剂、囊层剂和绒毛剂等4种绒囊钻井液主要处理剂,调整钻井液性能以满足地质要求。最终实现平均机械钻速12.65 m/h,相较邻井提升了11.55%。整个钻井过程验证了绒囊钻井液在高固相容纳、漏失地层封堵、井塌卡钻处理及气侵维持性能等方面的优异能力^[26]。还是这一年,温哲豪等为了提高GX-3井的重复酸化效果,采用绒囊暂堵流体对原酸化形成的高传导蚓孔进行封堵。应用结果显示,该井产气量得到显著提升,为碳酸盐岩储层的重复酸化转向技术提供了一种高效可行的新方法^[27]。

2016年,为解决马壁区块煤层气钻井过程中面临的漏失、井壁失稳和气侵等成井难题,通过室内对比实验,测定了注入3种不同钻井液后煤岩的单轴抗压强度,以及封堵煤岩后其承受液压力的能力。现场应用结果与实验数据一致,表明煤层气绒囊钻井液能够满足井壁稳定和防漏堵漏的要求^[28]。同年,郑力会等利用绒囊流体高封堵强度特性,成功提升了郑X井的日产气量,达到作业前的两倍以上,有效解决了重复压裂过程中原裂缝受损导致供气量减少的问题^[29]。

2017年,气区上部二叠系石千峰组和石盒子组发生严重漏失,且与之连通的直井出现恶性漏失和坍塌卡钻,造成成井困难。绒囊钻井流体通过内封堵和黏结作用解决破碎岩石问题,强化了岩石的力学性能。绒囊钻井流体的成功应用,克服了韩城区块煤层气井在上漏和下塌方面的井筒难题^[30]。同年,郑3X煤层气井因水力裂缝与含水砂岩层沟通,导致气井出现高产水、低产气的问题。聂帅帅等利用绒囊流体具有低伤害性、堵水及封堵强度高的特点,在进行重复压裂后,成功将排水期的产水量降低了79%,产气期的产水量降低了68%,产气量提高了44%。有效解决了压裂作业水产量过高的问题^[31]。

2018年,尝试在绒囊暂堵剂中加入固相纤维,以提升封堵承压能力和起效速度。采用0.1%、0.5%和1.0%浓度的纤维与密度为0.86 g/cm³、表观黏度为52.5 mPa·s、动塑比为1.06 Pa/(mPa·s)的绒囊流体混合,形成新的暂堵剂。实验结果表明,加入纤维后的混合暂堵剂密度变化小于0.01 g/cm³,表观黏度变化小于0.50 mPa·s,动塑比变化小于0.02 Pa/(mPa·s),显示出良好的兼容性。应用该暂堵剂后,日产气量达8×10⁴ m³/d,相较邻井提高了15%。应用结果表明,加入固相纤维后,绒囊流体的封堵效果得到了进一步增强^[32]。同年,魏攀峰等研究发现,在煤层气钻井过程中,常常面临漏失和井壁坍塌的问题。通过调整绒囊流体的不同配方,成功配制出适用于煤层气井的钻井绒囊流体,实现了对漏失和坍塌的有效封堵和控制^[33]。

2019年,从源头开始研究钻井液环境污染问题^[34],以减少包括绒囊在内的钻井液对环境的伤害。此外,应用了塔河油田A1井^[35],使得A1增产效果明显。

2019年以后,绒囊流体针对不同的油气井需求,在控制硫化氢井修井过程中实现了不放压修井^[36],在煤系地层致密砂岩气稳气控水中^[37],实现了封堵和储层改造的双重作用。

绒囊钻井液长达十余年的研究,基本上满足了石油工程领域的应用需求,特别是储层封堵作业的需求。根据不同的目标需求,研发不同组分的处理剂和研制不同性能体系,开发出绒囊钻井流体、绒囊完井流体、绒囊修井流体、绒囊压裂暂堵流体、绒囊酸压暂堵流体、绒囊堵水流体和绒囊深部调驱流体等工作流体。但是,研究和应用者经常认为绒囊流体只有一种,不了解用不同的材料配制不同的用途的体系以适用不同的应用对象,或者用相同的材料配制不同性能的体系满足不同的作业需求,造成如何选择、如何应用的困惑。所以,回顾十年来绒囊流体的应用,以开发更能发挥作用的材料和体系是十分必要的。

为了更好地了解绒囊流体在不同领域的应用情况,对2010—2019年间绒囊流体在实际过程中的应用情

况进行了统计分析,按照绒囊流体应用的领域分类,统计了绒囊流体在钻井、修井、压裂、稳油控水、酸化以及聚合物驱替六大领域中的应用频率。通过这些数据,可以深入分析绒囊流体在各个领域的应用频率差异,及其在不同年份的应用频率变化趋势,为此调研了 36 篇绒囊在钻井、修井、压裂、稳油控水、酸化、聚合物驱替六个领域的应用情况,见表 1。

表 1 绒囊流体 2010—2019 年不同领域应用频率统计

Table 1 Statistics of application fuzzy ball fluids in different fields from 2010 to 2019

年份	钻井/次	修井/次	压裂/次	稳油控水/次	酸化/次	聚合物驱替/次
2010	3	1	1	1	1	1
2011	3	2	1	1	1	1
2012	1	0	0	0	0	0
2013	0	1	0	0	0	0
2014	1	1	0	0	0	0
2015	3	1	1	0	1	0
2016	2	1	1	1	0	0
2017	1	0	1	1	0	0
2018	1	1	1	0	0	0
2019	0	0	2	0	0	0

从表 1 中可以看出,2010—2019 年,十年间绒囊流体的应用领域呈现出多领域的发展趋势,其应用主要集中在钻井、修井、压裂领域,在稳油控水、酸化和聚合物驱替领域应用较少。

2010—2011 年,得益于绒囊流体在井壁稳定性和防漏堵漏方面的突出优势,满足了钻井过程中对稳定性和安全性的高要求。从不同领域的应用频率上可以发现,钻井是绒囊流体的主要应用领域。

2012—2014 年间,绒囊流体在钻井领域的应用频率经历了一定的波动。尽管如此,钻井作业依然是其主要应用领域,除了钻井领域之外,绒囊流体也逐渐扩展至其他领域,尤其是修井和酸化领域中。虽然在这些领域中的应用频率较低,但仍显示绒囊流体在提升油气井修复效果、优化酸化反应等方面的潜力。总之,尽管绒囊流体在这一时期应用呈现出一定的波动,但在其他井下作业的作用逐步被重视。

2015 年以后,压裂和稳油控水的应用逐步增加,尤其是压裂领域,从 2015 年的极少应用逐渐稳定到后续几年连续应用,表明其在提高采收率和油气田开发中的潜力逐步显现。

整体而言,2010—2019 年十年间,绒囊流体的应用范围广泛。从所收集的数据中可以看出,绒囊流体在不同领域的应用存在显著差异性,这表明数据收集是有效的,为后续的深入分析提供了可靠的基础。

1 方法过程

1.1 室内研究

通过统计一定时间区间内各领域的绒囊流体应用频次来确定热点领域,这种方法在统计学上的理论支持主要基于频率分布、集中趋势、偏态分布和异常值检测等理论。从统计学角度来看,发文总量可以被视为对某一领域热度的直接量化,频率分布的分析能够揭示发文量在各领域间的分布情况,而集中趋势测量如均值和中位数,则帮助判断发文量的整体水平。如果某些领域的发文量显著高于其他领域,则可以通过离散程度如方差或标准差,来确定这些领域是否具有热点特征。

同时,热点领域的形成通常符合偏态分布,即大多数领域发文量较低,只有少数领域的发文量非常高,这种分布模式反映了少数领域占据大多数注意力的现象。此外,二八法则也提供了理论支持,即 20% 的领域可能贡献了 80% 的发文量,正是热点领域的特征所在。

从数学排序的角度来看,对领域发文量进行排名能够直观地识别出热门领域,符合排名分布的规律如词频分布定律,即排名靠前的领域发文量显著高于其他领域。异常值检测方法则可以进一步帮助识别显著高

于总体水平的领域,将其视为热点领域。此外,假设检验可以验证某些领域的发文量是否显著偏高,从而在统计学上判断该领域是否属于热点。

综上所述,文献统计分析法的理论支持主要来自统计学中对集中性和分布模式的分析,以及异常值和显著性差异的判断,能够科学合理地确定热点领域。

各领域发文量关于时间的变化趋势,实质上是利用时间序列分析法研究发文量的动态变化。时间序列分析的核心思想,是将数据分解为不同的组成部分,包括趋势、季节性周期和随机波动。其中,趋势部分反映了发文量的长期变化方向。这种趋势可以通过拟合线性回归模型、移动平均法或多项式拟合等方法来识别,对热点领域的长期发展做出科学判断。

除了趋势,时间序列中还可能存在季节性效应,即发文量呈现出周期性波动的特征。通过分析季节性成分,可以更好地理解领域内的规律性活动模式。通过傅里叶变换、周期性检测或移动窗口分析等技术,可以揭示这些周期性的规律,从而为领域发文量变化背后的内在机制提供理论支持。时间序列分析还关注随机波动的成分。这种波动通常由突发事件、外部冲击引起。如果某一领域在某段时间的发文量显著偏离长期趋势和周期性波动,就代表在这段时间区间出现一次短期的热点现象。

时间序列分析还依赖于平稳性理论,这是对时间序列建模的一个基础假设。平稳性是指时间序列的统计特性,例如均值、方差和自相关等特征,在时间上是恒定的。如果发文量数据是非平稳的,则需要通过差分、对数变换或其他方法将其转化为平稳序列后进行分析。

最后,时间序列分析中的自相关性与滞后效应理论,也为解释发文量的动态变化提供了支持。如果发文量在某一时刻与之前的时刻高度相关,即自相关性强,则可以通过自相关函数或偏自相关函数来量化这种关联。进而使用自回归积分滑动平均模型或其他预测性模型,进一步预测某领域未来的发文量变化。

总结来说,时间序列方法为领域发文量的动态变化提供了全面的理论框架。从趋势分析、周期性检测到随机波动与平稳性检测,这些理论帮助解释数据背后的长期发展、规律性模式和短期突发变化,为绒囊流体确定热点应用领域提供了数学基础。为预测绒囊流体的热门应用领域及应用领域的发展提供支撑依据。

此类数据统计分析的问题具有一个显著的共同点,即多个因变量往往依赖于同一个自变量,并表现出函数关系。为了更系统化、标准化地解决此类问题,同时提升研究的效率和准确性,分析过程进行可视化尤为重要,这不仅有助于清晰地呈现研究的逻辑结构,还能够帮助研究者更直观地理解理论成果,发现潜在问题和改进方法,如图1所示。

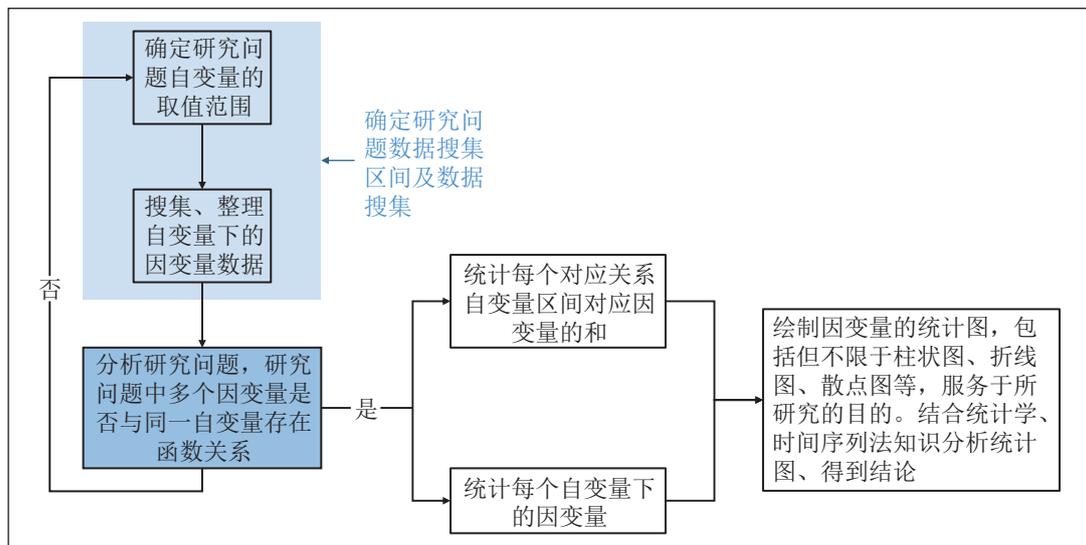


图1 室内研究成果形成过程

Fig. 1 Process of the results of indoor research results

从图 1 中可以看出, 整个流程可以分为确定研究问题数据搜集区间及数据搜集、分析方法适用性、数据统计处理、研究结果可视化呈现四个部分。

第一部分是确定研究问题中自变量的取值范围及搜集与自变量对应的因变量数据, 这是整个流程的基础, 有些数据或函数关系并不能直接从原生数据点看出, 一些因变量的取值往往需要经过统计和整理, 确保数据的准确性和完整性与所研究问题的目的相对应。这一步直接决定了研究过程的范围和方向, 也直接影响到该室内研究成果的适用性。

第二部分是流程中最核心的环节, 旨在判断研究问题在所选自变量取值区间内是否能通过该流程进行分析。如果多个因变量与同一自变量存在多种函数关系, 则每个函数的对应关系可以看作一个类别。

第三部分对数据进行两方面处理, 一是统计对应关系及因变量之和; 二是由于存在多个函数关系, 对于同一自变量, 需要统计不同对应关系下的多个因变量值。

第四部分是研究结果的可视化呈现, 将第三部分的统计结果绘制成散点图、柱状图、折线图等, 具体形式依据研究问题需求而定。在这些图表的基础上, 可进一步利用线性拟合、时间序列法等统计方法对结果进行深度处理, 线性拟合可以探讨绒囊流体应用频率与时间或其他关键变量之间的关系, 揭示潜在的趋势或相关性。而时间序列分析则可以帮助识别不同应用领域在不同时期的变化规律, 从而捕捉数据中的周期性、波动性或长期趋势, 以更有力地支撑研究结论。

整体而言, 该室内研究成果的形成过程系统地介绍了每个环节的具体阶段, 清晰展现了各阶段的因果逻辑关系, 同时体现出流程的连续性与阶段推进的间隔性。必须指出, 整个过程旨在提供解决此类问题的思路和方法, 而具体问题的解决仍需结合实际条件, 进行具体问题具体分析。因地制宜的原则才能够确保解决方案的针对性和有效性。

1.2 应用过程

绒囊流体在 2010—2019 年十年间的应用领域逐步发展, 在这十年里有 36 篇与其相关的研究文章发表。为了解不同年份绒囊流体在不同领域的应用分布情况, 依据文章内容, 将 36 篇文章归入钻井、修井、压裂、稳油控水、酸化和聚合物驱替六大领域进行分类统计。由于一篇文章可能涵盖多个应用领域, 因此在统计时, 不以文章总量为统计单位, 而是以各领域在文章中出现的频率为单位。这种统计方法能够更准确地反映各领域的实际关注度, 避免因单篇文章涉及多个领域而造成的数据偏差, 从而更科学地展现绒囊流体在不同领域的应用分布。

依据统计结果显示, 对绒囊流体在不同领域的应用频率进行统计, 通过汇总钻井、修井、压裂、稳油控水、酸化和聚合物驱替应用频率, 可以进一步计算各领域的应用频率在总次数中的占比, 为理解绒囊流体的应用热点提供了直观依据。同时, 这一分析为深入挖掘绒囊流体的潜力、优化其使用策略奠定了坚实的基础, 尽管一些领域在当下不热门, 面临一系列技术难点, 但挑战即是机遇, 这些领域在未来完全可能成为绒囊流体应用热门领域, 这也为未来技术创新提供了方向性指导。

为了更清晰地展示绒囊在不同领域的热门程度, 采用柱状图的可视化呈现方法。柱状图横轴表示领域名称, 纵轴表示绒囊流体在该领域的应用次数, 便于比较不同领域的应用频率。

接下来, 将整理出的时间序列数据进行汇总, 生成一个时间序列表格, 记录 2010—2019 年十年间每一年不同应用领域的应用频次。基于这些数据, 选择使用散点图进行数据点的可视化处理, 横轴表示年份, 纵轴表示对应年份内绒囊流体在该领域的应用次数。为了便于区分不同领域的趋势, 散点图中不同领域的应用情况使用了不同颜色、标识的数据点。

在完成散点图绘制后, 进一步对每个领域的数据点进行了线性拟合, 通过线性拟合, 可以得到描述各领域随年份变化的线性方程, 包括每条拟合直线的斜率和截距, 斜率绝对值的大小可以反应该领域随年份的变化程度, 截距可以反应绒囊流体初始年份在该领域的应用频次。这些拟合直线叠加在散点图上更加方便对

比,直观呈现了各领域的应用变化趋势。

在室内研究的过程中,对相关问题进行了系统的分析,并基于分析结果形成了室内研究成果形成流程图。以绒囊流体在不同领域的应用为实例,将实际现场应用过程可视化,流程涵盖了从数据收集到最终结论的各个环节,以及验证过程中的关键步骤,详细展示了研究成果如何在实例中得到应用。不仅可以直观地了解每个环节如何衔接,确保方法的思路可以可视化呈现,进而保证研究成果的可靠性和实用性。另外,通过将理论应用于实际问题的解决过程中,还能够证明室内研究成果的可行性,进一步优化和调整研究方法,提升在实际应用的效果,如图 2 所示。

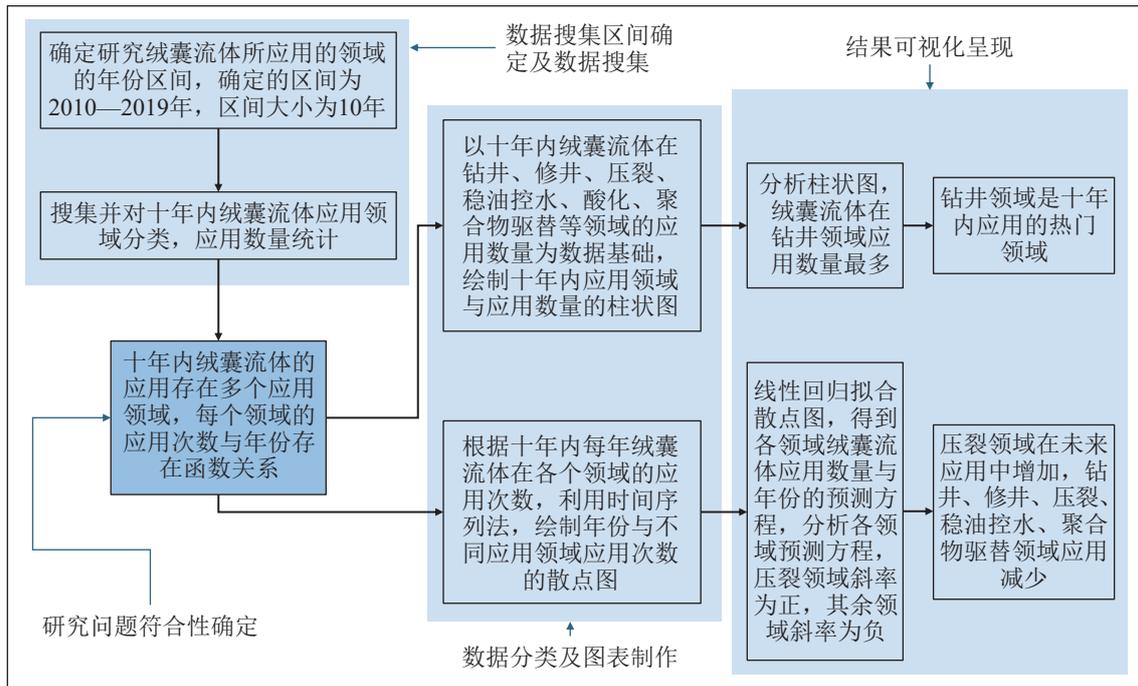


图 2 现场应用过程

Fig. 2 Field application process

从图 2 中可以看出,整个过程可以分为数据搜集区间确定及数据搜集、研究问题符合性确定、数据分类及图表制作、结果可视化呈现四个部分,体现了系统化和逻辑性,验证了理论的实践价值,也为未来类似研究提供了参考模板。

第一部分是明确研究的自变量范围和数据的收集与整理,设定研究时间区间为 2010—2019 年,并将分析的时间区间确定为 10 年。这一步搜集了研究时间区间内 36 篇绒囊流体应用的文献,并整理应用频次,为整个研究提供了框架、方向和数据基础。

第二部分是整个流程的核心环节,重点分析绒囊流体在不同领域的应用频率(因变量)与年份(自变量)之间的关系,判断这些数据是否可以通过该室内研究成果处理。如果年份和不同应用领域应用频次存在多种函数关系,则每种对应关系可看作一个应用领域,便可以按照不同的应用领域将应用情况分类。进而继续接下来的数据处理、分析。

第三部分对数据进行了两方面的处理,首先,按照应用领域分类,统计 2010—2019 年十年内每个领域应用频率的总和;其次,对同一自变量在不同领域的多个应用频率进行统计,得到其关于年份的分布和变化。

第四部分是结果的可视化呈现,通过柱状图和散点图展示统计结果,并结合时间序列法预测各领域未来的应用趋势。根据线性回归拟合的方程,分析结果显示钻井领域是十年内应用最多的领域,压裂领域的应用

趋势可能在未来呈现正增长, 其他领域则可能呈现下降趋势。

整体而言, 绒囊流体应用领域的频率及应用领域发展趋势研究实例, 很好的应用了室内研究成果, 并得到了具有一定科学性、客观性的实验结论。

2 结果现象讨论

2.1 热点率预测绒囊流体应用热门领域分析

热点率是衡量某一领域在特定研究主题中相对关注程度的重要指标, 其计算公式为该领域研究频率与所有研究频率之和的比值。该指标直观反映各领域在整体研究主题中的贡献比例和关注程度, 可以定量地分析绒囊流体在不同领域的应用分布, 36 篇文献涉及应用领域划分为钻井、修井、压裂、稳油控水、酸化和聚合物驱替共 6 个应用领域, 并对每个领域的应用频率进行统计。为了更直观地对比各领域之间绒囊流体应用频率的差异, 可通过统计各领域的研究频率数据并绘制柱状图, 将不同应用领域的频率差异以图形化方式呈现。柱状图能够清晰展示各领域的应用热点, 直观反映绒囊流体在 6 个领域的应用强度及相对分布情况, 如图 3 所示。

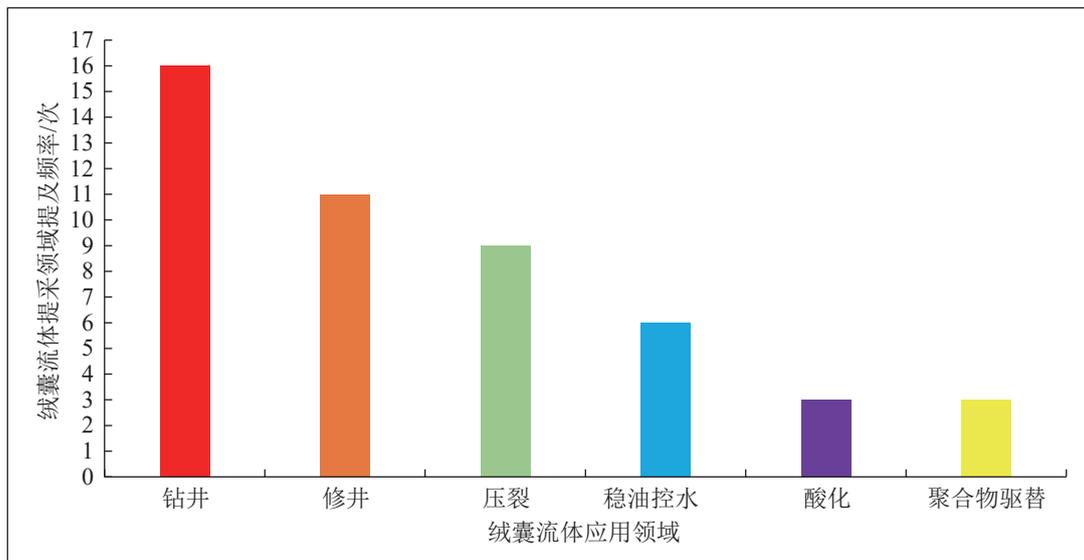


图 3 绒囊流体不同领域应用频率

Fig. 3 The number of applications of fuzzy ball fluids in different fields

从图 3 中可以看出, 十年间, 绒囊流体在六个领域都有应用。同时, 绒囊流体在不同领域的应用频率也不同, 其中, 绒囊流体在钻井、修井、压裂、稳油控水、酸化、聚合物驱替领域中的应用频率分别为 16 次、11 次、9 次、6 次、3 次、3 次。为体现绒囊流体文章在不同应用领域中占比, 通过热点率计算得出, 绒囊流体文章在钻井、修井、压裂、稳油控水、酸化、聚合物驱替领域中的热点率分别为 33%、23%、19%、13%、6% 和 6%。分析不同领域绒囊流体的热点率发现, 绒囊流体的研究主要集中在钻井、修井和压裂领域, 其中钻井领域研究频率最多, 热点率达到了 33%, 占据了显著的优势, 这说明在 2010—2019 年十年间, 绒囊流体在钻井领域的应用最为热门。

(1) 钻井领域应用最热门, 主要原因在于绒囊流体能够改善钻井液的流变性能, 提高钻井效率并降低作业风险。此外, 钻井作为石油勘探开发的基础环节, 对新型工作液需求较大, 吸引了更多的研究关注。

例如, 2017 年, 班凡生等发现金坛储气库硬脆性泥岩地层在钻探过程中, 当遇到裂隙发育的硬脆性泥岩时, 常规钻井液难以应对, 而绒囊钻井液通过内封堵的方式, 抑制了自由水侵入, 防止井壁坍塌和扩径, 确保钻井顺利进行。实验表明, 绒囊钻井液具有出色的封堵能力, 它在驱替砂泥岩柱塞时, 仅需 30 min, 驱替压力

就能迅速上升至 18 MPa, 有效封堵流动通道, 防止钻井液漏失, 减少地层污染, 提高钻井安全性和效率。绒囊钻井液具有强大的抑制性, 滚动回收率 93%, 远高于清水和聚合物钻井液。

又如, 2018 年, 发现煤层气钻井过程中经常遇上漏下塌地层, 通常采用调换或调整钻井液来防塌控漏, 魏攀峰等通过调节绒囊流体不同的配方配制钻井液。现场应用效果表明, 该绒囊配方性能可以实现煤层气井内封堵控制漏失、坍塌。

(2) 修井和压裂领域的研究频率相对较高, 也表明了绒囊流体在这些领域的应用潜力。修井过程中, 绒囊流体可以用于井壁保护和清理, 提高作业安全性; 在压裂领域, 绒囊流体出色的携砂能力和裂缝支撑效果对于憋压、造缝、支撑等压裂工作帮助很大, 成为研究的关键点。这些应用场景的实际需求, 为绒囊流体的研究提供了明确的技术驱动。

例如, 2020 年, 在修井作业中, 普光气田深部碳酸盐岩地层天然裂缝、溶洞与改造后人工裂缝结构共存, 井筒液柱与地层形成压差时成为漏失通道, 需实施暂堵。曾浩等为了解决绒囊修井液封堵低气压层时, 封堵大尺度通道导致用量过大的问题, 引入固态堵剂辅助绒囊修井液降低流体用量。封堵后注入破胶液解除暂堵, 测定清水流速恢复效果。结果表明, 相同承压所需绒囊修井液体积随固态堵剂加量增大而下降 12.3%~60.5%, 破胶后裂缝中清水流速恢复率达 98%, 伤害程度较低。此应用扩展了绒囊流体应用领域。

又如, 绒囊流体在压裂作业中也有应用, 2016 年, 郑 X 井地处山西省沁水县郑庄镇杨树庄村北, 是沁水盆地南部晋城斜坡带郑庄区块一口煤层气开发直井。完钻井深为 946.78 m, 套管射孔完井。生产层为山西组 3#煤层, 厚度为 4.0 m。顶板厚为 3.2 m, 含砂泥岩底板厚度为 1.2 m, 泥岩射孔段为 886.4~890.4 m。煤层解吸压力为 3.7 MPa, 含气量为 28 m³/t, 孔隙度为 4.0%, 渗透率较低。郑力会等发现绒囊流体能使压裂液转向压开新缝且不伤害原裂缝, 利用其高、封堵强度性能, 使日产气量达到 2 倍以上, 解决了重复压裂伤害原缝导致供气量少的难题。

(3) 稳油控水、酸化和聚合物驱替领域的研究相对较少, 但这并不意味着绒囊流体未来应用的潜力差。相反, 未来绒囊流体在酸化和聚合物驱替领域的应用空间很多, 之所以目前应用较少, 是因为这些领域具有明确的技术挑战, 同样, 这些技术挑战也不断推动绒囊流体发展, 并取得一部分成效, 尽管现在看来, 这些成效还难以解决目前遇到的大多数工程问题, 但或许随着研究成果不断发展, 能够为解决这些问题提供新的思路, 未来的研究也可能随着技术突破和工业需求的变化而进一步拓展。

例如, 绒囊流体在稳油气控水领域的应用最早是 2017 年的郑庄煤层气田。郑 3X 井位于山西省沁水县郑庄镇中乡村, 属于沁南晋城斜坡带郑庄区块的一口煤层气开发直井。完钻井深度为 710 m, 人工井底为 702 m, 采用套管射孔完井。生产层为山西组 3#煤层, 厚度为 4.1 m, 顶板为 7.2 m 厚的含砂泥岩, 底板为 11.8 m 厚的含砂泥岩。射孔段 648.7~653.2 m, 厚度为 4.5 m。煤层的解吸压力为 2.2 MPa, 吨煤含气量为 23 m³/t, 孔隙度为 4.3%。郑 3X 煤层气井的水力裂缝与含水砂岩层沟通, 导致气井出现高产水、低产气的问题。聂帅帅等通过应用绒囊流体的低伤害性、堵水性和强封堵性能, 经过重复压裂后, 排水期的产水量降低了 79%, 产气期的产水量降低了 68%, 同时产气量提高了 44%。该技术有效解决了压裂后水产量过高的难题。

又如, 绒囊流体在 2015 年酸化作业中得到应用。GX-3 井位于鄂尔多斯盆地陕北斜坡, 完钻深度为 3577 m, 钻井层位于奥陶系马家沟组马五层, 采用射孔并常规酸化处理。温哲豪等为了提高 GX-3 井的重复酸化效果, 使用了绒囊暂堵流体封堵了原酸化高传导蚓孔, 迫使酸液进入未酸化的地层。经过处理后, 产气量由 5.0×10⁴ m³/d 提升至 7.0×10⁴ m³/d, 实验结果表明, 绒囊暂堵流体封堵高传导蚓孔后进行再酸化, 不仅保护了原裂缝的产气能力, 还成功新增了产量贡献层。这为碳酸盐岩储层的重复酸化提供了一种有效的新方法。

再如, 绒囊流体在聚合物驱替领域的应用, 魏攀峰等为了解决非均质砾岩油藏高渗通道与低渗通道共存时, 常规聚合物驱大幅度提高采收率困难的问题。利用绒囊流体中囊泡在高渗通道低流动阻力诱导下进入并大量堆积的机理, 降低高渗通道与低渗通道间流动阻力差, 促使驱替介质转向进入低渗区, 提高油藏采收

率。驱替介质转向进入低渗岩心, 原油采收率提高 8.17%~11.54%, 驱油效果提升显著。在克拉玛依油田七东 1 区砾岩油藏 TX 井和 TY 井应用, 分别累计注入绒囊流体 150 m³ 和 123 m³, 井口压力升高 4.70 MPa 和 1.28 MPa, 对比注入前后 90 d, 日产油量分别提高 64.15% 和 17.74%, 整体含水率下降 7.94% 和 10.91%, 说明绒囊流体辅助聚合物驱提高采收率效果明显。

整体而言, 绒囊流体在钻井领域的应用最为热门, 并且得到许多现场应用, 其余领域的热门程度较低, 但是仍存在部分的现场应用, 并取得一定的成效。

2.2 时间序列法预测绒囊流体应用热门领域趋势分析

将绒囊流体文献按照应用涉及领域分为钻井、修井、压裂、稳油控水、酸化、聚合物驱替六大领域后, 为了预测应用领域中绒囊流体应用随年份的变化, 同时对比不同应用领域绒囊流体的发展趋势, 将各应用领域的文章频率绘制散点图, 横坐标为年份, 纵坐标为该领域绒囊流体应用频次。并分别对绒囊流体在各领域的应用频率关于年份进行线性回归, 拟合出预测方程, 通过图中拟合后的直线, 便于更直观地分析绒囊流体在不同领域应用频次发展趋势, 如图 4 所示。

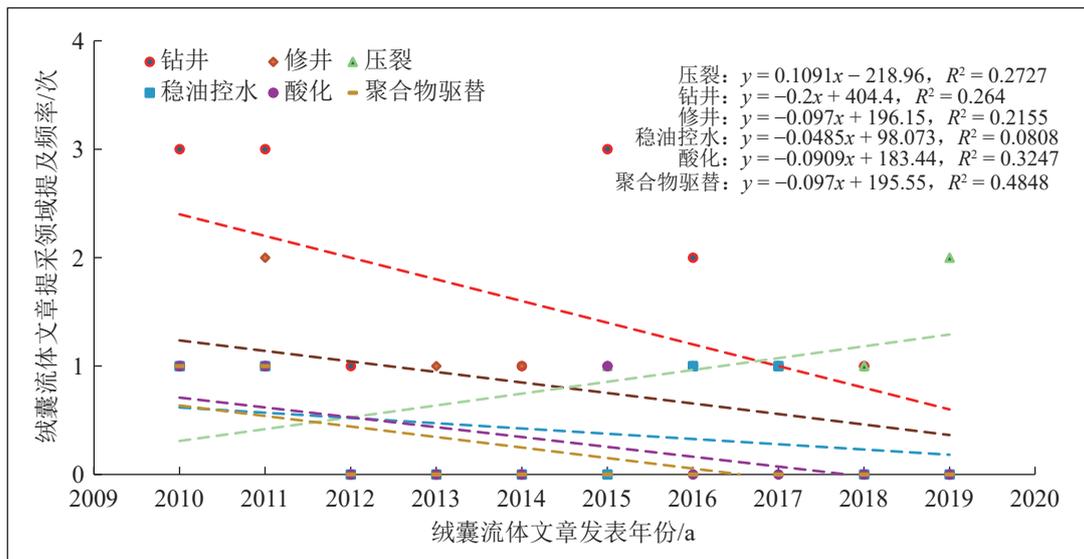


图 4 绒囊流体六大应用领域趋势

Fig. 4 Trends in six application fields of fuzzy ball fluids

从图 4 中可以看出, 绒囊流体的研究领域呈现出明显的趋势差异, 绒囊流体在钻井、修井、压裂、稳油控水、酸化、聚合物驱替领域中的线性方程斜率分别为-0.20、-0.10、0.11、-0.05、-0.09 和-0.10。钻井、修井、稳油控水、酸化和聚合物驱替, 均表现出明显的下降趋势, 尤其是在稳油控水和聚合物驱替等领域, 可能已经达到了技术瓶颈, 导致研究活动逐步减少。相比之下, 压裂领域却呈现出上升趋势。这种趋势的变化不仅反映了绒囊流体在不同领域应用的变化, 还揭示了行业技术发展的方向。未来, 随着新技术的不断发展, 可能会出现新的热点领域, 推动绒囊流体的研究进入新的阶段。

(1) 钻井领域趋势方程斜率为-0.20, 决定系数(R^2)为 0.26, 表明钻井领域的研究频率呈下降趋势。钻井领域在 2010 年到 2019 年期间研究频率较多, 但在此后逐渐减少。

在这十年内, 钻井领域是绒囊流体热门应用领域, 但是从发展趋势上看, 应用热度在逐年减退。钻井问题往往是人们现场过程中最先面临的问题, 在绒囊流体尚未问世或者未成熟之前, 一些钻井核心问题得不到改善, 例如井壁稳定性、钻井液的性能、井漏以及各问题之间的制衡关系等。因此, 在早些年, 绒囊流体在钻井的应用十分热门, 随着绒囊的发展, 钻井核心问题不断改善, 研究的需求自然减少。从这一角度也能间接反映出绒囊实际应用价值的卓越性。深部煤层气未来可能继续应用, 绒囊流体在新领域会有更多拓展。

例如,2017年,韩3-X井井深为1785 m,韩3-Y井井深为1985 m,建井周期为21 d,期间发生了多次漏失现象。郑力会通过调整绒囊钻井流体的性能,研究漏失点和坍塌点,掌握了地层的漏失规律。应用绒囊钻井流体后,能够有效增强岩石的力学性能,减少钻井过程中的漏失量,从而成功解决了韩城区块煤层气井的上漏下塌等井筒问题。

(2)修井领域趋势方程斜率为 -0.10 , R^2 为 0.22 ,表明修井领域的研究频率也在逐年减少。图中显示修井领域的研究热度起初较高,但下降趋势较为明显,表明相关技术的探索阶段可能已经完成,或者其他更具潜力的领域吸引了研究资源。

例如,2022年,乍得某注气井地层压力低、易脱气形成次生气顶,三开钻至1313 m时出现失返性漏失,井筒大量气体溢出而无法安全施工,常规修井液不能有效平衡地层压力,存在很大井控风险。现场利用低密度纳微米绒囊修井液降低漏速、控制气窜、低伤害的性能优势,解决了修井液堵漏成功率低、材料不适用及有效期短的难题。

(3)压裂领域趋势方程斜率为 0.11 , R^2 为 0.27 ,说明压裂领域的研究频率呈缓慢增长趋势。结合图中表现,压裂领域的研究起初较少,但自2015年开始逐步增加,这是由于绒囊流体在压裂过程中携砂能力或裂缝支撑等性能的优越性逐渐被发现并应用。绒囊流体在携砂能力和裂缝支撑能力上具有独特优势,随着非常规油气资源的开发逐渐成为全球能源勘探的重点,尤其是在页岩气、致密油等领域,压裂技术的重要性日益增加。在这些资源的开发中,绒囊流体的应用可以有效提高压裂液的性能,进而提升压裂效果。这使得绒囊流体在压裂领域的应用需求逐渐增加,带动了相关研究的增长。

例如,2019年,蒋建方为了研究绒囊暂堵剂在深层碳酸盐岩储层转向压裂中的适用性,选择了塔里木盆地塔河油田奥陶系碳酸盐岩THX井岩心作为样本,开展了注入绒囊暂堵剂前后的岩石力学特性评价实验,并进行了绒囊注入含裂缝岩心后的封堵压力实验。实验结果表明,岩心的韧性得到了增强,绒囊暂堵后裂缝的承压能力逐步提升,绒囊韧性封堵带已经形成,显示出显著的封堵效果;同时,绒囊暂堵剂能够在 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温下稳定工作。结论认为,绒囊暂堵剂能够有效满足深层碳酸盐岩暂堵转向压裂的需求。

(4)稳油控水领域趋势方程斜率为 -0.05 , R^2 为 0.08 ,表明在2010—2019年十年间,该领域的研究频率呈现缓慢下降的趋势。从数据中可以看出,稳油控水领域的应用初期曾受到一定关注,但近年来其应用热度逐渐减退。这一现象与几个因素相关,稳油控水技术面临较大的技术挑战,尤其是在实际应用过程中可能遇到复杂的地质条件和工程难题;虽然该领域的应用潜力巨大,但其实际效果仍有待进一步验证和优化,这导致相关研究和投资的热情有所减退。此外,随着其他技术的不断发展和突破,稳油控水领域的竞争也日益加剧,这可能进一步影响了其在科研中的关注度。然而,随着技术进步和应用验证的深入,稳油控水领域仍有可能迎来新的突破和发展。

例如,2020年,鄂尔多斯盆地苏里格地区岩心柱塞的孔隙度为 $3.29\%\sim 3.98\%$,气测渗透率为 $0.0419\sim 0.0512\text{ mD}$ 。现场描述破碎性致密砂岩储层气藏孔隙度为 $3.7\%\sim 15.0\%$,渗透率为 $0.01\sim 1\text{ mD}$ 。赵俊等为了解决苏里格深部煤系致密气储层厚度较小,且压裂过程中易与水层沟通从而导致气井产水的问题,在苏里格气田A、B两口井实施了控水压裂。通过利用绒囊流体的封堵强度和增气堵水性能,该方法有效地控制了裂缝形态并防止了水层的沟通,最终两个井的平均日产气量分别提高了 13.71% 和 6.99% ,有效解决了压裂后气井出水产量过高的问题。

(5)酸化领域趋势方程的斜率为 -0.09 , R^2 为 0.32 ,这表明在2010—2019年十年间,酸化领域的研究频率整体呈现出下降趋势。酸化领域的应用热度整体较低,说明该领域的关注度相对较弱。绒囊流体在酸化领域的应用尚处于初步探索阶段,其相关研究尚未形成系统性、规模化的突破,也未成为该领域的主要研究方向。这一趋势受到多种因素的影响,例如技术尚未完全成熟、研究成果的推广和应用受到限制、以及其他技术在酸化领域的竞争等。然而,这也表明酸化领域仍然存在一定的技术空白和潜在的研究价值,为绒囊流

体未来在该领域的发展提供了探索的空间和方向。

(6) 聚合物驱替领域趋势方程斜率为 -0.10 , R^2 为 0.48 , 表明聚合物驱替领域的研究频率在逐年减少。聚合物驱替的应用热度本就一直处于较低水平, 还要逐年减少, 可能是在 2010—2019 年十年间, 一些与绒囊流体相关的聚合物驱替技术在应用过程中效果不明显。这与绒囊流体当前的发展密切相关, 同时也反映出技术瓶颈的存在, 或绒囊流体在该领域的应用潜力尚未被充分挖掘。

整体而言, 通过绒囊流体六大应用领域趋势图, 能够直观的反映出 2010—2019 年十年间绒囊在不同领域的应用情况, 线性方程具有一定的预测性, 根据线性拟合的方程, 可以预测绒囊流体应用涉及领域的发展能力, 拟合方程的斜率绝对值的大小可以视为某领域发展能力的大小。斜率绝对值越大, 意为下一年变化越大, 正负表示变化增加或减少。钻井、修井、压裂、稳油控水、酸化、聚合物驱替领域分别是 -0.20 、 0.11 、 -0.10 、 -0.05 、 -0.09 、 -0.10 。钻井和压裂领域的发展能力较大, 因此预测下一年, 钻井领域的应用会显著减少, 而压裂领域则会相对增加。帮助研究者可以在了解十年内绒囊流体应用情况的基础之上, 更为准确地聚焦于下一个绒囊流体热门应用领域。

最后, 线性回归虽然是一种简单且有效的预测方法, 但它也有一些明显的缺点。线性回归假设自变量与因变量之间存在线性关系, 这在实际问题中并不总是成立。对于非线性关系, 线性回归的预测效果较差; 线性回归容易受到异常值的影响, 模型的稳定性和准确性可能会受到很大影响; 线性回归无法有效处理特征之间的多重共线性问题, 这可能导致参数估计的不准确, 进而影响模型的表现。

未来在选择模型时, 应首先对数据进行分析, 了解数据的特性。通过探索性分析判断数据是否呈现线性关系, 若是, 可以使用线性回归; 若不是, 可以尝试支持向量机、决策树等模型。在选择模型后, 评估模型效果。通过调参优化模型, 这样可以确保选用最适合的数据模型, 提升预测准确性。

3 结论建议

(1) 传统方法上, 热点领域的识别多依赖于经验判断, 这种方法在准确性和科学性上存在局限性。而通过文献统计的定量化方法, 不仅克服了这一难题, 还为热点领域的预测提供了更加科学和客观的依据。通过对大量相关领域的文献进行统计分析, 不仅指明研究领域热点。还为文献综述指明调研方向, 有助于学者在明确未来研究重点的基础上, 加深对绒囊流体的全面认识。

(2) 尽管文献统计法为研究提供了科学的定量依据, 但其应用仍存在一定局限性。当前的统计分析主要基于参考文献数量, 而对研究报告、技术白皮书等学术文件的覆盖较少。这种局限性可能导致数据来源的不够全面, 进而影响热点预测的准确性。此外, 由于统计过程对文献种类的依赖性较高, 对于非公开数据或灰色文献的挖掘能力有限, 遗漏一些潜在的重要信息。因此, 统计结果的准确性仍有提升空间。

(3) 为进一步提高预测的科学性和全面性, 未来的研究应着眼于扩展文献种类, 构建更加全面和多样化的基础数据库。在现有学术论文的基础上, 增加技术报告、专利文献、会议论文和行业白皮书等其他学术资源的统计覆盖范围, 从而减少因文献单一化导致的偏差问题。同时, 可以引入自然语言处理和机器学习等智能化数据分析工具, 对非结构化文档进行自动化处理, 挖掘更深层次的知识图谱。此外, 还应注重国际化合作, 整合来自不同地区、不同语言的文献资源, 结合大数据算法, 更加全面地把握钻井绒囊流体的应用方向。这将不仅有助于提高热点预测的准确性, 还能为该领域的创新与技术突破提供强有力的理论支持和数据保障。

致谢

感谢中国石油大学(北京) 研究实施过程和论文撰写过程中提供的一切帮助, 感谢项目参与者在研究过程中给予的支持与付出。

稿件申明

论文所有作者都同意文章中的作者排名, 不存在排名争议, 对文章中的学术观点一致, 对文章中涉及

的结论建议意见一致。

文章涉及的内容不存在学术不端的问题。

署名贡献声明

戴勇, 调研绒囊流体应用情况, 对调研的数据进行整理、分析, 为整个研究提供数据支持。

赵俊淇, 搭建文章整体框架, 撰写论文内容, 补充参考文献内容。

郭秦, 调研绒囊流体文献, 对整理的数据作图分析, 为文章内容提出修改意见。

金龙, 对文章数据处理部分提供技术支持, 为文章内容提出修改意见。

李宏宏, 对文章内容提供理论支持, 对结果讨论分析给出修改意见。

郑力会, 提出了课题研究的思路, 给出论文的修改方向。

数据可用性声明

本研究中涉及的所有原始数据、分析脚本及研究过程中产生的其他相关数据资料, 均已妥善保存并可通过合理请求获得。为确保数据的隐私与安全, 以及遵守相关伦理与法律要求, 部分敏感或个人信息已进行脱敏处理。研究者鼓励并欢迎其他学者基于本研究数据进行进一步的探索与分析。

如有数据访问需求, 请通过电子邮件联系本研究的通信作者联系, 并在邮件中明确说明数据使用目的、研究计划以及预期的研究成果。将在收到请求后的合理时间内, 根据数据共享政策与程序, 对请求进行评估并作出回应。

参考文献

- [1] 郑力会, 左锋, 王珊, 等. 国内可循环泡沫类钻井液应用现状 [J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(1): 10-16. //ZHENG Lihui, ZUO Feng, WANG Shan, et al. State of the art in the micro-bubble-based drilling fluids in China [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32(1): 10-16.
- [2] ZHENG Lihui, WANG Jinfeng, LI Xiaopeng, 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.
- [3] 闫立飞, 申瑞臣, 夏焱等. 煤层气全井欠平衡钻井技术柳林实践 [J]. 中国煤层气, 2014, 11(6): 7-10. //YAN Lifei, SHEN Ruichen, XIAN Yan, et al. Drilling practice of full-hole underbalanced drilling technology of CBM in Liulin block [J]. China Coalbed Methane, 2014, 11(6): 7-10.
- [4] 孟尚志, 窦政辉, 刘彬, 等. FL-H2-L 煤层气五分支水平井绒囊钻井液技术 [J]. 钻井液与完井液, 2012, 29(1): 5-8+89. //MENG Shangzhi, DOU Zhenghui, LIU Bin, et al. Fuzzy ball drilling fluid technology in CBM of multilateral horizontal well FL-H2-L with five branch holes [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2012, 29(1): 5-8+89.
- [5] 郑力会, 陈必武, 张峥, 等. 煤层气绒囊钻井流体的防塌机理 [J]. 天然气工业, 2016, 36(2): 72-77. //ZHENG Lihui, CHEN Biwu, ZHANG Zheng, et al. Anti-collapse mechanism of the CBM fuzzy-ball drilling fluid [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(2): 72-77.
- [6] ZUO Chen. Li, Practice of fuzzy ball cementing pad fluid in leakage zone of Naiman well N-X-Y. Advanced Materials Research Vol. 773 (2013) pp 714-719.
- [7] 王珊, 曹砚锋, 姜文卷, 等. 渤海某油田绒囊暂堵流体修井工艺 [J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(3): 114-117. //WANG Shan, CAO Yanfeng, JIANG Wenjuan, et al. Workover technology using fuzzy-ball temporary plugging fluid in Bohai Oilfield [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(3): 114-117.
- [8] 朱立国, 黄波, 陈维余, 等. 适于高矿化度地层水地层的稳油控水绒囊流体 [J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(2): 216-220. //ZHU Ligu, HUANG Bo, CHEN Yuwei, et al. Fuzzy-ball fluid for stabilizing oil production and water control informations with high-salinity water [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 38(2): 216-220.
- [9] 魏攀峰, 郑力会, 纪成, 等. 非均质砾岩油藏绒囊流体辅助聚合物驱效果 [J]. 新疆石油地质, 2020, 41(3): 307-313. //WEI Panfeng, ZHENG Lihui, JI Cheng, et al. Fuzzy-ball fluid assisted polymer flooding to enhance oil recovery in heterogeneous conglomerate reservoirs [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(3): 307-313.
- [10] 郑力会, 曹园, 韩子轩. 含绒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 Petrolei Sinica*, 2010, 31(3): 490-493.
- [11] 郑力会, 孟尚志, 曹园, 等. 绒囊钻井液控制煤层气储层伤害室内研究 [J]. *煤炭学报*, 2010, 35(3): 439-442. //ZHENG Lihui, MENG Shangzhi, CAO Yuan, et al. Laboratory studies on control coal bed methane formation damage by fuzzy-ball based drilling fluids [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(3): 439-442.
- [12] 郑力会, 孔令琛, 曹园, 等. 绒囊工作液防漏堵漏机理 [J]. *科学通报*, 2010, 55(15): 1522-1530. //ZHENG Lihui, KONG Lingshen, CAO Yuan, et al. Leakage prevention and plugging mechanism of fuzz-ball working fluid [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(15): 1522-1530.
- [13] 王德桂, 何玉云, 卜渊, 等. 吉 X 井煤层气绒囊钻井液实践 [J]. *石油钻采工艺*, 2011, 33(5): 93-95. //WANG Degui, HE Yuyun, BU Yuan, et al. Practice of fuzzy-ball drilling fluid technology in Well Ji X coal bed methane [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2011, 33(5): 93-95.
- [14] 郑力会. 仿生绒囊钻井液煤层气钻井应用现状与发展前景 [J]. *石油钻采工艺*, 2011, 33(3): 78-81,90. //ZHENG Lihui. Current status and development prospect of coalbed methane drilling application of bionic fuzzy ball drilling fluid [J]. *Oil Drilling Process*, 2011, 33(3): 78-81,90.
- [15] 郭本广, 郑力会, 孟尚志, 等. 绒囊工作液在煤层气勘探开发中的应用前景 [J]. *资源与产业*, 2011, 13(4): 117-121. //GUO Benguang, ZHENG Lihui, MENG Shangzhi, et al. Prospects for the application of fuzzy ball working fluid in coalbed methane exploration and development [J]. *Resources and Industry*, 2011, 13(4): 117-121.
- [16] 王金凤, 郑力会, 韩子轩, 等. 用多元回归法预测水基绒囊钻井液当量静态密度 [J]. *石油钻采工艺*, 2012, 34(2): 33-36. //WANG Jinfeng, ZHENG Lihui, HAN Zixuan, et al. Prediction of equivalent static density of water-based fuzzy ball drilling-fluids with multiple regression method [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2012, 34(2): 33-36.
- [17] 王金凤, 杨晨, 毛邓添, 等. BP 神经网络法预测水基绒囊钻井液当量静态密度 [J]. *石油钻采工艺*, 2013, 35(6): 32-35. //WANG Jinfeng, YANG Chen, MAO Dengtian, et al. Prediction of equivalent static density of water-based fuzzy ball drilling fluid by BP neural network method [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2013, 35(6): 32-35.
- [18] 孙法佩, 张杰, 李剑, 等. 煤层气 215.9 mm 井眼水平井绒囊钻井液技术 [J]. *中国煤层气*, 2012, 9(2): 18-21. //SUN Fapei, ZHANG Jie, LI Jian, et al. Soft capsule drilling fluid technology for 215.9 mm CBM well and horizontal well [J]. *China Coalbed Methane*, 2012, 9(2): 18-21.
- [19] LI Zuochen. Practice of fuzzy ball cementing pad fluid in leakage zone of Naiman well N-X-Y [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 773: 714-719.
- [20] 胡永东, 赵俊生, 陈家明, 等. 磨 80-C1 侧钻水平井绒囊钻井液实践 [J]. *钻采工艺*, 2013, 36(1): 110-113. //HU Yongdong, ZHAO Junsheng, CHEN Jiaming, et al. Practice of fuzzy ball drilling fluid in Mill 80-C1 side drilling horizontal well [J]. *Drilling Technology*, 2013, 36(1): 110-113.
- [21] 杨鹏, 李俊杞, 孙延德, 等. 油基可循环微泡沫钻井液研制及应用探讨 [J]. *天然气工业*, 2014, 34(6): 78-84. //YANG Peng, LI Junqi, SUN Yande, et al. Development and application of an oil-based circulating micro-foam drilling fluid [J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(6): 78-84.
- [22] 张媛. 产油趋势法评价绒囊修井液在海上 SZ36-1 油田修井效果 [J]. *石油钻采工艺*, 2014, 36(4): 61-63. //ZHANG Yuan. Evaluating the effect of fuzzy-ball workover fluid for offshore SZ36-1 Oilfield with oil production tendency method [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2014, 36(4): 61-63.
- [23] 滑志超, 王照辉, 邬恩中, 等. 绒囊钻井液在煤层气樊试 U1 井组的应用 [J]. *化工管理*, 2014(21): 82-83. //HUA Zhichao, WANG Zhaohui, WU Enzhong, et al. Application of fuzzy ball drilling fluid in coalbed methane Fan test U1 well group [J]. *Chemical Management*, 2014(21): 82-83.
- [24] 魏攀峰, 郑力会, 李博文, 等. 绒囊钻井流体在深水油气井中应用的可行性 [J]. *石油钻采工艺*, 2015, 37(1): 80-82. //WEI Panfeng, ZHENG Lihui, LI Bowen, et al. Rheological properties of fuzzy ball drilling fluids can be met in deepwater-drilling [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2015, 37(1): 80-82.
- [25] 郑力会, 翁定为. 绒囊暂堵液原缝无损重复压裂技术 [J]. *钻井液与完井液*, 2015, 32(3): 76-78,108. //ZHENG Lihui, WENG Dingwei. Study on repeating fracturing while causing no damage to original fractures [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2015, 32(3): 76-78,108.
- [26] 王洪关, 崔金榜, 朱庆忠, 等. 沁平 12-11-3H 煤层气六分支水平井绒囊钻井液技术 [J]. *石油钻采工艺*, 2014, 36(3): 39-41. //WANG Hongguan, CUI Jinbang, ZHU Qingzhong, et al. Drilling fluid technology for fuzzy ball drilling in Qingping 12-

- 11-3H coalbed methane six-branch horizontal well [J]. *Oil Drilling Technology*, 2014, 36(3): 39-41.
- [27] 温哲豪, 薛亚斐, 白建文, 等. GX-3 井绒囊流体暂堵重复酸化技术 [J]. *石油钻采工艺*, 2015, 37(5): 85-88. //WEN Zhehao, XUE Yafei BAI Jianwen, et al. Well vouch fluid temporary plugging repetitive acidification technology [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2015, 37(5): 85-88.
- [28] 郑力会, 刘俊英, 滑志超, 等. 马壁区块复杂结构煤体的煤层气绒囊钻井液研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(5): 79-83. //ZHENG Lihui, LIU Junying, HUA Zhichao, et al. Research on coalbed methane fuzzy ball drilling fluid for complex structural coal body in Mabi block [J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(5): 79-83.
- [29] 郑力会, 崔金榜, 聂帅帅, 等. 郑 X 井重复压裂非产水煤层绒囊流体暂堵转向试验 [J]. *钻井液与完井液*, 2016, 33(5): 103-108. //ZHENG Lihui, CUI Jinbang, NIE Shuashuai, et al. Steering test of temporary plugging of fuzzy ball fluid in repeated fracturing of non-water-producing coal seam in Zheng X well [J]. *Drilling and Completion Fluids*, 2016, 33(5): 103-108.
- [30] 郑力会. 绒囊钻井流体成功解决韩城区块煤层气井上漏下塌的井筒难题 [J]. *天然气工业*, 2017, 37(7): 138. //ZHENG Lihui. Fuzzy ball drilling fluid successfully solves wellbore problems of coalbed methane wells leaking upward and collapsing downward in the Hancheng block [J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(7): 138.
- [31] 聂帅帅, 郑力会, 陈必武, 等. 郑 3X 煤层气井绒囊流体重复压裂控水增产试验 [J]. *石油钻采工艺*, 2017, 39(3): 362-369. //NIE Shuashuai, ZHENG Lihui, CHEN Biwu, et al. An experiment on refracturing with fuzzy-ball fluid for water control and stimulation of CBM Well Zheng 3X [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2017, 39(3): 362-369.
- [32] 许洪星, 魏攀峰, 王祖文, 等. 无固相绒囊流体混合固相纤维的重复压裂暂堵技术 [J]. *非常规油气*, 2018, 5(04): 75-79. //XU Hongxing, WEI Panfeng, WANG Zuwen. Repeat fracturing temporary plugging with solid-phase fiber mixed with solid-phase fuzzy ball-free fluid [J]. *Unconventional Oil and Gas*, 2018, 5(04): 75-79.
- [33] 魏攀峰, 臧勇, 陈现军, 等. 绒囊钻井液处理煤层气钻井上漏下塌地层的施工工艺 [J]. *天然气工业*, 2018, 38(09): 95-102. //WEI Panfeng, ZHANG Yong, CHEN Xianjun, et al. The construction technology of the velvet bladder drilling fluid to treat the leakage and collapse formation of coalbed methane drilling[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(09): 95-102.
- [34] ZHANG Y, SU G, ZHENG L, et al. The environmental friendliness of fuzzy-ball drilling fluids during their entire life-cycles for fragile ecosystems in coalbed methane well plants [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 364: 396-405.
- [35] 蒋建方, 翟晓鹏, 贺甲元, 等. 绒囊暂堵剂在深层碳酸盐岩储层转向压裂中的应用 [J]. *天然气工业*, 2019, 39(12): 81-87. //JIANG Jianfang, ZHAI Xiaopeng, HE Jiayuan, et al. Application of a fuzzy-ball temporary plugging agent to the diverting fracturing of deep carbonate reservoirs [J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(12): 81-87.
- [36] 曾浩, 朱方辉, 张文昌, 等. 普光气田绒囊修井液结合固相堵剂暂堵深部低压气层 [J]. *石油钻采工艺*, 2020, 42(5): 652-656. //ZENG Hao, ZHU Fanghui, ZHANG Wenchang, et al. Temporary plugging of deep low-pressure gas layer by fuzzy ball workover fluid combined with solid-phase plugging agent in Puguang gas field [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2020, 42(5): 652-656.
- [37] 赵俊, 杨生文, 孙泽宁, 等. 苏里格深部煤系致密气储层绒囊流体控水压裂 [J]. *石油钻采工艺*, 2020, 42(5): 647-651. //ZHAO Jun, YANG Shengwen, SUN Zening, et al. Applying fuzzy-ball fluid to the water control fracturing in deep coal-measure tight gas reservoirs in Sulige [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2020, 42(5): 647-651.