

石油钻井工程防漏堵漏工艺的研究应用及经济性研究

燕钦章（胜利油田大明集团有限公司 山东 东营 57000）

摘要：石油作为各领域发展不可或缺的能源支柱，其开采作业的核心在于钻井技术的精准执行。在钻井工程复杂多变的作业环境中，钻井过程中漏失现象构成了一项严峻挑战，若未能及时识别并采取有效措施加以控制，将连锁引发一系列负面影响。鉴于此，石油行业亟需加大对防漏堵漏技术的研发投入与应用力度，依据钻井现场的特定条件与工程标准，科学匹配并应用恰当的防漏堵漏策略，以源头防控为目标，有效遏制石油渗漏的风险。

关键词：石油钻井；钻井工程；防漏堵漏工艺；经济性分析

随着全球石油资源需求量的持续攀升，为保障石油市场的稳定供应，我国正加速推进石油勘探与开发工作。然而，在石油钻井工程的推进过程中，复杂多变的地质条件与技术难题并存，其中井漏问题尤为棘手，它不仅对地下资源的保护构成威胁，还损害了地下油气层的结构完整性，进而影响了石油开采的效率与钻井工程的顺利顺畅进行。因此，深入研究并高效运用防漏堵漏技术显得尤为重要，需集合多种先进施工技术策略，精准定位并解决钻井过程中漏失问题，确保石油钻井工程的质量与安全，为行业的长远发展奠定稳固基础。在此过程中，经济性分析亦占据关键地位，通过科学合理的成本效益评估，有助于优化资源配置，提升防漏堵漏技术的投入产出比，提升整体经济效益形成技术创新与应用相互促进的良性循环。

1 防漏堵漏工艺

石油钻井作为挖掘地下油气宝藏的核心途径，依托先进设备与技术预定位置穿透岩层，直达油气层深处。随着科技的不断演进，钻井技术已从手工挖掘的原始形态，跨越至人力冲击、机械钝钻阶段，最终迈入旋转钻井的现代化篇章。然而，钻井作业中频发的井漏问题，其潜在影响深远，因此，防漏堵漏技术的研究与应用显得尤为重要。防漏堵漏技术体系主要包含预防与应对两大核心环节：预防策略侧重于钻井全过程中，运用预见性的技术手段，预先防范井漏风险；而堵漏措施则是在井漏事件发生后，迅速行动，采取有效方法封闭漏失路径，控制事态发展，从而保障生产效益。

2 影响石油钻井工程防漏堵漏效果的因素

2.1 漏层精准定位

当前，尽管水动力学分析法和综合判断法被广泛应用于漏层定位，但其复杂性与现场操作实际需求的脱节，显著制约了定位精度的提升。特别是在长裸眼

井段及多层漏失并存的复杂地质条件下，定位难度急剧上升，加之施工团队专业技能水平的参差不齐，更使得防漏堵漏工艺的现场实施效果大打折扣。

2.2 漏失通道特性

堵漏材料的选择高度依赖于漏失通道开口尺寸的准确评估，而漏失通道特性的不确定性则为这一环节设置了重重障碍。当前，基于漏速参数的推测方法虽为通道张开程度的判断提供了依据，但其固有的局限性使得预测结果与实际状况之间往往存在偏差，进而可能导致对漏失层孔缝尺寸的错误估计，直接影响堵漏措施的有效性和针对性。因此，漏失通道特性的复杂性和不确定性，成为防漏堵漏技术实施过程中亟待解决的关键问题之一。

2.3 漏失压力波动

地层压力的预测难度本就较高，加之其固有的不确定性，使得防漏堵漏作业的技术复杂性和风险性显著增加。在缺乏精确地层压力数据支撑的情况下，防漏堵漏工艺的现场实施效果难以保障，不仅可能无法满足工程安全性的要求，还可能在经济性方面造成不必要的损失。因此，如何有效应对漏失压力的波动，成为提升防漏堵漏工艺综合效益的关键所在。

3 石油钻井工程防漏堵漏工艺的应用策略

3.1 石油钻井工程 KPD 堵漏工艺

在石油钻井工程的实施过程中，井漏作为常见的技术难题，其有效解决依赖于对成因与严重性的精准分析。KPD 控制可扩张堵漏技术作为当前行业内的主流解决方案，凭借其独特的优势备受瞩目。该技术核心在于利用惰性材料增强的水泥砂浆，其出色的胶结密封性能和固水扩张特性，为应对井漏提供了强有力的技术支持。在实际操作中，技术人员严格遵循“高注低堵”的策略原则，根据不同类型的漏失井口特征，实施差异化的注入方案。对于无液面返出的失返性井

口, KPD 堵漏剂被精确注入至漏失层上方 80 至 100m 的位置; 而对于可见液面泄漏的井口, 则采取在漏失层上下 50m 范围内分段注入堵漏浆的措施; 在无回流井况下, 注入点则设置在距漏失层约 20m 处, 以实现 KPD 材料的精准封堵。实践证明, 该工艺在堵漏效率上表现卓越, 成功率高达 90% 以上, 是石油钻井防漏堵漏领域的一项科学且高效的技术创新。

3.2 石油钻井工程复合承压剂堵漏工艺

针对石油钻井作业中频繁出现的井漏现象, 精确监测与及时有效的堵漏措施至关重要。复合承压剂堵漏技术, 作为应对此类问题的重要手段, 通过复合承压料混凝土灌浆的方式实现漏洞的快速封闭。在设计阶段, 该技术综合考虑了压力计算方法、自动节流管的控制要点, 并严格筛选复合型填料, 确保压剂与胶浆的配比、流速等参数达到最优状态, 以实现通道封闭的高效性与资源利用的最大化。在实施过程中, 保持管道的畅通无阻, 并科学调控油气充填、转换及注入过程, 是确保堵漏治理效果的关键。

3.3 石油钻井工程泥浆堵漏工艺

泥浆堵漏作为石油钻井中广泛应用的防渗技术, 其优化应用对于提高钻井作业的安全性与效率具有重要意义。面对地层岩土开裂等引起的井漏问题, 技术人员通过减小泥浆泵容积、调整泥浆的润滑性、固相含量及浓度等参数, 实现了对漏孔的有效堵塞。针对高渗透性砾石或砂层, 采取增加泥浆稠度的措施, 以增强流阻, 防止泥浆流失, 达到堵漏的目的。在深井钻进作业中, 合理控制钻井液的粘度, 以降低环空压降, 实现对井漏的有效控制。此外, 循环封堵与挤压封堵技术也被广泛应用于解决地层构造复杂导致的井漏问题, 其中挤压封堵技术特别注重根据现场条件选用合适的钻井液, 确保充分覆盖漏层, 并通过严格控制注浆过程中的环内气压与灌浆时间, 必要时采取分段灌浆的方式, 以增强封堵效果。

3.4 石油钻井工程其他堵漏工艺

面对钻探及完井过程中多样化的井漏问题, 油田企业需根据泄漏速度等具体条件, 灵活采取多种技术措施进行综合治理。对于低漏失速率的井口 ($<5\text{m}^3/\text{h}$), 通过暂停钻进并向泥浆中添加适当浓度的 DF-1 (如 2% 至 3%), 尝试实现漏孔的闭合。若效果不佳, 可进一步采用憋压工艺或添加木屑等辅助材料以增强堵漏效果。对于中速泄漏 ($5\text{--}15\text{m}^3/\text{h}$) 的井口, 则推荐采用桥接式封堵技术, 并谨慎提升钻头至安全位置,

同时精确控制桥接剂的种类、用量及比例。此外, 复合凝胶材料技术凭借其独特的网格结构形成能力, 在封闭漏层方面展现出广阔的应用潜力, 为石油钻井防漏堵漏技术的多元化发展提供了新的思路与方向。

4 实例分析

4.1 成因深入解析

在 A 油田的钻井作业中, 井漏现象频发, 其根源可细分为渗透性漏失与裂缝性漏失两大核心类别。首先, 渗透性漏失主要归因于油田特有的地层结构, 特别是砂砾岩与变质岩地层所展现出的高渗透特性 (其渗透率约为 $14 \times 10^3 \mu\text{m}^2$), 加之地层颗粒尺寸显著超越钻井液颗粒, 通常超出三倍之多, 这一物理差异直接促成了钻井过程中的渗透性漏失现象。然而, 值得注意的是, 钻井作业的进行伴随着泥饼的逐渐累积与增厚, 这一动态过程在一定程度上对井漏的扩展起到了抑制效果, 从而使得此类漏失的速率通常被限制在 $10\text{m}^3/\text{h}$ 以内。其次, 裂缝性漏失的成因更为复杂且多变, 涉及碳酸岩、白云岩及裂缝性砂岩等多种岩石类型。这些岩石中自然存在的裂缝结构, 在钻井作业的机械应力作用下易于扩展, 进而为钻井液的漏失提供了直接通道。特别是在穿越破碎带地层时, 钻井过程中常伴随有井下憋跳、钻速急剧上升等异常现象, 这些现象进一步加剧了裂缝性漏失的风险。此类漏失的核心机制在于井内压力状态的失衡, 导致地层中的薄弱面发生开裂, 而漏失的具体量级与速度则直接受裂缝尺寸大小的调控, 其速度范围可广泛波动于 20 至 $100\text{m}^3/\text{h}$ 之间。

4.2 预处理方案部署

为有效预防和应对井漏挑战, A 油田在钻井作业的初期阶段便采取了随钻防漏与适时停钻堵漏相结合的预处理策略。在防漏堵漏材料的选择上, 主要聚焦于单封、细目钙以及承压堵漏剂 (具体细分为 1 型小粒径与 2 型大粒径两种), 通过精准评估渗漏速度, 科学配比并选用适宜的复合堵漏剂组合, 以期在钻井作业初期便构建起高效的防漏屏障, 为后续作业提供有力保障。

4.3 堵漏技术方案设计

针对 A 油田地层中出现的裂缝性井漏难题, 设计了一套基于钻井液与堵漏材料配比动态调整的治理方案:

对于漏速低于 $10\text{m}^3/\text{h}$ 的轻微井漏情况, 采用以钻井液为基础, 辅以 4% 单封与 6% 细目钙的配比方

案,旨在初步构建并加固堵漏防线,有效控制漏失的进一步发展。当井漏速度上升至 10 至 30m³/h 的中等程度时,则需对钻井液中的堵漏材料配比进行相应调整,将单封与细目钙的比例分别提升至 6% 与 4%,并引入 2% 的 1 型承压堵漏剂与 6% 的 2 型承压堵漏剂,以增强堵漏体系的整体效能,有效应对中等强度的漏失挑战。面对漏速超过 30m³/h 的严重井漏状况,必须采取更为强力的应对措施。此时,需将钻井液中的单封与细目钙比例均保持在 6% 的高水平,并同时加入 8% 的 1 型与 8% 的 2 型承压堵漏剂,以构建出高强度、高密度的堵漏体系,迅速且有效地控制并封堵漏失通道,确保钻井作业的安全顺利进行。这一堵漏技术方案设计,通过精细化的材料配比策略与动态调整机制,旨在实现对 A 油田不同类型及程度井漏问题的精准治理与高效应对。

4.4 方案优化

4.4.1 孔隙型渗透性堵漏优化方案

鉴于 A 油田高孔高渗型地层的特殊地质条件,尤其是浅棕红色粉砂岩与泥质粉砂岩构成的复杂地层结构,其高孔隙度(26.78%)与高渗透率($2561 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)特性显著,针对此类大孔隙度砂砾岩地层,必须实施更为精细化的堵漏策略优化。考虑到地层总厚度达 1200m,且岩性多变、胶结不良、渗透性能强而承压性能弱,特别是在深度较大的关键井段,井漏问题尤为突出。砂砾岩作为该地层的主要组成部分,其高含砂率(40.6%)与高渗透率($1462 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)直接加剧了钻井作业中的井漏风险。因此,需优化钻井操作流程,严格控制下钻速度与开泵速度,避免瞬间冲击力过大导致的井漏加剧。

4.4.2 钻井液体系渗透性封堵性能优化

针对 A 油田当前钻井液体系在渗透性封堵方面的不足,尤其是随钻防漏剂未能有效发挥作用,显示出显著的侵入深度与适应性问题,必须采取更为有效的措施以提升封堵效能。传统堵漏剂因缺乏必要的固化能力,导致封堵后承压性能不足,堵漏效果欠佳,且易引发重复性漏失。为此,需深入探索并优化随钻封堵剂的选用与配比,结合传统堵漏剂的优势,通过二者的协同作用,构建更为高效的封堵体系。具体而言,可引入新型复合随钻防漏剂,如骨架颗粒、变形颗粒、柔弹性颗粒及纤维材料等,利用这些材料间的相互作用机制,显著提升对微孔隙与微裂缝的自适应封堵能力,实现井漏的主动防控与高效治理。

4.5 经济性分析

从石油钻井工程的全局视角出发,防漏堵漏工艺的应用质量直接关联着石油开采的整体经济效益。因此,在钻井作业实践中,必须高度重视防漏堵漏工艺的技术革新与应用优化。具体而言,需从以下几个方面着手:首先,全面审视防漏堵漏工艺的实际应用效果,针对存在的问题进行深入剖析,并提出针对性的改进措施,以有效降低故障发生率;其次,持续优化工艺流程与技术方案,推动技术水平的不断提升;再次,充分利用现代可视化技术手段,深入剖析井漏机理,为技术措施的完善提供有力支撑;最后,积极引入并应用新型材料与技术手段,以提升石油开采的效率与质量。通过上述综合措施的实施,不仅能够有效控制钻井成本,还能够显著提升石油开采的经济效益,为石油行业的可持续发展奠定坚实基础。

5 结论

综上所述,石油钻井过程中防漏堵漏工艺的效能对于保障石油开采的整体效率与经济效益具有至关重要的作用。因此,在钻井作业中,必须高度重视并密切关注该工艺技术的应用情况。具体而言,需全面评估防漏堵漏工艺在现场的应用表现,深入剖析其潜在问题与挑战,并根据实际作业条件制定并实施针对性解决方案,以有效降低故障与事故风险。同时,持续推动防漏堵漏工艺的优化与革新,聚焦技术升级与突破,通过创新手段解决现有技术难题。此外,还应积极运用现代可视化技术,深入剖析漏失现象的内在机制,为技术措施的精准制定与实施提供坚实支撑,从而不断完善钻井作业流程中的各项技术环节,提升整体经济效益。

参考文献:

- [1] 孙舜,王志鹏.石油钻井工程的防漏堵漏工艺探讨[J].石化技术,2024,31(07):167-169.
- [2] 张彦军.石油钻井工程的井漏原因和防漏堵漏工艺方案研究[J].科技风,2024,(14):81-83+93.
- [3] 杜飞虎,薛永强,赵显龙.石油钻井工程的防漏堵漏工艺[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(01):150-152.
- [4] 郭亚林.石油钻井工程的防漏堵漏工艺探究[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(23):22-24.
- [5] 扶喆一.石油钻井工程防漏堵漏工艺质量标准探析[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(21):1-3.
- [6] 王宝平.石油钻井工程中防漏堵漏工艺应用探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(21):169-171.