封堵技术在井下作业中的成本效益与环保效果评估

戚喻晓 (胜利油田分公司油气井下作业中心, 山东 东营 257000)

摘要: 本文系统梳理并评估了封堵技术在井下作业中的成本效益和环保效果。本研究介绍了封堵技术的定义、类型及技术原理, 并探讨了其在油气井、地热井和废弃井中的具体应用。通过详细的成本构成和效益分析, 揭示了封堵技术在实际应用中的经济性和可行性。本文评估了封堵技术的环保效果, 分析其对地下水、地表环境和大气的影响, 并提出了改进建议和未来研究方向。本文旨在为封堵技术在井下作业中的成本效益与环保效果评估提供参考和借鉴。

关键词: 封堵技术; 井下作业; 成本效益; 环保评估

在油气井、地热井及其他井下作业中, 封堵技术至关重要, 旨在确保井下流体的有效控制, 避免资源浪费和环境污染。随着全球能源需求的增长和开采技术的提升, 封堵技术的作用日益显著。同时, 全球环境保护意识的增强和各国严格的环保法规, 使得传统封堵方法带来的地下水污染、地表破坏和大气污染等问题备受关注, 因此, 开发环保高效的封堵技术成为必然趋势, 以实现可持续发展并减少生态负面影响。实际应用中, 封堵技术的选择不仅需考虑技术性能和环保效果, 还必须进行全面的成本效益分析, 明确经济性和可行性, 优化决策, 从而实现经济收益最大化和环境负担最小化。本文旨在系统梳理封堵技术的定义、类型、原理及应用场景, 并结合实际案例, 对其成本效益和环保效果进行全面评估, 期望为相关领域的理论研究和实践应用提供支持, 推动封堵技术的广泛应用和不断优化。

1 封堵技术概述

1.1 封堵技术的定义与类型

持续封堵技术是指在井下作业中, 永久性地阻止流体流动或封闭某一井段的技术。此类技术通常用于废弃井封堵、废井封堵或封堵不再需要开采的油气层, 确保不会发生泄漏或污染。这些技术要求封堵材料和方法具有高度的耐久性和稳定性, 以保证长时间内的有效封堵。常见的持续封堵技术包括水泥封堵、树脂封堵和复合材料封堵等。这些技术通过物理和化学反应, 形成坚固的封堵屏障, 确保封堵效果的持久性和可靠性。暂时封堵技术是指在井下作业的某一阶段临时使用的封堵方法, 目的是在作业完成后能够恢复流体流动。这类技术主要用于井下维修、测试和短期的作业暂停, 要求封堵材料和方法具有易操作性和可逆性。暂时封堵技术的关键在于其灵活性和有效性, 既

要能够有效阻止流体流动, 又要在需要时快速解除封堵。常用的暂时封堵技术包括桥塞封堵、膨胀式封堵和机械封堵工具等。这些技术通过机械作用或物理变化, 在短时间内形成有效封堵, 并在需要时通过特定操作解除封堵。

1.2 技术原理

物理封堵技术通过利用材料的物理性质来阻断或限制井下流体的流动。这种方法通常依赖于材料的粘度、密度和膨胀性等特性来实现封堵效果。例如, 膨胀材料封堵利用材料在井下温度和压力变化下发生膨胀, 从而填充孔隙和裂缝, 形成有效的封堵屏障。常用的膨胀材料包括膨胀水泥和膨胀树脂。此外, 粒子封堵通过注入高密度或高粘度的粒子材料, 这些粒子在流体中堆积形成物理屏障, 典型材料有石英砂、陶粒和高分子微粒。凝胶封堵则利用特定化学物质在井下条件下凝结成胶体, 堵塞孔隙和裂缝, 常见的凝胶材料是高分子聚合物, 能够迅速形成高强度的封堵层。

化学封堵技术通过化学反应生成新的固体物质或改变现有流体的性质来实现封堵。这种方法依赖于化学反应的可控性和反应产物的性质来确保封堵效果。水泥封堵是一种常见的化学封堵方法, 通过将水泥浆注入井下, 与地下水接触后发生水化反应, 生成坚硬的水泥石, 形成持久的封堵屏障。树脂封堵则利用环氧树脂或酚醛树脂等材料, 这些树脂在井下通过化学反应固化, 形成坚硬且耐腐蚀的封堵层, 适用于各种复杂的井下环境。酸溶解反应封堵通过注入酸性液体与碳酸盐岩反应, 生成不溶性盐类, 化学沉淀在井下形成封堵屏障, 这种方法适用于特定地质条件下的临时封堵。

机械封堵技术通过机械装置或工具在井下形成物理屏障, 以阻断流体流动。机械封堵具有操作简单、效果显著的特点, 广泛应用于临时封堵和紧急情况下

的封堵作业。桥塞封堵是常用的机械封堵方法，通过使用机械桥塞工具在井筒中扩张或膨胀形成封堵屏障，这些桥塞通常由金属或高分子材料制成，能够承受高压和高温。膨胀式封堵利用膨胀封堵器具（如膨胀管或膨胀式桥塞）在井下膨胀，填充井筒或裂缝，形成有效的封堵，这些器具通过机械或液压驱动实现膨胀。封隔器封堵则通过使用复杂的机械装置在井下特定位置展开形成密封，封隔器广泛用于分段测试、分层注采和临时封堵等作业。

2 成本效益分析

2.1 成本构成

材料成本是封堵技术中最基础的成本构成，直接影响着封堵作业的总体经济性。不同的封堵技术需要使用不同的材料，例如水泥封堵需要大量的水泥浆，树脂封堵需要各种环氧树脂或酚醛树脂，而机械封堵则需要高强度的金属或复合材料。这些材料的成本因其性能、质量和市场供应情况而有所不同。此外，材料的运输和储存也会增加额外的费用，尤其是在偏远或地理环境复杂的井场。高质量的封堵材料虽然成本较高，但其优越的封堵效果和持久性往往能够带来更高的整体效益。设备成本包括封堵作业中所需的各种机械设备和工具的购买、租赁以及维护费用。例如，水泥封堵作业需要搅拌设备、泵送设备等；机械封堵需要桥塞工具、膨胀封堵器等专用设备。这些设备不仅初期投资较大，而且在使用过程中需要定期维护和保养，以确保其正常运行和使用寿命。此外，井下作业环境复杂，设备的耐用性和适应性要求较高，这也进一步增加了设备成本。选择适合的、高效的设备能够提高封堵作业的效率 and 效果，从而间接节约成本。

人工成本是封堵作业中不可忽视的重要组成部分，涵盖了技术人员、操作工人和管理人员的工资、培训费用以及其他相关费用。封堵作业通常需要专业的技术人员进行现场操作和监控，确保作业按照计划顺利进行，同时保证安全和质量。这些专业人员的薪资较高，而且随着技术复杂度的增加，所需的人力成本也随之上升。此外，为了适应新的封堵技术和设备，还需要对工作人员进行持续的培训和技能提升，这些都增加了人工成本。维护成本主要包括封堵作业后期的检查、维护和修复费用。封堵技术需要在封堵完成后进行定期监测和评估，以确保封堵效果的持续性和稳定性。如果在监测过程中发现封堵失效或有泄漏风险，需要及时采取修复措施，这也会增加额外的维护

成本。对于持续封堵技术，维护成本相对较低，因为这些技术旨在实现长期稳定的封堵效果；而对于暂时封堵技术，维护和修复可能较为频繁。此外，设备的日常维护、材料的更新替换等也属于维护成本的一部分，合理的维护计划和措施能够有效延长设备和材料的使用寿命，减少长期成本。

2.2 效益分析

直接经济效益是指封堵技术在井下作业中直接带来的经济收益。首先，封堵技术能够有效控制和管理井下流体，防止油气或地热资源的泄漏，提高资源的采收率和利用率，从而直接增加经济收益。例如，成功的封堵作业可以延长油气井或地热井的生产寿命，增加产量。其次，封堵技术的应用能够减少由于井下流体失控导致的意外停工和生产中断，从而避免巨大的经济损失。最后，通过使用高效的封堵技术，可以减少在后期维护和修复上的投入，降低整体运营成本。总之，封堵技术直接提升了井下作业的经济效益，增加了企业的盈利能力。间接经济效益是指封堵技术带来的非直接经济收益，这些收益虽然不直接体现在财务报表上，但对企业的长期发展和可持续运营具有重要影响。首先，使用环保高效的封堵技术可以减少对环境的负面影响，避免因环境污染而产生的罚款和赔偿费用，从而降低企业的法律和合规风险。其次，封堵技术的成功应用可以提升企业的社会形象和市场信誉，增强社会公众和投资者的信任，为企业赢得更多的市场机会和合作伙伴。

3 环保效果评估

3.1 环境影响因素

地下水污染是封堵作业中一个关键的环境影响因素。如果封堵技术和材料不当，井下流体可能会通过裂缝、孔隙或未完全封堵的路径渗入地下水层，导致地下水污染。油气井和地热井中的化学物质，如油、天然气、重金属和有机污染物，可能会对地下水资源造成严重危害，影响饮用水和农业用水的安全。因此，封堵技术必须确保封堵材料的耐久性和稳定性，防止有害物质的渗漏，保护地下水资源。高效的封堵技术和材料能够形成可靠的屏障，阻断污染物进入地下水层，确保地下水的安全。封堵作业对地表环境也可能产生显著影响，特别是在井场及其周边区域。地表环境影响包括土壤污染、地表水污染和生态系统破坏等。例如，封堵材料在运输、储存和操作过程中如果管理不善，可能会泄漏到地表，污染土壤和地表水。封堵

作业本身还可能对周边的植物、动物和栖息地造成扰动和破坏。为了减少地表环境影响，封堵作业需要严格遵循环保规程，采取措施防止材料泄漏，减少对生态环境的扰动，并在作业完成后进行环境恢复和修复。

大气污染是封堵作业中另一个需要关注的环境影响因素。封堵作业可能会释放挥发性有机化合物(VOCs)、粉尘和其他有害气体，影响大气质量。例如，使用某些化学封堵材料时，可能会释放有害气体，对工人和周边居民的健康构成威胁。此外，封堵作业过程中使用的机械设备也可能产生废气排放，增加大气污染。为减少大气污染，封堵作业应选择环保型材料，使用低排放设备，并采取适当的防尘和废气处理措施，确保作业过程中的空气质量符合环保要求。高效的环保措施不仅能保护大气环境，还能提升企业的绿色形象和社会责任感。

3.2 评估指标

所使用材料的环境友好性。环境友好材料应具有低毒性、低挥发性和可降解性，确保在使用和废弃过程中不会对环境造成污染。例如，使用低毒性的水泥、天然树脂或环保型高分子材料，可以减少对地下水和土壤的污染风险。此外，材料的生产过程也应尽量减少碳排放和能源消耗，选择可再生资源或废弃物回收材料制成的封堵材料，有助于减少环境负担。评估材料的环境友好性，可以通过其化学成分、生产工艺和环境影响评估报告等指标进行。封堵效果的持久性。封堵材料和技术需要在长期内保持稳定和有效，防止封堵失效导致的地下水污染、地表环境破坏和大气污染。持久的封堵效果不仅能够减少维护和修复的频率，还能确保长期环境安全。例如，使用高强度、耐腐蚀的封堵材料，如高性能水泥、树脂和复合材料，可以提供持久的封堵效果。持久性的评估可以通过实验室测试、现场监测和长期性能评估报告等方式进行，以验证封堵材料和技术在实际应用中的稳定性和耐久性。

封堵作业过程中产生的废弃物处理。废弃物包括封堵材料的残余、设备的清洗废水、废弃的施工材料和封堵过程中产生的废气等。这些废弃物如果不当处理，可能会对环境造成严重污染。环保效果评估需要考虑废弃物的分类、收集、运输和处理方式。例如，使用无害化处理技术处理有毒有害废弃物，采用回收再利用技术处理可再生材料，减少废弃物的产生和排放。评估废弃物处理的环保效果，可以通过废弃物处理记录、排放监测数据和处理设施的合规性等指标进行。通过综合评估环

境友好材料的使用、封堵效果的持久性和废弃物处理，可以全面衡量封堵技术在井下作业中的环保效果，确保作业过程的环境安全和可持续发展。

4 案例及经济效益分析

一个典型的环保成功案例是某油气公司在废弃井封堵中的应用。该公司在废弃井封堵过程中采用了环保型水泥和树脂封堵技术，选用低毒性、低挥发性的材料，确保封堵过程中不对周围环境造成污染。封堵完成后，进行了长期的环境监测，结果显示地下水质量没有受到任何污染，地表土壤和植被也保持完好。此项目不仅达到了封堵的技术要求，还获得了环保认证，成为行业内的示范项目。在另一案例中，一家地热能公司在地热井的封堵中，采用了高性能的膨胀材料和机械封堵技术，确保了封堵效果的持久性和稳定性。通过对封堵井的长期监测，未发现任何热水或蒸汽泄漏，周围环境没有受到任何负面影响。此外，公司还采取了先进的废弃物处理措施，对封堵过程中产生的废弃材料进行了分类处理和无害化处理，减少了对环境的负面影响。该项目得到了当地政府和社区的高度评价，并作为绿色环保项目进行推广。

成功的环保封堵项目不仅在环境保护方面取得了显著成效，还带来了显著的经济效益。首先，使用环保型材料和技术虽然初期成本较高，但由于其优越的性能和持久性，减少了后期维护和修复的费用。例如，在上述油气公司废弃井封堵案例中，由于封堵效果稳定，五年内未发生任何封堵失效情况，节省了大量的维护费用和人力成本。长远来看，高效持久的封堵技术降低了总体运营成本，提高了企业的经济效益。此外，环保封堵项目提高了企业的社会形象和市场竞争力。成功的环保实践使企业获得了环保认证和政府支持，增强了公众和投资者的信任，带来了更多的市场机会和合作伙伴。例如，上述地热能公司的成功项目不仅为公司带来了更多的地热能开发项目，还赢得了多项环保大奖，提高了企业的品牌价值和市场影响力。

5 结论

封堵技术在井下作业中发挥着关键作用。通过物理、化学和机械原理，有效控制井下流体，确保作业安全和资源利用。封堵作业虽有一定成本，但带来的经济效益显著。环保效果评估显示，环保封堵技术可保护地下水、地表环境和大气质量。成功案例表明，高效的封堵技术不仅环保，还能带来经济利益。未来应关注新材料和技术改进，推动封堵作业的绿色发展。