

石油压裂中 PGA 暂堵剂的作用及应用价值探索

李平垒（德州大陆架石油工程技术有限公司，山东 德州 253074）

摘要：随着非常规油气资源开发对高效环保压裂技术的迫切需求，聚乙醇酸（PGA）暂堵剂以其可降解性、智能响应特性及环境友好优势成为研究热点。本文系统阐述了 PGA 的材料特性与制备工艺，揭示了其“暂堵-降解-疏通”动态作用机制，并从经济性、环保性及技术创新性三方面剖析其应用价值。研究表明，PGA 通过精准封堵高渗通道、诱导复杂裂缝网络形成，显著提升储层改造效率；其完全降解特性避免了传统暂堵剂的储层伤害与环境污染问题，同时推动了智能材料与绿色技术的融合创新。未来研究需进一步优化降解动力学模型与规模化应用方案，为油气行业可持续发展提供技术支撑。

关键词：聚乙醇酸（PGA）；石油压裂；暂堵剂；可降解材料；环境友好

中图分类号：TE357.2 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-5167 (2025) 014-0046-03

Exploration of the Role and Application Value of PGA Temporary Plugging Agent in Oil Well Fracturing

Li Pinglei (Dezhou Continental Shelf Petroleum Engineering Technology Co., Ltd., Dezhou Shandong 253074, China)

Abstract: With the urgent demand for efficient and environmentally friendly fracturing technologies in the development of unconventional oil and gas resources, polyglycolic acid (PGA) temporary plugging agent has become a research hotspot due to its biodegradability, intelligent response characteristics, and environmental friendliness. This paper systematically elaborates on the material properties and preparation process of PGA, reveals its dynamic mechanism of “temporary plugging-degradation-unblocking”, and analyzes its application value from three aspects: economy, environmental protection, and technological innovation. Studies have shown that PGA significantly improves reservoir stimulation efficiency by precisely plugging high-permeability channels and inducing the formation of complex fracture networks. Its complete degradation characteristic avoids the reservoir damage and environmental pollution issues associated with traditional temporary plugging agents, while also promoting the integration and innovation of smart materials and green technologies. Future research needs to further optimize the degradation kinetics model and large-scale application schemes, providing technical support for the sustainable development of the oil and gas industry.

Keywords: polyglycolic acid (PGA); oil well fracturing; temporary plugging agent; biodegradable material; environmentally friendly

传统石油压裂技术受限于暂堵剂封堵效率低、环境风险高等瓶颈，难以满足深层及非常规储层高效开发需求。聚乙醇酸（PGA）作为新型可降解暂堵剂，凭借其高强度、可控降解及生态兼容性，为破解储层改造与环境保护的矛盾提供了创新路径。本文通过解析 PGA 的物化特性、作用机制及多维应用价值，旨在为压裂技术绿色化升级与智能化转型提供理论参考。

1 PGA 暂堵剂在石油压裂中的应用前景与研究价值

随着全球油气勘探开发逐步向深层、超深层及页岩气、致密油等非常规储层拓展，传统压裂技术因暂堵剂封堵强度不足、降解不可控等问题，难以满足复杂裂缝网络构建需求，且化学残留易引发储层污染与生态风险。在此背景下，聚乙醇酸（PGA）凭借其分子结构可设计性、环境响应降解性及高强度特性，成为破解暂堵效率与环保矛盾的关键材料^[1]。研究表明，PGA 在高温高压储层中可通过粒径与形态的精准调

控，优先封堵高渗通道并诱导压裂液转向低渗区域，从而形成多级分支裂缝，显著提升储层改造体积；其独特的酯键水解机制使降解周期与压裂作业时间窗高度匹配，既能保障暂堵稳定性，又可实现裂缝导流能力的自主恢复，避免了传统技术中因暂堵剂残留导致的二次伤害。从技术演进视角看，PGA 暂堵体系不仅推动了压裂工艺从“被动封堵”向“智能暂堵-自疏通”的范式转变，更通过与纳米改性、原位监测等技术的融合，为实时调控裂缝扩展提供了材料基础，这对页岩油气重复压裂、薄互层精准改造等复杂场景具有重要战略意义。同时，PGA 在降解后仅生成 CO₂ 和 H₂O 的特性，彻底解决了石油基暂堵剂对地下水的潜在污染，契合全球能源行业低碳化转型趋势。随着分子工程与智能材料技术的发展，未来 PGA 有望通过功能基团修饰实现降解速率的地质条件自适应调节，进一步释放其在立体缝网构建、储层全生命周期管理中的应

用潜力，为油气高效开发与绿色化生产提供双重保障。

2 PGA 暂堵剂概述

2.1 PGA 材料特性

聚乙醇酸（PGA）是由乙醇酸单体缩聚而成的合成高分子材料，其分子链结构致密且高度规整，赋予材料优异的热稳定性和机械强度。在高温高压的复杂地层环境中，PGA 能够保持稳定的物理性能，有效抵抗井下流体的冲击与地层应力作用。与其他生物降解材料相比，PGA 的结晶度显著更高，这一特性使其在高温下的形变率更低，从而确保暂堵过程的可靠性。此外，PGA 的降解行为依赖于分子链中酯键的水解或酶解作用，降解速率可通过调整分子量和结晶度进行调控^[2]。例如，较低分子量的 PGA 在温和的地层条件下可实现快速降解，而较高分子量的材料则适用于需要延长暂堵时间的作业场景。尤为重要的是，PGA 降解后的产物为水和二氧化碳等环境友好物质，不会对储层孔隙结构或地下水系统造成二次污染，充分体现了其生态兼容性。

2.2 PGA 暂堵剂制备与性能

PGA 暂堵剂的制备工艺多样化，可根据实际需求设计其微观形态与宏观性能。常见的制备方法包括溶液浇铸、熔融共混以及 3D 打印技术。溶液浇铸法通过溶剂挥发形成均匀的颗粒或薄膜结构，适用于常规封堵场景；熔融共混法则通过引入增韧剂或增强填料，显著提升材料的耐温性与抗压性能，满足深井高温环境的应用需求；3D 打印技术则通过精密控制材料堆积方式，构建具有多孔或仿生结构的暂堵剂，从而实现裂缝形态的自适应匹配。在性能优化方面，通过调节分子量分布、添加功能性助剂或设计复合体系，可精准调控 PGA 的降解动力学、封堵强度及与地层的相互作用。例如，引入亲水性组分可加速降解过程，而交联改性则能增强材料的抗压能力。研究表明，通过优化粒径、形态与地层条件的匹配性，PGA 暂堵剂能够实现高效封堵与自主疏通的双重功能，其渗透率恢复能力显著优于传统油溶性暂堵剂，为储层保护与高效开发提供了技术保障。

3 PGA 暂堵剂在石油压裂中的作用机制

PGA 暂堵剂在石油压裂中的作用机制是一个动态且精细的过程，可以细分为三个阶段，即暂堵阶段、降解阶段和疏通阶段，每个阶段都发挥着至关重要的作用，共同促进了压裂效果的提升。

在暂堵阶段，压裂液携带 PGA 暂堵剂进入裂缝后，PGA 的颗粒或纤维通过物理堆积与摩擦作用，有效地封堵了高渗通道。这一过程中，PGA 暂堵剂像一道屏障，阻止了压裂液继续沿着原有的高渗路径流动，从

而迫使后续流体转向未改造的区域^[3]。这种转向作用有助于形成更为复杂的裂缝网络，增加了油气渗流的通道，提高了储层的改造效果。

进入降解阶段，随着储层温度的升高或 pH 值的变化，PGA 分子链开始逐渐断裂。这一过程是 PGA 暂堵剂特有的动态降解特性，使得其材料强度逐渐下降，封堵压力也随之逐步释放。这种降解是可控的，可以根据储层的实际情况和压裂需求进行调节，实现了“暂堵”与“疏通”之间的自适应平衡。

到了疏通阶段，PGA 降解的产物溶解于地层流体中，原有的封堵通道逐渐恢复了渗透性。这意味着油气可以顺畅地通过这些通道产出，不会因为暂堵剂的残留而受到阻碍。这一阶段的完成，标志着 PGA 暂堵剂完成了其使命，为油气的顺畅产出创造了有利条件。

相较于传统的暂堵剂，如油溶性树脂或刚性颗粒，PGA 暂堵剂具有显著的优势。传统暂堵剂往往需要在压裂结束后通过人工干预进行清除，而 PGA 暂堵剂则通过其动态降解特性实现了“暂堵 – 疏通”的自适应调节，大大减少了人工干预的需求。这不仅提高了施工效率，还降低了施工成本，为石油压裂技术的发展提供了新的思路和方向。

4 PGA 暂堵剂的应用价值探索

4.1 经济价值分析

PGA 暂堵剂的应用为石油压裂作业带来多维度的经济价值提升。其核心优势在于通过精准封堵高渗段，迫使压裂液转向低渗或未改造区域，促使裂缝网络向三维空间均匀扩展，从而突破传统压裂中因流体“指进效应”导致的裂缝分布不均问题。这一机制不仅能够扩大储层改造体积，还能激活更多隐蔽的油气流动通道，直接提升单井初期产量与累计产能。同时，PGA 材料在完成暂堵任务后自主降解的特性，省去了传统油溶性树脂或刚性颗粒所需的冲砂、酸化解堵等后续工序，大幅降低作业时间与设备投入成本^[4]。从油田全生命周期管理角度考量，PGA 的应用减少了因暂堵剂残留引发的近井地带堵塞风险，使储层渗透率得以高效恢复，为重复压裂、层系补孔等增产措施创造有利条件，显著延缓产量递减曲线。此外，该材料的环境兼容性降低了环保治理成本，避免了传统化学暂堵剂可能引发的生态赔偿风险，进一步优化了油田开发的综合经济效益。更为重要的是，PGA 技术通过提升单井采收率与降低边际油田开发门槛，为老油田挖潜与非常规资源经济化开发提供了技术杠杆，推动油气行业在提质增效与可持续发展之间实现平衡。

4.2 环保价值分析

PGA 暂堵剂的环保价值深刻体现在其对传统石油

开采生态瓶颈的突破与革新。传统石油基或化学合成类暂堵剂在压裂作业后往往难以完全清除，残留物不仅会堵塞储层微观孔隙、降低油气渗流效率，其缓慢释放的有机组分还可能通过裂缝迁移至地下水层，造成重金属富集或毒性物质扩散，长期威胁生态安全。相比之下，PGA 基于酯键水解的降解机制使其在完成封堵任务后，能够在地层温度、湿度及微生物作用下逐步分解为小分子乙醇酸，并最终转化为二氧化碳和水。这一过程既不会生成微塑料等持久性污染物，也不会改变地层流体的酸碱平衡或离子组成，从根本上规避了储层物性损伤与地下水系统污染的双重风险。尤其针对页岩气、致密油等非常规资源开发中普遍存在的水资源敏感区域，PGA 的应用大幅降低了压裂液返排处理难度与环保处置成本，其降解产物的生物相容性更有利于维护周边土壤及水域生态系统的稳定性。从行业转型视角看，PGA 技术通过替代非降解材料，直接减少了石油开采过程中的碳足迹与化学物质投放量，其全生命周期环境友好特性不仅符合国际绿色油田认证标准，更为油气企业应对日益严格的环保法规、参与碳交易市场提供了技术支撑，推动行业从“末端治理”向“源头减污”的可持续发展模式跨越。

4.3 技术创新价值分析

PGA 暂堵剂的技术创新价值不仅体现在其自身性能突破上，更在于为石油工程领域开辟了智能材料与绿色技术融合的新路径。传统暂堵材料的功能设计多局限于静态封堵，而 PGA 通过分子结构设计与界面功能化改性，首次实现了暂堵剂对地层环境参数的动态响应能力^[5]。例如，通过接枝温敏性聚合物（如聚 N-异丙基丙烯酰胺），可使 PGA 在特定温度阈值下发生构象转变，加速酯键水解速率；引入纳米黏土或磁性颗粒构建复合体系，则能利用地层压力变化触发材料内部应力集中点，实现降解行为的“按需触发”。这种智能响应特性使得暂堵剂从被动执行工具转变为主动调控介质，能够根据地层能量分布差异自主调整降解时序，从而优化裂缝扩展路径与导流能力匹配度。更深层次的技术辐射效应在于，PGA 研发过程中积累的可控降解机理、环境适应性强化等核心技术，为井下可降解工具的全链条创新提供了范式参考。例如，借鉴 PGA 的分子链断裂机制开发的生物降解压裂球，可在完成分段压裂任务后自主分解，无需钻磨回收；基于 PGA 增强工艺衍生的复合桥塞材料，则通过调控纤维取向与界面结合强度，兼顾了承压性能与可控降解的平衡。此外，PGA 技术体系催生了石油工程与材料科学、智能传感等学科的深度交叉——如将压电材料嵌入 PGA 基体构建自供能监测单元，可实时反馈暂

堵剂状态与裂缝动态；利用机器学习算法关联材料降解动力学与地层参数数据库，则推动了暂堵方案设计的数字化与精准化。这种跨领域协同创新不仅加速了石油工程装备的智能化升级，更重塑了从材料研发到现场应用的技术转化模式，为行业应对超深层、低渗透等极限工况挑战提供了创新工具箱。

5 结论

PGA 暂堵剂在石油压裂中的应用标志着暂堵技术从被动封堵向智能动态调控的范式跃迁。其核心价值体现在三方面：经济层面，通过诱导裂缝均匀扩展与自主疏通功能，降低作业成本并提升单井采收率，为边际油田开发注入经济可行性；环保层面，以完全降解特性消除储层污染风险，降解产物的生态安全性助力油气行业碳中和目标实现；技术层面，通过分子设计赋予材料环境响应能力，并衍生出可降解压裂工具、智能监测系统等创新方向，推动多学科交叉融合。然而，PGA 技术仍面临降解速率与地层条件精准匹配、复合体系长期稳定性验证等挑战。未来研究需结合数字孪生技术构建降解动力学预测模型，开发适应极端工况的功能化改性方案，并通过全尺寸井下试验验证其工程适用性。此外，需加强 PGA 暂堵剂与纳米驱油剂、二氧化碳压裂等新兴技术的协同效应研究，以形成覆盖储层改造全周期的绿色技术链条。随着智能材料与油气工程的深度融合，PGA 暂堵剂有望引领压裂技术向高效化、低碳化、智能化方向持续演进，为全球能源转型提供关键支撑。

参考文献：

- [1] 吴鹏飞,崔华帅,朱金唐,等.暂堵剂用聚乳酸/聚乙醇酸复合纤维的制备及降解性能研究[J].材料导报,2024,38(13):266-271.
- [2] 董晓强,金冰垚,刘雨涵,等.PGA 可降解材料作为钻完井液暂堵剂实验研究[J].钻井液与完井液,2024,41(2):166-171.
- [3] 靳耀.油气田用 PGA 可溶桥塞结构设计及材料改性[D].北京:北京化工大学,2024.
- [4] 胡安邦,于小荣,彭凯南,等.聚酯类颗粒暂堵剂的降解规律及水解机理[J].精细化工,2024,41(9):2038-2044.
- [5] 董晓强,金冰垚,刘雨涵,等.PGA 可降解材料作为钻完井液暂堵剂实验研究[J].Drilling Fluid & Completion Fluid, 2024,41(2).

作者简介：

李平奎(1995-)，男，汉族，河南南阳人，硕士研究生，工程师，研究方向：油田化学剂。