

碳酸盐岩酸化技术进展及发展趋势

杨林川*, 史恺翌, 赵威, 豆淞, 丁婧琦

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年5月12日; 录用日期: 2026年6月15日; 发布日期: 2026年7月8日

摘要

由于当前碳酸盐岩油气藏开发逐渐向深层、超深层及复杂缝洞型储层转移, 储层非均质性强、孔隙结构复杂和酸液作用不均等问题日益突出, 使得酸化改造技术面临更高要求。对于碳酸盐岩储层而言, 既需要通过酸岩反应有效解除近井污染、改善孔喉连通性和提高储层渗流能力, 同时也要避免酸液近井快速消耗、优先进入高渗通道以及深部改造不足等问题。盐酸作为传统酸化体系, 因溶蚀能力强、成本较低而被广泛应用, 但其反应速率快、腐蚀性强和作用距离有限等缺陷较为明显。研究人员在发展盐酸体系的同时, 也持续改进胶凝酸、乳化酸等缓速酸体系以及VES自转向酸、暂堵转向酸等转向酸体系, 其应用效果较为显著。文章对碳酸盐岩酸化技术研究进展进行了详细阐述, 重点分析了酸岩反应机理、主要酸液体系、酸化性能评价方法及存在问题与发展趋势, 旨在为复杂碳酸盐岩储层酸化改造和酸液体系优化提供借鉴。

关键词

碳酸盐岩, 缓速酸, 转向酸, 酸化效果评价

Progress and Development Trends of Carbonate Rock Acidification Technology

Linchuan Yang*, Kaiyi Shi, Wei Zhao, Song Dou, Jingqi Ding

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: May 12, 2026; accepted: June 15, 2026; published: July 8, 2026

Abstract

With the development of carbonate oil and gas reservoirs gradually shifting toward deep, ultra-deep, and complex fractured-vuggy reservoirs, challenges such as strong reservoir heterogeneity,

*第一作者。

complicated pore structures, and uneven acid distribution have become increasingly prominent, placing higher demands on acidizing stimulation technologies. For carbonate reservoirs, acid-rock reactions are required to effectively remove near-wellbore damage, improve pore-throat connectivity, and enhance reservoir seepage capacity. Meanwhile, problems such as rapid acid consumption near the wellbore, preferential acid flow into high-permeability channels, and insufficient deep reservoir stimulation must be avoided. Hydrochloric acid, as a conventional acidizing system, has been widely used because of its strong dissolution capacity and relatively low cost. However, its rapid reaction rate, strong corrosiveness, and limited effective penetration distance remain significant limitations. While hydrochloric acid systems continue to be developed, retarded acid systems such as gelled acid and emulsified acid, as well as diverting acid systems including viscoelastic surfactant self-diverting acid and temporary plugging diverting acid, have also been continuously improved, showing considerable application potential. This paper systematically reviews the research progress of carbonate acidizing technologies, with emphasis on acid-rock reaction mechanisms, major acid systems, acidizing performance evaluation methods, and existing problems and development trends, aiming to provide guidance for acidizing stimulation and acid system optimization in complex carbonate reservoirs.

Keywords

Carbonate Rock, Retarded Acid, Diverting Acid, Acidizing Performance Evaluation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



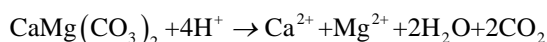
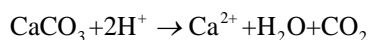
Open Access

1. 引言

碳酸盐岩储层是全球油气资源的重要储集类型之一，在常规油气、深层、超深层油气以及复杂缝洞型油气藏开发中占有重要地位。随着勘探开发程度不断提高，油气开发对象逐渐由中浅层、常规优质储层向深层高温、低渗致密、强非均质和裂缝、孔洞型碳酸盐岩储层转变，储层改造难度显著增加[1]。此类储层孔隙结构复杂，天然裂缝和溶蚀孔洞发育程度差异大，储层连通性和渗流能力空间变化强，常导致酸液在施工过程中优先进入高渗层、裂缝或大孔道，而低渗层、污染严重区域及未充分动用部位难以得到有效改造[2]。因此，如何实现酸液的有效进入、深部作用和均匀改造，已成为制约复杂碳酸盐岩储层增产效果的重要问题。酸化技术利用酸液与方解石、白云石等碳酸盐矿物之间的化学反应，达到解除近井污染、扩大孔喉、沟通裂缝和提高渗流能力的目的，是碳酸盐岩储层最常用、最直接的增产改造手段之一。

2. 酸岩反应机理

碳酸盐岩酸化的本质是酸液与储层中方解石、白云石等碳酸盐矿物发生非均相溶蚀反应，酸液注入地层后，典型的固液非均相反应方程如下：



通过消耗近井地带或裂缝壁面的碳酸盐矿物，扩大孔隙、喉道及天然裂缝，形成具有一定导流能力的酸蚀通道，从而降低流体渗流阻力、改善储层连通性并提高油气井产能。其基本反应过程包括酸液向

岩石表面的对流与扩散传质、氢离子在矿物表面的吸附与化学反应、反应产物向主体流体中的迁移,以及由此引起的孔隙结构和流场动态演化。对于方解石和白云石储层,酸岩反应速率受酸液类型、酸浓度、温度、压力、流速、矿物组成、岩石孔隙结构及反应产物浓度等因素共同控制。其中,盐酸与碳酸盐岩反应速率快、溶蚀能力强,是碳酸盐岩酸化中应用最广泛的主体酸液,但在高温或强非均质储层中易出现近井快速消耗、酸液作用距离有限和优先进入高渗通道等问题,导致深部改造不足。为延缓酸岩反应、降低滤失并提高酸液有效穿透距离,逐步发展形成了缓速酸体系;而针对多层系、裂缝发育及非均质性强的碳酸盐岩储层,为改善酸液分布、提高低渗或未动用部位的改造程度,又进一步形成了可以选择性分流的转向酸体系。因此,酸岩反应机理不仅是认识碳酸盐岩酸化增产本质的基础,也是不同类型酸液体系设计、性能优化及现场工艺选择的重要理论依据。

3. 酸液体系研究进展

3.1. 盐酸体系

盐酸体系是碳酸盐岩酸化中应用最早、最广泛的基础酸液,其核心优势在于对方解石、白云石等碳酸盐矿物具有较强溶蚀能力,能够通过酸岩反应快速扩大孔隙、沟通裂缝并形成酸蚀蚓孔。早期 Daccord 等[3]建立了反应流体溶蚀多孔介质形成蚓孔的定量模型,指出蚓孔是在传质受限条件下由反应流体选择性溶蚀形成的高导流通道;Wang 等[4]通过碳酸盐岩线性岩心驱替实验提出,盐酸基质酸化存在最优注入速率,低速下注入易发生端面溶蚀,高速下注入则形成多分支蚓孔,而中等最优速率下可用最小酸量形成贯穿岩心的主蚓孔;Panga 等[5]进一步建立双尺度连续模型,将孔隙尺度的传质-反应过程与宏观达西流动相耦合,较好再现了盐酸酸化中不同溶蚀形态;Buijse 等[6]提出半经验蚓孔生长模型,用于估算碳酸盐岩酸化中蚓孔传播速度和酸液用量。国内研究也表明盐酸浓度、温度和排量对蚓孔形态具有显著影响。杨兆中等[7]通过正交岩心驱替实验发现,在其研究条件下酸液浓度 20%、温度 50℃~70℃、注酸排量 2 cm³/min 时可获得较优蚓孔形态,且注酸排量对蚓孔形态的影响大于酸液浓度和反应温度。总体来看,盐酸体系研究已从单纯评价溶蚀能力,发展到以酸岩反应动力学、传质控制、蚓孔形态调控和最优施工参数设计为核心的理论与实验体系;但由于盐酸反应过快、腐蚀性强、滤失大和非均质储层中选择性差,其局限性也直接催生了缓速酸和转向酸等改性酸液体系的发展。

3.2. 缓速酸体系

缓速酸体系主要针对常规盐酸在碳酸盐岩中反应速率快、近井消耗严重和有效作用距离短等问题而发展,其中乳化酸和胶凝酸是现场应用和室内研究最具代表性的两类体系。Lynn 等[8]针对高温、低渗、含气碳酸盐岩岩心,对柴油乳化酸和原位胶凝酸的酸蚀行为进行了对比研究,结果表明两类酸液均可形成较深穿透的蚓孔,但所需酸液体积和蚓孔形态存在明显差异,说明缓速酸体系的流变性质和传质特征会显著影响酸化效果。Taylor 等[9]发表了原位胶凝酸室内评价研究,对三种商业化原位胶凝酸体系在 5%~20% HCl、最高 150°F 条件下进行比较,指出原位胶凝酸通常由聚合物、交联剂、破胶剂及其他添加剂组成,其主要机理是在酸液被岩石消耗、pH 升高后于岩石表面或高渗通道中形成凝胶,从而降低酸液流动能力并改善酸液分布。Al-Mutairi 等[10]研究了乳化酸液滴尺寸对其与方解石反应动力学的影响,采用 15% HCl 与柴油按 70:30 体积比形成乳化酸,并改变乳化剂浓度调控液滴尺寸,结果表明乳化酸的反应速率受液滴尺寸、乳化稳定性和黏度控制,酸相被油相包裹后 H⁺向岩石表面的传质受到限制,从而表现出明显缓速作用。综合来看,乳化酸主要依靠油外相包裹酸液、降低 H⁺扩散和酸岩接触速率实现缓速,适用于高温、深部和需要延长作用距离的碳酸盐岩酸化;胶凝酸则主要通过聚合物增黏或原位成胶降低酸液滤失和传质速率,适用于裂缝型、高滤失或非均质储层,但其残胶伤害、耐温性和破胶返排问题仍

是后续改进重点。

3.3. 转向酸体系

转向酸体系主要针对碳酸盐岩储层非均质性强、酸液易沿高渗层或天然裂缝窜流、低渗或污染部位动用不足等问题而发展,其核心思路是在酸化过程中通过黏度增加、暂堵或选择性封堵已酸化通道,使后续酸液转入未充分改造区域。Chang 等[11]等提出了一种基于黏弹性表面活性剂(VES)的自转向酸体系,指出该体系初始黏度较低,随盐酸与碳酸盐岩反应进行, Ca^{2+} 浓度升高和 pH 上升可诱导体系原位增黏,从而实现自转向作用,这是 VES 自转向酸用于碳酸盐岩基质酸化的早期代表性研究。Taylor 等[12]改进了 VES 自转向酸体系,指出该体系在进入碳酸盐岩并发生酸岩反应后,表面活性剂胶束由球状结构向蠕虫状结构转变,使酸液黏度升高,从而提高酸液在多层或非均质碳酸盐岩中的分布均匀性。Al-Ghamdi 等[13]通过并联岩心实验研究了 VES 酸转向效果,发现注入排量和初始渗透率级差是影响 VES 转向效率的关键因素,且 VES 酸最大表观黏度通常出现在较窄的注入速率窗口内,排量过高并不一定有利于转向和酸化效果提升。近年来, VES 自转向酸仍是转向酸研究的重点。2025 年发表的清洁自转向酸研究面向深层高温碳酸盐岩储层开发了基于 VES 的清洁转向酸体系,强调其低滤失、低摩阻、易破胶和低伤害特征,表明转向酸正由单一流功能向耐高温、低伤害、清洁化和深部均匀酸化方向发展。

4. 酸化性能与微观评价技术

酸化性能与微观评价技术主要用于表征酸液作用前后碳酸盐岩孔隙结构、蚓孔形态、渗流能力及储层伤害程度的变化。CT 扫描技术是碳酸盐岩酸化评价中应用较广的三维可视化方法,可在不破坏岩心的条件下获取酸化前后岩心内部结构图像,通过图像重构和灰度分割识别酸蚀蚓孔、溶蚀孔洞和裂缝扩展形态,进一步定量计算蚓孔长度、直径、分支数量、体积、连通性及孔隙度变化等参数,从而评价酸液的深穿透能力和酸蚀效率。Yoo [14]等利用高分辨率微米 X 射线 CT 对石灰岩酸化后的蚓孔进行三维可视化,并开展 25 组不同注入条件下的岩心驱替实验,结果表明微米 CT 能够清晰揭示最优蚓孔的传播特征,主蚓孔头部传播行为与最优注酸速率和酸化效率密切相关,可用于改进蚓孔预测模型。张合文等[15]通过多组岩心酸化流动实验和 CT 扫描获得酸蚀蚓孔真实形态,并引入盒维数和 Hausdorff 分形维数对蚓孔复杂程度进行定量表征,结果表明酸蚀蚓孔具有明显分形特征,分形维数随溶蚀形态变化而变化,最优排量对应的分形维数约为 1.6。

核磁共振技术更侧重于孔隙尺度流体赋存状态和孔径分布变化分析,通常通过酸化前后 T_2 谱变化判断小孔、中孔和大孔的比例变化,评价酸液对微细孔喉的扩容作用、可动流体孔隙增加程度以及束缚流体空间变化,同时也可以反映酸化对储层渗流能力的改善效果。Ren [16]等针对低渗碳酸盐岩残酸伤害问题,结合流变测试、岩心实验和 NMR 测试定量分析残酸对孔隙结构的影响;研究指出,残酸及其增稠剂体系可能对不同尺度孔隙产生损害, NMR 能够识别酸化后或残酸作用后孔径分布变化,因此可作为评价酸化增产效果和二次伤害风险的重要手段。Mahmoud [17]等利用 3 英寸石灰岩岩心,在 100°C 条件下开展不同注入速率的酸化岩心驱替实验,并首次将 NMR 用于评价酸蚀蚓孔与周围孔隙系统的连通性;研究认为,传统压降曲线和突破孔隙体积只能粗略反映蚓孔形成,而 NMR 能够进一步识别酸化后主蚓孔与基质孔隙之间的连通程度,并指出最优蚓孔形成条件可通过控制改进 Damköhler 数在 0.17~0.3 之间获得。

除 CT 和核磁外,扫描电镜可用于观察酸化前后矿物晶面、颗粒边缘、微裂缝和溶蚀坑等微观形貌变化,能谱分析可辅助判断酸液对方解石、白云石及黏土矿物等组分的选择性溶蚀特征;压汞、氮气吸附等方法可用于定量评价孔喉半径分布、孔隙连通性和比表面积变化;岩心驱替实验则可结合压降曲线、

突破孔隙体积、酸后渗透率恢复率和注酸排量优化,评价不同酸液体系的酸化效率、滤失特征和最优注入条件。当前碳酸盐岩酸化评价已由单一的酸后渗透率或溶蚀率测试,逐步发展为以岩心驱替为基础、CT三维成像和核磁共振结构表征为核心,并结合扫描电镜、压汞、矿物组成分析和数字岩心模拟的多尺度综合评价体系,可为酸液体系优选、酸蚀蚓孔调控和酸化施工参数优化提供更可靠依据。

5. 存在的问题与发展趋势

当前碳酸盐岩酸化技术已从单一依赖强酸溶蚀,逐步转向围绕“深部有效作用”和“非均质储层均匀改造”的体系优化,但其核心矛盾仍未根本解决,首先深层、超深层及复杂缝洞型储层温压条件更苛刻、非均质性更强,使酸液易在近井或高渗通道中快速消耗,其次缓速酸、转向酸等改性体系虽能改善作用距离和酸液分布,却仍受耐温稳定性、残渣或残胶伤害、破胶返排、添加剂配伍性以及现场参数匹配精度等因素制约。未来发展不应仅停留在酸液类型的更新上,而应以储层精细认识为基础,将高温低伤害酸液、智能转向材料、可降解暂堵体系、多尺度评价技术和数值模拟方法相结合,形成“酸液体系-施工工艺-效果评价”一体化优化模式,从而推动碳酸盐岩酸化向深部缓速、精准转向、绿色低伤害和智能化设计方向发展。

基金项目

- 1) 重庆科技大学硕士研究生创新计划项目(YKJCX2520126)。
- 2) 新型油气勘探开发国家科技重大专项“四川盆地深层超深层碳酸盐岩气藏勘探开发与集成示范”项目编号(2025ZD1402500)。

参考文献

- [1] 巫芙蓉,朱亚东,何昌兴悦,等. 深层-超深层海相碳酸盐岩地球物理关键技术[J]. 天然气勘探与开发, 2026, 49(2): 204-215.
- [2] 朱东亚,王静彬,尤东华,等. 断裂与不同圈层流体耦合作用下超深层碳酸盐岩成储机制[J/OL]. 地学前缘, 1-18. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2026.3.80>, 2026-05-12.
- [3] Daccord, G., Liétard, O. and Lenormand, R. (1993) Chemical Dissolution of a Porous Medium by a Reactive Fluid II. Convection vs Reaction, Behavior Diagram. *Chemical Engineering Science*, **48**, 179-186. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(93\)80294-z](https://doi.org/10.1016/0009-2509(93)80294-z)
- [4] Wang, Y., Hill, A.D. and Schechter, R.S. (1993) The Optimum Injection Rate for Matrix Acidizing of Carbonate Formations. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Houston, 3-6 October 1993, SPE-26578-MS. <https://doi.org/10.2118/26578-ms>
- [5] Panga, M.K.R., Ziauddin, M. and Balakotaiah, V. (2005) Two-Scale Continuum Model for Simulation of Wormholes in Carbonate Acidization. *AIChE Journal*, **51**, 3231-3248. <https://doi.org/10.1002/aic.10574>
- [6] Buijse, M. and Glasbergen, G. (2005) A Semiempirical Model to Calculate Wormhole Growth in Carbonate Acidizing. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Dallas, 9-12 October 2005, SPE-96892-MS. <https://doi.org/10.2118/96892-ms>
- [7] 杨兆中,邓庄,于梦男,等. 碳酸盐岩基质酸化蚓孔生长机理实验研究[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(2): 24-29.
- [8] Lynn, J.D. and Nasr-El-Din, H.A. (2001) A Core Based Comparison of the Reaction Characteristics of Emulsified and In-Situ Gelled Acids in Low Permeability, High Temperature, Gas Bearing Carbonates. *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*, Houston, 13-16 February 2001, SPE-65386-MS. <https://doi.org/10.2118/65386-ms>
- [9] Taylor, K.C. and Nasr-El-Din, H.A. (2003) Laboratory Evaluation of In-Situ Gelled Acids for Carbonate Reservoirs. *SPE Journal*, **8**, 426-434. <https://doi.org/10.2118/87331-pa>
- [10] Al-Mutairi, S.H., Nasr-El-Din, H.A., Hill, A.D. and Al-Aamri, A.D. (2009) Effect of Droplet Size on the Reaction Kinetics of Emulsified Acid with Calcite. *SPE Journal*, **14**, 606-616. <https://doi.org/10.2118/112454-pa>
- [11] Chang, F., Qu, Q. and Frenier, W. (2001) A Novel Self-Diverting-Acid Developed for Matrix Stimulation of Carbonate Reservoirs. *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*, Houston, 13-16 February 2001, SPE-65033-MS. <https://doi.org/10.2118/65033-ms>

-
- [12] Taylor, D., Kumar, P.S., Fu, D., Jemmali, M., Helou, H., Chang, F., *et al.* (2003) Viscoelastic Surfactant Based Self-Diverting Acid for Enhanced Stimulation in Carbonate Reservoirs. *SPE European Formation Damage Conference*, The Hague, 13-14 May 2003, SPE-82263-MS. <https://doi.org/10.2118/82263-ms>
- [13] Al-Ghamdi, A.H.H., Mahmoud, M.A.A., Wang, G., Hill, A.D.D. and Nasr-El-Din, H.A.A. (2014) Acid Diversion by Use of Viscoelastic Surfactants: The Effects of Flow Rate and Initial Permeability Contrast. *SPE Journal*, **19**, 1203-1216. <https://doi.org/10.2118/142564-pa>
- [14] Yoo, H., Kim, Y., Jang, H. and Lee, J. (2021) Propagation Characteristics of Optimum Wormhole in Carbonate Matrix Acidizing Using Micro X-Ray CT Imaging. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **196**, Article 108010. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108010>
- [15] 张合文, 邹洪岚, 鄢雪梅, 等. 碳酸盐岩酸蚀蚓孔分形模型及酸化参数优化[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2017, 39(2): 105-110.
- [16] Ren, J., Liu, Z., Deng, Y., Guo, J., Lai, J., Wang, J., *et al.* (2024) The Quantitative Study of Residual Acid Damage of Low Permeability Carbonate Rock Based on NMR Test. *Geoenery Science and Engineering*, **241**, Article 213109. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.213109>
- [17] Mahmoud, M. (2017) Determination of the Optimum Wormholing Conditions in Carbonate Acidizing Using NMR. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **159**, 952-969. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.10.004>