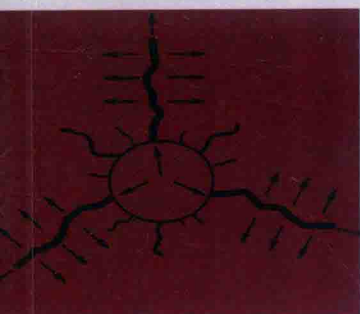




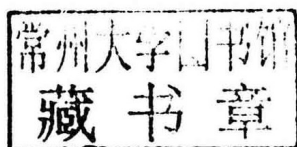
碳酸盐岩酸化实验 评价技术与应用

李 杰 韩慧芬 桑 宇 杨 建 编著

石油工业出版社

碳酸盐岩酸化实验 评价技术与应用

李 杰 韩慧芬 桑 宇 杨 建 编著



石油工业出版社

69.36102

内 容 提 要

本书集成梳理了碳酸盐岩酸化实验评价类型、实验设备、实验评价参数、实验测试及数据处理方法,介绍了碳酸盐岩储层改造转向酸化材料评价技术、酸蚀裂缝形态特征数字化模拟技术、高黏酸液酸岩反应动力学参数测试等特色技术,并介绍了碳酸盐岩酸化实验评价结果在井眼轨迹优化、井壁稳定性分析、酸液体系和转向酸化材料优选、施工排量和施工规模优化、酸化工艺措施选择等方面的应用。

本书可供从事实验评价科研人员以及相关院校师生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

碳酸盐岩酸化实验评价技术与应用 / 李杰等编著.

— 北京: 石油工业出版社, 2018. 1

ISBN 978-7-5183-2306-7

I. ①碳… II. ①李… III. ①碳酸盐岩-酸化压裂-实验-评价 IV. ①TE357. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 299891 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址: www.petropub.com

编辑部: (010) 64523712

图书营销中心: (010) 64523633

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 17.75

字数: 460 千字

定价: 150.00 元

(如出现印装质量问题, 我社图书营销中心负责调换)

版权所有, 翻印必究

《碳酸盐岩酸化实验评价技术与应用》

编 写 组

李 杰 韩慧芬 桑 宇 杨 建 潘 琼

彭钧亮 王 良 彭 欢 唐思洪 黄成惠

闵 建 王业众 曾 然 苏 军 高新平

叶颀泉 袁舒航 冯 艳 李翠楠

前言

碳酸盐岩油气藏在全球分布广泛,储量巨大。世界上油气储量的 60%、产量的 50% 来自碳酸盐岩油气藏。该类油气藏大多数埋藏较深,非均质性强,孔隙、裂缝系统复杂,一般具有低孔、低渗的特点。

中国碳酸盐岩油气藏也有着广泛的分布,已在四川、渤海湾、塔里木、鄂尔多斯、珠江口、北部湾、百色、柴达木、酒西、苏北等盆地获得发现,包括海相和湖相碳酸盐岩油气藏。四川磨溪嘉陵江和雷口坡、川东石炭系、磨溪—高石梯龙王庙组和灯影组等气藏获得发现。2013 年 7 月提交磨溪区块龙王庙组 713km^2 基本探明储量 $4065.76\times 10^8\text{m}^3$ 。2013 年申报安岳气田高石梯区块灯四上亚段气藏天然气控制地质储量 $2042.9\times 10^8\text{m}^3$,磨溪区块预测地质储量 $2380.64\times 10^8\text{m}^3$,合计天然气控制+预测地质储量 $4423.54\times 10^8\text{m}^3$ 。

目前,越来越多的油气资源在深层碳酸盐岩类储层中被勘探发现,该类油气藏的特点是储层埋藏深、地层温度高、产层厚度大、储层非均质性严重,基质中碳酸盐岩纯度高、自然投产率较低,通常需要对储层进行改造以获得工业油气流。面对深层碳酸盐岩油气藏的特殊性,酸压改造技术通常面临储层较深、温度较高、酸岩反应速度对温度敏感,缝洞发育造成酸液滤失严重限制了酸液的有效作用距离和穿透深度等一系列难题。鉴于当前复杂碳酸盐岩储层的特殊性,一方面压裂、酸化等工艺措施在勘探开发中发挥了重要作用,促进了酸压工艺技术的发展;另一方面,也对高温深井复杂碳酸盐岩储层酸压工艺技术提出了新的要求。对此有必要针对复杂碳酸盐岩储层情况,设计一套完整的酸压效果分析评价思路和方法,对碳酸盐岩储层进行酸岩反应、酸液滤失以及酸蚀裂缝导流能力机理研究,为酸压增产施工工艺提供理论基础,同时为压裂酸化材料优选提供依据。

对于碳酸盐岩储层,酸化是解除地层伤害、增加产能的常用手段。碳酸盐岩酸化中,由于碳酸盐岩一般较纯,酸液能完全溶解流经孔道,形成孔洞;孔道经酸溶蚀而变大的过程是不稳定增长过程,依据最小渗流阻力原则,酸液选择性流经大孔道,大孔道经酸液溶蚀后变得更大,渗流阻力越来越小,得到的酸液越来越多,经过孔道间的竞争,只有少数大孔道得到酸液,其他小孔道几乎没有酸液流过。流经酸液较多的大孔道经过酸液溶蚀,最终形成肉眼可见的蚓孔,蚓孔穿越污染带,去除污染,达到增产的目的。由于蚓孔具有无限导流能力,蚓孔穿越带相当于渗流能力无限大,直接扩大了井筒半径,因此,碳酸盐岩酸化中,往往能得到负表皮,酸化效果较好,增产倍数较高。

碳酸盐岩储层改造评价是增产改造工艺类型、施工参数及液体体系选择的依据。各大油田及高校经过多年的连续攻关,形成了碳酸盐岩实验评价技术,主要有酸溶蚀、酸蚀岩板导流能力、酸岩反应动力学、残酸伤害、酸化效果、酸液滤失、酸蚀裂缝表面形态特征定量描述以及近几年兴起的暂堵酸化材料评价等方面的实验。目前中国石油西南油气田分公司工程技术研究院、中国石油勘探开发研究院廊坊分院等实验室具备在高温(最高 200°C)、高压(最高 200MPa)、酸性介质条件下开展压裂酸化机理、工艺模拟及优化、入井材料评价等方面的实验评价能力。

在实验评价过程中,需要对实验数据和评价方法进行归纳汇总,便于实验操作人员及委托评价人员对实验方法和过程有清晰的认识和了解。首先,规范实验方法。目前,实际实验过程中,每一项实验数据及实验现象的记录、基本数据的输入、实验结果的获得等多方面都存在一定的问题,阻碍了评价实验及科研工作的开展。其次,通过设备改造,扩大碳酸盐岩实验评价的范围。酸蚀裂缝导流能力、酸岩反应、滤失等几大类别实验的开展在压裂酸化研究中起着非常重要的作用:酸岩反应动力学参数是酸压有效作用距离计算的关键参数,酸岩反应动力学规律不同,其酸液有效作用距离的计算也不同;酸蚀裂缝导流能力是衡量酸压成功与否的关键因素之一,影响酸蚀裂缝导流能力的主要因素有酸岩反应动力学参数、储层特性、储层硬度和裂缝闭合应力,通过酸蚀裂缝导流能力测试可以优选施工参数、改造工艺及液体体系;储层发育有一定的天然裂缝,施工过程中需要控制滤失。对于酸压改造,酸液滤失的同时与岩石发生反应,不断扩大滤失通道,一旦沟通天然微裂缝和形成“酸蚀孔道”,将大大提高酸液的滤失量,影响酸液作用距离。通过滤失的测定,不但可以了解储层滤失特征,还可以为工艺优选提供依据,以达到改造的目的。以上这些实验结果不但可以为酸化设计提供依据,还对改造工艺类型、施工参数的优选等都有很好的指导意义。

根据已有的碳酸盐岩酸化压裂实验评价能力,集成梳理实验评价类型及设备、实验评价参数、实验方法及实验评价参数数据处理方法等,从而形成一套适用于碳酸盐岩酸化评价的实验技术,作为压裂酸化工作者的实验技术手册。

同时,在编写过程中,依托了磨溪—高石梯龙王庙组碳酸盐岩油气藏储层改造实验评价。该储层岩性为白云岩,Ⅰ+Ⅱ类储层发育,在纵横向剖面上具有一定的非均质性。Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类储层在纵向上和横向上均不同程度发育,存在层段间吸酸能力的差异。同时,储层缝洞比较发育,钻井液容易漏失进入地层堵塞裂缝,降低油气藏产能。龙王庙组储层改造面临的主要问题是解决不同完井方式下长水平井段均匀吸酸、缝洞发育储层近井地带解堵和低渗透储层造长缝问题。通过储层物性、岩性、岩石力学、酸液性能、暂堵酸化材料性能、酸蚀裂缝形态以及工艺模拟等实验,对龙王庙组储层井眼轨迹优化、井壁稳定性分析、酸液体系和转向酸化材料优选、施工排量和施工规模优化、酸化工艺措施选择等提供了实验技术支撑,提高施工参数设计的针对性和经济性,现场应用取得了较好的效果,提高了油气藏的勘探开发质量和效益。

本书由中国石油西南油气田分公司工程技术研究院组织编写。本书分为七章,前言由韩慧芬、桑宇编写,第一章由彭欢、王良、唐思洪、高新平编写,第二章由韩慧芬编写,第三章由韩慧芬、曾然编写,第四章由唐思洪、闵建、杨建、彭钧亮、韩慧芬、袁舒航、李翠楠编写,第五章由韩慧芬、潘琼、王良、黄成惠、高新平、冯艳编写,第六章由韩慧芬、彭欢、苏军编写,第七章由韩慧芬、王业众、叶颀泉编写。全书由李杰、韩慧芬、桑宇统稿。

感谢刘同斌专家在本书的编写过程中做出技术指导,本书集成了中国石油西南油气田分公司工程技术研究院油气井增产技术实验室多年来的研究成果,大量的科研人员为书稿做了大量的工作,同时成都理工大学伊向艺教授等为实验数据提供了技术指导,值此书出版之际,一并感谢。

限于笔者水平有限,本书难以全面反映碳酸盐岩实验评价技术,也难免有差错与不足,敬请读者提出宝贵意见。

目 录

第一章 碳酸盐岩储层酸化改造及实验评价技术发展	(1)
第一节 碳酸盐岩储层改造发展历程	(1)
第二节 碳酸盐岩储层地质特征	(2)
第三节 碳酸盐岩酸化实验评价技术进展	(4)
第二章 碳酸盐岩储层酸化实验评价方法及分类	(18)
第一节 实验评价方法分类	(18)
第二节 实验评价参数选择	(21)
第三节 实验评价技术应用分类	(25)
第三章 碳酸盐岩储层物性特征实验评价技术	(38)
第一节 岩石矿物成分测试	(38)
第二节 储层物性参数测试	(42)
第三节 储层微观结构分析	(57)
第四节 储层物性特征对酸化工艺的指导	(65)
第四章 岩石力学及地应力实验评价技术	(68)
第一节 岩石力学参数测试	(70)
第二节 地应力大小及方向测试	(84)
第三节 大尺寸真三轴水力压裂模拟测试	(103)
第五章 储层敏感性实验及敏感性评价技术	(108)
第一节 敏感性矿物及评价指标	(108)
第二节 流动实验及敏感性评价	(112)
第三节 敏感性测试结果及影响因素分析	(121)
第六章 酸化材料性能评价技术	(131)
第一节 酸液基本性能评价	(131)
第二节 前置液性能评价	(141)
第三节 酸岩反应能力评价方法	(151)
第四节 暂堵转向酸化材料性能评价	(181)
第七章 酸化工艺模拟实验评价技术	(196)
第一节 酸液穿透实验	(196)
第二节 储层伤害及解除效果评价	(214)
第三节 酸蚀裂缝导流能力及酸蚀形态评价	(222)
第四节 酸液黏性指进实验模拟	(264)
参考文献	(272)

第一章 碳酸盐岩储层酸化改造及实验评价技术发展

第一节 碳酸盐岩储层改造发展历程

碳酸盐岩储层一般具有低孔、低渗的特点，进行储层改造是该类油气藏开采的必要措施和有效手段（陈赓良，2006）。针对碳酸盐岩储层的矿物组成特性，碳酸盐岩储层采用酸化压裂工艺改造，通过解除近井底地带的污染堵塞，在井筒与储层之间形成高导流能力的酸蚀裂缝，最终达到提高油气产量的目的。

碳酸盐岩储层酸化压裂工艺比其他油气井增产技术都要早。最早的油井酸化处理作业可以追溯到 1895 年，美孚石油公司用浓盐酸对俄亥俄州利马地区碳酸盐岩储层的油井进行增产处理。碳酸盐岩储层改造历史上具有里程碑意义的事件是美孚石油公司化学家 Herman Frasch 在 1896 年 3 月 17 日申请了第一个酸化改造工艺的专利。在后来的 30 年或更长一段时间内，酸化工艺应用得越来越少。酸化历史上第二个具有里程碑意义的事件是 Dow Chemical 公司的研究员 Sylvia Stoesser 与 John Grebe 在 1932 年共同开发出酸液缓蚀剂，通过在酸液中加缓蚀剂的措施，实现了油井增产的需求，导致酸化工艺得到广泛应用。Stoesser 和 Grebe 在 1935 年曾观察发现，在注酸过程中，有时能获得地层的破裂压力，这表明储层在酸化时也被压裂，首次描述油藏水力压裂是在酸处理工艺的应用过程中。然而，对酸压的认识和进一步发展，实际上是在 20 世纪 30 年代末期和 40 年代早期。1935 年，Clason 第一次指出当酸液径向渗入时，对碳酸盐岩储层实施酸化作业（基质酸化），其产量增加是不可能的；他认为，肯定是形成了裂缝，并且解释说只有通过扩大裂缝，并清除掉裂缝中的钻井液和其他沉积物，产量才会大幅度增加。大约 10 年以后，人们才发现的确是形成了裂缝。20 世纪 50 年代以后，储层改造技术在中国开始应用。1955 年，四川地区在隆 9 井进行了第一次解堵酸化作业。酸化历史上第三个具有里程碑意义的事件是 Nierode 和 Williams 在 1972 年提出了一种盐酸和石灰岩反应的动力学模型，使得碳酸盐岩储层酸化工艺从一门神秘的科学变成了一门稍微可被预知的科学。Nierode 和 Williams 用他们的模型预测了作业过程中酸岩反应的过程，并进行酸压工艺设计。1976 年 Coulter 等人提出采用多级交替注入前置液和酸液的方法来实现控制滤失后，多级交替注入酸压技术得到了广泛的应用。为了使均质程度较高的储层也获得较高的酸蚀裂缝导流能力，国内外还发展了闭合裂缝酸化技术（李月丽，2009）。

初期的碳酸盐岩增产改造以解堵酸化为主，经过多年的研究与发展，针对碳酸盐岩的储层改造，实现了由解堵酸化向深度酸压转变，由笼统酸化到重点挤酸转变，由部分井段（层位）改造向全井段（层段）充分改造转变。

碳酸盐岩储层温度高，酸岩反应速度快；储层孔洞发育，滤失量大，酸液作用距离有限。要获得理想的增产效果，必须实现深度改造（陈赓良，2004）。近年来，国内外逐步完善和发展了以控滤失、延缓酸岩反应速度从而实现深穿透为主体的各种酸压技术，如前置液

酸压、胶凝酸酸压、化学缓速酸酸压、降滤失酸酸压、泡沫酸酸压、高效酸酸压、自生酸酸压等。20 世纪 80 年代初开始,国内油气田开始开展前置液酸压、胶凝酸酸压等工艺技术的应用。同时开始引进了 Halliburton、NOWSO 等国外技术服务公司的增产改造技术和液体体系,取得了不同程度的效益和实践经验。1998 年原四川石油管理局引进 Dowell 公司的滤失控制酸在川中进行了施工,这是该类酸液体系在国内的首次应用。目前,深度酸压技术在碳酸盐岩气田开发中得到了广泛的应用。

碳酸盐岩储层酸化主要是清除近井带污染、解决低渗透储层油气渗流阻力大的问题(刘静,2006),因此必须要解决的是注酸时酸液沿施工井段的分布问题,然而由于储层伤害及层间非均质性的影响,使各层段的渗透率差异较大,注入酸液置放不均匀,达不到有效增产的目的,所以在对此类储层进行全井酸化处理时,必须采取分流转向措施,对于储层厚度大,非均质程度高的储层,为了实现所有储层段的均匀改造,国内外先后发展了转向酸酸化工艺、封隔器分层酸化工艺、堵塞球分层酸化工艺(王兴文,2004)。通过这些工艺的实施,能够实现目的层段的均匀改造和对重点层段有针对性的改造,大多获得了较好的处理效果。

近年来,大多新发现的储量均为低渗透储量,水平井由于其穿过油气层长度长能够大幅度提高单井产量,水平井在新完钻井的比例中逐年提高,已经成为低渗透油气藏开发的主体技术之一。水平井由于其水平段长,各段储层物性差距大,如何实现整个水平段的均匀改造成为制约水平井增产改造效果的关键因素(耿宇迪,2011)。针对水平井笼统酸化效果差,国内外先后发展了连续油管拖动酸化工艺、水力喷射分段酸化工艺和裸眼封隔器分段酸化工艺。这些技术的应用,大大提高了水平井改造效果,目前工具已经能够满足 10 级以上的水平井分段改造需要。

随着液体技术的进步,使得酸液携砂成为可能,针对比较均质的碳酸盐岩储层和复杂性储层(碳酸盐岩、泥岩、砂岩组分相对均衡的复杂储层),在酸压和加砂压裂的基础上又发展了携砂酸压工艺(伊向艺,2014),并在长庆的靖边气田等进行了应用,取得了较好的效果,丰富了碳酸盐岩储层改造工艺。

由于中国深层碳酸盐岩储层的特点与国外具有较大差异,主要表现在埋藏深、储层非均质性严重和基质含油性差(王永辉,2012)。靠单一的酸压工艺或酸液体系难以获得理想的效果,所以中国逐步把多种单一酸压技术集成为复合酸压技术,在现场应用中取得了较好的效果。

碳酸盐岩储层改造技术在国内的四川盆地、陕甘宁盆地中部气田、塔里木油田应用最为广泛。为实现深穿透,酸液体系已由单一型向复合型发展,已经逐步成为降滤失、缓速、缓蚀、降阻和助排的多功能酸液体系。高黏度胶凝酸和低摩阻乳化酸的发展实现了大排量、高泵压、深穿透的目标(陈志海,2005)。酸液的注入工艺已发展为不同酸液体系的交替单级注入或多级交替注入,在深层碳酸盐岩储层能同时实现裂缝的深穿透和高导流能力。为适合中国深层碳酸盐岩储层酸压的需要,发展了不同体系组成的复合酸压技术。复合酸压技术的应用大大提高了酸蚀裂缝的规模和导流能力,基本满足了高温深井碳酸盐岩储层增产改造的需要。

第二节 碳酸盐岩储层地质特征

一、碳酸盐岩沉积特征

碳酸盐岩主要由文石、方解石、白云石、菱镁矿、菱铁矿、菱锰矿组成。现代碳酸钙沉

积主要由高镁方解石、文石及少量低镁方解石组成。低镁方解石最稳定，文石不稳定，高镁方解石最不稳定。后两者在沉积后易转变成低镁方解石。因此，古代岩石中的碳酸盐矿物多是低镁方解石。碳酸盐矿物的结晶习性和晶体特征与形成环境有关。

碳酸盐岩中混入的非碳酸盐成分有：石膏、重晶石、岩盐及钾镁盐矿物等，此外还有少量蛋白石、自生石英、海绿石、磷酸盐矿物和有机质。常见的陆源混入物有黏土、碎屑石英和长石及微量重矿物。陆源矿物含量超过 50% 时，则碳酸盐岩过渡为黏土或碎屑岩。

碳酸盐岩原生沉积矿物为文石、镁方解石等不稳定矿物。矿物沉积后在成岩过程中具有从不稳定型向稳定型转化的趋势。矿物转化过程中储集空间也经历了从原始到次生、溶蚀充填等一系列的变化，造成碳酸盐岩沉积物和孔隙类型复杂多变，储集空间类型多种多样。储层中储集空间具有以不同原生与次生储集空间组合及融合共同储集流体的复合特征。

二、碳酸盐岩储层物性特征

塔里木盆地奥陶系的岩石基质孔隙度和渗透率均很低，属特低孔、特低渗透储层（丁云宏，2009）。

鄂尔多斯盆地奥陶系石灰岩类孔隙储层孔隙度一般为 1%~8%，最高可达 13%；白云岩储层其面孔率可达 3%~9%，基质孔隙度可达 4%~13%。

四川盆地碳酸盐岩储层总体具低孔、低渗特点，平均孔隙度 1.79%，渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，非均质性强。

石炭系气藏平均孔隙度 5.49%，渗透率 $2.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，通过岩心分析结果表明，储层物性好，属中—高渗透性气藏。相国寺石炭系气藏多种试井资料解释结果表明各井渗透率一般为 $300 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右，构造平面上其顶部渗透率高；万顺场石炭系气藏渗透率在 $(3.18 \sim 105) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 范围，平均为 $25.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右。

飞仙关组在川东及川东北地区主要以鲕类白云岩孔隙型储层为主，圈闭范围大，裂缝较发育，储层单层厚度大、横向分布广、纵向分布较集中、孔隙度较高，平均孔隙度 6.0%~8.0%，最大孔隙度超过 25%；渗透率变化大，一般为 $(0.01 \sim 1160) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，基质渗透率介于 $(0.01 \sim 1000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间。

嘉陵江组储层在四川盆地发育有 T_{1j1}^5 、 T_{1j3}^4 、 $T_{1j1}^4 \sim T_{1j3}^3$ 、 T_{1j3}^2 、 T_{1j2}^2 和 $T_{1j1}^2 \sim T_{1j1}^1$ 多套储层。储集类型以裂缝—孔隙型为主。主要储集空间为粒间（溶）孔、粒内（溶）孔、晶间孔、铸模孔等。四川盆地嘉陵江组储层由于受岩相、成岩等因素控制，其物性特征及厚度差异大，总体表现为：低孔、低渗，非均质性较强。

长兴组气藏属礁相沉积，储层储集空间以晶间（溶）孔为主，裂缝较发育。储渗类型为孔隙型或裂缝—孔隙型，且以裂缝—孔隙型居多。据黄龙场等气田统计，生物礁储层平均孔隙度为 1.68%~6.29%，渗透率为 $(2.26 \sim 29.12) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，有效厚度为 5.38~67.4m，这些储层大多属于中等—差的储层。

安岳气田灯影组构造由北向南主要发育有磨溪潜伏构造和高石梯潜伏构造，储层主要集中在灯二段和灯四段，其中灯四段分为灯四下亚段和灯四上亚段。储集岩类主要为富含菌藻类的藻凝块云岩、藻叠层云岩、藻砂屑云岩，孔隙度主要分布在 3%~5% 之间，平均为 4.32%，渗透率在 $(0.01 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间，属低孔低、渗储层，局部区域和层段发育有裂缝，改善了储层渗透性，储集类型为裂缝—孔洞型和孔隙（洞）型，储集类型多，非均质性强。灯影组储层温度在 140~160℃ 之间，地层压力系数在 1.05~1.14 之间，属高温、

常压气藏。

磨溪龙王庙气藏产层最深达 4776.0m, 地层温度最高达 144.8℃, 压力系数最高达 1.65, 局部 H_2S 含量为 $11.6\text{g}/\text{m}^3$ 。孔隙度分布在 2.0%~8.0%, 渗透率分布在 $(0.01\sim100)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$, 总体表现出低孔、中低渗特征。

三、碳酸盐岩储层储集特征

储集类型的划分有许多种方法。本次气藏储集类型划分充分考虑储集空间类型、空间搭配关系、对于气藏的控制等因素。四川盆地碳酸盐岩储集空间主要包括: 孔隙、裂缝、溶蚀孔洞 3 种类型 (廖仕孟, 2016)。

1. 孔隙型

孔隙型储层储层空间以孔隙为主, 孔隙之间的喉道较宽, 基质渗透率高, 仅靠基质本身就可以形成工业油气流。

2. 裂缝—孔隙型

该类型储层指碳酸盐岩地层中储集空间以孔隙为主, 构造断层裂缝与孔隙相互沟通有机配置形成的储渗空间, 也是最为常见的裂缝—孔隙型储层类型; 裂缝—孔隙型储集类型中裂缝起到很大的作用。构造缝沟通了彼此孤立的孔隙及沿其溶蚀扩大而成的溶孔溶洞, 从而构成一个缝孔洞组成的储渗体, 它具有总孔隙度低而渗滤能力特高的储渗特征。

3. 孔洞及裂缝—孔洞型

储集空间主要以溶蚀孔洞为主, 裂缝在其中储集性能相对较弱, 主要以沟通溶洞, 作为主要渗流通道的储集类型, 非均质性较强。

4. 裂缝型

四川盆地经过剧烈的构造运动, 形成了基质致密, 裂缝发育的储层, 其中构造发育的张裂缝既是储层空间又是渗流通道的裂缝型储层。

第三节 碳酸盐岩酸化实验评价技术进展

一、酸液体系研究进展

为了实现深度酸化、改善酸化效果, 碳酸盐岩储层酸化工作液起着决定性的作用。而不同的储层特征, 对酸化改造酸液有不同的要求。目前主要的缓速酸液体系有: 稠化酸、自转向酸、泡沫酸、乳化酸以及自生酸等 (陈赓良等, 2004)。

在这些缓速酸液体系中, 稠化酸的研究应用最为成熟, 已广泛应用于碳酸盐岩储层改造。稠化酸即胶凝酸, 采用向酸液中加入稠化剂的方法, 增加酸液黏度, 延缓地扩散、传质, 从而起到缓速和降滤失的效果, 延长酸液作用距离, 实现深入地层酸化的目的。

清洁自转向酸是最新发展的化学转向酸液。在转向酸与岩石矿物发生反应前, 酸液黏度较低, 与岩石进行反应时, 酸液值与钙镁离子浓度不断升高, 转向酸中表面活性剂形成胶束, 使得溶液黏度增大, 阻止酸液继续进入高渗透层, 促进酸液转入低渗透层, 从而实现均匀酸化的目的。

泡沫酸通过向酸液中引入气体以及起泡剂等助剂, 降低了酸岩的接触面积, 控制了氢离子的传质, 从而降低反应速度。泡沫酸适用于低压低渗透地层, 在水敏地层中具有较强优

势。乳化酸为油包水型酸液，作为分散相的酸液被连续油相包裹，与岩石隔离，当温度升高、乳化剂不断被地层吸附后，乳化酸逐步破乳，释放出酸与岩石进行反应。该酸缓速作用好，但是施工摩阻高，在深井应用中受限制。目前微乳酸，即小分子级别的乳化酸，解决了摩阻高这一问题，但是在高温下如何保证其稳定性，依旧需要进一步探索（吴志鹏等，2010）。因此，酸化改造要能实现深穿透和均匀布酸的目的，酸液体系应具有耐高温、缓速、能深度酸化的特性。

从酸液性能实验评价调研可以发现，为了实现地层的深部酸化、获得优良的酸化作业效果，国内外在缓速酸液的研究方面开展了大量的研究工作，取得了较大的进展。但现有酸液体系仍不能完全满足低渗透或高温地层深部酸化的需要，也不适应加砂压裂酸化的性能要求，其中包括低渗透地层的深部酸化要求。酸液在拥有现有聚合物稠化酸高黏度的同时具有低地层伤害性，高温地层深部酸化和加砂压裂酸化要求酸液具有现有聚合物稠化酸更高的黏度。即降低稠化酸的地层伤害性、提高稠化酸的黏度是研制高性能酸液急需解决的问题（杨荣，2015）。

同时，研制高性能酸液还需继续开展以下研究，以便优选出最佳的酸化改造工作液：

（1）从碳酸盐岩储层地质特征出发，分析了储层改造酸液体系面临的问题，明确适合于特定碳酸盐岩储层的酸液体系。

（2）按照行业标准对稠化剂的热稳定性进行评价，优选出耐温性良好的酸液用稠化剂，再从表观黏度、流变性能以及腐蚀测试三方面评价不同稠化剂用量对酸液体系的影响，从而确定稠化剂在酸液体系中的用量。然后按照标准对缓蚀剂、助排剂进行优选，最终形成一套酸液体系。

（3）进行酸液的综合性能评价：配伍性能、腐蚀性、降阻性能、流变性能、缓速性能、降滤失性能、助排性能、岩心酸化效果以及酸蚀裂缝导流能力。

（4）开展酸液的酸岩反应研究，分析酸岩反应机理，对比分析酸岩反应动力学方程和溶蚀行为特征。

二、酸岩反应动力学研究进展

酸化压裂改造技术是碳酸盐岩储层油气井增产的重要手段，为设计酸化压裂施工工艺方案，必须要明确酸蚀有效作用距离，而确定酸蚀有效作用距离的关键是掌握酸液在地层裂缝中的酸岩反应过程。酸岩反应是指在地层中酸液与矿物岩石所发生的化学反应。在酸化压裂施工中都需要将酸液注入地层中，溶蚀地层污染物以及岩石矿物从而达到储层改造的目的，因此酸岩反应研究成为酸化模拟及酸压设计中的核心部分。

在长期的实践与研究中，人们为了提高地层条件下的酸岩反应模拟实验的精确性和简便性，做了许多的相关研究和实验。从静态的酸岩反应模拟实验到动态的酸岩反应模拟实验，酸岩反应模拟实验发展趋于成熟。静态酸岩反应模拟实验方法是在地层温度条件下，把岩石静置在酸液中发生酸岩反应，岩石的反应面积已知，测定岩石质量或酸液浓度与时间的关系。这种方法使用的装置设备极其简单，操作简便，适用于小岩样的酸岩反应定性分析。动态酸岩反应模拟实验方法中流动式酸岩反应模拟实验最早发展起来，由于地层裂缝中酸液与岩石发生的是流动反应， H^+ 传质方式同时受扩散与对流传递的影响，因此流动方式的酸岩反应过程更接近地层裂缝中酸岩反应的真实情况。目前酸岩反应动力学参数的室内测试方法主要有两种：裂缝流动模拟实验和旋转岩盘模拟实验，只有裂缝流动模拟实验方法形成了一

套技术标准 SY/T 6526—2002《盐酸与碳酸盐岩动态反应速率测定方法》。

1. 裂缝流动模拟实验

裂缝流动模拟实验基本原理是用地层岩心切割成两块大小相同的岩板，平行放置于酸岩反应室中，驱替酸液在两个岩板之间的缝隙内流动，测取进出口酸液浓度的变化，观察岩石表面的酸蚀情况，从而研究模拟人工裂缝中酸液流动反应的相关规律。该方法能更精确地模拟酸液在地层条件下的流动状态，因此成为模拟酸岩反应和评价酸蚀裂缝导流能力的重要方法。

国内外学者从 20 世纪 80 年代末就针对裂缝流动模拟实验开展了大量的研究。国内学者总结了静态酸岩反应模拟实验、平行板流动酸岩反应模拟实验和旋转岩盘酸岩反应实验的方法及原理，阐明了平行板流动酸岩反应模拟的实验原理与地层裂缝中的酸岩反应情况较接近，研究结果表明，当岩石类型不同时，获得的酸岩反应动力学方程也不相同，其中石灰岩的反应级数较小，一般在 1 左右，而白云岩反应级数较大。也有学者用人工模拟裂缝装置研究了盐酸—白云岩反应速率的影响因素，得出酸浓度和排量影响较大，而温度和缝宽的影响较小。提出考虑吸附和解吸过程的盐酸和白云岩的反应机理模式，较好地解释了各种因素对酸岩反应速率的影响规律（李力等，2000）。随着碳酸盐岩储层改造工艺的发展，平行板裂缝流动实验进行酸岩反应速率测试不易观察到残酸浓度变化，测试误差较大。同时，实验过程中需要耗费大量的岩心，现场取心常常制约了大规模开展酸岩反应速率测试的实验研究工作。因此，国内对于平行板裂缝流动模拟实验主要是用于观察酸蚀裂缝导流能力，通过不同影响因素下的导流能力来优选酸液。

2. 旋转岩盘模拟实验

目前国内外大多采用旋转岩盘开展酸岩反应速率测试，其原理是将岩心加工成直径为 25.4mm、大约 2.5mm 厚的小圆盘，在设定温度压力条件下将岩盘置于酸液中旋转，形成岩面与酸液的相对运动，由此来进行酸岩动态反应的研究，定时测定酸液的浓度，求取酸岩反应动力学参数，同时建立了旋转岩盘酸岩反应模型求取了 H^+ 传质系数 De 。

国外学者从 1973 年开始就大量开展了碳酸盐岩与不同酸液体系的酸岩反应实验研究。从最初利用旋转岩盘仪研究方解石和白云石在不同温度 and 不同转速下的溶解速率，结果表明，旋转岩盘仪存在传质受限和表面反应受限两大特点，在 25℃ 时，方解石的传质速率在很高的旋转速度下也会受到限制，而白云石的溶解速率在很低的转速下也会受到表面反应速率的影响（Lund K 等，1973）。针对不同酸液类型对酸岩反应动力学参数的影响也开展了大量研究，包括研究了 HF 与硅酸盐的初次反应和二次反应动力学，测定了二次反应的反应速率，以及探讨了高温条件下乳化酸与白云岩的酸岩反应机理，并建立了相应的酸岩反应动力学方程（R. C. Navarrete 等，1998）。也有学者用旋转岩盘仪第一次系统的测试乳酸与石灰岩酸岩反应的传质系数。实验发现，乳酸与石灰岩的酸岩反应速率在低转速（500r/min 以下）主要是由传质系数控制，在高转速下由表面反应控制；酸液的扩散系数随着温度的升高而增大；同离子效应会很大程度地降低反应速率。

相比于国外学者的研究，国内对酸岩反应动力学的研究起步相对较晚。1979 年研制出国内第一台旋转岩盘酸岩反应动力学实验装置，并投入普通酸液体系的相关实验，取得的实验成果与国外专家的规律一致，旋转圆盘实验方式研究常规酸液体系的酸岩反应时可靠性强。实践证明旋转圆盘实验方式适用于高温、高压旋转运动条件下的常规酸液体系的酸岩反应研究，确定酸岩反应动力学方程、扩散活化能、 H^+ 传质系数，还可研究酸岩反应速度及

其影响因素等。随后有学者使用旋转岩盘仪进行酸岩反应动力学测试后发现,测定酸岩反应速率误差较大,分析认为在单位时间内测取酸液浓度差获得酸岩反应速率时,由于酸岩反应釜内酸浓度不均匀;实验中面容比较小,反应前后酸液的浓度差小,导致测定酸浓度时误差较大;另一个重要原因是取样过程中酸液浓度挥发严重(张建利等,2003)。

随着石油工业技术中酸液体系的发展,越来越多的高黏度酸液体系及缓速酸液体系投入到复杂油气储层改造应用中,如四川盆地磨溪—高石梯震旦系、龙王庙组及龙岗构造长兴组、飞仙关组等都采用高温胶凝酸、高温转向酸等进行酸化改造。而实验结果发现在酸岩反应过程中,岩心周围酸液与其他部位的酸液浓度差异较大,不能有效地进行 H^+ 传质交换,影响测试结果。

因此,国内学者伊向艺等提出了“液体旋转”代替“岩盘旋转”的新思想,并设计利用液体旋转的方法使酸液与两侧岩石进行流动反应的新型实验装置。实验装置可模拟酸液在不同裂缝宽度间隙中的流动特征,同时取样时可以从两侧夹持器的任意一侧取样,也可以从釜体下侧的卸压接口取样,保证了酸液与反应釜中的岩面反应后的反应生成物均匀,且稳定性、准确性更高。基于此实验装置,有学者从酸岩反应模拟室内实验方法研究出发,对比分析了常规酸岩反应模拟实验在测试高黏度酸液体系时的适应性,在此基础上建立了一套适用于高黏度酸液酸岩反应动力学研究的实验方法,进行不同黏度酸液酸岩反应规律实验研究(李沁,2013)。同时采用流体计算力学(CFD)软件 FLUENT 对高黏酸液在反应釜内部的流动情况进行模拟,得出了转速与壁面速度损失的关系式和转速与壁面速度的关系式,以此两关系式可以较为精确地计算各转速下壁面速度损失与壁面速度,得到了施工排量与实验装置转速的关系,从而优化实验设计(张紫薇等,2014)。

国内外学者普遍应用各类酸岩反应测试实验装置对多种类型的酸液体系(包括胶凝酸、泡沫酸、乳化酸、清洁酸和交联酸等)进行了酸岩反应评价,求取了相应的酸岩反应参数,考察了酸岩反应的各影响因素,并且在酸岩反应机理上进行了详细研究,取得了一批成果。同时,近几年针对高黏酸液开展了酸液动力学研究,取得了一定的认识,建立了与黏度参数相关的酸岩反应模型。

三、酸蚀裂缝导流能力研究进展

在碳酸盐岩酸化后,粗糙不平的裂缝表面在闭合压力作用下能保持一定的开启程度,在裂缝中形成流体流动孔隙,以此形成一条具有一定导流能力的人工裂缝,从而达到改善流体渗流条件、增大油气产量的目的。因此,酸蚀裂缝的导流能力是评价酸压施工成功与否的重要指标之一。

酸蚀裂缝导流能力的研究主要以实验数据为基础,实验设备主要有两种,一种是酸蚀裂缝导流仪,主要采用经验公式来计算酸蚀裂缝导流能力:

$$K_f W = \frac{100 Q \mu L}{h \Delta p} \tag{1-1}$$

另一种是酸液环流装置,主要使用 API 推荐的公式来计算酸液环流装置的导流能力:

$$K_f W = 1.67 \times \frac{Q \mu L}{h \Delta p} \tag{1-2}$$

式中 $K_f W$ ——酸蚀裂缝导流能力, $\mu m^2 \cdot cm$;

Δp ——实验压差, MPa。

μ ——液体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$;

h ——实验岩板宽度, cm ;

Q ——实验流量, mL/min ;

L ——实验平行板长度, cm 。

然而, 由于酸刻蚀岩样表面存在粗糙不平的“凸起”与“凹陷”结构, 其并不像单纯的平行平板流动模型, 故基于立方定律和达西公式的导流能力计算模型并不适用于酸蚀裂缝。1973年, 国外学者利用白云岩作为研究对象, 测量酸岩反应后的岩石溶蚀体积, 提出了考虑裂缝等效宽度、裂缝闭合压力及岩石嵌入强度等因素的裂缝导流能力预测模型, 即之后被广泛使用的 N-K 模型 (Nierode 等, 1973), 模型如下:

裂缝等效宽度:

$$w_i = \frac{XV}{2(1 - \phi)h_f x_f} \quad (1-3)$$

裂缝导流能力:

$$C_f = 3.90293 \times 10^7 w_i^{2.47} e^{-c\sigma_c} \quad (1-4)$$

其中:

$$c = \begin{cases} (13.457 - 1.3 \ln S_f) \times 10^3; & 0 < S_f < 137.89 \\ (1.964 - 0.28 \ln S_f) \times 10^3; & S_f > 137.89 \end{cases} \quad (1-5)$$

式中 C_f ——裂缝导流能力, $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$;

w_i ——裂缝等效宽度, cm ;

S_f ——岩石嵌入强度, MPa;

σ_c ——裂缝所受闭合压力, MPa。

1977年, 国外学者首次考虑了裂缝表面形态对导流有利的影响, 将凹凸不平的裂缝表面假设为具有高度不同、而直径相同的“钉床”结构的粗糙表面, 并基于此推导了裂缝导流力的计算模型 (Gangi. F 等, 1978), 模型为:

$$C_f(\sigma) = C_{f0} \left[1 - \left(\frac{\sigma}{M} \right)^m \right] \quad (1-6)$$

式中 C_{f0} ——裂缝初始导流能力, $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$;

M ——“钉床”结松的有效弹性模量, MPa;

σ ——裂缝所受的闭合压力, MPa;

m ——粗糙度的分布函数特征值, 常量 ($0 < m < 1$)。

1981年, 相关学者研究了裂缝闭合压力对导流能力的影响, 在考虑层流流动的条件下推导了导流能力计算模型 (Walsh 等, 1981):

$$K_f w = (K_f w)_0 \left[1 - \left(\frac{\sqrt{2}h}{a_0} \right) \ln(\sigma_c - p_0)_e \right]^3 \left[\frac{1 - b(\sigma_c - p_0)}{1 + b(\sigma_c - p_0)} \right] \quad (1-7)$$

$$b = \sqrt{3} \pi \left(\frac{f}{h} \right) E (1 - \nu^2) \quad (1-8)$$

式中 K_{fw} ——裂缝导流能力, $\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$;
 p_0 ——参考压力, MPa;
 E ——岩石弹性模量, MPa;
 a_0 ——参考压力下的裂缝半宽, cm;
 h ——裂缝表面各点高度均方根。
 ν ——泊松比;
 f ——自相关距离, cm。

1989 年, 国外学者研发了酸蚀裂缝导流能力测试仪器, 使酸液以线性的方式流通裂缝, 以此避免了酸液重力对刻蚀实验的影响, 并研究了岩石岩性、酸液浓度、反应温度及酸液类型对酸刻蚀过程的影响。其研究成果表明, 更高的反应温度有利于加快酸岩反应速率并增加岩石的溶蚀量, 但并不相应地提高裂缝在闭合压力作用下的导流能力, 说明岩石的溶蚀体积与裂缝导流能力之间并无直接关系 (Malik 等, 1989)。

2012 年, 相关学者在张性条件下利用酸蚀岩样表面来模拟裂缝在地层中的真实形态, 同时运用三维光学轮廓仪对酸蚀岩样表面进行三维扫描及 3D 成像。其研究成果发现, 在张性条件下, 裂缝导流能力主要受到裂缝表面的“凸起”和“凹陷”部分影响 (Neumann. L. F 等, 2012)。

基于国外学者的研究成果, 国内学者在不同影响因素对酸蚀裂缝导流能力的影响以及酸蚀裂缝导流能力数学模型方面也开展了大量的研究工作。

国内学者利用白云岩开展酸蚀实验及导流能力测试实验, 研究了酸液排量、反应温度、酸液浓度及裂缝宽度对酸蚀裂缝导流能力的影响。其研究成果表明, 裂缝宽度对导流能力的影响程度最大, 其次依次为: 酸液浓度、反应温度及酸液排量。同时利用玉门青西油田储层的复杂岩性岩样开展酸刻蚀实验及裂缝导流能力测试实验, 其研究成果表明, 过高的酸液浓度可能导致岩石力学性质的破坏, 同时, 岩石表面反应后脱落的颗粒会导致裂缝孔隙堵塞, 导致裂缝导流能力降低 (郭静等, 2003; 付永强等, 2003)。

2011 年, 相关学者研究了岩石岩性分布、表面渗透率分布、酸岩反应温度等因素对裂缝导流能力的影响 (牟建业等, 2011)。其研究成果指出, 表面岩石岩性和渗透率的分布情况对裂缝表面的刻蚀形态有着极大的影响, 而裂缝表面的刻蚀形态及岩石力学性质则对裂缝在闭合压力下的变形特征产生重要影响。

2017 年, 赵立强等运用酸蚀裂缝导流仪、激光扫描仪, 在变参数条件下, 对实际岩样进行了酸岩刻蚀及导流能力实验, 系统考察了酸压工艺、酸液浓度、裂缝性质、酸液类型对酸岩刻蚀形态及酸蚀裂缝导流能力的影响。

四、酸蚀裂缝刻蚀形态表征研究进展

裂缝表面几何形态是影响裂缝导流能力的关键因素, 准确地描述酸蚀裂缝表面的几何形态, 研究具有不同刻蚀形态表面的裂缝对导流能力的影响, 并能准备地计算酸蚀裂缝导流能力对酸压工艺具有重要的意义。

早在 20 世纪 70 年代, 水利工程和土木工程领域的学者就引入各种表征粗糙表面的参数来量化粗糙表面或人工裂缝面。1977 年开始, Mandelbrot. B 等在研究中发现自相似性和仿射性是自然界中不规则的几何物体边界所共有的特点, 并基于研究成果创立分形几何学, 由此提供了一种描述自然界中粗糙表面特征的新方法。2002 年, 国外学者首次利用三维表面

光度仪对人工裂缝表面进行扫描测量并获取裂缝表面各点的高度分布, 并利用扫描数据计算得到裂缝的宽度及分布情况 (Iwano 等, 2002)。

直到 1996 年, 才开展了针对酸蚀裂缝刻蚀形态表征的大量研究。

1998 年, Ruffet 等人引入机械探针式的表面轮廓仪对酸蚀裂缝表面进行数据测量, 首次实现了酸蚀裂缝表面参数 (平均裂缝宽度、歪度、斜度、绝对粗糙度、线粗糙度、峰态、标准差及线粗糙度等) 的获取。随后, 国内学者首次将光学表面轮廓仪引入酸蚀裂缝表面形态的表征工作, 利用软件得到了裂缝表面的三维立体图像。

2009 年, 赵仕俊等首次研发用于酸刻蚀裂缝表面扫描的三维激光轮廓仪。然而其未形成真正的酸刻蚀裂缝壁面三维彩色图像, 并且不具备壁面形态分析功能。

2012 年, Neumann 等人利用石灰岩和白云岩的露头岩样开展酸刻蚀物理模拟实验及导流能力测试实验, 利用三维激光轮廓仪测量酸刻蚀后的裂缝表面, 并针对均匀刻蚀、沟槽刻蚀和非均匀刻蚀 3 种不同刻蚀形态的裂缝表面进行数字化成像。

2015 年, 白翔等利用三维数字化分析方法, 定义了具有明确物理意义的酸蚀裂缝表面形态表征参数, 定量揭示了表征参数和裂缝表面流动通道的关系, 利用表征参数首次提出了酸蚀裂缝刻蚀类型的数字化分类方法, 并揭示了不同刻蚀形态对酸蚀裂缝导流能力的影响规律。

在分析碳酸盐岩的酸岩反应与酸蚀机理的基础上, 建立了酸蚀表面形态分析测试方法, 并进行不同酸蚀条件下酸液溶蚀表面实验, 研究了酸蚀表面变化规律, 利用分形方法和数字化方法提取非均匀溶蚀特征参数, 并分析了碳酸盐岩非均匀酸蚀裂缝表面对导流能力影响 (戴亚婷等, 2016)。

国内外学者经过数十年的探索, 以大量理论和实验研究为基础, 取得了大量的成果, 尤其在酸蚀裂缝刻蚀形态表征方面。

(1) 基于岩样酸刻蚀实验, 利用获取的岩样表面三维数据对岩样表面的几何形态进行分析, 得到表面起伏形态对裂缝内流体的影响; (2) 通过对扫描三维数据的分析, 获得了裂缝表面的几何形态定量表征参数, 分析和评价裂缝的非均匀刻蚀程度; (3) 利用新定义的表征参数将岩样刻蚀形态进行细分。

因此, 在深入研究酸蚀裂缝表征的基础上, 建立了基于表面形态表征参数推导裂缝导流能力计算模型, 在模型中改变表面表征参数得到不同形态裂缝的导流能力数值, 即利用数值模拟手段代替物理模拟实验, 更加全面、方便地研究裂缝表面刻蚀形态对导流能力的影响。

五、岩石力学实验评价研究进展

岩石力学影响着油气勘探过程的各个方面, 然而近年才作为地球科学的一个方面在能源开发中扮演不可替代的角色。其发展的源动力来自于水力压裂裂缝方位的解释、水力裂缝几何形状的预测、预防套管损坏、预测出砂、井壁稳定性问题等。水力压裂作为储层改造的重要手段, 在油气增产中发挥了重要的作用。面对复杂地层、成本控制、环保要求等压力, 对压裂设计的要求也越来越高, 对裂缝方位/几何形状的预测逐渐从定性发展为定量。伴随着各种水力压裂设计模型的发展, 对室内岩石力学参数的测试要求也就越来越高, 这也促进了储层改造岩石力学实验技术的进步。

1. 岩石力学实验机技术研究现状介绍如下

岩石实验机是一种用于研究岩石力学性能, 包括岩石的抗压强度、应力应变关系的基础