

地热储层改造技术研究进展

原若溪¹, 马峰^{1*}, 张薇¹, 朱喜¹, 陆川¹, 张汉雄¹, 余鸣潇¹, 黎楚童²

1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所; 自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心, 石家庄 050061

2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

摘要 热储强化增产技术是提高深部热储开发能力的有效手段, 通过提高热储层的渗透性增大岩体与流体之间的传热能力, 最大限度地开发岩体中的热能。介绍了热储强化增产改造中酸化技术的发展历程与增产原理, 梳理了国内外典型地热田开展酸化增产的相关案例和研究现状, 总结了常用的酸性化学刺激剂和增产效果。

关键词 酸化压裂; 基质酸化; 碳酸盐岩; 砂岩; 储层改造

近年来以气候变化为核心的全球环境变化正广泛地影响着人类社会的方方面面, 导致气温增高、海平面上升、极端天气与气候频发, 发展可再生能源的呼声日益高涨^[1]。地热资源具有储量大、分布广、运行稳定和生命周期二氧化碳排放低等特点, 已成为世界各国重点研究开发的新能源^[2-3]。按照热储的温度范围和埋藏深度可划分为浅层地热能资源、水热型地热资源和干热岩资源, 目前全球主要利用的为水热型地热资源^[4]。中国水热型地热资源每年可开采量折合标准煤 18.65 亿 t, 主要分布在华北、松辽、苏北、江汉、鄂尔多斯和四川等平原盆地以及东南沿海、胶东半岛和辽东半岛等山地丘陵^[5]。据国家地热能中心数据显示, 截至 2020 年底, 全国水热型地热能供暖建筑面积 5.8 亿 m², 发

电装机容量达到 45 MW, 开发利用潜力巨大。随着地热探测技术进步和深度增加, 深部高温热储的开发逐渐受到重视, 其中, 黑龙江松嫩平原 GR1 井, 深度 4028 m, 孔底温度 119.4℃(非稳态); 冀中拗陷区域高阳地热田 JZ04 井, 深度 4007 m, 孔底温度 135℃^[6]; 雄安新区高阳地热田 D34 井, 深度 4517 m, 孔底温度 131℃^[7]; 冀东马头营凸起地热田 M-1 井, 深度 4502.11 m, 实测 3965 m 处温度 150℃^[8]; 青海贵德 ZR2 井, 深度 4703 m, 实测 4600 m 处温度 205℃^[9]; 海南福山凹陷花东 1R 井, 深度 4478.95 m, 预测温度在 170~190℃之间^[10]。深部高温地热甚至干热岩型地热开发所面临的埋深大、温度高、水量小和渗透低是限制地热开发的关键难题, 热储强化增产是实现深部热能高效开发的有效手段^[11]。

收稿日期: 2022-09-08; 修回日期: 2022-10-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB1504101); 国家自然科学基金项目(41602271); 中国地质调查局项目(DD20189112)

作者简介: 原若溪, 助理研究员, 研究方向地热资源调查评价, 电子信箱: yuanruoxi@mail.cgs.gov.cn; 马峰(通信作者), 教授级高级工程师, 研究方向地热资源调查评价与开发利用技术, 电子信箱: mafeng@mail.cgs.gov.cn

引用格式: 原若溪, 马峰, 张薇, 等. 地热储层改造技术研究进展[J]. 科技导报, 2022, 40(20): 52-64; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.20.007

本研究重点介绍深部热储层增产改造中酸化技术的发展历程与增产原理,回顾国内外地热田储层改造中酸化技术的研究现状,总结常用的酸性化学刺激剂和增产效果,介绍雄安新区地热井酸化压裂案例。

1 储层增产技术

热储层强化增产的目的是通过改变整个热储层的渗透性来提高岩体与流体之间的传热能力,以最大限度地开发岩体中的热能^[12]。目前常用的增产技术主要包括:(1)各种不同造缝介质的压裂技术:水力压裂、酸化压裂、加砂压裂和高能气体压裂等^[13];(2)各种不同的基质酸化:如砂岩酸化、碳酸盐岩酸化等^[14]。两者的差别主要在于^[15]:基质酸化技术是在低于储层破裂压力下注入酸液,不产生新的裂缝,酸液沿地层孔隙作径向流动,通过溶解储层中的胶结物和堵塞物,恢复和提高近井地带(通常不到百米)的渗透率,适用于碳酸盐岩储层和砂岩储层;压裂技术是在高于储层破裂压力的情况下注入压裂液,用压力将地层压开一条或几条裂缝,并用支撑剂(或不用支撑剂)将裂缝支撑起来,减小流动阻力,沟通油、气、水流动通道,达到改善储层渗透性,提高产量的目的^[16-17](图1)。

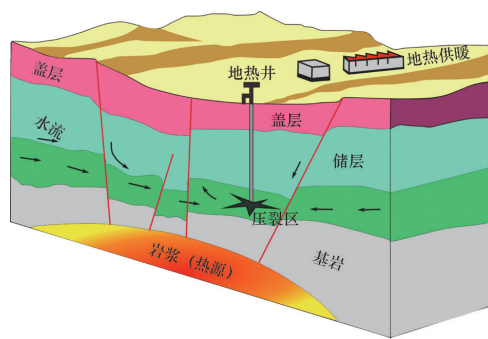


图1 储层压裂改造示意

在压裂技术中:水力压裂技术在地热开发中得到广泛应用^[18],主要包括2种压裂方式:类似油气产业的传统支撑剂型水力压裂和以清水剪切为主结合化学刺激的水力压裂,后者在大部分增强型地热系统(EGS)工程中得到应用并取得成功^[19]。针

对压裂目标储层的地质特征,压裂工艺包括了酸化压裂、加砂压裂和高能气体压裂等,酸化压裂是用酸液做压裂液且不加支撑剂,酸液同时发挥化学作用和水力作用,来扩大、延伸、压开和沟通裂缝,形成延伸远、流通能力高的渗流通道^[20],包括普通酸压、前置液酸压、多级交替注入酸压和平衡酸压等^[21];加砂压裂是通过使用一种固体材料,如砂、铝矾土、陶粒以及某些轻质材料来保持已经打开的裂缝,从而保证裂缝的导流能力;高能气体压裂适用于特低渗透硬储层,是一种利用脉冲加载并控制压力的上升速度,使迅速释放的高温高压气体在井筒附近压开多方位的径向裂缝,沟通井筒与储层裂缝,达到增产的目的^[22]。这些储层改造技术,尤其是酸处理技术,已成为国内外地热井增加或恢复热储层的孔隙度和渗透率,移除地层损害的重要手段,在碳酸盐岩、砂岩和火山岩等热储层中得到广泛应用。

1.1 基质酸化的发展和技术特点

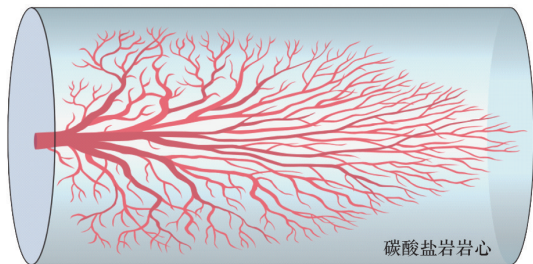
1.1.1 发展历程

最早的油井酸处理可以追溯到1895年,美孚石油公司化学家Frash使用浓盐酸刺激俄亥俄州利马地区的碳酸盐岩储层油井,增产效果显著,这是碳酸盐岩酸化历史上的第一个重大里程碑^[23]。然而,随着套管腐蚀愈发严重,酸化刺激生产消失了近30年,直到1932年,普尔石油公司与道化学公司将盐酸(HCl)正式用于油气井处理,酸化技术进入了新时代^[24]。1933年,Wilson与印第安那标准石油公司申请氢氟酸(HF)处理砂岩工艺专利;Halliburton在德克萨斯州附近使用HCl和HF的混合物进行了第一次砂岩酸化^[25]。1940年道威尔公司在墨西哥沿岸地区,将土酸(12%HCl-3%HF的混合物)首次进行了井筒处理,这是酸化技术在砂岩储层应用的标志^[25]。最初开发化学增产技术主要是为了提高石油和天然气的产量,逐渐也应用于地热井。1960年以来,使用HCl和HF或两者混合物,对砂岩地层地热井进行了大量的基质酸化处理^[25]。1980年,Strawn将这2种酸列为最有效的酸,选择HCl来处理石灰石、白云石和钙质带,HF溶解黏土矿物和二氧化硅^[26]。1990年以后,酸化技术更是被广泛于

处理地热井中钻井泥浆和结垢造成的地层损害。

1.1.2 增产原理

基质酸化的增产原理是酸液进入孔隙或裂隙与岩石发生反应,溶蚀孔壁或缝隙,增大孔隙体积和裂隙宽度,改善流体渗流条件(图2^[27]),然后随着残酸液一起排出地层,恢复地层原始渗透能力。增产效果与地层污染程度相关,在地层没有受到污染堵塞时,效果甚微;在有污染的地层,随着污染程度由轻到重,酸化后获得的增产倍比值也逐渐增大。基质酸化的工艺用液一般包括前置液、处理液和后置液,注液顺序为:注前置液→注处理液(土酸)→注后置液^[23]。



用 HCl 处理的石灰石和白云石岩心会形成称为虫洞(红色的)宏观通道,这些通道是 HCl 与碳酸钙和碳酸镁反应形成水溶性氯化物盐的结果

图2 碳酸盐岩酸化示意

前置液一般为浓度 5%~10% 的 HCl,主要作用为溶解一部分碳酸盐矿物,充分发挥土酸(一般由 10%~15% HCl 和 3%~8% HF 组成)对黏土、石英和长石的溶蚀作用,维持酸液较低的 pH 值,使得这些矿物与 HF 溶液混合形成的萤石(CaF₂)处于可溶状态,避免其沉淀阻塞地层^[28]。处理液一般选用 HCl 和 HF 的混合液,根据目标层的地质特征混合液应有不同的配比。后置液一般选用清水、氯化钾(KCl)、HCl 及氯化铵(NH₄Cl)溶液,主要作用是:(1)将主体酸驱替到远井处地层,增大化学刺激的有效距离;(2)稀释未被驱替到地层深处的主体酸^[29]。注入液添加剂的合理使用,对酸化效果起着重要作用,在地热井酸化中,加入缓蚀剂和铁离子稳定剂即可减少酸液对金属管件的腐蚀,降低对地层的污染^[23]。

目前使用的酸性化学刺激剂,按照酸性液体的化学成分,可分为传统酸系统、缓速酸系统、螯合剂及 CO₂ 化学刺激剂等^[30]。无论哪种酸性刺激剂,其目的均为延缓酸岩反应速度,尤其是在高温深井中,增大酸液的有效作用范围。其中,土酸是目前较为常用的酸性刺激剂,土酸中的 HCl 主要用于溶解石灰石、白云石等碳酸盐矿物,解除矿物孔隙和裂缝中的堵塞物质,扩大沟通地层原有的孔隙和裂缝,提高地层渗透性;HF 化学特性复杂,常被用于溶解石英、黏土矿物及长石类矿物,具体反应过程如表 1^[30]所示。

表1 酸化中主要化学反应

酸	矿物	反应公式
HCl	方解石	$2\text{HCl} + \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \uparrow$
	白云石	$4\text{HCl} + \text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 \rightarrow \text{CaCl}_2 + \text{MgCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2 \uparrow$
	菱铁矿	$2\text{HCl} + \text{FeCO}_3 \rightarrow \text{FeCl}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \uparrow$
HF	石英	$\text{SiO}_2 + 4\text{HF} \rightarrow \text{SiF}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
	钠长石	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + 14\text{HF} + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Na}^+ + \text{AlF}_2^+ + 3\text{SiF}_4 + 8\text{H}_2\text{O}$
	高岭土	$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8 + 24\text{HF} + 4\text{H}^+ \rightarrow 4\text{AlF}_2^+ + 4\text{SiF}_4 + 18\text{H}_2\text{O}$
	钾长石	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + 14\text{HF} + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{K}^+ + \text{AlF}_2^+ + 3\text{SiF}_4 + 8\text{H}_2\text{O}$
	蒙脱石	$\text{AlSi}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4 + 40\text{HF} + 4\text{H}^+ \rightarrow 4\text{AlF}_2^+ + 8\text{SiF}_4 + 24\text{H}_2\text{O}$

1.2 酸化压裂的发展和特点

1.2.1 发展历程

1935年,陶氏化学公司科学家 Grebe 和 Stoesser 在用 HCl 对密歇根州灰岩储层的几口油井进行增产处理时,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了,这是科学家首次描述油藏水力压裂;Clason 在碳酸盐岩酸化处理中观察到产量增加不是因为酸的径向渗透,而是因为存在裂缝,并且只有通过扩大裂缝或从裂缝中去除钻井液和其他沉积物才能解释生产率的大幅提高,至此压裂理论得到快速发展^[31]。1947年,美国堪萨斯州雨果顿地区首次进行了水力压裂增产作业,这次压裂产生了一个简单的

双翼裂缝从而提高了天然气产量^[32]。随后压裂作业逐渐从小型压裂(解除近井地带污染)—中型压裂(提高低渗透油层导流能力)—端部脱砂压裂(提高中高渗透层导流能力)—大型压裂(应用到油藏系统的开发)。与此同时,压裂工艺技术、设备、工具、管柱、下井原材料、机制研究和设计软件开发方面也都取得了长足的进步。1972年,Nierode和Williams提出了一种盐酸和灰岩反应的动力学模型,预测了压裂作业中酸反应过程,使得碳酸盐岩储层酸化工艺变得可被预知^[24]。油气田所使用的压裂器具和压裂液较为复杂,较高的施工成本限制了压裂技术在地热井的应用,随着新型绿色环保经济压裂液的研发,压裂技术由油气井逐渐走向地热。1979年,美国能源部计划将石油增产技术扩展到地热井,通过增产处理提高地热经济性,避免重新钻井,开展了水力压裂、酸化处理、爆炸增产和高能气体压裂现场测试^[31]。中国针对压裂增产技术的研究和应用比较多地借鉴了油田、煤层气开采领域的工艺及设备,天津地热勘察开发设计院在碳酸盐岩基岩裂隙地热井中应用压裂技术,取得良好的效果^[33];陕西省煤田地地质勘探公司在砂岩地热井中应用压裂技术;黑龙江省九〇四水文地质工程地质勘察院将压裂技术应用于地热井回灌中,达到预期的效果;中国地质调查局水环中心对多口水井进行了多次水力压裂增产水试验,效果较好;河南省地矿局在豫西基岩严重缺水山区地热钻井中,采用水力压裂技术,使地热井出水量增大为原来的3倍^[34]。

1.2.2 增产原理

酸化压裂是碳酸盐岩储层改造的主要技术手段,广泛应用于刺激石灰岩、白云石或酸溶解度高于85%的地层^[23]。其施工压力大于地层岩石破裂压力,形成人工裂缝,酸液沿着裂缝流动,有效作用距离可达几十到上百米,除解除近井带污染,还可以改变储层的流型,提高产量^[27]。酸化压裂中应优先选择物探测井显示储层含水量好,但试水效果差的层段,对于储层中原有裂隙,特别是一类和二类裂隙层效果较好。控制碳酸盐岩酸化压裂增产效果的2个重要因素是酸压裂缝的有效长度和裂缝

的导流能力(图3)。

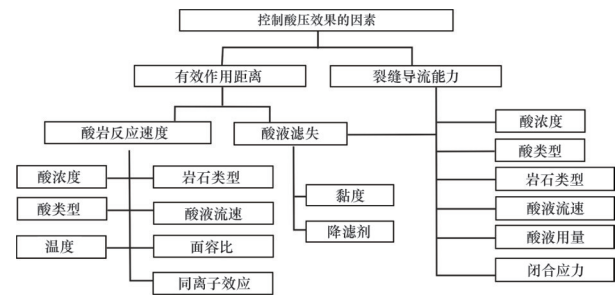


图3 控制酸化压裂效果的影响因素

为此,科学家研制了一系列的酸化压裂技术,适用于碳酸盐岩酸压技术主要分为普通酸压技术和深度酸压技术^[21]。酸化压裂基本流程为:压前评估→工艺方法优选→压裂液体系优选→压裂关键参数设计及方案确定→压力曲线诊断→压后效果评价^[35]。

压前评估主要是对目标井的可改造潜力进行评估,在大量搜集区域地质资料、钻完井资料、邻井资料等基础上,对储层生产指标、伤害指标、储层物性指标等进行评估,进而综合判断目标井是否具有改造潜力。工艺方法优选是针对不同类型的热储层,制定相应的改造工艺,提高储层改造效果,对于漏失量大、缝洞发育的地层,普通酸化压裂技术便能达到目标;对于天然裂缝较发育的地层,应采取大排量酸化或振荡酸压;对于缝洞不发育地层,应采用深度酸压^[36]。酸液体系优选包括酸液类型、酸液浓度、酸液用量等,决定着酸化过程中酸液作用效率以及酸蚀裂缝长度,与有效改造范围关系密切。施工参数设计:在进行酸化压裂之前,应对录井岩屑进行一系列的物理化学性质试验分析,正确选择酸化压裂的材料及注酸量等工程参数,从而达到在对储层伤害最小的前提下,最大限度地疏通岩溶裂隙通道^[37]。改造效果评价:评价指标包括产能大小、储层伤害指标和酸液突破距离模拟等^[35]。

综上,深部地热储层改造酸化技术的发展历程是由基质酸化逐步走向酸化压裂,由碳酸盐岩储层逐步走向砂岩储层再到依据不同储层特点均衡发展,由油气和页岩气逐步走向地热资源。

2 储层增产技术的应用

2.1 火山岩与砂岩热储增产技术

世界上高温地热资源相对集中区都是地壳活动的异常区,多火山和地震^[38]。国外大多数地热储层产自硅化岩浆或火山岩,火山岩热储层的矿物组分同砂岩相似,一般同时含有碳酸盐(方解石、白云石和菱铁矿等)和硅酸盐(石英和长石等)矿物。因此,国外大部分地热田地热井的酸化都与砂岩酸化有关^[39]。

在国外火山岩热储层地热田的地热井开采过程中,初始产量非常好,但经常会遇见2种工程状况导致生产井生产指数及回灌井注入指数降低,无法满足地热系统的产能要求:(1)井下作业过程中,钻井泥浆及岩屑对近井处地层造成污染,堵塞天然

裂缝通道;(2)地热开采中的冷-热水循环过程会打破天然热储层原有的水岩相互作用热力学平衡,水中所含的一些离子、化合物可以相互作用而发生结垢,结垢物通常有碳酸钙、无定形二氧化硅、硫酸钙等,这些结垢物依附在井筒和热储层的天然裂缝中进而增大热储阻力^[44]。

因此,近30年来,基质酸化增产技术广泛应用于国外火山岩和砂岩热储层的地热井中,包括:印度尼西亚、墨西哥、菲律宾和萨尔瓦多等高温地热资源集中区,通过酸液溶解砂粒之间的胶结物和部分砂粒,或孔隙中的泥质堵塞物以恢复和提高井底附近地层的渗透力,处理后储层的产能相应提高了2~10倍^[40]。表2总结了世界范围内典型地热田使用化学刺激的增产效果。

表2 典型地热田使用酸增产效果

地热田	化学刺激液	处理井数	化学刺激前后注入指数变化/ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot(10^5\text{Pa})^{-1}$)	增产效果	文献
Backman(菲律宾)	10%HCl-5%HF	2	0.68→3.01	4.4	[41]
			0.99→1.4	1.4	
Leyte(菲律宾)	10%HCl-5%HF	3	3.01→5.84	1.9	[42]、[43]
			0.68→1.77	2.6	
			1.52→10.8	7.1	
Tiwi(菲律宾)	HCl-HF	1	2.52→11.34	2.6	[41]
Mindanao(菲律宾)	10%HCl-5%HF	1	成功	—	[44]
Salak(印度尼西亚)	HCl-HF	1	4.7→12.1	2.6	[45]
Berlin(萨尔瓦多)	10%HCl-5%HF	5	1.6→7.6	4.8	[46]
			1.4→8.6	6.1	
			0.2→1.98	9.9	
			0.9→3.4	3.8	
			1.65→4.67	2.8	
Las Tres Virgenes(墨西哥)	10%HCl-5%HF	2	0.8→2.0	2.5	[38]
			1.2→3.7	3.1	
Los Azufres(墨西哥)	10%HCl-5%HF	1	3.3→9.1	2.8	[47]
Larderello(意大利)	HCl-HF	4	11→54	4.9	[48]
			4→25	6.3	
			1.5→18	12	
			11→54	4.9	

2.1.1 印度尼西亚地热田

Salak 地热田位于印度尼西亚雅加达南部 60 km 处^[45],是印度尼西亚最大的已开发地热田,地热储层主要由安山岩和流纹岩组成,储层温度 240~312℃。技术人员发现在 2004—2009 年钻探的 10 口生产井均显示出产能低的迹象,最初回灌和生产测试表明,主储层中大型天然裂缝的连通性差,井的渗透率低;完井和流量测试表明,这些井的产量仅为 31.75 t·h⁻¹,远低于预期初始蒸汽产量 68.04~86.18 t·h⁻¹;钻井记录显示,其中 9 口井在钻井过程

中泥浆损失量较大,储层连通性下降严重^[49]。

技术人员曾对一口井进行了大量注水和热刺激,效果不佳。因此,以 HCl+HF 溶液作为刺激液,选择不同的酸量和浓度,通过连续油管将刺激液注入到目标储层,成功率达到 100%,生产力和蒸汽输送能力都显著提高,总蒸汽增大 207.29 t·h⁻¹,热储渗透性和钻井生产性能得到了恢复。技术人员还发现用最大的氢氟酸浓度(9%)和负载量(21.48×10³ L/m)处理,渗透性可以达到最好的改善且注入指数在第 2 次酸化后没有增加(表 3^[49])。

表3 连续油管酸刺激结果

井编号	酸	负载量/(10 ³ L·m ⁻¹)	化学刺激前后注入指数变化/ (kg·s ⁻¹ ·(10 ⁵ Pa) ⁻¹)		蒸汽产量/MWe	
			工作前	工作后	工作前	工作后
AWI 8-7	7.5%HCl	8.05	3.8	9.7	4.2	9.8
	5%HF	16.11				
AWI 10-3	7.5%HCl	10.74	4.4	8.0	3.6	8.0
	5%HF	21.48				
AWI 11-6RD	15%HCl	10.74	1.5	6.8	0	3.6
	9%HF	21.48				
第二次酸化 AWI 11-6RD	15%HCl	10.74	6.8	6.8	3.6	3.6
	9%HF	21.48				

2.1.2 墨西哥地热田

墨西哥地热资源集中分布在中央火山带的 4 个地热田中,分别是:Las Tres Virgenes、Los Azufres、Cerro Prieto、Los Humeros^[50]。

2000 年,在 Los Azufres 地热田第一次进行了 2 口回灌井 AZ-7、AZ-15 的基质酸化,结果显示产量分别增长 13%、32%。2002 年,技术人员发现 Las Tres Virgenes 地热田的 2 口生产井 LV-11、LV-13 井口压力和蒸汽产量都较低,于是以 HCl 和 HF 溶液作为主体酸,用连续油管技术注入目标地层,结果显示 2 口井的注入率分别从刺激前的 8×10⁻⁶、1.2×10⁻⁵ L·s⁻¹·Pa⁻¹ 提高到 2.0×10⁻⁵、3.7×10⁻⁵ L·s⁻¹·Pa⁻¹^[51]。2005 年同样的技术被应用到 Los Azufres 地热田 AZ-9AD 井,结果显示该井的产量提高了 174%^[52]。2010 年又在 Cerro Prieto 地热田进行了几次尝试。2012 年科学家采用 12%HCl-3%HF 对

Los Humeros 地热田的 3 口井开展酸化,结果显示原始蒸汽流量增加了 7%^[24]。

墨西哥近年来开展了大量基质酸化增产作业,且大部分都为生产井,这些井因钻井液侵入而受到严重破坏,基质酸化的目的都是去除膨润土泥和二氧化硅或碳酸钙垢。这些井在酸化后测试产量均有显著增加,最高增长达到 540%(表 4^[24])。

虽然这些基质酸化增产作业,取得了良好的效果,但基质酸化并不能提高储层远端渗透率或创建新的通道,为提高井与储层天然裂隙连通性以获得更高的产能,墨西哥在位于 Los Azufres 地热田西南部的 AZ-47D 井实施了酸化压裂。该井于 2010 年 6 月完工,深度 1520 m,井底温度 218℃。研究表明从 960 m 深度开始存在高温渗透带,由于热液蚀变活跃,裂缝部分或全部被矿物封闭,缺乏连通性。该井开工生产后,一直没能达到较好的生产条件,

表4 墨西哥酸刺激增产效果

井编号	钻井年份	酸刺激年份	井类型	放置技术	蒸汽流速和回灌能力/(t·h ⁻¹)	酸化后生产和回灌能力提高/%
AZ-7	1992	2000	回灌井	钻杆	850	13
AZ-9AD	2003	2005	生产井	钻杆	68	174
AZ-8	1988	2005	回灌井	钻杆	410	128
AZ-56R	2002	2006	生产井	钻杆	70	367
AZ-52	1987	2008	回灌井	连续油管	170	143
AZ-68D	2006	2008	生产井	连续油管	64	540
AZ-51	1986	2010	生产井	连续油管	42	147

井口压力偏低,流量不足以实现商业化运营,产能指数 $9 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kPa}^{-1}$,与该地热田其他井相比差距较大。2010年10月采用10% HCl -5% HF 开展储层酸化压裂以增加井的有效生产半径。

在主酸阶段开始时最大压力为4880 kPa,达到最大压力后压力开始快速下降,直到该阶段结束压降为1860 kPa,说明裂缝已打开并与主要储层相连通(图4^[53])。在酸压作业26 d后,井口蒸汽产量 $26 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$,与初始产量 $5 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$,提高了500%,井口压力提高了8倍^[53]。

2.1.3 萨尔瓦多地热田

萨尔瓦多位于中美洲北部,是拥有地热资源最丰富的地区,但实际装机容量仅为预计发电容量的1/8,大多数地热项目低于其可开发的潜力。2000—2010年萨尔瓦多对4个火山型的地热田使用各种酸(泥酸、乙酸和氢氟酸)进行了40多次的增产处理,结果表明,精心设计的处理方法和特殊的酸

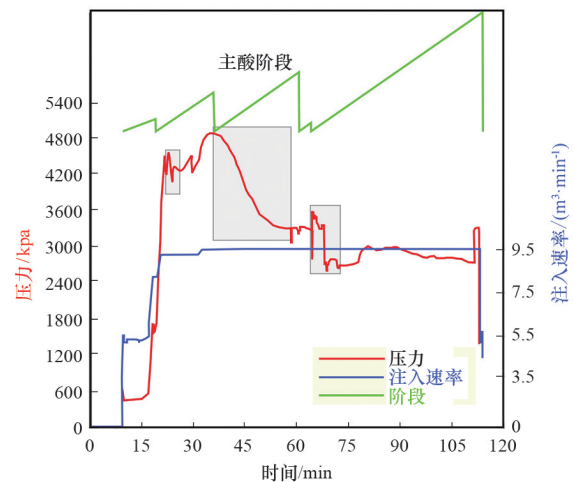


图4 AZ-47D井流量压力随时间变化曲线

混合物相结合,显著改善了地热储层的增产效果。从2000年到2010年,这些技术的应用带来了超过60 MWe的发电量和756 kg/s注入能力累积增量(表5)^[54]。

表5 萨尔瓦多2000—2010年酸刺激增产效果

井编号	酸刺激年份	井类型	放置技术	增量/(kg·s ⁻¹)	所用酸的类型
TR-14, TR1C	2000	回灌井	连续油管	61	泥酸7.5:1.5
TR-7, TR11A	2004	回灌井	井口	53	泥酸10:5
TR11A	2006	生产井	井口	43	砂岩酸6%(RPHF)
TR17A	2008	回灌井	井口	5.4	砂岩酸5%(RPHF)
AH-35 B	2009	回灌井	井口	50	砂岩酸6%(RPHF)

注:RPHF,延缓的磷化氢氟酸。

2.2 碳酸盐岩热储增产技术

目前针对碳酸盐岩储层改造方式主要有2种:(1)基于高浓度 HCl 的酸化技术,碳酸盐岩储层的主要矿物成分是方解石(CaCO_3)和白云石(MgCa

$(\text{CO}_3)_2$,其中以方解石为主,称为石灰岩,以白云石为主称为白云岩^[55],该地层的酸化一般都使用高浓度 HCl ,其浓度越高溶蚀能力越强,溶解一定体积的碳酸盐岩所需要的盐酸体积越少,残酸溶液也较

少,易于排出。(2)广泛应用于碳酸盐岩热储层增产改造的酸化压裂技术^[21]。

碳酸盐岩热储天然裂隙发育,非均质性极强,目前的利用仅仅局限在热储顶部约 200 m 的强岩溶发育带,深部热储层厚度更大,温度更好,但渗透性差,水量小(图 5),不同次级构造单元的碳酸盐岩地热井产量和回灌存在较大的差异,开发利用受到很多技术因素的制约。对于更具开发潜力的深部地热系统,地热资源开发利用的关键在于储层激发技术,酸化压裂技术是储层激发的有效手段,其主要的目的是压开裂缝,酸刻蚀裂缝,形成高导流能力的裂缝^[56-57]。



图5 强岩溶发育带和深部热储钻井岩心照片

2.2.1 德国地热田

近年来,德国建造了许多水力地热发电厂,主要是在慕尼黑地区莫拉斯盆地,这里的热储层由碳酸盐组成,大部分钻井均已进行酸化来提高产量,使用的主要酸是 7.5%~20% 的 HCl,以及少量的乙酸和柠檬酸作为混合。2013 年,对盆地 14 口地热井酸化处理结果显示,用 HCl 酸化可以显著改善碳酸盐岩储层地热井的产能,影响酸化的效果主要包括注入速度和酸液的温度,且第一次酸处理效果最大,而随后的酸化仅略微改善了地热井产量。数据还表明,持续酸化会导致地热井产能的退化,这说明基质酸化主要是消除了钻井过程造成的损害,并不会产生大量新的流动通道^[58]。

2.2.2 土耳其地热田

Alaşehir 地热田位于土耳其西部,为碳酸盐岩热储层,由于最初针对地热储层钻探的几口井产能低于预期,技术人员使用连续油管清洁和酸化刺激技术,使用 18% HCl,对储层开展酸化改造。酸化后生产试验和试井分析表明,清洗和酸化改造显著提高了渗透率,部分井增产超过初始值的 4 倍(表 6)^[40]。

表6 土耳其酸刺激增产效果

井编号	井口温度/℃	生产能力/(t·h ⁻¹)		增产效果/%
		酸化前	酸化后	
DP-1	159	190	800	421
BY-2	175	268	450	68
BY-6	175	250	500	100
BY-5	154	237	202	47

2.2.3 中国地热田

碳酸盐岩热储层是中国水热型地热资源开发的主战场,广泛分布于华北、关中、四川、汾渭、鄂尔多斯、苏北和鲁西南等盆地,约占陆地面积的 1/3^[2]。在垂向上碳酸盐岩热储主要包括了古生界寒武系和奥陶系以及中元古界蓟县系和长城系,地层厚度可达数千米^[59]。近年来国内研究者们对碳酸盐岩热储层的地热井开展了大量的酸化增产实验(表 7),这些研究成果和改造效果将为深部碳酸盐岩热储层增产改造提供指导经验。

2007 年,马忠平等^[60]在天津河西区复兴门 WR95 地热井选用 20% HCl 溶液,开展酸化压裂,地热井出水量由酸化前的 10.38 m³·h⁻¹ 增加到 95.67 m³·h⁻¹,井口水温由 53℃ 上升到 78℃。2015 年,王连成等^[37]对天津东丽开发区 DL-24 地热井和河东区 HD-02 回灌井开展酸化压裂,DL-24 地热井出水量由 10.38 m³·h⁻¹ 增至 95.67 m³·h⁻¹,井口流体温度由 53℃ 上升至 78℃,HD-02 回灌井由 40 m³·h⁻¹ 增加到 137 m³·h⁻¹,出水温度由 83℃ 上升至 87℃。2019 年,何铁柱等^[61]对浙江桐乡碳酸盐岩热储层地热井开展酸化压裂,成功扩大了地热井周边热储层的裂隙,涌水量由 120 m³·d⁻¹ 增加至 205.55 m³·d⁻¹,出水温度由 54℃ 上升至 62℃。2019 年,孙晓林等^[33]采用 20% HCl 溶液对天津王兰庄地热田 NK-28 井开展酸化压裂,地热井最大涌水量由 68 m³·h⁻¹ 提升至 110 m³·h⁻¹。2020 年,刘庆等^[35]采用大排量酸化压裂技术针对北京通州张家湾镇地热井储层改造,改造后单位涌水量提高了 65.51%,水温提高 2℃,产能系数提高了 59.51%,近井伤害得到完全解除,渗透率得到明显改善。2021 年,朱咸涛^[62]针对太原西温庄地热田碳酸盐岩地层 2 口地热井(西 T-1 和西 X-3)开展酸化,酸化压裂液分别为

表7 国内地热井的酸化压裂参数

位置	酸	井深/m	压裂前出水量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	压裂后出水量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	压裂前水温/ $^{\circ}\text{C}$	压裂后水温/ $^{\circ}\text{C}$
浙江桐乡	20% HCl	2500.26	120.0	205.55	54	62
太原西温庄	18% HCl	—	528	3120	55	63
	16% HCl	—	847.2	1074	60	50
北京通州张家湾镇	20% HCl	2501.80	603.39	887.08	44	47
天津王兰庄地热田 NK-28 地热井	20% HCl	2852	1632	2640	—	—
北京双桥地热田京通 4 号地热井	20% HCl	2800.88	957.87	2163.8	—	—
天津河西复兴门 WR95	20% HCl	2101.04	249.12	2296.08	53	78
天津东丽开发区 DL-24	—	—	2400	3768	81.4	89
河东区 HD-02 回灌井	—	—	960	2688	83	87
河北献县	—	4025	362.9	738.7	—	—

16% HCl 和 20% HCl, 改造后西 X-3 井效果明显温度由 55°C 上升到 63°C , 流量由 $22 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 增加至 $130 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 西 T-1 井所处位置物性发育较差, 改造效果较差。李文等^[63]对北京双桥地热田京通 4 号地热井开展压裂试验前后抽水和回灌试验, 结果表明单位涌水量增加 1.73 倍, 回灌量增加 1.4 倍, 最终其出水量增产 123% 以上, 出水温度增温 2.5°C 。研究者还在河北献县对高于庄组热储 3701~4025 m 段进行了整体酸化压裂, 压裂后水位降深由 43.74 m 降至 25.33 m, 变化幅度为 18.41 m; 单位涌水量由 $72.58 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ 增至 $147.74 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$, 增加 2 倍多。

3 雄安新区地热井酸化压裂技术

雄安新区是中国中东部地热资源开发利用条件最好的地区, 碳酸盐岩热储层是新区主要的地热

开发利用层位, 目前以开发蓟县系雾迷山组顶部热储为主^[64]。雄安新区容城地热田 D22 井位于中朝准地台(I级)华北断坳(II级)冀中台陷(III级)容城凸起(IV级)西南部, 终孔井深 3517 m, 揭露碳酸盐岩热储厚度达到 2537 m, 为目前雄安新区揭露碳酸盐岩厚度最大的地热井。钻孔从上到下依次揭露地层为第四系、新近系、蓟县系雾迷山组、蓟县系杨庄组和蓟县系高于庄组^[65]。2021 年 4 月, 天津凯雷油田技术有限公司受中国地质科学院水文地质环境地质研究所委托, 对 D22 井开展增产改造实验和产能测试施工。研究者创新采用对深部低渗透性碳酸盐岩储层更适用的水力喷射酸化压裂技术, 对 D22 井开展酸化压裂改造作业。压裂增产试验过程包括压裂测试和正式压裂 2 个阶段, 施工曲线见图 6^[11]。

从施工曲线(图 6)看, 泵入前置液阶段, 注入

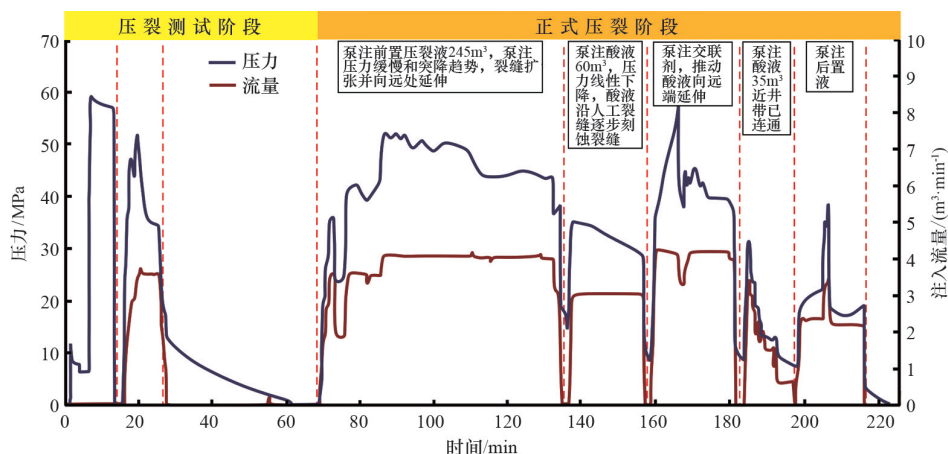


图6 D22井压裂流量压力随时间变化曲线

流量保持稳定,压力具有缓慢及突降的变化,表明裂隙起裂并向远处延伸,同时不断沟通其他天然裂隙,每一次新裂隙的连通反映在压力曲线上就是一次压力的突降;第一阶段胶凝酸注入后,流量保持稳定的情况下压力逐渐降低,表明酸液反应明显,酸蚀反应随主裂隙前行,热储层改造效果较好;第一阶段交联液注入,注入压力突然增大后出现波动式下降,表明交联液推动胶凝酸进一步刻蚀远端裂隙;第二阶段胶凝酸注入,注入流量和压力均呈现快速下降趋势,表明近井带裂隙已具备很好的连通性,胶凝酸快速向储层深部渗透;泵注顶替液阶段,酸液进一步向远端推移,连通范围进一步扩大。

对该井压裂增产前后进行了2次抽水试验,评估压裂效果,结果显示,目标层段3024~3174 m涌水量由增产改造前的 $4.72 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 增加到改造后的 $44.10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,提高了9.3倍;单位涌水量由增产改造前的 $0.024 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$ 增加到改造后的 $0.745 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$,提高了31倍;储层渗透系数由 $4.4 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 提高到了 $146.3 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$;井口水温由增产改造前的 60.0°C 升高到 66.5°C 。试验研究表明,可通过增产改造提高深部巨厚碳酸盐岩热储的开发潜能。

4 结论

1) 热储强化增产技术是提高深部热储开发能力的有效手段,通过热储层的渗透性提高岩体与流体之间的传热能力,最大限度地开发岩体中的热能。热储强化增产中的酸化技术主要包括基质酸化和酸化压裂2种。其中基质酸化应用广泛,大量的地热井都存在产量下降及堵塞的问题,基质酸化可以有效改善地热井产能,是移除地层损害最有效的方法之一,主要使用酸性化学刺激剂为土酸。

2) 酸化压裂是主要针对碳酸盐岩储层的改造措施,中国碳酸盐岩储层分布广泛,是水热型地热资源主要开采层,研究者开展了大量的酸化压裂试验,取得了良好的效果。其中,雄安新区D22井采用水力喷射酸化压裂,使得该井涌水量提高了9.3倍,井口水温升高 6.5°C ,可以为同类地区的深部热储强化增产工作提供借鉴。

3) 酸化压裂对不同地区、不同类型热储层的

增产改造效果存在差异,在低产地热井增产改造设计过程中,需要因地制宜选择合适的方法、工艺及参数。

参考文献 (References)

- [1] 国家发展改革委发布.“十四五”可再生能源发展规划[EB/OL]. (2022-06-01)[2022-09-04]. <https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202206/P020220602315650388122.pdf>.
- [2] 张薇, 王贵玲, 刘峰, 等. 中国沉积盆地型地热资源特征[J]. 中国地质, 2019, 46(2): 255-268.
- [3] Ma F, Wang G L, Sun H L, et al. Indication of hydrogen and oxygen stable isotopes on the characteristics and circulation patterns of medium-low temperature geothermal resources in the Guanzhong Basin, China[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2022, 10(1): 70-86.
- [4] 汪集旸, 胡圣标, 庞忠和, 等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 25-31.
- [5] 王贵玲, 张薇, 梁继运, 等. 中国地热资源潜力评价[J]. 地球学报, 2017, 38(4): 449-450.
- [6] 伍晓龙, 杜垚森, 王庆晓. 冀中拗陷区域JZ04井钻井工程设计[J]. 钻探工程, 2021, 48(7): 84-90.
- [7] 王思琪, 张保建, 李燕燕, 等. 雄安新区高阳地热田东北部深部古潜山聚热机制[J]. 地质科技通报, 2021, 40(3): 12-21.
- [8] 张云, 高亮, 刘现川, 等. 唐山马头营干热岩M-1井钻井工艺技术[J]. 地质与勘探, 2022, 58(1): 176-186.
- [9] 张森琦, 吴海东, 张杨, 等. 青海省贵德县热泉水干热岩体地质—地热地质特征[J]. 地质学报, 2020, 94(5): 1591-1605.
- [10] 叶顺友, 杨灿, 王海斌, 等. 海南福山凹陷花东1R井干热岩钻井关键技术[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(4): 10-16.
- [11] 马峰, 王贵玲, 朱喜, 等. 雄安新区深部碳酸盐岩热储强化增产试验研究[J]. 工程科学学报, 2022, 44(10): 1789-1798.
- [12] Huenges E. Enhanced geothermal systems: Review and status of research and development[J]. Geothermal Power Generation, 2016, 2016: 743-761.
- [13] 赵金洲, 任岚, 蒋廷学, 等. 中国页岩气压裂十年: 回顾与展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 121-142.
- [14] 那金. 化学刺激技术对增强型地热系统(EGS)热储层改造作用研究: 以松辽盆地营城组为例[D]. 长春: 吉林大

- 学, 2016.
- [15] King G E. Acidizing concepts—Matrix vs. Fracture acidizing[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1986, 38(5): 507–508.
- [16] Li N Y, Dai J X, Li J H, et al. Application status and research progress of shale reservoirs acid treatment technology[J]. *Natural Gas Industry B*, 2016, 3(2): 165–172.
- [17] Sutra E, Spada M, Burgherr P. Chemicals usage in stimulation processes for shale gas and deep geothermal systems: A comprehensive review and comparison[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 77: 1–11.
- [18] 任忠喜. 水力压裂增产技术进展[J]. *化学工程与装备*, 2020(10): 52, 45.
- [19] Schill E, Cuenot N, Genter A, et al. Review of the Hydraulic development in the multi-reservoir/multi-well EGS project of soultz-sous-forets[C]//*Proceedings of World Geothermal Congress 2015*. Melbourne: International Geothermal Association, 2015: 19–25.
- [20] 林天懿, 柯柏林, 杨森, 等. 碳酸盐岩热储酸化压裂增产机理研究及应用[J]. *城市地质*, 2018, 13(3): 21–26.
- [21] 朱丽君, 刘国良. 酸化压裂工艺技术综述[J]. *安徽化工*, 2015, 41(2): 9.
- [22] Grubelich M C, King D, Knudsen S, et al. An overview of a high energy stimulation technique for geothermal applications[C]//*Proceedings of the World Geothermal Congress 2015*. Melbourne: International Geothermal Association, 2015: 1–6.
- [23] Portier S, André L, Vuataz F D. Review on chemical stimulation techniques in oil industry and applications to eothermal systems[R]. Neuchâtel: Deep Heat Mining Association, 2007.
- [24] Kalfayan L J. Fracture acidizing: History, present state, and future[C]//*SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*. Richardson: SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference held in College Station, 2007: SPE-106371-MS.
- [25] Portier S, Vuataz F D, Nami P, et al. Chemical stimulation techniques for geothermal wells: Experiments on the three-well EGS system at Soultz-sous-Forêts, France[J]. *Geothermics*, 2009, 38(4): 349–359.
- [26] Strawn J A. Results of acid treatment in hydrothermal direct heat experiment wells[C]//*Proceedings of Geothermal Resource Council Meeting*. Salt Lake City: OSTI, 1980: 427–430.
- [27] Al-Harthi S, Bustos O A, Samuel M, et al. Options for high-temperature well stimulation[J]. *Oilfield Review*, 2008, 20(4): 52–62.
- [28] 冯波, 许佳男, 许天福, 等. 化学刺激技术在干热岩储层改造中的应用与最新进展[J]. *地球科学与环境学报*, 2019, 41(5): 577–591.
- [29] Mcleod H O. Matrix acidizing[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1984, 36(13): 2055–2069.
- [30] 刘明亮, 庄亚芹, 周超, 等. 化学刺激技术在增强型地热系统中的应用: 理论、实践与展望[J]. *地球科学与环境学报*, 2016, 38(2): 267–276.
- [31] Entingh D J. Geothermal well stimulation experiments in the United States[C]//*Proceedings of the World Geothermal Congress 2000*. Kyushu-Tohoku: International Geothermal Association, 2000: 3689–3694.
- [32] 毛峥, 李亭, 刘德华, 等. 水力压裂支撑剂应用现状与研究进展[J]. *应用化工*, 2022, 51(2): 525–530, 537.
- [33] 孙晓林, 杨宝美, 高新智, 等. 天津城区奥陶系灰岩热储层酸化压裂增产试验研究[J]. *河北工业大学学报*, 2019, 48(6): 87–92.
- [34] 申云飞, 卢玮, 陈莹, 等. 水力压裂技术在豫西基岩地热井增产中的应用研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2016, 43(10): 253–256.
- [35] 刘庆, 柯柏林, 林天懿, 等. 酸化压裂技术在碳酸盐岩热储中的应用[J]. *城市地质*, 2020, 15(3): 327–335.
- [36] 赵永平, 曹元平, 李龙. 酸化压裂技术在油气田开发中的应用研究[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2012, 33(16): 20.
- [37] 王连成, 李明朗, 程万庆, 等. 酸化压裂方法在碳酸盐岩热储层中的应用[J]. *水文地质工程地质*, 2010, 37(5): 128–132.
- [38] Jaimes-Maldonado J G, Sánchez-Velasco R. Acid stimulation of production wells in Las Tres Vírgenes geothermal field, BCS, México[J]. *Geothermal Resources Council Transactions*, 2003, 27: 699–705.
- [39] Kalfayan L. Production enhancement with acid stimulation[M]. 2nd ed. Tulsa: PennWell Corporation, 2008.
- [40] Akin S, Yildirim N, Yazman M, et al. Coiled tubing acid stimulation of Alaehir Geothermal Field, Turkey[C]//*Proceedings of World Geothermal Congress 2015*. Melbourne: International Geothermal Association, 2015: 1–6.
- [41] Buning B C, Malate R C M, Lacanilao A M, et al. Recent experiments in acid stimulation technology by PNOC-Energy Development Corporation, Philippines[C]//*Proceedings of the World Geothermal Congress 1995*. Florence: International Geothermal Association, 1995: 1807–1812.

- [42] Yglopaz D M, Buning B C, Malate R C M, et al. Proving the Mahanagdong B resource: A case of a large-scale well stimulation strategy, Leyte Geothermal Power Project, Philippines[C]//Proceedings of the 23rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford: Stanford University, 1998: 51-56.
- [43] Malate R C M, Yglopaz D M, Austria J J C, et al. Acid stimulation of injection wells in the Leyte geothermal power project, Philippines[C]//Proceedings of the Twenty-Two Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford: Stanford University, 1997: 267-272.
- [44] Buning B C, Malate R C M, Austria, J J C, et al. Casing perforation and acid treatment of well SK-2D Mindanao 1 Geothermal project, Philippines[C]//Proceedings of the Twenty-Two Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford: Stanford University, 1997: 273-277.
- [45] Pasikki R G, Gilmore T G. Coiled tubing acid stimulation: the case of Awi 8-7 production well in Salak geothermal field, Indonesia[C]//Proceedings of Thirty-First Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford: Stanford University, 2006: SGP-TR-179.
- [46] Barrios L A, Quijano J E, Romero R E, et al. Enhanced permeability by chemical stimulation at the Berlin Geothermal Field, El Salvador[J]. Geothermal Resources Council Transactions, 2002, 26: 73-78.
- [47] Flores M, Barajas E N, Rodriguez M A. Productivity analysis and acid treatment of well AZ-9AD at the Los Azufres geothermal field, Mexico[J]. Geothermal Resources Council Transactions, 2006, 30: 791-796.
- [48] Cappetti G. How EGS is investigated in the case of the Larderello geothermal field[C]//Proceedings of the Engine Launching Conference, Orléans: SlideServe, 2006, 32: 12-15.
- [49] Pasikki R G, Libert F, Yoshioka K, et al. Well stimulation techniques applied at the Salak geothermal field[C]//Proceedings of the World Geothermal Congress 2010, Bali Indonesia: International Geothermal Association, 2010: 1-11.
- [50] Alcalá L M. Acid stimulation of geothermal wells in Mexico, El Salvador and the Philippines[R]. Reykjavik: Geothermal Training Programme, 2012.
- [51] Verma S P, Pandarinath K, Santoyo E, et al. Fluid chemistry and temperatures prior to exploitation at the Las Tres Virgenes geothermal field, Mexico[J]. Geothermics, 2006, 35(2): 156-180.
- [52] Flores-Armenta M. Geothermal activity and development in Mexico: Keeping the production going[R]. Santa Tecla: UNU-GTP, LaGeo, 2014.
- [53] Flores-Armenta M, Ramirez-Montes M A, Morales-Alcalá L. Acid Fracturing Results for Well AZ-47D, Los Azufres Geothermal Field in Mexico[C]//Proceedings of the World Geothermal Congress 2015, Melbourne: International Geothermal Association, 2015: 1-9.
- [54] Barrios L, Guerra E, Jacobo P, et al. Chemical stimulation applied in geothermal fields of EL SALVADOR, years 2000-2009[R]. Santa Tecla: UNU-GTP, LaGeo, 2011.
- [55] Wang Y, Liu Y G, Bian K, et al. Seepage-heat transfer coupling process of low temperature return water injected into geothermal reservoir in carbonate rocks in Xian County, China[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2020, 8(4): 305-314.
- [56] 马峰, 王潇媛, 王贵玲, 等. 浅层地热能与干热岩资源潜力及其开发前景对比分析[J]. 科技导报, 2015, 33(19): 49-53.
- [57] 王贵玲, 马峰, 蔺文静, 等. 干热岩资源开发工程储层激发研究进展[J]. 科技导报, 2015, 33(11): 103-107.
- [58] Schumacher S, Schulz R. Effectiveness of acidizing geothermal wells in the south German molasse basin[J]. Geothermal Energy Science, 2013, 1(1): 1-11.
- [59] 徐浩然, 程镜如, 赵志宏. 华北地区碳酸盐岩热储层酸化压裂模拟方法与应用[J]. 地质学报, 2020, 94(7): 2157-2165.
- [60] 马忠平, 杜槟, 鲍卫和, 等. 酸化压裂工艺在地热井中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2007, 34(2): 45-47.
- [61] 何铁柱, 孙振添. 酸化压裂工艺在浙江桐乡地热井增产中的应用[J]. 城市地质, 2019, 14(4): 49-54.
- [62] 朱咸涛. 酸压技术在碳酸盐岩低效地热井中的应用[J]. 石化技术, 2021, 28(6): 107-108.
- [63] 李文, 孔祥军, 袁利娟, 等. 北京通州地区地热井酸化压裂增灌试验研究[J]. 城市地质, 2019, 14(4): 43-48.
- [64] 马峰, 王贵玲, 张薇, 等. 雄安新区容城地热田热储空间结构及资源潜力[J]. 地质学报, 2020, 94(7): 1981-1990.
- [65] 王颖晋, 马峰, 谢和平, 等. 雄安新区容城地热田蓟县系热储裂隙表征与聚热特征研究[J]. 地质学报, 2021, 95(6): 1902-1914.

Application of geothermal reservoir modification technologies and prospective

YUAN Ruoxi¹, MA Feng^{1*}, ZHANG Wei¹, ZHU Xi¹, LU Chuan¹, ZHANG Hanxiong¹, YU Mingxiao¹, LI Chutong²

1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology; Technology Innovation Center for Geothermal & Hot Dry Rock Exploration and Development, Ministry of Natural Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China
2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

Abstract The reservoir modification technology is an effective means to improve the development capacity of deep thermal reservoirs. It increases the heat transfer capacity between the rock and the fluid by increasing the permeability of the thermal reservoir, maximizing the exploitation of the thermal energy in the rock. This paper reviews the development history and the production enhancement principle of the acidification technology in reservoir modification technologies, compares the relevant cases and researches of the acidification production enhancement carried out in the canonical geothermal fields abroad, as well as the commonly used acidic chemical stimulants and the production enhancement effects. By analyzing the experience and the lessons learned from the reservoir modification abroad, some guidance is provided for the modification of deep carbonate thermal reservoirs in China.

Keywords fracture acidizing; matrix acidizing; carbonates; sandstone; reservoir modification ●



(责任编辑 刘志远)