

四川盆地二叠系茅口组海相缝洞型气藏试气关键技术

王洪广, 庞金海, 谷爱民, 陈大厂

中石化中原石油工程有限公司井下特种作业公司 河南濮阳 457164

通讯作者: Email: 605059036@qq.com

引用: 王洪广, 庞金海, 谷爱民, 等. 四川盆地二叠系茅口组海相缝洞型气藏试气关键技术[J]. 油气井测试, 2024, 33(3): 38-45.

Cite: WANG Hongguang, PANG Jinhai, GU Aimin, et al. Key technologies for gas testing in marine fractured-vuggy gas reservoirs in Permian Maokou formation, Sichuan basin[J]. Well Testing, 2024, 33(3): 38-45.

摘要 四川盆地二叠系茅口组过平衡钻井液渗滤污染严重, 对深穿透射孔、酸压工艺、压井堵漏等试气施工关键技术提出了更高要求。通过对射孔枪弹、射孔液、射孔引爆方式进行优化, 同时, 通过全岩矿物溶蚀实验、排量预测研究, 优化了酸压工艺、堵漏浆配方及压井堵漏方法, 形成了超深穿透射孔、酸压、压井堵漏等系列关键工艺技术, 满足了缝洞体储层试气技术需求。现场应用 6 口井/8 层, 均获得了工业气流, 单层试气周期平均缩短 9 d, 实现了四川盆地二叠系海相碳酸盐岩茅口组气藏“1”字号井的勘探突破。该技术为同类型储层试气施工提供了技术参考。

关键词 二叠系茅口组; 缝洞储集体; 试气技术; 喷漏同存; 酸压; 压井堵漏; 优化改进

中图分类号: TE273

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.03.007

Key technologies for gas testing in marine fractured-vuggy gas reservoirs in Permian Maokou formation, Sichuan basin

WANG Hongguang, PANG Jinhai, GU Aimin, CHEN Dachang

Sinopec Zhongyuan Petroleum Engineering Co., Ltd., Downhole Special Operation Company, Puyang, Henan 457164, China

Abstract: In the Sichuan basin, severe filtration contamination from overbalanced drilling fluids in the Permian Maokou formation poses significant challenges for critical gas testing technologies such as deep penetration perforation, acid fracturing, well control, and leakage prevention. By optimizing perforation gun charges, perforation fluids, and detonation methods, as well as through comprehensive whole-rock mineral dissolution experiments and displacement prediction studies, the acid fracturing processes, leak prevention slurry formulations, and well control and leakage prevention techniques were optimized, and a series of advanced technologies including ultra-deep penetration perforation, acid fracturing, well control, and leakage prevention were developed, which meet the technical requirements for gas testing in fractured-vuggy reservoirs. Field applications in six wells across eight layers have yielded industrial gas flows, with the average single-layer testing period reduced by nine days, which realized a significant breakthrough in the exploration of Wells “1” in the marine carbonate gas reservoirs in Permian Maokou formation in the Sichuan basin. These technologies provide a valuable technical reference for gas testing operations in similar reservoirs.

Keywords: Permian Maokou formation; fractured-vuggy reservoir; gas testing technology; blowout-leakage coexistence; acid fracturing; well control and leakage prevention; optimization and improvement

四川盆地二叠系茅口组海相碳酸盐岩储层埋藏深, 经多期构造运动和古岩溶共同作用形成缝、洞型复杂气藏。该类气藏储集体类型多、成因机制复杂, 常表现为不同尺度孔、缝、洞交错发育, 缝洞体呈片状分布, 纵、横向缝隙连通程度差, 气、水关系复杂, 孔、洞是流体主要储集空间, 裂缝既是主要储集空间, 也是主要的流体连通通道。储层空间形态多样、大小悬殊、分布不均, 具有很强的非均质性^[1-3]。由于大型洞穴和构造、溶蚀孔洞缝发育, 钻

井过程中常伴随着严重漏失, 完井试气过程中喷漏同存, 压井极易发生漏失, 压井堵漏难度大, 污染储层严重。录井及测井资料显示, 不同区域储层地质特征及物性差异大, 须通过酸压改造才能建产^[4]。

国外在 20 世纪 70 年代形成了成熟的碳酸盐酸化理论^[5-6], 国内胥云等^[7-8]对碳酸盐岩储层酸压理论进行了较为全面总结, 并在青海尕斯 E₃ 复杂岩性油藏进行了应用^[9]。近几年, 苟波^[10]、何春明等^[11]对裂缝型碳酸盐岩储层酸压技术进行了研究。盆

内碳酸盐岩缝洞地质储集体气藏气源丰富,其中 60% 以上的碳酸盐岩气藏为缝洞型^[12]。通过加大施工规模、缓速酸、清洁转向酸等增加酸蚀缝延伸,因射孔穿深小,酸液滤失量大,酸蚀作用距离短,实现深度改造难度大,现有工艺技术适应性差。已施工 36 口井(67 层)试气结果表明,改造效果不理想井(层)占 56%。如川中磨溪构造茅口组磨溪 XXX 井,采用自生酸+胶凝酸交替注入改造,因近井污染堵塞严重,射孔穿深小,试气产量仅 $1.26 \times 10^4 \text{ m}^3$;川西北下二叠统的龙 XXX 井,采用前置酸+高低黏滑溜水交替注入改造,因酸液适应性差,酸蚀作用范围小,试气产量仅 $0.56 \times 10^4 \text{ m}^3$;川南低陡褶皱带福宝 XXX 井,采用交联酸酸压施工,由于喷漏同存,井喷失控。射孔穿深、酸压液体体系及工艺、压井堵漏技术,成为了制约碳酸盐岩缝洞型气藏完井试气施工的技术瓶颈。认识缝洞型碳酸盐岩储层地质特征,探索深穿透射孔、酸压改造及压井堵漏技术,对于此类气藏勘探突破,具有重要的现实意义。

1 地质特征

四川盆地二叠系茅口组以海相碳酸盐岩沉积为主,区域内第四轮资源评价天然气资源量 $1.47 \times 10^{12} \text{ m}^3$,探明储量 $852.03 \times 10^8 \text{ m}^3$,资源量十分丰富,具有很大的勘探潜力^[13]。受多期构造运动影响,成因机制复杂,储集体类型多样^[14-15],且具明显的强非均质性。

(1) 储层类型主要为裂缝-孔洞型-多缝洞型等,各项异性差异系数大^[16-17],如图 1 所示,缝、洞系统部分在同一水平面上,部分在同一垂直面上,或以任意角度连接;不同区域,缝、洞发育及连通程度不均一^[18],从而形成串珠状复杂区带地层,如图 2 所示,表现为串珠、片状、杂乱和空白地质体,片状发育区之间被极狭窄且渗透性好的通道(裂缝)连接^[19-20]。

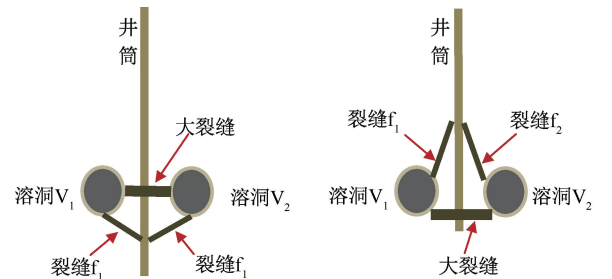


图 1 复杂地层缝洞结构分布示意图
Fig. 1 Distribution diagram of cracks and caverns in complex strata

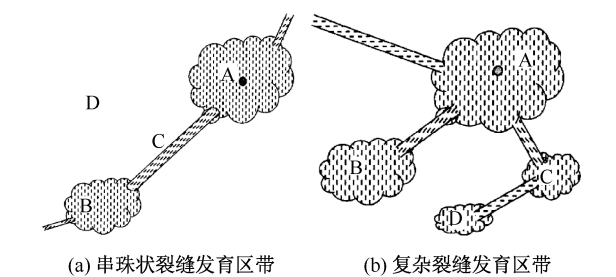


图 2 串珠状复杂区带地层结构示意图
Fig. 2 Structure diagram of beaded fracture and complex fracture zone

- (2) 基质普遍低孔、渗,渗透率悬殊大,裂缝与基质渗流能力存在数量级差别(0.001~44.95 mD)。
- (3) 气藏埋深差异大(3 500~7 000 m)。
- (4) 压力系统差异大,使用钻井液密度 $1.51 \sim 2.3 \text{ g/cm}^3$,部分已试气井实测压力系数 $1.4 \sim 2.2$ 。气藏总体为构造控制、异常高压气藏。
- (5) 测井解释气层类型多样,包含了 I、II、III 类气层及裂缝层、含气层、干层。
- (6) 不同埋深,纵向上层间产量差异大,平面上井间产量差异大,已试气井,部分井含水,如表 1 所示。

表 1 茅口组试气结果					
Table 1 Gas test results of Maokou formation					
井号	层位	地层压力系数	气产量/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	水产量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	试气结论
M1	茅口组	1.99	0.46	541	含气水层
YB6	茅三段	>1.83	0	0	干层
YB7 侧 1	茅口组	2.10	53.02	293	气水层
YB101	茅三段	1.85	3.65	0	低产气层
	茅三段	1.57	12.36	0	中产气层
XT1	茅一段	1.93	7.58	0	低产气层
	茅二段	1.36	17.38	0	中产气层

2 试气技术难点

(1) 茅口组缝洞型储层,具有强非均质性,部分井异常高压、高温、高产、高含酸性腐蚀气体,尤其是元坝地区探井深度甚至大于 6 000 m,储层温度高,试气施工工具承压相对较低,试气难度极大,很难满足加重酸压施工需要,作业施工风险大,严重制约了施工的安全性与稳定性。

(2) 地层温度高,破裂压力高,施工泵压高,注酸困难或施工排量低,泵注时间长,酸液在高温高压下对入井管材、阀件等动态腐蚀严重;酸岩反应速度快、滤失大,酸蚀作用范围小,酸压改造施工难度大,对液体的降阻性能、井下工具、井口装置和施工设备承压能力均有较高要求。

(3) 储层埋藏深, 温度高达 160 ℃, 此类储层破裂压力极高、井深管柱摩阻大、储层致密吸液能力低等导致施工压力极高。此工况不仅增加了施工风险及对施工设备、管柱的损害, 而且制约着酸压施工排量。若酸压不能大排量注入, 活性酸液不能进入地层深部, 就难以实现对低渗透储层大规模酸压改造的基本要求。因此, 如何实施大排量、如何优化酸压施工参数等来达到深度酸压, 是茅口组气藏效益勘探亟待解决的难题。

(4) 海相碳酸盐岩地层的漏失通道主要以裂缝和溶洞为主, 尤其在构造的主体部位上, 井漏地层多, 由于长期地下水的侵蚀, 裂缝、溶洞发育, 井漏现象比较严重, 常见于垂直型、大倾角型裂缝漏失、孔隙漏失和溶洞漏失等。由于区内勘探程度低, 地压系数不是很清楚, 酸压放喷后, 近井地层能量亏空严重, 在对产层段进行压井作业时, 地层容易再次发生井漏, 压井堵漏过程中的“喷漏同存”, 增加了压井堵漏作业难度, 同时, 堵漏浆及堵漏材料性能、数量不易预估, 多准备则造成浪费, 少准备则可能造成其它井控风险。

(5) 由于储层的强非均质性, 孔缝洞片状非连续性分布, 地压系数的不确定性, 过平衡钻井液的应用, 常导致钻井液大量漏失, 常规射孔技术穿透近井钻井液渗滤污染带难度大。地层温度高, 射孔器材长时间处于高温环境中, 可能造成射孔弹、压力起爆器失效, 以及导爆索中断和高压下射孔枪变形、卡枪等事故, 对射孔器材性能要求高。

为加大区内勘探程度, 增加探明地质储量, 形成效益勘探开发, 降低试气施工过程风险, 有必要针对性优化射孔、酸压、压井堵漏等关键试气工艺技术。

3 试气关键技术

茅口组地层为近年来四川盆地内重要的勘探开发新层系, 试气工艺技术方案经不断论证优化, 完善设备配套, 形成了超深穿透射孔、酸压、压井堵漏等系列关键工艺技术, 满足了缝洞体地层试气技术要求。2023 年以来, 探区内共试气施工 6 口井/8 层, 均获得了工业气流, 单层试气周期平均缩短 9 d, 未发生任何井下故障复杂, 有力支撑了探区内茅口组效益勘探开发。

3.1 射孔技术

(1) 射孔枪、弹选型

茅口组地层孔缝洞发育, 钻井过程中放空、井漏频发, 近井漏失钻井液污染渗滤带大。根据井深、地温、井筒作业液体类型及性能, 考虑孔眼摩阻和穿深, 优选采用 $\phi 89$ mm 盲孔枪、深穿透射孔弹, 确保射穿套管、水泥环及钻井污染带。优化设计清水条件下射孔枪身耐压 ≥ 140 MPa, 泥浆条件下射孔枪身耐压 ≥ 210 MPa, 射孔弹耐温 ≥ 150 ℃。据井深加深, 井筒作业液体密度提高, 相应提高枪弹耐压、耐温级别, 确保地层温度条件下 120 h 不失效及射孔一次成功率。

(2) 射孔压井液选择

射孔完井液, 要求具有油气层保护功能、流变性好、传压性好、无腐蚀性, 且满足安全环保要求。根据目的层预测压力系数, 优化泥浆条件下射孔液为相应密度的优质泥浆, 确保射孔加压有效传递和引爆射孔。

(3) 射孔引爆方式

为保证泥浆条件下射孔, 井口加压射孔压力不作用于射孔枪身, 减少枪身承压, 避免炸枪, 设计采用压力开孔起爆方式, 井口油管加压引爆射孔枪, 达到销钉剪断设计值时, 销钉被剪断, 压力开孔起爆装置击发起爆, 引爆传爆管、导爆索和射孔弹, 承压销钉被剪断的同时, 开孔器内套上行, 打开生产孔道, 使油管与套管连通。

3.2 酸压工艺技术

盆地内茅口组海相碳酸盐岩储层具有超深、高温、高压、高含硫、低孔低渗特征, II、III 类气层居多, 钻井泥浆污染堵塞严重, 自然产能较低, 通常需要通过酸压(化)改造才能获得工业性产能。针对海相碳酸盐岩储层酸压改造的技术难点, 开展了酸压技术研究, 采用胶凝酸/闭合酸酸压工艺, 有效解除了泥浆等储层污染堵塞, 沟通了较大范围裂缝和孔隙, 提高了单井产量。

3.2.1 酸压工艺优化

灰岩孔隙-裂缝型储层, 井深, 温度高, 酸岩反应速度快; 酸蚀形成蚓孔, 加剧酸液滤失, 综合影响有效酸蚀作用距离及酸压效果。Coulter&Crowe 等人(1976)提出前置液与酸液交替注入酸压工艺, 类似前置液酸压工艺, 以其降滤失性及对储层的不均匀刻蚀程度优于前置液酸压, 目前已成为实现深度酸压的主流技术而广泛应用。优化引用此酸压工艺技术, 利用非反应液(压裂液或滑溜水)的注入, 降低储层温度和酸岩反应速度, 延伸酸蚀裂缝长

度,实现深度酸压;利用 2 种液体的”黏性指进”形成差异化刻蚀(见图 3),使得液体波及到的动态裂缝最大程度成为“有效裂缝”。



图 3 多级交替注入酸压指进效应
Fig. 3 Multistage alternating injection acid pressure fingering effect

3.2.2 酸液液体优化

(1)全岩矿物组分

茅口组岩性以浅灰-灰色砂屑灰岩、生屑灰岩灰岩为主,全岩矿物成分分析,如表 2 所示,岩石主要成分为方解石,平均含量 94.73%,少量重晶石、石英及黏土矿物。

表 2 茅口组全岩矿物分析结果
Table 2 Results of whole rock mineral analysis in Maokou formation

样品	矿物含量/%				
	黏土	重晶石	石英	斜长石	方解石
1					
2	0.99	5.98	1.10	1.59	90.39
3	0.48	3.25	0.40	0.68	99.07
4	0.63	2.35	0.32	1.21	91.02
5	0.78	1.86	0.26	1.02	89.89
6	0.96	5.36	0.84	0.48	95.41
7	0.61	2.18	1.01	0.36	90.37
8	0.81	2.24	0.96	0.97	96.15
9	0.92	2.13	0.43	0.42	98.51
10	0.65	2.37	0.94	0.35	99.15
11	0.47	2.19	1.21	0.81	97.36
平均	0.73	2.99	0.75	0.79	94.73

(2)酸溶蚀实验

岩屑成分以方解石为主,酸岩溶蚀实验结果(见表 3),20% HCl 溶蚀率 90%以上,高于 15% HCl 溶蚀率。因此,优选浓度 20% HCl、耐温 150 ℃、180 ℃、200 ℃系列胶凝酸为主体酸液体系,酸液黏度 $\geq 20\text{ mPa}\cdot\text{s}$,密度 $\geq 1.05\text{ g/cm}^3$,腐蚀速率 150 ℃时 $\leq 200\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 、180 ℃时 $\leq 210\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 、200 ℃时 $\leq 220\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。优化交替液体为滑溜水,其表观黏度 5~15 mPa·s,降阻率 $\geq 80\%$,防膨率 $\geq 70\%$ 。

表 3 茅口组岩屑酸溶实验结果
Table 3 Results of acid dissolution experiment of cuttings from Maokou formation

样品	15% HCl/%	20% HCl/%
1	85.38	90.01
2	81.65	92.57
3	84.25	91.12
4	83.65	93.25
5	85.36	92.61
6	86.18	93.67
7	82.36	91.36
8	84.36	93.18
9	81.23	93.17
10	83.25	91.25
11	80.36	92.07
平均	83.46	92.21

(3)优化液体配方

前置/闭合酸:20% HCl+0.31%胶凝剂+2.21%缓蚀剂+0.83%铁离子稳剂+0.8%助排剂。

胶凝酸:20% HCl+0.73%胶凝剂+2.3%缓蚀剂+0.82%铁离子稳剂+0.8%助排剂。

滑溜水:0.2%胍胶+1.1%助排剂+0.25%黏土稳定剂+清水。

3.2.3 酸压规模

随着酸液规模的增加,酸蚀缝长、缝高及缝宽相应增加。以酸蚀裂缝长度为目标,结合茅口组储层地质特征,进行酸压裂缝动态模拟(见图 4),优化常规酸压规模为 300~500 m³ 酸液和 150~300 m³ 滑溜水。模拟射孔段裂缝长度 101.8 m,裂缝总高度 64.1 m,平均裂缝宽度 1.28 cm。

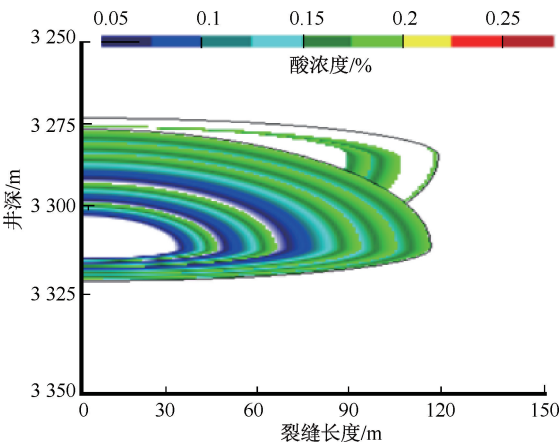


图 4 酸压酸蚀缝长模拟图
Fig. 4 Simulation diagram of acid pressure and acid corrosion seam length

3.2.4 泵注程序优化

(1)排量压力预测

模拟茅口组吸酸压力梯度 0.022~0.032 MPa/m 下,计算不同排量下的井口施工压力(见表 4)。设

计施工排量 2~5 m³/min, 105 MPa 酸压井口、施工限压 95 MPa 下,排量可提高至 5 m³/min 以上。

表 4 茅口组酸压施工压力与排量预测
Table 4 Prediction of acid pressure and displacement in Maokou formation

延伸压力梯度 /(MPa·m ⁻¹)	延伸压力 /MPa	不同排量(m ³ /min ⁻¹)下的井口施工压力/MPa					
		1	2	3	4	5	6
0.022	73.04	43.48	46.77	51.61	57.73	65.02	73.44
0.024	89.68	50.12	53.41	58.25	43.01	71.66	80.08
0.026	83.32	56.76	60.05	64.89	71.01	78.30	86.72
0.028	91.96	63.40	66.69	71.53	77.65	84.94	93.36
0.03	98.60	70.04	73.33	78.17	84.29	91.58	100.00
0.032	107.24	76.68	79.97	84.81	90.93	98.22	106.64
114.3 mm+89 mm 管柱摩阻		3.64	6.93	11.77	17.89	25.18	33.60

(2)泵注程序

现场实践及室内交替注入实验表明,压裂液+胶凝酸或压裂液+转向酸等,不同黏度液体交替注入,能够形成较好的黏性指进,且交替级数越多、排量越大,酸蚀沟通孔、洞、缝越多,从而形成向井流动通道,如图 5~图 6 所示。根据酸压规

模、限压、吸酸能力、管路摩阻等,优化设计胶凝酸+滑溜水交替泵注级数、泵压、施工排量和阶段液量,如表 5 为 XX 井设计泵注程序,现场条件允许的情况下,应尽可能增加胶凝酸+滑溜水交替泵注级数,提高施工排量,实现储层深度酸压改造。



图 5 不同交替级数指进形态对比
Fig. 5 Contrast of different alternate series of exponents

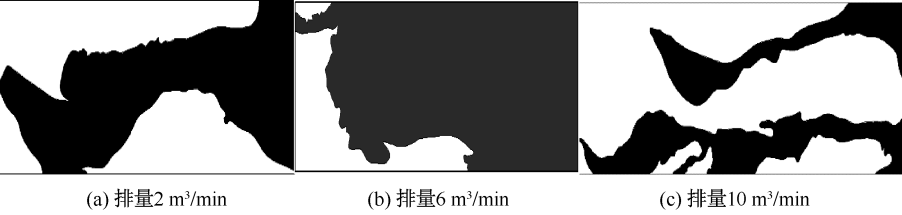


图 6 不同施工排量指进形态对比
Fig. 6 Comparison of different construction displacement pointing patterns

表 5 XX 井泵注程序

Table 5 XX well pump injection procedure					
序号	施工阶段	液体	施工排量/ (m ³ ·min ⁻¹)	泵注压力/ MPa	注入液量/ m ³
1	前置液	滑溜水	1~4	<95	/
2	前置液	前置酸	1~4	<95	/
3	酸压	胶凝酸	2~5	<95	/
4	酸压	滑溜水	2~5	<95	/
5	酸压	胶凝酸	2~5	<95	/
6	酸压	滑溜水	2~5	<95	/
7	酸压	胶凝酸	2~5	<95	/
...			
8	闭合酸	闭合酸	1~3	<95	/
9	顶替	滑溜水	1~3	<95	/
10	测压降 30 min				

3.3 压井堵漏控制技术

孔、缝、洞发育储层,井漏情况复杂多变,常伴随着返吐、井涌等,不同井、不同层,产能差异大,压井液及堵漏浆密度、性能不易有效确定,压井堵漏成为了制约此类地层钻探开发的技术瓶颈之一。

3.3.1 堵漏浆配方

结合钻井、测井、录井、邻井试气等区域地质资料,将茅口组地层分为孔隙型、裂缝-孔隙型、裂缝-孔洞型三种类型,对孔缝洞尺寸大小、空间几何形态等进行识别分类,对不同漏失工况下的堵漏材料选取、配方、浓度、粒级匹配及其配比等,进行试验

研究,目前已形成了一套处理缝洞型储层漏失的堵漏浆配方,如表 6 所示,即不同的漏速,对应不同级别的堵漏浆配方,以很好的形成桥架暂堵,提高近井地层承压能力。

表 6 不同漏速下的堵漏浆配方

Table 6 The formula of plugging slurry under different leakage velocity

地层类型	漏速/($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	级别/%	堵漏浆配方
孔隙型	≤ 5	一级(15)	基浆+2.5%单封+1.5%随钻+1% 0.5 mm 酸溶性刚性堵漏剂+3% 1 mm 核桃壳+4% (2~3 mm) 核桃壳+1% 云母片
裂缝-孔隙型	5~10	二级(20)	基浆+2%单封+2%随钻+11% 2~3 mm 核桃壳+6% 1 m 核桃壳+2% 0.5 mm 酸溶性刚性堵漏剂+2% 云母片
裂缝-孔洞型	10~20	三级(30)	基浆+2%单封+3%随钻+10% 1 mm 核桃壳+9% 2~3 mm 核桃壳+2% 0.5 mm 酸溶性刚性堵漏剂+1% 云母片

3.3.2 漏失处理技术

(1)孔隙型储层

储层储集空间以孔隙为主,天然裂缝以微裂缝发育为主,局部构造不发育。钻井漏失为渗透性漏失,漏速 $\leq 5\text{ m}^3/\text{h}$ 。此工况下的地层漏失,通常采用静止堵漏技术,即首先根据预测地层压力,配制相应密度的压井液和堵漏浆;二是吊罐、低排量静止堵漏(压井液);三是静止观察,促使堵漏浆充分膨胀,堵塞近井裂缝孔隙;四是关井结束,采用小排量($0.2\sim 0.3\text{ m}^3/\text{min}$)反循环洗井,如无漏失,则再提排量 $0.1\text{ m}^3/\text{min}$ 洗井一周,直至排量提到 $0.5\text{ m}^3/\text{min}$,不溢不漏,压稳气层为止。若循环过程中存在漏失,则降低排量,吊灌注入一定量的堵漏浆后,再重复上述小排量反循环洗井,直至不溢不漏,堵漏成功。

(2)裂缝-孔隙型储层

储层储集空间,同时发育裂缝和孔隙,钻井漏失以裂缝性漏失为主,漏速 $5\sim 10\text{ m}^3/\text{h}$ 。此工况下的地层漏失,通常采用逐级加重压井堵漏技术,即首先采用预先配制压井液,挤入一定数量,静止或关井观察,井口起压,则说明压井堵漏不成功;二是根据井口压力,配制,挤入一定数量的二级堵漏浆,静止观察,井口起压,则继续挤注一定量的二级堵漏浆,否则,采用小排量($0.2\sim 0.3\text{ m}^3/\text{min}$)反循环洗井至不溢不漏,堵漏成功。

(3)裂缝-孔洞型储层

储层储集空间以裂缝、孔洞为主,钻井漏失以裂缝性或洞穴性漏失为主,部分井(层)为只进不出的失返性漏失(恶性漏失)或放空漏失,漏速达 $10\sim 20\text{ m}^3/\text{h}$ 。此工况下的地层漏失,施工过程中,可能出现喷、漏同存,常采用平推压井,辅助逐级加重压井封堵技术,即预配制一定数量三级堵漏浆,平推至地层,观察井口起压情况;二是井口压力 $> 10\text{ MPa}$,则继续平推三级堵漏浆;三是井口压力 $< 10\text{ MPa}$,则挤入预先配制二级堵漏浆一定数量,静

止观察,井口起压,则说明压井堵漏不成功;四是根据井口压力,继续挤入一定数量的压井液,静止观察,井口不起压,采用小排量($0.2\sim 0.3\text{ m}^3/\text{min}$)反循环洗井至不溢不漏,堵漏成功。

4 现场应用

2023 年以来,对盆内二叠系茅口组海相缝洞型气井进行酸压改造试气。FU1 井位于川南低陡褶皱带塘河断背斜,该构造由南到北储气丰度逐渐下降,呈现出南富北贫特征,是典型的断控成藏。目的层垂直断裂方向横穿断裂,241.3 mm 钻头钻至井深 3 756.55 m 完钻。在 3 650.03 m 钻遇放空 2.16 m,并伴随泥浆失返,钻完井期间累计漏失钻井液 367 m^3 。

采用 114.3 mm 油管 \times 壁厚 8.56 mmBGT3 PIN \times 长度 3 653 m+88.9 mm 油管 \times 壁厚 12.09 mm BGT3 PIN \times 长度 1 725.3 m+77.07 mmRDS 循环阀 \times 长度 3.04 m+77.07 mmRD 循环阀 \times 长度 1.8 m+127.5 mm 完井封隔器 \times 长度 2.05 m+73 mm 筛管 \times 壁厚 7.01 mm BGT3 BOX PIN \times 长度 1.9 m 管柱组合,进行射孔-酸压联作试气施工。管柱下至设计深度,校深坐封后,控制套压 10 MPa,油管阶段打压至 44 MPa 降低至 29.5 MPa,TCP 监测仪监测到射孔起爆信号,射孔成功。酸压泵注总液量 705.42 m^3 ,其中滑溜水 298.13 m^3 ,前置酸 69.99 m^3 ,胶凝酸 307.0 m^3 ,闭合酸 30.3 m^3 。酸压施工曲线显示,前置酸阶段,酸降明显(9.29 MPa);胶凝酸阶段,泵压波动,酸岩作用显著,在降温、降滤基础上,酸液体系的“黏性指进”作用,不断酸蚀沟通孔、缝、洞,形成了差异化刻蚀和有效刻蚀,形成了动态“有效裂缝”。酸压后,采用 10 mm 油嘴试气产量 $18.62\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。密度 $2.2\text{ g}/\text{cm}^3$ 泥浆下,环空加压至 50 MPa,操作 RD 阀成功。之后采用逐级加重压井堵漏技术方法,以 $0.1\text{ g}/\text{cm}^3$ 密度差渐提至 $2.4\text{ g}/\text{cm}^3$,压井漏失密度

2.2 g/cm³ 泥浆 23 m³,反循环洗井至进出口液性一致,无火焰燃烧,无硫化氢显示。敞井观察 24 h,不溢不漏,压井成功。

至今,应用优化后的试气关键技术,如表 7 所

示,已施工茅口组海相逢洞型气藏 6 口井计 8 层,试气均获得了工业气流,验证了盆内二叠系茅口组海相逢洞型气藏的储集潜力,也充分验证了缝洞型气藏试气关键技术的实践应用性。

表 7 关键试气技术应用
Table 7 Key gas test technology applications

井号	试气井段/m	层位	射孔枪、弹参数		酸压技术		堵漏技术		试气结果	
			优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后	气产量/ (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	结论
FU1 井	3 652.8~3 697.3	茅三段		1.89 mm 盲孔		1.胶凝酸/ 闭合酸		1.静止堵漏 (压井液+一 级堵漏浆)	18.62	中产气层
XT2 井	4 563.2~4 579.3	茅三段	1.89 mm 枪	枪	1.自生酸/ 胶凝酸	2.交替 注入			25.63	高产气层
YB1 井	3 269.4~3 286.4	茅一段	2.深穿透射 孔弹	2.深穿透射 孔弹	2.交替 注入	3.规模 酸液 300~ 500 m ³	1.静止堵 漏(压井 液)	2.逐级加重 堵漏(压井 液+二级堵 漏浆)	20.18	高产气层
YB27 井	6 480.1~6 538.0	茅三段	3.枪身耐压 ≥40 MPa	3.枪身耐压≥ 210 MPa	3.规模 酸液 200~ 300 m ³	150~ 300 m ³	2.逐级加 重堵漏 (压井液)	3.平推+逐 级加重堵漏 (三、二级堵 漏浆+压井 液)	15.32	中产气层
	6 910.1~6 983.0	茅二段	4.射孔弹耐 温≥120 ℃	4.射孔弹耐 温≥150 ℃	4.排量 2~ 4 m ³ /min	4.排量 3~ 6 m ³ /min			6.17	低产气层
M6 井	6 214.0~6 301.5	茅三段	5.射孔穿深 ≥600 mm	5.射孔穿深≥ 889 mm					28.93	高产气层
YB702 井	4 563.0~4 608.2	茅一段	6.加压起爆	6.压力开孔 起爆					7.58	低产气层
	6 583.1~6 618.2	茅三段							18.32	中产气层

5 结论

(1)优化后的试气关键技术,成功推广应用于缝洞体储层试气施工 6 口井/8 层,均获得了工业气流,单层试气周期平均缩短 9 d,实现了四川盆地二叠系海相碳酸盐岩茅口组气藏“1”字号井的勘探突破,为下步区域内及其它探井的试气施工,提供了工艺技术方法支撑。

(2)应用胶凝酸体系、胶凝酸+滑溜水多级交替泵注工艺,缓解了酸液在高温下对入井管材、阀件的动态腐蚀,满足了酸液降滤、缓蚀、缓速要求,延长了酸蚀作用距离,酸压效果好,现场施工安全顺利。

(3)灰岩缝洞气藏,在射孔后放喷期间,经常出现漏失,特别是经过酸压改造后的地层更易出现大漏情况,给压井、解封带来一定的风险。制定压井堵漏原则,摸索压井堵漏工艺方法,6 口井/8 层堵漏效果十分显著,针对“喷漏同存”井(层)的试气堵漏技术方法取得了长足的进步。

致谢:感谢领导、同事在论文编写过程中给出的建议,感谢中国石油化工股份有限公司勘探分公司元坝项目部各位领导,在四川盆地二叠系茅口组地质资料收集、评价方面给予的大力支持。

参考文献

[1] 张希明. 新疆塔河油田下奥陶统碳酸盐岩缝洞型油气藏特征[J]. 石油勘探与开发,2001,28(5):17-22.
ZHANG Ximing. The characteristics of lower ordovician fissure-vug carbonate oil and gas pools in Tahe oil field, Xinjiang [J]. Petroleum Exploration and Development, 2001,28(5):17-22.

[2] 林忠民. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层特征及成藏条件[J]. 石油学报,2002,23(3):23-26.
LIN Zhongmin. Carbonate rock reservoir features and oil-gas accumulating conditions in the ordovician of Tahe oilfield in northern Tarim basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2002,23(3):23-26.

[3] 鲁新便. 塔里木盆地塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏开发地质研究的若干问题[J]. 石油实验地质,2003,25(5):508-512.
LU Xinbian. Several problems in study of development programme of Ordovician carbonate reservoir in Tahe oilfield,Tarim basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003,25(5):508-512.

[4] 王鸣华. 气藏工程[M]. 北京:石油工业出版社,1997:1-37.

[5] ROBERTS L D. The effect of surface kinetics in fracture acidizing [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1973,14(4):385-395.

[6] ROBERTS L D, GUIN J A. A new method for predicting acid pen-etration distance [J]. Society of Petroleum

- Engineers Journal, 1975, 15(4): 277-286.
- [7] 胥云. 碳酸盐岩储层酸压工艺技术综述[J]. 油田化学, 1997, 14(2): 175-179.
- XU Yun. A review on carbon dioxide corrosion of steel in aqueous media for oilfield chemical engineers[J]. Oilfield Chemistry, 1997, 14(2): 175-179.
- [8] 胥云, 楼湘. 碳酸盐岩储层深度酸压理论研究现状与发展[J]. 油气井测试, 2002, 11(1): 4-7.
- XU Yun, LOU Xiang. Theory research and development of in-depth acid fracturing of carbonate reservoir[J]. Well Testing, 2002, 11(1): 4-7.
- [9] 胥云, 孙凌云, 马白宁. 青海尕斯 E₃ 复杂岩性油藏深度酸压技术先导性试验研究[J]. 钻采工艺, 2002, 25(4): 31-34.
- XU Yun, SUN Lingyun, MA Baining. Experimental research of depth acid fracturing technology in Gasi E₃ complex lithology reservoir of Qinghai[J]. Drilling & Production Technology, 2002, 25(4): 31-34.
- [10] 苟波, 郭建春, 何春明, 等. 裂缝性气藏网络酸化可行性[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(7): 1090-1096.
- GOU Bo, GUO Jianchun, HE Chunming, et al. Feasibility of network acidification in the naturally fractured gas reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(7): 1090-1096.
- [11] 何春明, 陈红军, 王文耀. 碳酸盐岩储层转向酸化技术现状与最新进展[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(5): 121-126.
- HE Chunming, CHEN Hongjun, WANG Wenyao. Diversion acidizing used for carbonate reservoir: state-of-the-art and new development[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(5): 121-126.
- [12] 康毅力, 闫丰明, 游利军, 等. 塔河油田缝洞型储层漏失特征及控制技术实践[J]. 钻井液与完井液, 2010, 27(1): 41-43.
- KANG Yili, YAN Fengming, YOU Lijun, et al. Loss and control in vugular reservoir in block Tahe[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2010, 27(1): 41-43.
- [13] 胡安平, 潘立银, 郝毅, 等. 四川盆地二叠系栖霞组、茅口组白云岩储层特征、成因和分布[J]. 海相油气地质, 2018, 23(2): 39-52.
- HU Anping, PAN Liyin, HAO Yi, et al. Origin, characteristics and distribution of dolostone reservoir in Qixia formation and Maokou formation, Sichuan basin, China[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2018, 23(2): 39-52.
- [14] 李阳, 康志江, 薛兆杰, 等. 中国碳酸盐岩油气藏开发理论与实践[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 669-678.
- LI Yang, KANG Zhijiang, XUE Zhaojie, et al. Theories and practices of carbonate reservoirs development in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 669-678.
- [15] 焦方正. 塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2): 207-216.
- JIAO Fangzheng. Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei area, Tarim basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2): 207-216.
- [16] 杨敏, 龙喜彬, 潜欢欢, 等. 塔河缝洞型油藏试井曲线特征及储集体识别[J]. 油气井测试, 2020, 29(3): 64-70.
- YANG Min, LONG Xibin, QIAN Huanhuan, et al. Well test curve characteristics and reservoir identification of fractured carbonate reservoir in Tahe oilfield[J]. Well Testing, 2020, 29(3): 64-70.
- [17] 蔡明金, 王守峰, 尹国君, 等. 缝洞型碳酸盐岩储层储集类型判别方法[J]. 油气井测试, 2018, 27(4): 7-14.
- CAI Mingjin, WANG Shoufeng, YIN Guojun, et al. Reservoir type identification method for fractured-vuggy carbonate reservoirs[J]. Well Testing, 2018, 27(4): 7-14.
- [18] 陈利新, 程汉列, 杨文明, 等. 哈拉哈塘油田碳酸盐岩储层类型识别及应用[J]. 油气井测试, 2015, 24(6): 21-24.
- CHEN Lixin, CHENG Hanlie, YANG Wenming, et al. Identification of carbonate reservoir types in Halahatang oil-field and its application[J]. Well Testing, 2015, 24(6): 21-24.
- [19] 汪春浦, 叶海峰, 肖高棉. 多尺度缝洞型碳酸盐岩气藏试井分析[J]. 油气井测试, 2021, 30(6): 1-9.
- WANG Chunpu, YE Haifeng, XIAO Gaomian. Well test analysis of multi-scale fracture-vuggy carbonate gas reservoir[J]. Well Testing, 2021, 30(6): 1-9.
- [20] 胥洪俊, 孙贺东, 张万能, 等. “串珠”状地震反射与试井分析“串珠”模型关系探讨[J]. 油气井测试, 2015, 24(5): 6-9.
- XU Hongjun, SUN Hedong, ZHANG Wanneng, et al. Discuss on relationship “beaded” seismic reflection and “beaded” model at well analysis[J]. Well Testing, 2015, 24(5): 6-9.

编辑 吴志力

第一作者简介: 王洪广, 男, 1975 年出生, 工程师, 硕士, 2012 年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业, 现从事完井试气生产管理 & 工艺技术研究工作。电话: 13673936279, Email: 605059036@qq.com。通信地址: 河南省濮阳市中原油田濮阳县柳屯镇井下特种作业公司, 邮政编码: 457164。