不动管柱喷射分段酸压技术在超深井的应用

袁灿明[1]　张福祥[2]　石孝志[1]　朱炬辉[1]　袁学芳[2]　陈　健[1]　钟雨师[3]　敬承杰[4]

1.中国石油川庆钻探工程公司井下作业公司,四川　成都　610051

2.中国石油塔里木油田公司,新疆　库尔勒　841000

3.中国石油西南油气田公司 ,四川　成都　610051

4.中国石油塔里木油田公司塔中勘探开发项目部,新疆　库尔勒　841000

摘要:

塔里木油田深井超过 6 000 m,是典型的超深、超高压井,对不动管柱喷射分段酸压技术的应用提出了挑战。超深井喷射分段酸压要达到合理的喷射速度,要求在喷嘴组合、分段酸压设计上进行优化研究。针对塔里木油田哈拉哈塘地区喷射分段酸压的技术难点进行分析,优化出既能达到较高喷射速度,又能在泵压允许条件下完成现场施工的方案设计方法。通过在该地区碳酸盐岩储层中 3 口井的应用,共完成 13 段酸压施工作业,充分证明了不动管柱水力喷射分段酸压技术在超深井中的成功性,利用酸压施工曲线、停泵压力分析、邻井对比分析及压后测试等资料,完成对施工资料的后评估分析,达到预期效果,为超深井储层的不动管柱喷射分段酸压设计和施工方案的形成提供了参考。

关键词 :

超深井;喷射酸压;分段酸压;不动管柱;喷射工具;停泵压力

文献标识码:A

文章编号:1006-5539(2012)05-0043-04

0　前言

近年来,国内外学者在喷射酸压技术的研究和应用开发中取得了一系列研究成果,拓展了水力压裂技术的应用范围,在油气田勘探开发应用中形成了水力喷射酸压新技术。随着工艺改进,水力喷射压裂技术在世界多个油气田迅速应用。据不完全统计,水力喷射酸压技术已经在世界范围内施工了 360 余口井,大部分增产效果显著[1-3],但不动管柱喷射分段酸压工艺技术在超深井中的应用还未见相关报道。为了实现单井高产稳产和油气藏的高效开发,塔里木油田的酸压技术从笼统大排量酸压发展到遇油膨胀封隔器分段酸压技术,只有进行水平井分段改造,才能真正沟通多个缝洞储集单元,扩大泄流面积,提高单井产能,控制衰减速度。但在封隔器分段酸压后,封隔器胶筒残留在井筒中,给后期的修井作业带来困难。采用不动管柱定点喷射分段酸压工艺技术可以准确选择裂缝起裂位置,解决了常规的大段笼统酸化时无法控制起裂位置的难题,同时也能解决遇油膨胀封隔器胶筒残留井筒给后期修井作业造成的影响。因此,在塔里木油田哈拉哈塘区块碳酸盐岩储层的Ha901H 等 3 口探

收稿日期:
2012-06-10
基金项目:
国家自然科学基金资助项目(51074138)
作者简介:
袁灿明(1984-),男,四川简阳人,工程师,硕士,主要从事油气井增产措施的研究工作。

井进行了试探试验。

自国内外不动管柱喷射分段酸压工艺技术应用以来，取得了较大进展。塔里木油田哈拉哈塘地区Ha901H 等 3 口探井面临更多复杂性和难度，主要存在以下难点：

a）3 口探井均属超深井，目的层深度在 6 730.5~7 024.0 m 之间。

b）最大水平段长 310 m，对喷射工具的下入提出了挑战。

c）该地区储层埋深较大，地层温度高。

d）储集空间以缝、洞为主，基质孔渗差、非均质性强，给酸压设计提出了更高要求。

e）裂缝和溶蚀孔洞空间展布复杂，流体分布规律性差，前期改造经验表明该区块地层出水现象严重。

本研究在对塔里木油田哈拉哈塘地区 3 口探井采用不动管柱喷射分段酸压工艺技术的现场实践基础上进行，证明了不动管柱喷射分段酸压工艺技术在超深井中的可行性，并积累了大量的现场施工数据，为不动管柱喷射分段酸压技术在超深井中的应用提供了技术支撑。

1 现场实施井特点和工艺设计

1.1 喷射分段酸压工艺研究

Ha901H 等 3 口探井岩性均为石灰岩，地震解释均表现为表层弱反射，Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类储层交错分布，多以Ⅱ、Ⅲ类储层为主。其中 Ha901H、Ha6C2 井底部均与水层较近，储层多为裂缝孔洞型，高角度缝发育，目的层段发生裂缝水窜风险较大，因此，在设计上适当降低酸液规模。Ha122H 井由于改造段均为Ⅱ类储层，同时该井处于构造较高位置，储层呈层状发育，改造后出水风险小，为达到深度改造，突破“杂乱反射”区域，适当增大酸液规模。

根据前期研究成果[3-6]，保证足够的射孔和破岩效果，液体出喷嘴流速要在 150 m/s 以上，而喷嘴节流压差要在 20 MPa 左右。喷嘴流速越高，或节流压差越大，射孔和破岩效果越好，喷嘴产生的负压越大，但消耗在喷嘴上的水功率就越大，即施工排量越低，低到一定程度时就无法满足喷射分段酸压的要求。因此，超深井井口泵压的计算是影响喷嘴选择的关键。

根据前期研究成果[3]，喷嘴节流压力 Δp 由式(1)求得：

$$\Delta p=\frac{255.24Q^{1}\cdot 808\rho}{A^{2}C^{2}} \tag{1}$$

式中 Δp——喷嘴节流压力，MPa；

Q——施工排量，m^3/min；

ρ——流体密度，g/cm^3；

A——喷嘴总面积，mm^2；

C——喷嘴流量系数，一般取 0.9。

根据井口泵注压力预测式(2)，预测出不同排量下的井口施工压力值，在综合考虑喷嘴节流压力和井口承压条件后，选择合理的油管注入排量。

$$p_t=p_p+\Delta p+p_f-p_H \tag{2}$$

式中 p_t——井口泵注压力，MPa；

p_f——油管摩阻，MPa；

p_H——净液柱压力，MPa。

结合塔里木油田哈拉哈塘地区延伸压力梯度预测井口施工压力，见图 1。

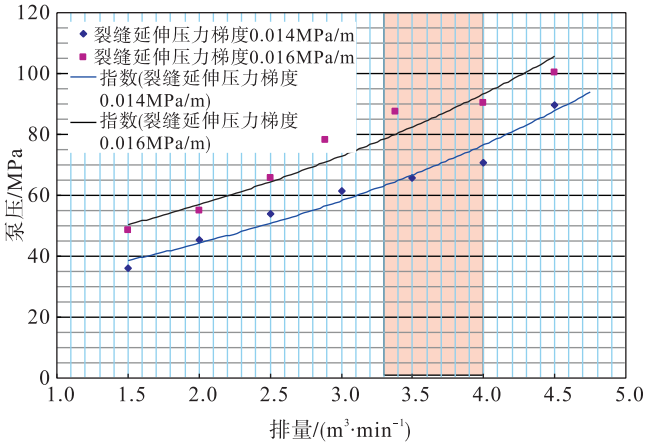

图 1 施工排量与施工泵压关系

根据泵压随喷嘴直径、个数的变化关系，决定合适的喷嘴直径和个数。结合该地区延伸压力梯度得到 12 孔×6 mm 和 6 孔×6 mm 的喷嘴组合，可满足喷射酸压对喷射速度和泵压的要求，见图 2。

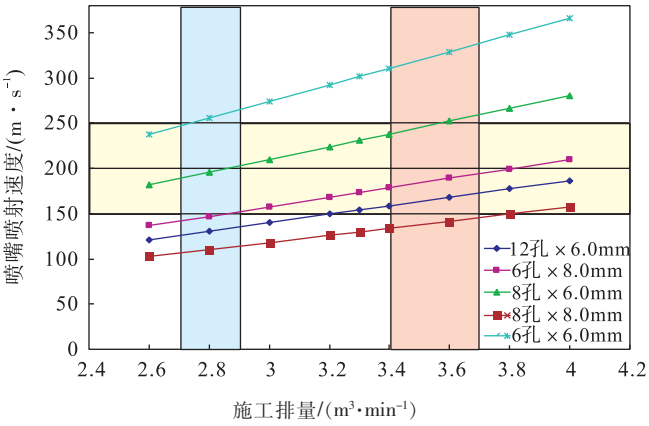

图 2 施工排量与喷嘴喷射速度关系

1.2 喷射工具的研究

喷射工具是通过喷嘴内孔横截面的收缩，将高压液体的压能聚集并转化为动能，获得最大的射流冲击

力，作用于套管或井底岩石上进行切割或破碎。

滑套式喷射工具是实现不动管柱喷射分段酸压技术的核心部件，由丢手接头、扶正器、喷枪、单流阀、筛管、引鞋等组成，结构见图 3。通过地面以 0.6~0.8 m^3/min 的排量送入树脂球，当树脂球被送入到滑套球座上，加压到额定压力剪断销钉，推动滑套下移至球座，露出喷嘴，同时完成对下部管柱的密封，开展本层的喷射工艺施工。施工完成后重复该施工步骤，逐级

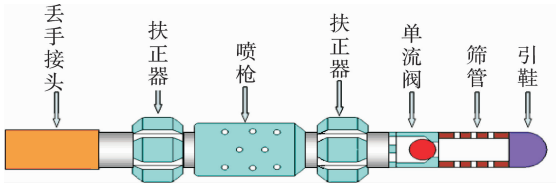

图 3　不动管柱滑套喷射工具

2　应用情况分析

在前期大量不动管柱喷射分段酸压技术研究基础上，对塔里木油田哈拉哈塘地区完成了 3 口探井的现场试验。结果表明，目前已经形成了井深 7 000 m 以内的不动管柱水力喷射分段酸压工艺及配套技术，研制的井下工具工作压力达到 119 MPa、工作温度 170 ℃，在 Φ127 mm 套管和 Φ152.4 mm 裸眼使用。试验井实现不动管柱喷射分段酸压裂缝 1~8 条缝，单缝酸压成功率 100 %，见表 2。

送球入座打开滑套酸压相应层段。针对塔里木油田哈拉哈塘区块具体井筒特征，对 Φ127mm 套管和 Φ152.4 mm 裸眼进行喷射器的研制，形成了具体尺寸和规范，见表 1。

表 1　滑套式喷射工具尺寸

套管尺寸/mm	裸眼尺寸 /mm	喷枪外径 /mm	喷枪内径 /mm	配球尺寸 /mm
Φ127 套管	—	Φ102	41.8	45.6
			37.6	41.2
			33.3	37.0
			28.6	32.7
—	Φ152.4	Φ104	—	—

表2　不动管柱喷射分段酸压现场试验井统计

井号	层位	分段数/段	井眼尺寸 /mm	酸压深度 /m	喷砂量 /t	砂浓度 /(kg·m^{-3})	射孔数 / 个	压后求产 /(m^3·d^{-1})
Ha901H	奥陶系	8	Φ127 套管	6 730.5~6 765.0	2.0	120	12	88.92(含水 7 %)
				6 786.0~6 806.5	2.0		12	
				6 820.0~6 860.5	2.0		12	
				6 860.5~6 881.0	2.0		12	
				6 897.5~6 928.5	2.0		12	
				6 940.5~6 959.0	2.0		12	
				6 982.5~7 005.0	2.0		12	
				7 007.5~7 024.0	2.0		12	
Ha122H	奥陶系	4	Φ127 套管	6 814.0~6 824.5	2.6	100	6	干层
				6 832.5~6 843.5	2.6		6	
				6 852.0~6 865.5	2.6		6	
				6 878.5~6 883.0	2.6		6	
Ha6C2	奥陶系	1	Φ152.4 裸眼	6 790.0~6 800.0	0	0	6	水 76.2

其中，Ha901H 井施工中出现了地层破裂压力异常高的情况，套压在限压 45 MPa 的条件下无法正常施工，经多次震荡酸化、二次射孔等手段都无法压开储层。从酸液进入地层后施工套压反应情况来看，储层吸液能力未有效改善，结果见图 4。

从停泵后压力分析表明，各段施工套压的变化趋势与每段的储层特征吻合。以 Ha901H 井为例，图 5、6 为该井各段停泵压力、停泵压降对比图。

各段停泵压力值不同，说明喷射分段酸压工艺技术的成功性。第二、三、四段以裂缝孔洞型、孔洞型储层为主，停泵压力较高，与储层类型较吻合，地层条件相对较差。第五段测井解释含有一段 1.5 m 的洞穴型储层，停泵压力仅 8.19 MPa，明显沟通了溶洞体。第六、七、八段停泵压力越来越高，但高于第五段，停泵

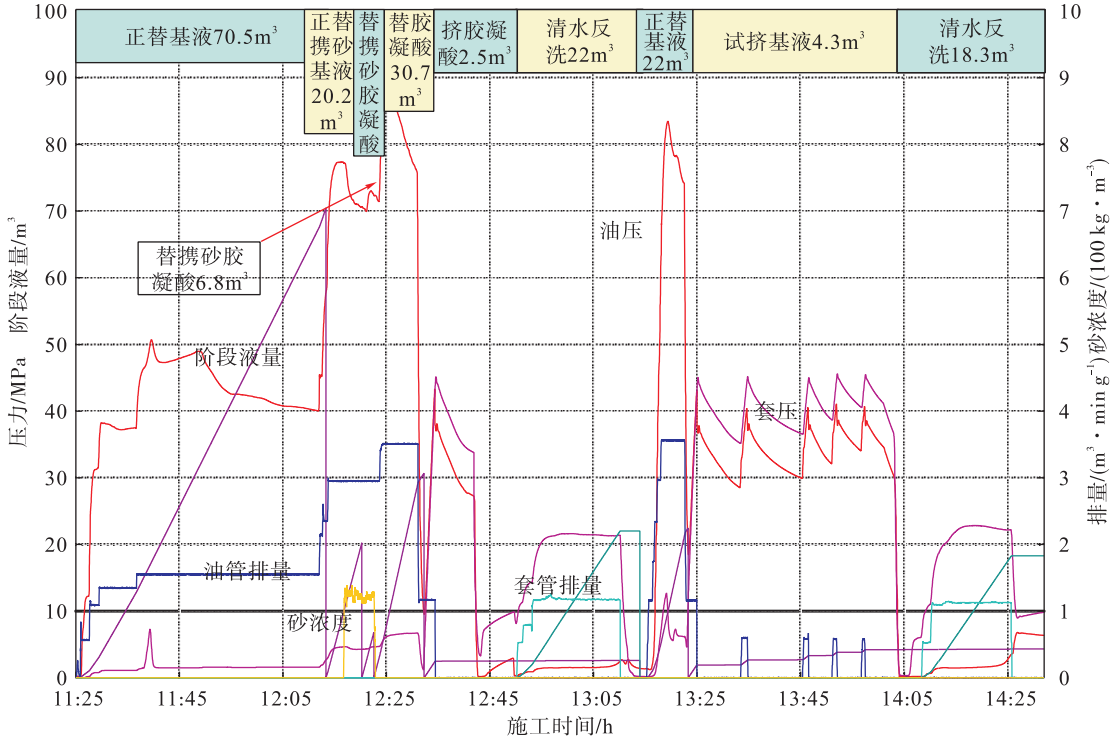

图 4 Ha901H 井现场施工曲线

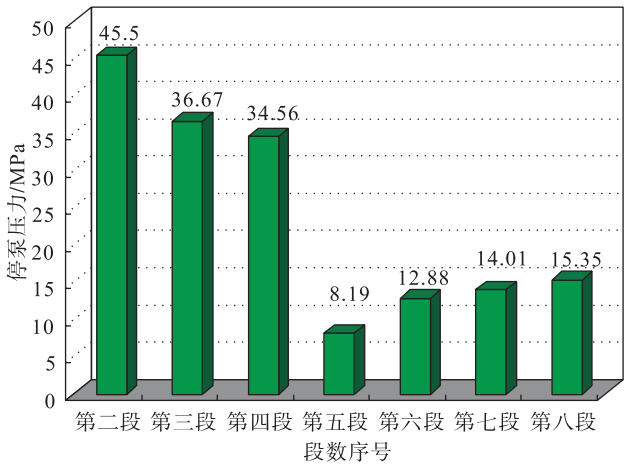

图 5 Ha901H 各段停泵压力对比图

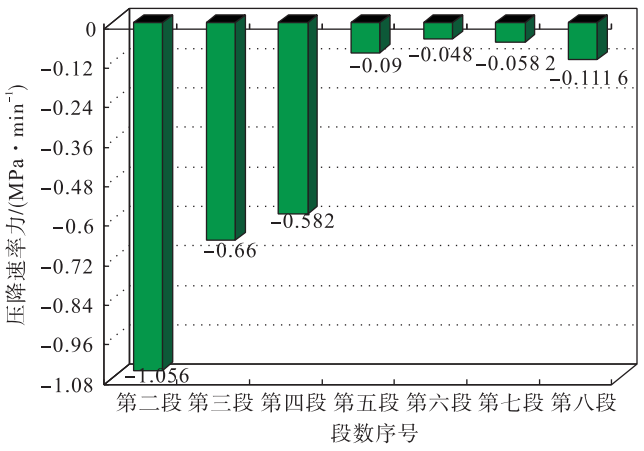

图 6 Ha901H 各段停泵压降对比图

压力受第五段影响。根据表 3 前期酸压改造统计结果，塔里木油田哈拉哈塘地区酸压过程以洞穴型储层特征为主，酸压结束后停泵压降一般小于 0.1 MPa/min，Ha901H 井后 4 段与该特征吻合，说明第 5 段压开了溶洞体。

表 3 塔里木油田哈拉哈塘地区前期酸压停泵压力统计表

井号	停泵实测数值 /MPa	压降值 / MPa	测试时间 / min	压降速率/ (MPa·min⁻¹)
Ha6	30.6~29.1	1.5	20	<0.1
Ha9	13.8~12.8	1.0	20	<0.1
Ha10	25.3~24.7	0.6	10	<0.1
Ha13	1.4~1.5	-0.1	20	<0.1

Ha901H 井前两段破裂压力高，第一层震荡 5 次酸压未能压开储层，施工压力表明超深地层破裂压力异常高，根据碳酸盐岩储层酸液接触地层后破裂压力有所降低的特点[7~10]，考虑在后期喷射酸压方案设计中采用酸携砂进行射孔，降低地层的破裂压力，达到成功压开储层的目的。

3 结论

a) 不动管柱喷射分段酸压技术，解决了常规笼统酸压无法控制起裂位置及遇油膨胀封隔器给后期修井等作业造成影响的难题，并控制酸压施工周期，在1 d 内完成 5 段喷射酸压施工作业，是一种全新、高效、安全的水平井分段酸压工艺。 （下转第 51 页）

（上接第 46 页）

b）通过不动管柱喷射分段酸压施工参数的理论研究，形成不动管柱喷射分段酸压施工参数的计算方法。

c）研制的适用于 Φ127 mm 套管和 Φ152.4 mm 裸眼等规格井眼的系列工具，其性能满足超深井不动管柱喷射分段酸压工艺的要求。

d）在塔里木油田哈拉哈塘地区开展了 3 井次不动管柱喷射分段酸压施工，实现了不动管柱最多完成水平井 8 条缝，井底最高工作压力约 119 MPa、工作温度 170 ℃，单缝酸压成功率 100 %。

e）考虑在后期的喷射酸压方案设计中采用酸携砂射孔，降低地层的破裂压力，达到成功压开储层的目的。

参考文献：

[1]李宗田.水平井压裂技术与进展[M]. 北京：中国石化出版社，2010，1-138.

[2] Mcdaniel B W ，Marshall E J ，East L E ，et al. CT-Deployed Hydrajet Perforating in Horizontal Completions Provides New Approaches to Multistage Hydraulic Fracturing Applications [C]. SPE 100157，2006.

[3] 马发明. 不动管柱水力喷射逐层压裂技术[J]. 天然气工业，2010，30(8)：25-28.

[4] 李志龙. 苏 10-30-38H 水平井水力喷射加砂压裂的研究与应用[J].特种油气藏，2009，16(4)：82-86.

[5] Mcdaniel B W，Surjaatmadja J B. Hydrajetting Applications in Horizontal Completions to Improve Hydraulic Fracturing Stimulations and Improve ROI[C]. SPE 125944，2009.

[6] Li Gensheng，Liu Li，Huang Zhongwei ，et a1. Study of Effect of Hydraulic Perforating on Form Ation Fracturing Pressure[J]. Journal of China University of Petroleum （Edition of Natural Science)，2006，30(5)：42-45.

[7] 郭建春，辛　军，赵金洲，等. 酸处理降低地层破裂压力的计算分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版)，2008，30(2)：83-86.

[8] 李小刚，杨兆中，梁　知，等. 深埋煤层气藏水力压裂增产技术探讨[J]. 天然气与石油，2011，29(6)：46-48.

[9] 白雪静，春　兰，杨兆中，等. 龙女寺构造须家河组低效气藏压裂改造技术[J]. 天然气与石油，2011，29(4)：27-31.

[10] 张应科，钟水清. 加砂压裂转向配套技术描述模式及应用[J]. 钻采工艺，2011，34(5)：46-51.