

渤海 A 油田水力喷砂射孔压裂增产技术

韩超¹, 刘峰¹, 余建生¹, 王晓², 陈玉山²

- 1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司工程技术作业中心 天津 300452
- 2. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司 天津 300452

通讯作者:Email:hanchao2@cnooc.com.cn
项目支持:国家重大科技专项“渤海油田高效钻完井及配套技术示范”(2016ZX05058-002)

引用:韩超,刘峰,余建生,等. 渤海 A 油田水力喷砂射孔压裂增产技术[J]. 油气井测试,2020,29(4):56-62.
Cite: HAN Chao, LIU Feng, YU Jiansheng, et al. Stimulation technology of hydraulic sand-jetting perforating and fracturing in Bohai A Oilfield[J]. Well Testing, 2020,29(4):56-62.

摘要 渤海 A 油田储层中低孔渗、储层薄、隔层长、产能低,开发难度大。为实现高质高效开发,采用水力喷砂射孔压裂增产技术在 A40 井进行先导性探索应用。基于伯努利原理,通过喷嘴喷射的高速流体加上石英砂喷射开套管,带来局部负压,实现层间动态封隔;通过钻杆加砂环空同时补液,实现喷砂射孔和水力压裂一体化。在 A40 井实际应用,避免了常规射孔对地层的压实作用,改善了近井筒摩阻,减少了储层污染。油井实际产能较钻后配产提高 60%,实现了一趟管柱完成两层射孔和压裂作业;水力动态封隔代替机械和化学封隔,降低井下作业复杂情况发生概率,节省器材费用。该技术实施风险低、工艺简单、择井范围宽、效益高,具有较好的推广价值。
关键词 喷砂射孔;水力压裂;增产技术;渤海油田;伯努利原理;储层污染;产能
中图分类号:TE357 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.04.010

Stimulation technology of hydraulic sand-jetting perforating and fracturing in Bohai A Oilfield

HAN Chao¹, LIU Feng¹, YU Jiansheng¹, WANG Xiao², CHEN Yushan²
1. Engineering Technology Operating Center, Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300452, China
2. CNOOC EnerTech-Drilling & Production Co., Tianjin 300452, China

Abstract: Bohai A oilfield has the characteristics of low porosity, low permeability, thin thickness, long interlayer and low productivity, which makes it difficult to develop. In order to realize high quality and high efficiency development, hydraulic sand-jetting perforating and fracturing stimulation technology was pilot to apply in Well A40. Based on Bernoulli's principle, the high-speed fluid with quartz sand injected through the nozzle perforates the casing, which brings the local negative pressure and realizes the dynamic interlayer isolation. By adding sand to drilling pipe and replenish liquid to annulus, integration of sand-jetting perforating and hydraulic fracturing can be realized. In the practical application of Well A40, the compaction effect of conventional perforating on formation is avoided and the friction near wellbore and the reservoir damage is reduced. The actual production capacity of the well increased by 60% compared with the post-drilling production. Perforation and fracturing can conducted for two layers by a trip of string. Hydraulic dynamic isolation can replace mechanical and chemical isolation to reduce the probability of complex situations and save equipment costs. The technology has the advantages of low risk, simple process, wide range of well selection and high benefit, and is worth promoting.
Keywords: sand-jetting perforating; hydraulic fracturing; stimulation technology; Bernoulli principle; reservoir damage; production capacity

水力喷砂射孔压裂技术方法于 1998 年被 Surjaatmadja J. B. 等第一次提出^[1-3]。该技术通过水力喷砂射孔与水力压裂联合组成,可快速准确地进行多处压裂,无需机械封隔,同时用于封隔器不能使用的环境^[4-7]。

近些年,国内外油气田成功的应用结果表明,水力喷砂射孔压裂技术方法已在低渗油藏开发中得到广泛应用,是低渗储层水平井压裂增产的有效技术^[8-10]。同时,也适用定向井分段压裂改造,成为一种有效开采薄储层、低渗透、稠油油气藏的技术

措施^[11-14]。

为提高渤海 A 油田的储量动用程度,完善注采井网,评价油田东营组 J 砂层西南部断块潜力资源量,在 A 油田新布 9 口调整井,开发储层均为东营组。根据岩心样品数据分析,统计出东营组不同小层的岩石物性,结果表明该油田东营组为中孔-中低渗储层,渗透率普遍低于 200 mD,开发生产井储层多为小薄层交互,80%的层厚小于 6 m,而且小层间连通性较差,地层导流能力弱,层间隔较长,50%储层间隔大于 50 m,完井后投产效果不佳。

据统计,该油田两个平台已投产东营组生产井共 7 口井,其中仅 1 口井达到配产要求,配产达标率仅为 14%。

针对此类中、低孔渗储层开发,渤海油田常用的增产方式为酸化和常规封隔器笼统水力压裂。经过“一井一策”分析,二者均存在一定的技术局限性。关于酸化存在诸多局限性,首先针对储层适用酸的体系选择困难,施工期间注酸压力高导致注酸困难,无支撑剂做有效支撑,使其持续时间短,从而增产效果较弱;关于封隔器笼统水力压裂,存在单趟单层时效性极低、对裂缝预测性差、无法对其精准控制等局限性。

由上述可知,常用的酸化和水力压裂增产措施存在诸多技术局限,不适合于该类储层开发^[15-18]。因此,为了实现该批次调整井高质高效开发,做好中低渗油井增产,降本增效等工作,经过详细的分析、对比、论证,决定采用“水力喷砂射孔压裂增产技术”在 A 油田进行探索性应用。该技术是集射孔、压裂一体化的新型增产措施,对于渤海油田尚属首次,可以大大的提高油气田开发的效果和效益,特别是提高非均质的、连通性差的、低渗和薄层等油气田的开发效果和效益。

1 A 油田基本情况

A 油田东营组总体构造面貌是一个被断层复杂化的背斜构造,油田范围内断层非常发育。储层物性为中低孔渗,多为小薄层交互,层间联通性差,属于正常温压系统。

1.1 构造特征

A 油田东营组总体构造面貌呈北东走向,是一个被断层复杂化的背斜构造。油田范围内断层非常发育,在平面上排列呈雁行式,剖面上主要为“Y”

型断层。

1.2 储层特征

本批次调整井开发层位包括古近系东营组东二下段 J 砂层、东三段 I 及 II 油组。

东二下段 J 砂层储层砂体分布稳定,连续性好。储层厚度自西向东逐渐变厚,南北向砂层分布较为稳定,储层平均厚度为 5.5 m,平均孔隙度为 19.5%,平均渗透率为 151.4 mD,为中孔中渗储层。

东三段 I 油组沉积微相为扇三角洲前缘沉积,储层由西至东逐渐尖灭,储层平均厚度为 4.3 m,平均孔隙度为 18.2%,平均渗透率为 83.3 mD,为中孔中渗储层。

东三段 II 油组储层为三角洲前缘沉积,储层由西至东逐渐尖灭,储层平均厚度 1.5 m,平均孔隙度为 16.7%,平均渗透率为 35.1 mD,为中孔低渗储层。

1.3 地层温度、压力情况

由 DST 测压资料得出, A 油田压力梯度为 1.095 MPa/100 m,温度梯度为 3.23 °C/100 m,压力系数为 1.0,属正常的温度、压力系统。

2 水力喷砂射孔压裂增产技术

水力喷砂射孔压裂增产技术主要特点:一趟管柱实现“无限次”射孔和多段压裂;压裂造缝点与射流孔眼一体化;根据伯努利原理实现精准分层支配裂缝;工具结构简单,施工程序简易,油、套同注,施工可以形成较大规模,作业风险较低。

2.1 一趟管柱实现“无限次”射孔

水力喷砂射孔工艺较常规 TCP 射孔传统工艺相比,其射孔孔径 25~29 mm 大于目前海上所在应用射孔弹最大孔径 21~25 mm,且不受长隔层的限制,可不分井下位置、不分次数、不分时机射孔,具有很高的机动性。对比于多趟射孔和单独负压返涌可节省多趟管柱作业,显著提高作业时效。该技术不受海上火工品禁运限制,避免了地面装配、火工品存放,以及炸枪、断爆、点火失败等风险。水力喷砂射孔有效改善了近井筒摩阻和由此产生的砂堵问题,使用更加方便、安全,且效果较好,同时在孔眼周围没有形成压实带污染,使得近井筒地带的应力集中情况得到缓解。图 1 为渤海常规 TCP 射孔管柱示意图,图 2 为水力喷砂射孔管柱示意图。

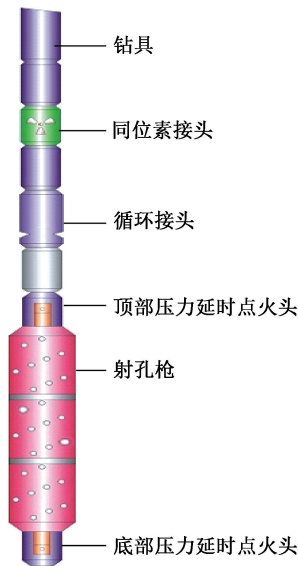


图 1 常规 TCP 射孔管柱结构示意图

Fig. 1 Structure of conventional TCP perforating string

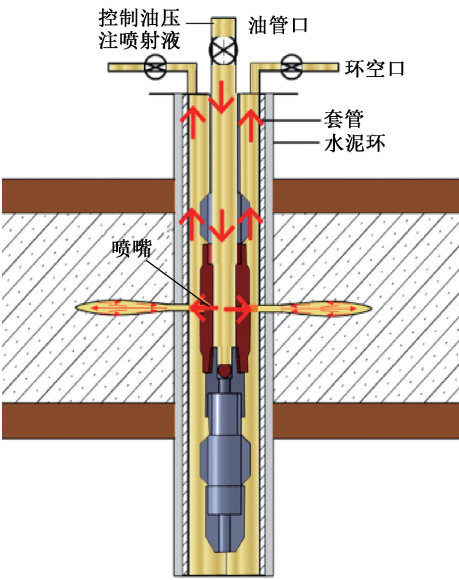


图 2 水力喷砂射孔管柱结构示意图

Fig. 2 Structure of hydraulic sand-jetting perforating string

2.2 一趟管柱实现多段压裂

该技术根据伯努利方程原理^[19],射流在射孔孔道内形成增压作用源于射流动压向静压的转化(动能和势能的和为常数),因此流速大的地方压力较低,如图 3 所示。伯努利原理,也即伯努利方程表述为

$$p + 1/2\rho v^2 + \rho gh = C$$

式中: p 为流体中某点的压强,Pa; v 为流体该点流速,m/s; ρ 为流体密度,kg/m³; g 为重力加速度,n/kg; h 为该点所在高度,m; C 为一个常量。

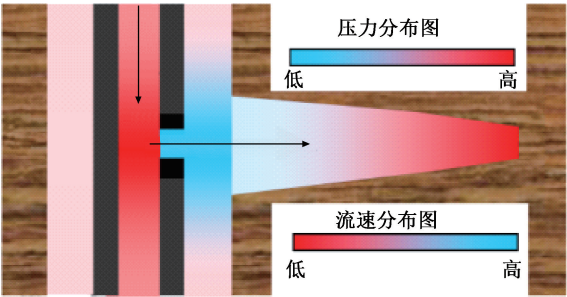


图 3 伯努利原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram for Bernoulli principle

通过上述原理运用,突破了传统方式的机械隔离,实现了水力动态封隔。流体通过喷嘴时的高速流动,在地层裂缝形成并延伸的过程中,喷嘴周围会产生一个极高的负压区,形成一个真空的腔体,在此作用下,水力喷射压裂实现了在施工中“水力封隔”的施工模式^[20-22]。通过采用高速射流来产生井筒内局部低压区的方法,实现不同井段间的动态封隔,一趟管柱可以完成多段压裂作业,无需使用任何机械或化学封隔工具,不仅节省器材费用,而且还避免了机械和化学封隔操作上的安全隐患,降低复杂情况发生的概率。

2.3 压裂造缝点与射流孔眼一体化

液流经过喷嘴后,产生高速射流喷射,此时动能与势能相互转换。由伯努利效应可知,喷嘴周围会产生低压区,更有利于地层破裂、裂缝延伸和分布(图 4)。

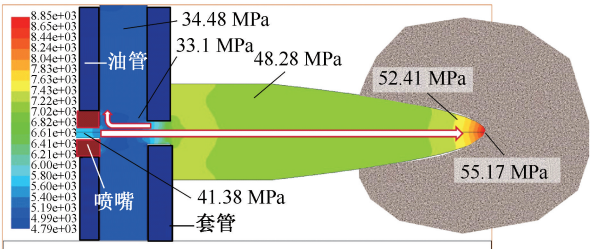


图 4 水力喷砂射孔压裂压力分布示意图

Fig. 4 Pressure distribution of hydraulic sand-jetting perforating

因此,水力喷砂喷嘴对应的位置即为裂缝的初始起裂位置。在裂缝延伸方向已知的前提下,可根据地层情况合理布局多条裂缝,保证主裂缝形成宽度,避免施工压力过高和降低砂堵风险几率。

2.4 油套同注

无机械封隔器阻隔,环空无阻碍,压裂施工期间,环空可同时泵注,如图 5 所示。油套同注的独特方式,满足了压裂作业的大排量需求,有效降解决了在压裂作业过程中井筒滤失量大而影响施工规模的问题,使得施工规模增大;而且,不动管柱可实

现正反循环随时切换,防止砂堵等复杂情况发生,作业安全更有保障。

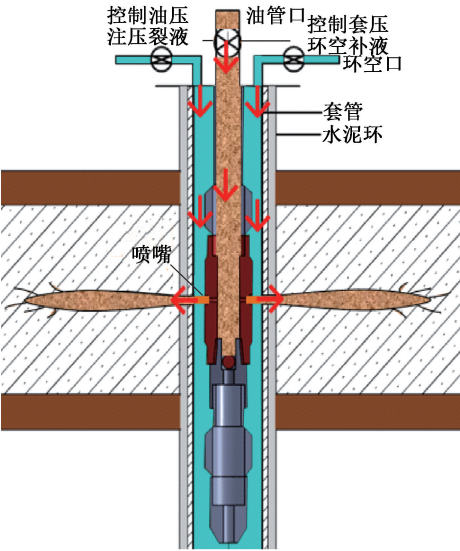


图 5 油套同注示意图

Fig. 5 Co-injection of tubing and casing

2.5 工艺步骤

- (1)下水力喷砂压裂管柱至设计井深。
- (2)电测校深,上提管柱至设计射孔位置。
- (3)进行喷砂射孔。钻杆内泵注携有石英砂的液体,携砂液经由喷射工具的喷嘴后,钻杆内部高压液体的势能及泵压经过喷嘴转化成为水射流的动能,高速度的水射流体很快将在套管上射开一个孔道,射穿套管,并穿透过水泥环和地层岩石,形成连通孔道。
- (4)进行水力压裂。钻杆及环空内同时泵入胶液,直至压开地层,钻杆侧继续增加到设计施工排量,进入主压裂施工程序。
- (5)主压裂作业结束后,关井,放喷,压井。将井下工具移至下一层压裂位置,重复(2)~

(5)步骤,进行下一层水力喷砂射孔压裂作业。

3 现场应用概况

通过对 A 油田同批次 4 口井进行比选,最终优选 A40 井进行水力喷砂射孔压裂增产技术先导性应用,其它 3 口井仍采用常规完井工艺,即常规炮弹射孔不防砂。完井作业结束后,A40 井产能较配产提高 60%,生产压差明显小于其他 3 口井 3~5 MPa,增产效果显著。

3.1 A40 井基本信息

A40 井(北纬 38°07′13.278″N;东经 119°29′30.148″E)所在储层包括古近系东营组东二下段 J 砂层、东三段 I 油组,东二下段 J 砂层储层沉积微相为滩坝砂沉积,砂体分布稳定,连续性好。储层分布受控于沉积相,具有“滩砂成片,坝砂成带”的特点。J 砂层储层厚度自西向东逐渐变厚,南北向砂层分布较稳定,储层平均厚度为 5.5 m。J 砂层储层平均孔隙度为 19.5%,平均渗透率为 151.4 mD;东三段 I 油组沉积微相为扇三角洲前缘沉积,储层由西至东逐渐尖灭,储层平均厚度为 4.3 m。储层平均孔隙度为 18.2%,平均渗透率为 83.3 mD。该油田平均水深 20 m,压力梯度为 1.095 MPa/100 m,温度梯度为 3.23 ℃/100 m,压力系数 1.0,属于正常的温度、压力系统。

A40 井四开 215.9 mm 井眼钻进至完钻井深 3 460.00 m,垂深 3 325.90 m,下 177.8 mm 尾管至 3 455.90 m,球座顶深 3 426.04 m,回接筒顶深 2 737.79 m。最大井斜 20.33°,对应井深 3 017.52 m,射孔段 3 157.3~3 167.9 m、3 330.7~3 337.2 m。A40 井射孔数据见表 1。

表 1 A 油田东营组 A40 井射孔数据

Table 1 Perforating data of Well A40 in Dongying formation A Oilfield

油组	储层信息				综合解释 结论	储层原始 状态结论	射开层段			
	电阻率/ (Ω·m)	孔隙度/ %	渗透率/ mD	泥质 含量/%			斜深/m	斜厚/ m	垂深/m	垂厚/ m
E3D2 ^u	3.4	18.9	61.2	13.4	水层	水层	2 984.5~2 988.0	3.5	2 871.8~2 875.1	3.3
	3.8	19.4	96.8	14.6	水层	水层	2 989.2~3 013.6	24.4	2 876.3~2 899.2	22.9
	4.5	15.9	13.4	23.0	水层	水层	3 014.5~3 018.6	4.1	2 900.0~2 903.9	3.9
	3.9	16.0	10.9	26.8	水层	水层	3 049.7~3 050.4	0.7	2 933.1~2 933.7	0.6
E3D2 ^l	10.2	10.6	0.8	22.6	差油层	差油层	3 157.0~3 157.3	0.3	3 034.4~3 034.7	0.3
	12.8	20.6	190.2	6.5	弱水淹	油层	3 157.3~3 158.4	1.1	3 034.7~3 035.8	1.1
	19.1	18.6	82.7	2.9	未水淹	油层	3 164.1~3 166.8	2.7	3 041.2~3 043.7	2.5
	13.4	21.4	181.8	1.9	弱水淹	油层	3 166.8~3 167.9	1.1	3 043.7~3 044.8	1.1
	14.8	9.3	1.2	9.2	致密层	致密层	3 167.9~3 168.5	0.6	3 044.8~3 045.4	0.6
E3D3-I	16.7	9.1	0.7	10.6	致密层	致密层	3 329.9~3 330.7	0.8	3 199.9~3 200.6	0.7
	17.9	17.4	45.7	13.2	未水淹	油层	3 330.7~3 336.6	5.9	3 200.6~3 206.3	5.7
	12.0	17.3	30.4	11.1	弱水淹	油层	3 336.6~3 337.2	0.6	3 206.3~3 206.9	0.6

该井目的层为东营组 J 砂体和 I 油组, 储层薄 (1.1 m+3.6 m+6.3 m), 造成 TCP 射孔误差可能性增大; 隔层长 (162.8 m), 常规压裂需要两趟射孔+两趟压裂实现; 中孔 (17.30%~21.45%) - 中低渗 (30.4~190.2 mD) 储层, 地层导流能力弱特点。

3.2 管柱组合

管柱组合依次为: 盲堵+花管+球座+水力喷枪+变扣 (73.025 mmEUE P×88.9 mmIF B)+88.9 mm 钻杆+88.9 mm 钻杆同位素接头+88.9 mm 钻杆+变扣 (88.9 mmIF P×114.3 mmIF B)+127.0 mm 钻杆; 管柱结构如图 6 所示。

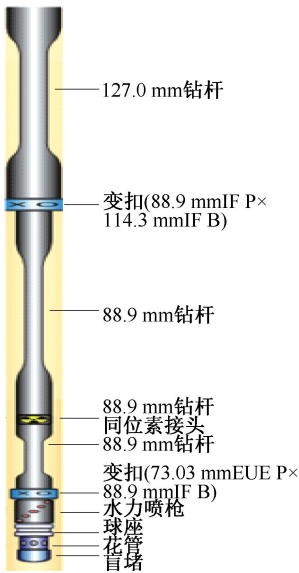


图 6 水力喷砂射孔压裂管柱结构示意图
Fig. 6 Fracturing string of hydraulic sand-jetting perforating

3.3 施工步骤

- (1) 连接下入水力喷射压裂管柱, 下钻到位;
- (2) 电测校深, 上提管柱至射孔压裂位置;
- (3) 连接压裂管线并试压, 进行正、反循环测试;
- (4) 导通正循环流程, 泵入 (2 600 L/min) 石英砂射孔作业;
- (5) 关闭返出, 小排量压开地层, 进行主压作业 (钻杆排量 2 600 L/min, 环空排量 1 600 L/min);
- (6) 停泵, 关井扩散压力;
- (7) 洗压井作业;
- (8) 起钻。

3.4 施工效果

(1) 一趟管柱顺利完成了两层射孔及压裂作业, 底层及顶层水力喷砂射孔深度分别为 3 333.7 m

和 3 165.5 m。

(2) 该工艺实现了油套同注大排量, 最大排量高达 4 200 L/min。

(3) 压裂效果显著: ①裂缝形态优。底层缝长 80 m、缝宽 1.656 cm、缝高 28 m; 顶层缝长 77.3 m、缝宽 1.681 cm、缝高 22.1 m; ②导流能力强。底层压裂结束后, 静态漏失 30 m³/h; 顶层压裂结束后, 静态漏失 40 m³/h。底层喷砂射孔和水力压裂施工曲线分别如图 7、图 8 所示。

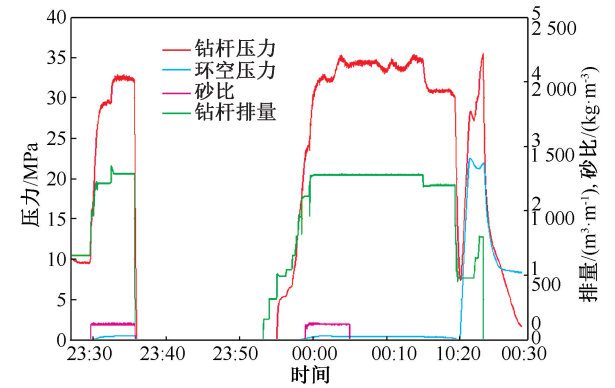


图 7 底层喷砂射孔施工曲线
Fig. 7 Operating curve of bottom layer using sand-jetting perforating

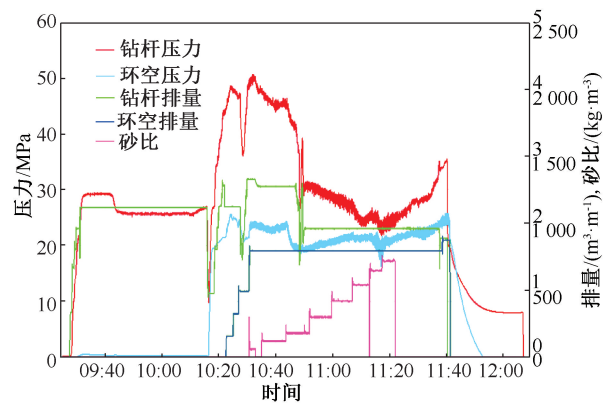


图 8 底层水力压裂施工曲线
Fig. 8 Operating curve of bottom layer using hydraulic fracturing

顶层喷砂射孔和水力压裂施工曲线分别如图 9、图 10 所示。

(4) 安全、无复杂情况发生, 较施工设计提前 0.75 d。

3.5 投产情况

投产后, 稳定日产量为 118 m³, 较钻后配产 (76 m³/d) 增幅 60% (图 11); 生产压差 5.11 MPa, 较同批次同层位井低 3~5 MPa, 如图 12 所示。

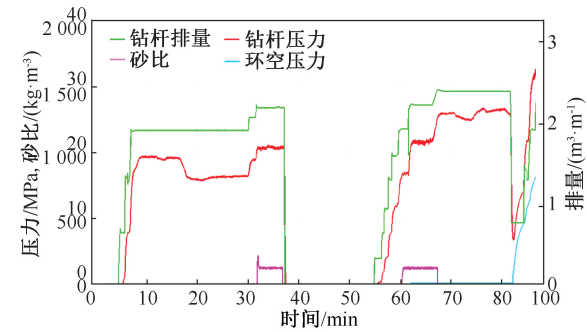


图 9 顶层喷砂射孔施工曲线
Fig. 9 Operating curve of top layer using sand-jetting perforating

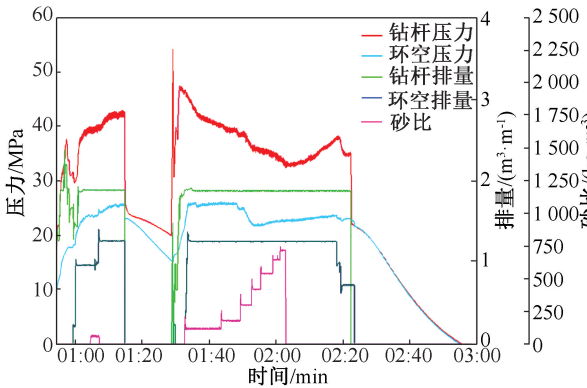


图 10 顶层水力压裂施工曲线
Fig. 10 Operating curve of top layer using hydraulic fracturing

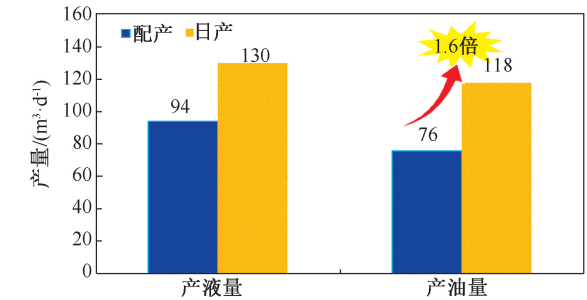


图 11 A40 井钻后与实际产量对比
Fig. 11 Comparison between actual production and post-drilling production of Well A40

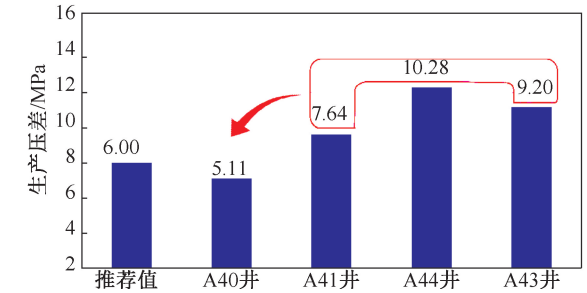


图 12 A40 井与同批次同层位井生产压差对比
Fig. 12 Comparison of production pressure difference between Well A40 and the same batch of wells producing in the same layer

4 结论

(1) 水力喷砂射孔压裂增产技术在 A40 井的成功应用,证实了该工艺在海上油田增产的可行性和易操作性,为海上油田探索出一种新型完井增产开采思路,可供渤海油田深井致密地层的开发增产提供借鉴。

(2) 水力动态封隔代替了机械封隔和化学封隔,该技术实现了一趟管柱完成两层射孔和压裂,不仅节省了器材费用,而且避免了机械和化学封隔操作上的安全隐患,降低复杂情况发生的概率。

(3) 该技术没有常规聚能射孔弹射孔对油层的压实作用,避免了对储层的二次伤害,具有风险低、工艺简、择井宽、效益高典型四大优势,应用前景广阔,推广价值较高。

致谢:论文撰写过程中,魏剑飞教授给予了悉心指导,在此表示感谢;感谢天津分公司研究院、中海油服,以及哈里伯顿等单位提供的大力支持。

参考文献

[1] SURJAATMADJA J B, GRUNDMANN S R, MCDANIEL B W, et al. Hydrazet fracturing: An effective method for placing many fractures in openhole horizontal wells [C]. SPE 48856, 1998.

[2] EAST L, WILLETT R, SURJAATMADJA J, et al. Application of new fracturing technique improves stimulation success for openhole horizontal completions [C]. SPE 86480, 2004.

[3] EAST L, GRIESER W, MCDANIEL B W, et al. Successful application of hydrazet fracturing on horizontal wells completed in a thick shale reservoir [C]. SPE 91435, 2004.

[4] 陈路原. 涇河油田连续油管水力喷砂射孔环空多簇压裂技术[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(4): 108-112.

CHEN Luyuan. Technology of hydraulic sand blasting perforation and multiple clusters fracturing with coiled tubing in Jinghe Oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(4): 108-112.

[5] 董尚富. 一口疑难水平井的成功压裂改造[J]. 油气井测试, 2017, 26(2): 68-69, 72.

DONG Shangfu. Successful fracturing to a difficult horizontal well [J]. 2017, 26(2): 68-69, 72.

[6] 郝增贤, 孙泽贞, 冉风华, 等. 水力喷射压裂工艺在水平井的应用[J]. 油气井测试, 2014, 23(5): 56-58.

HAO Zengxian, SUN Zezhen, RAN Fenghua, et al. Application of hydraulic fracturing technology in horizontal injection well [J]. Well Testing, 2014, 23(5): 56-58.

[7] 吴春方, 陈作, 刘建坤, 等. 煤层气 U 形井水力喷砂压裂技术[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(4): 105-109.

WU Chunfang, CHEN Zuo, LIU Jiankun, et al. Hydrazet fracturing technology of U-shape coal bed methane wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(4): 105-109.

- [8] 王昱茜,赵婷,胡国强,等. 水力喷砂分段压裂工艺在中平6井的现场施工分析[J]. 石油化工应用,2018,37(8):30-35,48.
WANG Yuxi, ZHAO Ting, HU Guoqiang, et al. On-site construction analysis about hydraulic sandblasting staged fracturing process of Zhongping 6 well [J]. Petrochemical Industry Application, 2018,37(8):30-35,48.
- [9] 夏克文,李民乐,王建国,等. 水力喷砂射孔分段压裂技术在水平井中的应用[J]. 油气井测试,2012,21(4):38-39.
XIA Kewen, LI Minle, WANG Jianguo, et al. Application of the technique of hydraulic jet perforation and staged fracturing to horizontal well [J]. Well Testing, 2012,21(4):38-39.
- [10] 周鹏遥,杨向同,刘会锋,等. 连续油管带底封喷砂射孔环空分段压裂技术在塔里木和田河气田的应用[J]. 油气井测试,2015,24(5):49-51.
ZHOU Pengyao, YANG Xiangtong, LIU Huifeng, et al. Application of Annulus Staged Fracturing Technology with Bottom Sealed Sandblast Perforating by the Coiled Tubing in the Tarim and Tianhe Gas Field [J]. Well Testing, 2015,24(5):49-51.
- [11] 吴建军,詹顺,吴明杨,等. 扇面水力喷砂定向射孔压裂技术在煤层气井中的应用[J]. 钻采工艺,2018,41(4):37-40.
WU Jianjun, ZHAN Shun, WU Mingyang, et al. Application of oriented sector perforation fracturing with hydraulic sand blasting in CBM wells [J]. Drilling & Production Technology, 2018,41(4):37-40.
- [12] 李梅,刘志斌,吕双,等. 连续油管喷砂射孔环空分段压裂技术在苏里格气田的应用[J]. 石油钻采工艺,2013,35(4):82-84.
LI Mei, LIU Zhibin, LYU Shuang, et al. Application of coiled tubing jet perforation separated fracturing through annulus technique in Sulige gas field [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013,35(4):82-84.
- [13] 苏崇刚,高卫东. 水平井水力喷射压裂技术探讨[J]. 石化技术,2015,22(6):177.
SU Chonggang, GAO Weidong. Exploration of hydraulic jet fracturing technologies for the horizontal well [J]. Petrochemical Industry Technology, 2015,22(6):177.
- [14] 李宪文,陈生圣,赵文轸. 水力喷砂射孔压裂喷嘴的损伤试验与分析[J]. 石油矿场机械,2009,38(2):42-46.
LI Xianwen, CHEN Shengsheng, ZHAO Wenzhen. Experimental study of hydrajet nozzle on abrasion [J]. Oil Field Equipment, 2009,38(2):42-46.
- [15] 范薇. 水力喷砂压裂工具关键部件的仿真研究[D]. 西安:西安石油大学,2010.
FAN Wei. Simulation study on key part of hydrajet fracturing tool [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2010.
- [16] 侯浩. 水力喷砂压裂提高管柱单趟施工能力探究[J]. 化工管理,2016(17):112.
HOU Hao. Study on improving single-pass construction capacity of pipe string by hydraulic sand blasting fracturing [J]. Chemical Enterprise Management, 2016(17):112.
- [17] 王旭,李丹丹. 水力喷砂射孔定向压裂技术在吴起油田的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量,2018,38(24):170-171.
WANG Xu, LI Dandan. Application of hydraulic sandblasting perforation directional fracturing technique in Wuqi Oilfield [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2018,38(24):170-171.
- [18] 袁春宏. 水力喷砂射孔压裂技术在试油工艺中的实践分析[J]. 中国石油和化工标准与质量,2011,31(8):187.
YUAN Chunhong. The practice analysis of hydraulic sand blasting and perforation fracturing technique in oil testing process [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2011,31(8):187.
- [19] 田守嵘,李根生,黄中伟,等. 水力喷射压裂机理与技术研究进展[J]. 石油钻采工艺,2008,30(1):58-62.
TIAN Shouzheng, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Research on hydrajet fracturing mechanisms and technologies [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008,30(1):58-62.
- [20] 张娜. 水力喷砂射孔压裂联作技术方法研究[D]. 大庆:东北石油大学,2016.
ZHANG Na. Research of fracturing hydraulic sand blasting perforation combination technology [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2016.
- [21] 曲海,李根生,樊永明,等. 水力喷射压裂工艺在 $\phi 101.6\text{mm}$ 套管井中的应用[J]. 石油钻采工艺,2011,33(3):55-57,61.
QU Hai, LI Gensheng, FAN Yongming, et al. Application of hydrajet fracturing technology to the treatment of 4 in well [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011,33(3):55-57,61.
- [22] 李梅,刘志斌,路辉,等. 连续管无限级滑套分段压裂技术在苏里格的应用[J]. 石油机械,2015,43(2):40-43.
LI Mei, LIU Zhibin, LU Hui, et al. Application of CT stepless sliding sleeve staged fracturing technique in Sulige [J]. China Petroleum Machinery, 2015,43(2):40-43.

编辑 王 军

第一作者简介:韩超,男,1987年出生,钻完井总监,工程师,2008年毕业于太原理工大学机械设计制造及其自动化专业,目前从事中国海上油气田勘探开发工程项目工作。电话:022-66503098;Email:hanchao2@cnoc.com.cn。通信地址:天津市滨海新区海川路2121号渤海石油管理局大厦C座806,邮政编码:300452。