

库车凹陷博孜超深凝析气藏加砂压裂技术

徐国伟¹, 邹国庆², 朱绕云¹

1. 中国石油塔里木油田分公司勘探事业部 新疆库尔勒 841000

2. 中国石油塔里木油田分公司油气田产能建设事业部 新疆库尔勒 841000

通讯作者: Email: xugw-tlm@petrochina.com.cn

引用: 徐国伟, 邹国庆, 朱绕云. 库车凹陷博孜超深凝析气藏加砂压裂技术[J]. 油气井测试, 2020, 29(6): 50-54.

Cite: XU Guowei, ZOU Guoqing, ZHU Raoyun. Sand fracturing technology of Bozi ultra deep condensate gas reservoir in Kuqa depression [J]. Well Testing, 2020, 29(6): 50-54.

摘要 塔里木油田博孜凝析气藏单井酸压改造后, 提产效果达不到预期目标, 生产过程中井口温度低于析蜡点温度, 井筒结蜡现象严重。根据博孜区块储层特点, 采用不同粒径支撑剂组合工艺、纤维暂堵转向分层工艺和树脂覆膜陶粒支撑剂防砂工艺相结合的加砂压裂配套技术, 实现了博孜区块超深储层改造作业。博孜 X 井采用该加砂压裂技术, 日产气由 $4.68 \times 10^4 \text{ m}^3$ 上升为 $51.5 \times 10^4 \text{ m}^3$, 是同区块 3 口常规酸压改造井平均气产量的 3 倍, 日产油由 0.46 m^3 上升为 40.97 m^3 , 效果显著。该技术为国内类似储层改造作业提供了技术支持。

关键词 库车凹陷; 凝析气藏; 酸化; 加砂压裂; 组合支撑剂; 纤维暂堵; 结蜡; 防砂

中图分类号: TE353 文献标识码: B DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.06.009

Sand fracturing technology for Bozi ultra deep condensate gas reservoir in Kuqa depression

XU Guowei¹, ZOU Guoqing², ZHU Raoyun¹

1. Department of Exploration, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang 841000, China

2. Oil and Gas Field Productivity Construction Division, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang 841000, China

Abstract: After acid fracturing of a single well in Bozi condensate gas reservoir of Tarim Oilfield, the effect of production improvement cannot reach the expected goal. In addition, in the process of production, because the wellhead temperature is lower than the wax precipitation temperature, the wellbore has a serious wax deposition phenomenon. According to the reservoir characteristics of Bozi block, the sand fracturing matching technology combining with different particle size proppant combination technology, fiber temporary plugging steering layering technology and resin coated ceramist proppant sand control technology was adopted to realize the fracturing for ultra-deep reservoir in Bozi block. With this sand fracturing technology, the gas production rate of well Bozi x increases from $4.68 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ to $51.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, which is three times of the average gas production of three wells with conventional acid fracturing in the same block, and the oil production rate increases from $0.46 \text{ m}^3/\text{d}$ to $40.97 \text{ m}^3/\text{d}$, and the fracturing effect is remarkable. This technology provides technical support for fracturing operation of similar reservoirs in China.

Keywords: Kuqa depression; condensate gas reservoir; acidification; sand fracturing; combined proppant; fiber temporary plugging; wax deposition; sand control

随着塔里木盆地库车坳陷油气勘探开发的不断深入, 白垩系巴什基奇克组的勘探从中浅层(3 000~5 000 m)进入深层—超深层(大于 5 000 m)。博孜气藏埋藏深度为 7 000 m, 地层压力 125 MPa, 是一套超深、超高压、高温、孔隙型低孔砂岩地层^[1-3]。该区块已钻井的单井产量低、井筒结蜡、地层出砂, 成为困扰博孜区块大规模开发的主要因素。

水力压裂是低渗储层增产的有效手段, 为页岩气、致密砂岩气的高效开发提供了技术支撑^[4-5]。

王雷等^[6-8]通过实验和模拟手段分析了不同粒径支撑剂组合的导流能力, 支撑剂组合比例和返排速度对支撑剂回流及缝内分布影响。钟焯等^[9]认为, 采用纤维支撑剂防回流技术, 优化压裂液的破胶性能和提高闭合压力能有效防止压裂井出砂。刘欣等^[10]对压裂液和压裂工艺进行优化, 解决了安棚深层系凝析气藏增产问题。刘斌等^[11]通过优化压裂液中破乳剂、防膨剂, 采用组合支撑剂方法, 在高庙沙溪庙组浅层凝析气藏压裂中应用 18 井次均取得

较好效果。吴国涛等^[12]提出了针对不同暂堵工艺类型的复合暂堵方式,并通过实验给出了不同尺寸暂堵剂的最优使用比例。邹国庆等^[13]针对塔里木盆地库车山前低孔裂缝性致密储层采用暂堵转向缝网酸压技术,取得了很好的改造效果。车明光等^[14]、冯虎等^[15]针对塔里木油田高温高压裂缝性气藏分层加砂压裂工艺和加重压裂液进行研究,解决了储层厚度大,笼统改造效果差,施工井口压力高的问题。张伟民等^[16]介绍了国内外覆膜陶粒支撑剂的研究进展,树脂覆膜支撑剂的显著特点就是密度低、抗破碎能力强、防砂防嵌入。机械分层改造工艺在超深井分层改造中受到极大限制,周生福等^[17]认为,在超深超高温高压含腐蚀介质油气井中完井封隔器的应用成功率低,通过建立评价体系降低完井封隔器失败率,确保油气井生产过程中井筒完整性。

博孜区块储层埋藏深、厚度大、温度高、地层压力高,凝析气中蜡含量高、易堵塞油管,根据博孜区块储层物性、流体特征,以及其他井酸化压裂提产效果,提出了采用不同粒径支撑剂组合工艺、纤维暂堵转向分层工艺、树脂覆膜陶粒支撑剂防砂工艺进行加砂压裂,增加储层改造波及范围,提高该区块单井产能,同时解决井筒流动温度低而导致的井筒结蜡问题。

1 地质背景

库车前陆盆地位于塔里木盆地北部,南天山造山带南翼,受南天山强烈挤压作用,划分为北部单斜带、克拉苏构造带、拜城凹陷等7个构造单元。其中克深区带位于克拉苏构造带,克深区带自东向西分为阿瓦特段、博孜段、大北段、克深段4个构造带,如图1所示,博孜段位于克深区带西部。

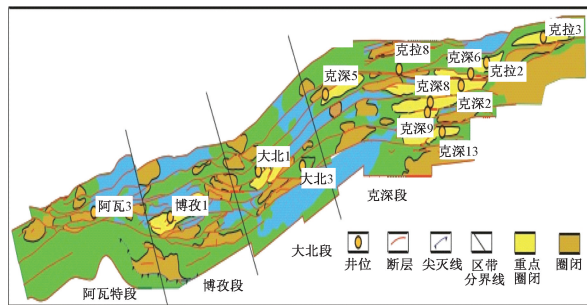


图1 库车前陆盆地克拉苏构造带

Fig. 1 Kelasu structural belt in Kuqa foreland basin

克深区带盐下气藏油气分布在平面上表现为

东气西油的特征。根据该区块测试结果,博孜气藏幅度大于储集层厚度,储层埋深7 000 m左右,地层压力系数1.83,井底温度130℃,地层产出天然气含蜡量约为0.5%,CO₂含量0.171%~0.186%。综合分析博孜气藏为常温高压边水层状断背斜高含蜡凝析气藏。

2 储层特征

加砂压裂前对储层进行综合评估是加砂压裂设计的基础,博孜区块储层岩石类型以长石砂岩为主,发育天然裂缝,脆性指数高,具备进行加砂压裂提产的条件。

2.1 岩性特征

巴什基奇克组储集层岩石类型以岩屑长石砂岩为主,含少量长石岩屑砂岩,石英含量一般为40%~60%,长石含量一般为20%~35%,以钾长石为主,岩屑含量一般为15%~30%,主要为岩浆岩岩屑,其次为变质岩岩屑。

2.2 物性特征

由于喜马拉雅晚期和燕山期强烈的构造挤压和构造变形,形成了博孜气藏裂缝体系。从成像资料看,博孜区块目的层段存在一定的高角度裂缝及微裂缝,裂缝走向以近东西向(南东东向-北西西向)为主,裂缝密度主要分布在0.2~0.4条/m之间。岩心裂缝统计结果显示,裂缝密度平均为0.87条/m,裂缝开度平均为0.25 mm,裂缝发育程度明显低于克深-大北地区。

从博孜区块巴什基奇克组全井段测井物性分析解释来看,有效储层孔隙度范围在3.5%~13.46%之间,平均6.02%;渗透率分布在 $0.062 \times 10^{-3} \sim 0.234 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间。实测岩心分析,孔隙度主要分布在4.0%~12.0%之间,平均7.74%;渗透率主要分布在 $0.1 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间。属特低孔特低渗物性储层。

2.3 岩石力学特征

根据三轴岩石力学岩心实验,博孜区块地层平均杨氏模量在30 GPa左右,泊松比在0.2左右,压裂过程中裂缝易于开启。应力状态属潜在走滑型应力机制,水平应力作用较强,水平两向主应力差异相对较小,脆性指数高,易于形成复杂缝网。

3 加砂压裂配套技术

通过组合支撑剂降低压裂液滤失,采用暂堵转

向加砂压裂技术提高纵向上波及面积,通过尾追树脂覆膜陶粒支撑剂,减少支撑剂的返排。

3.1 不同粒径支撑剂组合工艺

博孜气藏主要的储集体和渗流通道依赖于裂缝系统,裂缝系统的发育程度对单井产量起到决定性作用。然而,在加砂压裂改造过程中,裂缝系统越发育,泵注过程中液体的滤失系数越大。在排量受限的情况下,容易造成砂堵风险。采用在前置液中加入 $212\sim 106\ \mu\text{m}$ 的小粒径陶粒支撑剂,一方面小粒径支撑剂进入缝口时打磨缝口,减少孔眼摩擦;另一方面小粒径支撑剂进入微小裂缝系统,降低液体滤失系数,提高造主缝能力,裂缝闭合后小粒径支撑剂又起到支持微裂缝作用。大粒径陶粒支撑剂($1\ 180\sim 600\ \mu\text{m}$)由于沉降速度快,一般沉降于缝口,起到支持缝口作用,在返排过程中,小粒径支撑剂回流量会明显增加。考虑裂缝系统及支撑剂支撑状况,选用中等粒径陶粒支撑剂($600\sim 300\ \mu\text{m}$)和小粒径陶粒支撑剂($212\sim 106\ \mu\text{m}$)组合工艺。

3.2 纤维暂堵转向分层工艺

博孜区块巴什基奇克组储层厚度 $200\ \text{m}$ 左右,纵向上应力剖面差异大,采用笼统压裂工艺,压裂液优先进入应力相对小、容易吸液的层段,对于应力高的层段,无法有效造缝,层段得不到有效改造。机械封隔器、桥塞等机械分段方法适用于中浅井、井身结构简单、地层压力不高的井。博孜区块井深 $7\ 000\ \text{m}$,地层压力 $120\ \text{MPa}$ 。采用机械分段方法操作复杂、作业时间长、可靠性差。因此,通过暂堵方法,增加裂缝复杂程度,在携砂液中伴注浓度 $12\ \text{kg}/\text{m}^3$ 可溶解纤维,对已压开的层段实现封堵,提高净压力,从而压开高应力层段,实现暂堵转向的分层目的(图2)。

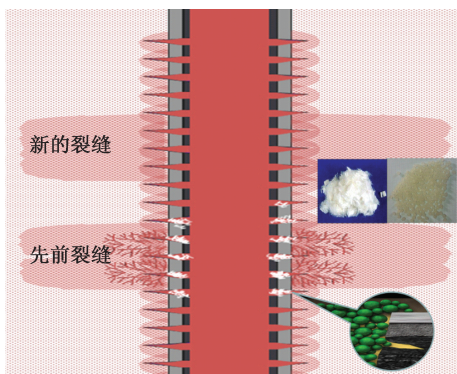


图2 纤维携砂暂堵转向示意图

Fig. 2 Schematic diagram of temporary plugging and steering of fiber carrying sand

3.3 树脂覆膜陶粒支撑剂防砂工艺

树脂覆膜支撑剂主要用于防砂作业,从克深气田投产情况看,加砂压裂后的井在后期开发过程中不同程度出现出砂现象。从图3可以看出,克深区块加砂压裂井返排砂量高达 $196.2\ \text{L}$,部分井因工作制度不合理,导致井筒被砂埋而不能正常生产。从加砂压裂返排砂量看,克深气田采用常规加砂压裂工艺,排液期间平均出砂量为 $70\ \text{L}$ 。

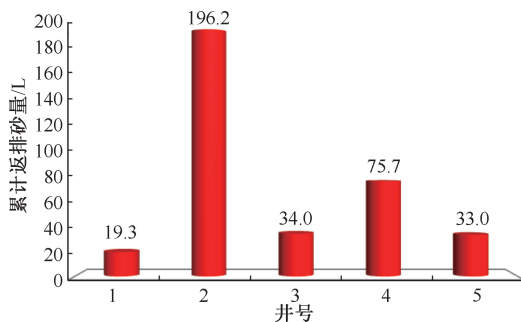


图3 克深区块加砂压裂井累计返排砂量

Fig. 3 Cumulative sand flowback of sand fracturing wells in Keshen block

采用树脂覆膜陶粒支撑剂防砂工艺,在高温、高闭合应力作用下,该支撑剂颗粒间在闭合压力 $100\ \text{MPa}$ 下形成的网状结构及导流能力如图4、图5所示,防止支撑剂的脱落和运移,油气可顺利通过支撑剂间空隙进行流动。

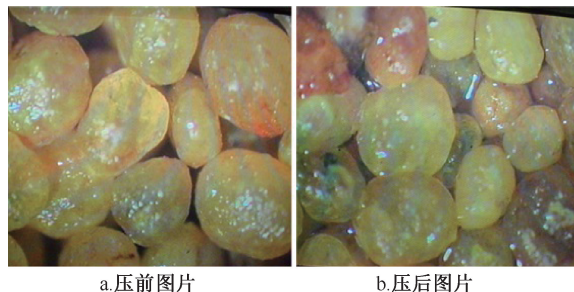


图4 覆膜陶粒支撑剂胶结状态

Fig. 4 Cementation state of coated ceramsite proppant

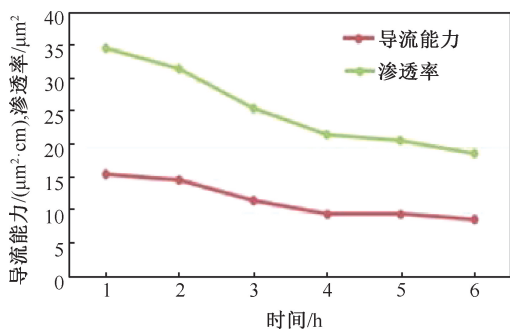


图5 覆膜陶粒胶结时间与导流能力、渗透率关系曲线

Fig. 5 Relationship between cementation time and conductivity, permeability of coated ceramsite

4 现场应用

博孜 X 井位于库车前陆盆地克拉苏构造带克深区带博孜 X 号构造上,目的层为白垩系巴什基奇克组,主要岩性为褐色泥岩、褐色细砂岩、灰褐色细砂岩。岩石矿物以石英为主,占总矿物含量的 38.6%,长石次之,其中钾长石 13.3%,斜长石 11.8%,方解石 15.8%,白云石 9.0%,黏土矿物含量较高,占总矿物的 9.3%。黏土矿物以伊蒙混层矿物为主,伊利石次之。

测井解释孔隙度 3.8%~11.7%,含油饱和度 50%~78%,没有水层。实测岩心孔隙度平均 6.18%,气测渗透率平均为 0.039 1 mD。成像解释上部地层主要发育 II 类裂缝,裂缝走向为北西西—南东东向,与天然裂缝夹角 30°~40°,下部地层主要发育 III 类裂缝,裂缝走向为北西西—南东东向,与天然裂缝夹角约 10°,拾取到的裂缝条数为 186 条,II 类裂缝 41 条(占 22%),III 类裂缝 145 条(占 78%)。

该井加砂压裂施工如图 6 所示,共注入压裂液 1 153 m³,陶粒 96 t,其中 70/140 目粉陶 2 t,30/50 目高强度陶粒 79 t,尾追 30/50 目覆膜陶粒支撑剂 15 t。砂浓度最高为 400 kg/m³,最高泵压 105.8 MPa,排量 5.7 m³/min。加入纤维 300 kg 进行转向,转向后相同排量下泵压上升 8 MPa。净压力拟合分析,压裂初期因天然裂缝开启导致压裂液滤失系数较高(4.9×10⁻³ m/min^{1/2}),显示出地层多裂缝特征,压裂液滤失大。采用前置液粉陶段塞降滤措施后,降低液体滤失的同时也降低井筒裂缝弯曲效应。

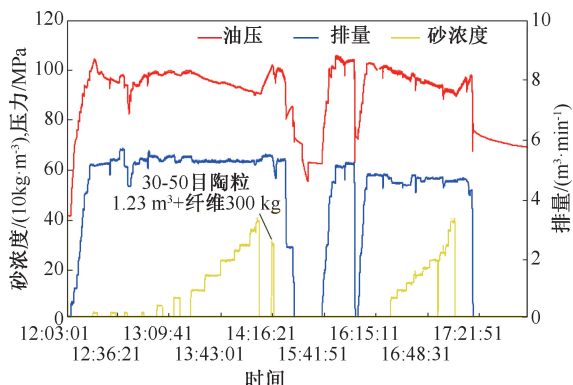


图 6 博孜 X 井加砂压裂施工曲线

Fig. 6 Sand fracturing operation curve of well Bozi X

该井采用 7 mm 油嘴求产,油压 81.2 MPa,日产气 51.5×10⁴ m³,日产油 40.97 m³,排液阶段累计返

排砂量为 0.5 L,试采期间井口温度为 45.4 ℃,井筒无结蜡现象。

博孜区块三口井采用酸压提产工艺,在试采期间总体表现为单井产量低,其中博孜 a 井酸压后日产气 14.5×10⁴ m³,博孜 b、博孜 c 井酸压后,日产气分别为 16.2×10⁴ m³、10.6×10⁴ m³,井口温度低(10.0~23.7 ℃)、井筒蜡堵严重,不能正常连续生产。采用酸压方式来提高单井产能,提产效果有限,井口温度低于该区块析蜡点温度,井筒结蜡现象严重。目前,博孜区块 6 井次采用该加砂压裂配套技术,平均日产气量达到 44.5×10⁴ m³,相比采用常规酸压工艺改造的井平均产量高出 3 倍,同时有效提高井筒温度,解决井筒结蜡问题。

5 总结

(1) 采用不同粒径支撑剂组合工艺、纤维暂堵转向分层工艺和树脂覆膜陶粒支撑剂防砂工艺等配套技术,可降低施工过程中的压裂液滤失,实现纵向上的软分层改造和减少出砂量。

(2) 博孜区块前期井产量低、井筒结蜡严重,酸压改造产量增长有限,开采过程中,井口温度低、井筒蜡堵现象严重。采用加砂压裂技术提高了单井产量,提高了井口温度,解决了井筒结蜡问题。

(3) 该加砂压裂配套技术不仅适用于博孜区块储层改造提产作业,同时对于国内类似的超深、高温裂缝性致密砂岩凝析气藏储层改造作业具有重要参考意义。

致谢:感谢塔里木油田公司油气工程研究院、勘探开发研究院等单位在论文写作过程中提供的数据支撑。

参考文献

- [1] 张荣虎,刘春,杨海军,等. 库车坳陷白垩系超深层储集层特征与勘探潜力[J]. 新疆石油地质, 2016, 37(4): 423-429.
ZHANG Ronghu, LIU Chun, YANG Haijun, et al. Characteristics and exploration potential of ultra-deep cretaceous reservoir in Kuqa depression, Tarim basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2016, 37(4): 423-429.
- [2] 雷刚林,谢会文,张敬洲,等. 库车坳陷克拉苏构造带构造特征及天然气勘探[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6): 816-820, 835.
LEI Ganglin, XIE Huiwen, ZHANG Jingzhou, et al. Structural features and natural gas exploration in the Kelasu structural belt, Kuqa depression [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(6): 816-820, 835.
- [3] 杜金虎,王招明,胡素云,等. 库车前陆冲断带深层大气

- 区形成条件与地质特征[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(4): 385-393.
- DU Jinhui, WANG Zhaoming, HU Suyun, et al. Formation and geological characteristics of deep giant gas provinces in the Kuqa foreland thrust belt, Tarim basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(4): 385-393.
- [4] 李素珍, 曾思云, 邓效国, 等. 福山复杂断块油气藏大型压裂工艺技术[J]. 油气井测试, 2019, 28(1): 60-66.
- LI Suzhen, ZENG Siyun, DENG Xiaoguo, et al. Large-scale fracturing technology for Fushan complex fault block oil and gas reservoir [J]. Well Testing, 2019, 28(1): 60-66.
- [5] 李宝军, 高永海, 周承富, 等. 大宁-吉县区块致密砂岩气储层压裂试气一体化技术[J]. 油气井测试, 2018, 27(5): 56-60.
- LI Baojun, GAO Yonghai, ZHOU Chengfu, et al. Integration technology of fracturing and gas test for tight sandstone gas reservoirs in Daning-Jixian block [J]. Well Testing, 2018, 27(5): 56-60.
- [6] 王雷, 张士诚, 张文宗, 等. 复合压裂不同粒径支撑剂组合长期导流能力实验研究[J]. 天然气工业, 2005, 25(9): 64-66.
- WANG Lei, ZHANG Shicheng, ZHANG Wenzong, et al. Experimental research on long-term conductivity of the proppant combination with different grain sizes in complex fracturing [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(9): 64-66.
- [7] 王雷, 张士诚. 不同粒径支撑剂组合比例对支撑剂回流及缝内分布影响研究[J]. 新疆石油天然气, 2014, 10(4): 50-52.
- WANG Lei, ZHANG Shicheng. Research on the influence of proppant combination ratio on proppant backflow volume and distribution in fracture [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2014, 10(4): 50-52.
- [8] 王雷, 张士诚. 压裂液返排速度对支撑剂回流量及其在裂缝内分布的影响[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(1): 101-110.
- WANG Lei, ZHANG Shicheng. Influence of the backflow velocity of fracturing fluid on the backflow volume and distribution of proppant in fractures [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(1): 101-110.
- [9] 钟烨, 邓燕, 郭建春, 等. 压裂气井防支撑剂回流技术研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2011, 13(1): 70-72, 84.
- ZHONG Ye, DENG Yan, GUO Jianchun, et al. Study of anti-backflow technology for propping agent in fracturing gas wells [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2011, 13(1): 70-72, 84.
- [10] 刘欣, 刘洪涛, 陶良军, 等. 高温裂缝性凝析气藏压裂技术研究[J]. 长江大学学报, 2007, 4(2): 207-210.
- LIU Xin, LIU Hongtao, TAO Liangjun, et al. Techniques for fracturing in high temperature fracture and condensate gas reservoirs [J]. Journal of Yangtze University, 2007, 4(2): 207-210.
- [11] 刘斌, 尹琅. 高庙沙溪庙组凝析气藏压裂技术研究及应用[J]. 油气井测试, 2015, 24(5): 54-55.
- LIU Bin, YIN Lang. Research and application of fracturing technology to gas condensate reservoir of Shaximiao group at Gaomiao [J]. Well Testing, 2015, 24(5): 54-55.
- [12] 吴国涛, 薛世杰, 王永贤, 等. 复合暂堵剂暂堵技术[J]. 油气井测试, 2018, 27(6): 51-56.
- WU Guotao, XUE Shijie, WANG Yongxian, et al. Research on temporary plugging technology of composite temporary plugging agent [J]. Well Testing, 2018, 27(6): 51-56.
- [13] 邹国庆, 熊勇富, 袁孝春, 等. 低孔裂缝性致密储层暂堵转向酸压技术及应用[J]. 钻采工艺, 2014, 37(5): 66-68.
- ZOU Guoqing, XIONG Yongfu, YUAN Xiaochun, et al. Temporary plugging and diverting acid fracturing technology and its application in low porosity and fractured reservoir [J]. Drilling & Production Technology, 2014, 37(5): 66-68.
- [14] 车明光, 王永辉, 彭建新, 等. 深层-超深层裂缝性致密砂岩气藏加砂压裂技术——以塔里木盆地大北、克深气藏为例[J]. 天然气工业, 2018, 38(8): 63-68.
- CHE Mingguang, WANG Yonghui, PENG Jianxin, et al. Sand fracturing technologies for deep and ultra-deep fractured tight sandstone gas reservoirs: A case study of Dabei and Keshen gas reservoirs in the Tarim basin [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(8): 63-68.
- [15] 冯虎, 徐志强, 徐延涛. 塔里木油田超深超高压气藏的成功改造[J]. 断块油气田, 2014, 21(6): 819-822.
- FENG Hu, XU Zhiqiang, XU Yantao. Successful stimulation of ultra-deep and ultra-high pressure gas reservoir in Tarim Oilfield [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(6): 819-822.
- [16] 张伟民, 刘三琴, 崔彦立, 等. 树脂覆膜支撑剂研究进展[J]. 热固性树脂, 2011, 26(6): 55-59.
- ZHANG Weimin, LIU Sanqin, CUI Yanli, et al. Research advance of resin coated proppants [J]. Thermosetting Resin, 2011, 26(6): 55-59.
- [17] 周生福, 崔龙兵, 刘练, 等. 顺北油田三高油气井完井测试封隔器影响因素及对策[J]. 油气井测试, 2019, 28(3): 37-41.
- ZHOU Shengfu, CUI Longbing, LIU Lian, et al. Influencing factors of completion test packer and countermeasure for 3-high oil and gas well in Shunbei Oilfield [J]. Well Testing, 2019, 28(3): 37-41.

编辑 刘振庆

第一作者简介: 徐国伟, 男, 1986年出生, 硕士研究生, 工程师, 2012年毕业于长江大学油气田开发工程专业, 现主要从事储层改造技术研究和管理工作。电话: 0996-2176322, 18299801090; Email: xugw-tlm@petrochina.com.cn。通信地址: 新疆库尔勒塔里木油田分公司勘探事业部, 邮政编码: 841000。