

doi:10.6056/dkyqt201401028

低渗透油田暂堵重复压裂堵剂用量优化与现场试验

苏良银, 庞鹏, 达引朋, 李向平, 吕宝强, 李转红

(中国石油长庆油田公司油气工艺研究院, 陕西 西安 710018)

摘 要 暂堵重复压裂是开启天然微裂缝、提高侧向剩余油动用程度的重要手段之一。由于目前施工过程中对堵剂用量没有具体优化,多凭经验确定,往往造成暂堵升压幅度小。为了提高鄂尔多斯盆地暂堵重复压裂的可控性,针对低渗透油田天然微裂缝发育、2 向水平主应力差较小的特点,在分析暂堵压裂过程中存在的突出问题后进行了暂堵剂的筛选,以减少堵剂残留给储层渗透率带来的伤害;依据巴布库克关于支撑剂在裂缝中的沉降规律,模拟暂堵重复压裂过程中人工裂缝内的暂堵压差,实现升压造侧向缝,并重新认识了暂堵压裂成败的关键影响因素和影响规律;利用三维压裂软件求取缝高、缝宽等关键参数,优化了暂堵剂的实际用量,现场试验中暂堵升压明显。该方法进一步完善了低渗透油田裂缝暂堵压裂优化设计方法,对现场施工具有一定的指导作用。

关键词 低渗透油田;暂堵剂;重复压裂;优化;现场试验

中图分类号:TE358 文献标志码:A

Usage optimization and field test of blocking agent for temporal-blocked re-fracturing in low permeability oilfield

Su Liangyin, Pang Peng, Da Yinpeng, Li Xiangping, Lv Baoqiang, Li Zhuanhong
(Research Institute of Oil and Gas Technology, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710018, China)

Abstract: Temporal-blocked re-fracturing is one of the important means to open the natural micro-fractures and improve the lateral producing extent of the remaining oil. But the rate of success is low by experience because of the blocking agent dosage without specific optimization in re-fracturing treatment. Aimed at the characteristics of natural fracture development and small two principal stress difference in low permeability oilfield of Ordos Basin, in order to improve the controllability of temporal-blocked re-fracturing, this paper selects the temporary blocking agent that is commonly used after the analysis of the existing problems for the low permeability reservoirs in the process of temporal-blocked re-fracturing, reducing the damage of the blocking agent residue to reservoir. A new method of computing the volume of the temporary blocking agent on the basis of Babcooky theory about the distribution of proppant in vertical fractures is brought forward to renew the key factors in the temporal-blocked re-fracturing. Combined with 3-D fracturing software, the key parameters such as fracture height and fracture width are calculated and the actual dosage of temporary blocking agents are optimized. The pressure of temporary blocking rises obviously by field test. This method further optimizes the design of temporal-blocked re-fracturing for the fracture of low permeability oilfield and has certain guiding role for on-site treatment.

Key words: low permeability oilfield; temporary blocking agent; re-fracturing; optimization; field test

1 暂堵压裂技术现状

老油田重复压裂逐渐成为降低油田产量递减速度、夯实稳产基础的进攻性稳产措施。但是随着油田开发时间的延长,重复压裂后含水率上升,单井日增油量也逐年降低,而且面临后续选井困难等问题。以鄂尔多斯盆地为代表的低渗透储层非均质性强,注入水突破速度快,老缝主线上水洗程度高^[1],控水增油形势严

峻。为了提高单井日增油量,针对低渗透储层天然微裂缝发育特征明显^[2-3]和两向主应力差值较小(3~5 MPa)的特点,且老井在经历初次改造和注入生产等影响后

收稿日期:2013-08-19;改回日期:2013-11-29。
作者简介:苏良银,男,1984 年生,工程师,2008 年毕业于中国石油大学(北京)石油工程专业,主要从事试油、压裂技术研究工作。
E-mail:slyin_cq@petrochina.com.cn。

引用格式:苏良银,庞鹏,达引朋,等.低渗透油田暂堵重复压裂堵剂用量优化与现场试验[J].断块油气田,2014,21(1):114-117.
Su Liangyin, Pang Peng, Da Yinpeng, et al. Usage optimization and field test of blocking agent for temporal-blocked re-fracturing in low permeability oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(1): 114-117.

存在井筒附近发生应力偏转的可能性^[4-8],积极探索了裂缝暂堵重复压裂改造工艺,在原有裂缝张开的同时,人为加入裂缝性暂堵剂,对其进行暂堵,迫使缝内静压力上升,开启侧向微裂缝,达到沟通侧向剩余油、扩大储层改造波及范围和提高单井采收率的目的^[9]。

目前,在鄂尔多斯盆地某油田**每年实施暂堵压裂 100 口**井以上,平均单井日增油 **1.1 t**,与常规重复改造措施相比,增油效果并不明显。原因主要有:1)暂堵剂的加量凭主观经验确定,每米油层的加量一般为 10~20 kg^[10],可控性差;2)暂堵剂优化设计时未考虑**缝宽和缝高**等关键裂缝参数;3)暂堵剂种类繁多,暂堵剂进入裂缝后升压不明显,达不到开启侧向微裂缝的条件。由以往矿场经验看,从暂堵剂进入裂缝开始,堆积至达到一定压差阻力所需时间较短,缝内暂堵主要发生在支撑裂缝缝口附近不远处(距缝口小于 50 m),这也为缝口发生地应力转向后开启侧向缝创造了有利条件。

2 暂堵剂筛选

除**炮眼暂堵压裂**外^[11],目前裂缝暂堵所用的暂堵剂主要有悬浮性堵剂、地下交联型堵剂和地面颗粒型堵剂等。悬浮性堵剂易受紊流等作用影响,难以形成较大的压差阻力;地下交联型堵剂由于交联不均匀,不易达到所需强度。考虑降低储层污染程度、提高返排效果及现场应用的普适性,笔者选用 XZ-1 型油溶性暂堵剂为研究对象。

该暂堵剂的主要物理性能有:1)常温下为固体颗粒,不受力时粒径为 5 mm,受力时呈现脆性破坏,平均粒径 3 mm,易泵送,20 ℃时视密度为 1.41 g/cm³;2)进入地层后,温度超过37 ℃,转向剂颗粒软化,对**支撑剂进行包裹和桥接,增加冻胶黏度,提高封堵性能**;3)在 40 ℃煤油中的溶解时间少于 65 min,施工完毕后,可迅速溶解排出,缩短对地层伤害的时间。

3 堵剂用量优化

为了提高暂堵效果,通常需要暂堵剂进入裂缝后在储层 2 向水平应力条件下形成一定的暂堵压差,开启侧向微裂缝。假设忽略堵剂对储层孔隙及裂缝端部的桥堵作用,且暂堵剂进入裂缝后与支撑剂的混合物不完全充填缝高(否则易砂堵,造成施工失败),由巴布库克关于支撑剂在裂缝高度上的分布规律(由下至上依次为沉降区、滚流区、悬浮区及无砂区)和平衡流速的相关定义^[12-13]可知,该暂堵剂进入裂缝后会发

生一定的暂堵压力差。
暂堵平衡状态时,暂堵两端壁面上的剪切应力为

$$\tau_{eq}=\frac{\Delta p w}{2 \Delta L} \tag{1}$$

根据汤姆斯阻力速度定义,剪切应力计算公式为

$$\tau_{eq}=u_{weq}^2 \rho_{sc} \tag{2}$$

平衡状态下,由式(1)和式(2)可求得暂堵距离:

$$\Delta L=\frac{\Delta p w}{2 u_{weq}^2 \rho_{sc}} \tag{3}$$

颗粒的阻力速度 u_{weq} 可根据汤姆斯关于非牛顿流体阻力速度与自由沉降速度 u_p 的拟合关系式计算,公式为

$$\frac{u_p}{u_{weq}}=0.041\left(\frac{u_p d_p \rho_l}{\mu_a} \sqrt{\frac{4 R_h}{d_p}}\right)^{0.71} \tag{4}$$

u_p 可用丹尼什公式^[14]计算:

$$u_p=\frac{(2 n+1) d_p}{9000 n}\left(\frac{\left(\rho_s-\rho_l\right) d_p}{6000 K_a}\right)^{\frac{1}{n}} \tag{5}$$

求出阻力速度 u_{weq} 后,在已知平均缝宽 \bar{w} 和混合物密度 ρ_{sc} 的条件下,根据储层条件设定一定暂堵附加压差 Δp ,便可由式(3)求取暂堵距离 ΔL 。
同理,在不同流态下,根据阻力速度 u_{weq} 与平衡流速 u_{eq} 的关系式,可求取 u_{eq} ,进而求取平衡裂缝高度 H_{eq} :

$$H_{eq}=H-\frac{0.01667 Q}{2 w u_{eq}} \tag{6}$$

暂堵裂缝体积(双翼)用量计算公式为

$$V=2 H_{eq} \Delta L \bar{w} \tag{7}$$

根据暂堵剂在携砂液中的等效砂质量浓度 ρ_z ,便可求取暂堵剂质量 m :

$$m=\rho_z V \tag{8}$$

ρ_z 可以根据总混合物的密度 ρ_{sc} 求取:

$$\rho_{sc}=\frac{1000+\rho_z+\rho_p}{1+\frac{\rho_z+\rho_p}{\rho_s}} \tag{9}$$

根据天然微裂缝开启条件,将需要达到的暂堵压差代入式(3),便可求取暂堵距离,进而计算出所需的暂堵剂用量。该方法巧妙地实现了平衡状态下暂堵两端的压差到裂缝暂堵距离的转化,消除了暂堵升压设计的盲目性,提高了设计的针对性。

4 影响因素分析

为了实现低渗透储层开启侧向天然微裂缝,要求加入暂堵剂后缝内压力上升 5 MPa 以上。设定暂堵剂进入裂缝后两端附加压差为 7 MPa,根据前人研究成

果和矿场试验发现,在砂比大于 30%(混砂液密度 1.30~1.40 g/cm³)时,同步加入暂堵剂,缝内静压力上升较快^[15]。同时,为了加强暂堵效果,采用 8/16 目大粒径支撑剂(粒径 1.2~2.4 mm),由式(1)—(7)可计算出裂缝暂堵距离和暂堵体积。在排量 2 m³/min 条件下,对混合物密度、颗粒有效直径和缝高等影响暂堵效果的参数进行分析。

4.1 暂堵混合物密度

给定等效颗粒直径 5 mm、缝宽 7.0 mm 和缝高 17.0 m,可以看出,混合物密度对暂堵距离有一定影响,对暂堵体积基本没有影响(见图 1)。混合物密度主要由砂比决定,一旦确定了砂比,总混砂液密度就基本确定。而由于所选暂堵剂视密度小于支撑剂的视密度(3.30 g/cm³),在一定含砂条件下(550~600 kg/m³),加入暂堵剂的速度对混砂液的密度影响较弱。

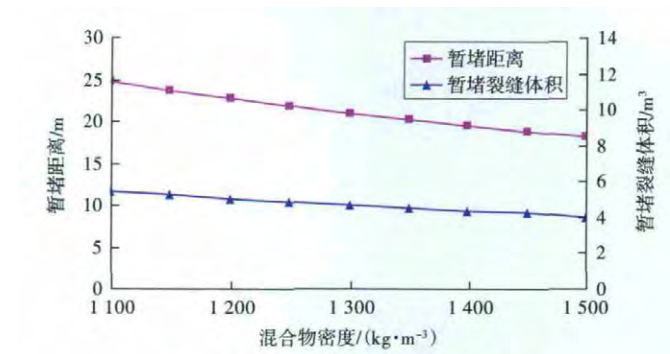


图 1 混合物密度对暂堵效果的影响

4.2 堵剂颗粒有效直径

在缝宽 7.0 mm、缝高 17.0 m 和混合物密度 1.40 g/cm³ 的条件下,暂堵剂进入裂缝后,其颗粒有效直径的大小对暂堵效果影响较大(见图 2),而颗粒有效直径在地层中的改变主要受地层温度的影响。在深井高温地层应用时,暂堵剂进入裂缝后,软化速度快,通过与支撑剂的相互作用(包裹、桥接等),颗粒有效直径增大至原有的 2~3 倍,显著增加了阻力速度,最终导致裂缝暂堵压差增加;而浅井低温地层情况则相反。这一现象也解释了在深井地层中加入很少量的暂堵剂就能起到很好的暂堵效果,其主要原因在于地层温度对暂堵剂软化作用的速度和程度。

4.3 裂缝高度

由式(6)、(7)可看出,暂堵裂缝体积与裂缝平衡高度呈线性关系,在缝宽 7.0 mm、混合物密度 1.40 g/cm³ 和颗粒直径 5 mm 的条件下,两者关系如图 3 所示。对纵向上发育多层或无有效隔层的井,如果其缝高等关键裂缝参数在压裂过程中不受控,则暂堵效果的可控性将变差。

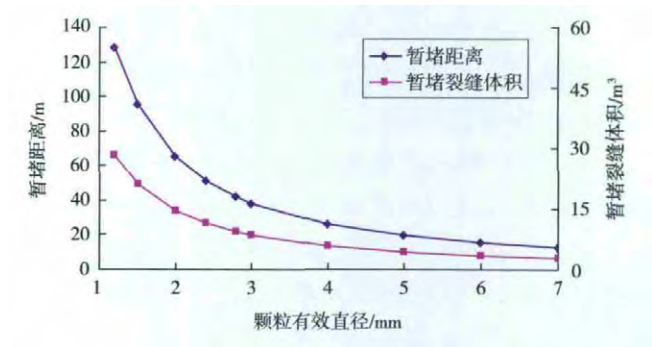


图 2 颗粒有效直径对暂堵效果的影响

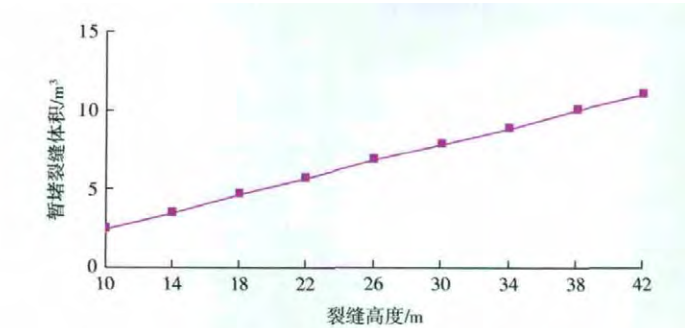


图 3 裂缝高度对暂堵效果的影响

5 现场试验

D45 井所在区块油藏平均砂层厚度 14.5 m,渗透率 0.57×10⁻³ μm²,孔隙度 8.10%。储层纵向上、平面上相对稳定,层内夹层较少;上下遮挡层以泥岩、凝灰质泥岩为主,发育较好,厚度多在 5 m 以上;储、隔层应力差为 3~5 MPa,有利于控制裂缝在储层内延伸。对区块新缝开启应力条件计算表明,当缝内净压力提高至 5~7 MPa 以上,可实现新裂缝的开启。

D45 井钻遇砂体厚度 16.9 m,油层厚度 12 m,电测渗透率 2.70×10⁻³ μm²,孔隙度 12.62%。2008 年 11 月压裂投产,初期改造加砂 35 m³,砂比 35.6%,排量 2.2 m³/min,试油日产纯油 15.3 t;投产即低产,日产液少于 1 m³。应用 Fracpro PT 三维模拟软件对造缝阶段(排量 2.0 m³/min)进行模拟,得出裂缝关键参数:缝高 18.0 m,缝宽 8.4 mm,裂缝半长 117 m。

该区块储层温度为 70~80 ℃,远大于暂堵剂软化点 40 ℃,暂堵剂进入裂缝后软化速度快,软化后包裹、桥接支撑剂,使得支撑剂的有效颗粒直径增加(取下限值)。由评价实验得出最终暂堵优化结果为:总混合物密度 1 343 kg/m³,缝中等效颗粒直径 5.5 mm,暂堵距离(单翼)21.4 m,暂堵裂缝体积(双翼)6.1 m³,所需暂堵剂 240 kg。

D45 井于 2013 年 5 月进行暂堵压裂,实际加入暂堵剂 210 kg,加入前工作压力为 32 MPa,暂堵后最高压力达到 41 MPa,新缝开启特征明显(见图 4),改造

后该井日产液 4.07 m³,日产油 2.7 t,日增油 1.9 t,措施效果显著。

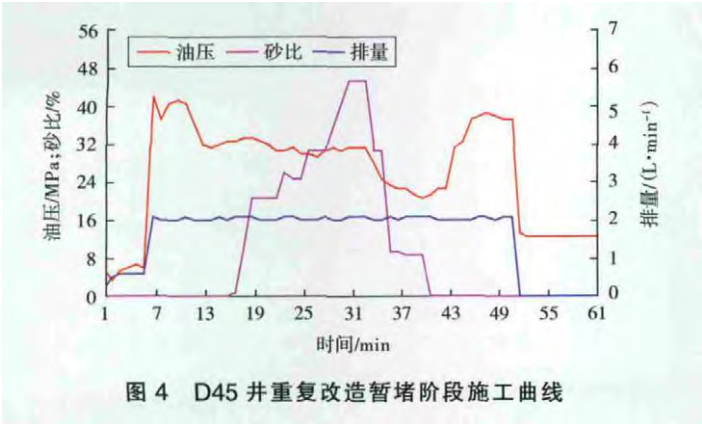


图 4 D45 井重复改造暂堵阶段施工曲线

6 结论

- 1)暂堵剂用量优化方法可进一步提高低渗透油田暂堵压裂升压效果,具有一定的指导意义。
- 2)暂堵剂的加入速度对混砂液密度影响有限,而地层温度直接影响暂堵剂的软化速度,从而影响支撑剂有效直径的大小,这是决定工艺成败的关键因素。
- 3)在对单井暂堵剂用量进行优化设计时,选择储层单一并具有一定厚度隔层的生产井,应用三维压裂软件对缝宽、缝高等重要参数进行精确模拟,可以提高优化结果的准确性和施工的可靠性。

7 符号注释

τ_{eq} 为剪切应力,Pa; Δp 为暂堵两端附加压差,Pa; \bar{w} 为平均缝宽,m; ΔL 为暂堵距离,m; u_{weq} 为阻力速度,m/s; ρ_{sc} 为混合物总密度,g/cm³; u_p 为自由沉降速度,m/s; d_p 为砂粒等效直径,mm; ρ_s 为支撑剂视密度,g/cm³; R_h 为水力半径,mm; μ_a 为压裂液视黏度,mPa·s; n 为流性指数; ρ_l 为压裂液密度,g/cm³; K_a 为压裂液在裂缝中的稠度系数,kg·sⁿ/m²; u_{eq} 为平衡流速,m/s;

H_{eq} 为平衡裂缝高度,m; Q 为地面泵注排量,m³/min; H 为裂缝高度,m; V 为暂堵裂缝体积(双翼),m³; m 为暂堵剂质量,kg; ρ_z 为堵剂等效砂质量浓度,kg/m³; ρ_p 为支撑剂含砂质量浓度,kg/m³。

参 考 文 献

[1] 卢丽,陈小凡,夏彪,等.裂缝型低渗油藏主、侧向井渗透率推算[J].断块油气田,2013,20(2):207-209.

[2] 熊伟,刘华勋,高树生,等.低渗透储层特征研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2009,31(5):89-92.

[3] 郝明强,刘先贵,胡永乐.微裂缝性特低渗透油藏储层特征研究[J].石油学报,2007,28(5):93-98.

[4] 董光,邓金根,朱海燕,等.重复压裂前地应力场分析[J].断块油气田,2012,19(4):485-488.

[5] 达引朋,赵文,卜向前,等.低渗透油田重复压裂裂缝形态规律研究[J].断块油气田,2012,19(6):781-784.

[6] 何青琴,杨永全,何世明,等.低渗透油气田重复诱导应力场模拟研究[J].天然气技术,2009,4(1):30-32.

[7] 张士诚,张劲.压裂开发理论与应用[M].北京:石油工业出版社,2003:10-12.

[8] 陈远林,郭建春.重复压裂技术研究[J].中国西部油气地质,2006,2(4):457-460.

[9] 谈士海.低渗透砂岩油藏暂堵重复压裂技术研究[J].石油实验地质,2006,28(3):307-310.

[10] 白红艳,杨勇,苏春娥.低渗透油田缝内转向压裂工艺适应性研究[J].石油化工应用,2010,29(2-3):56-60.

[11] 刘全喜,姚海金,刘萍,等.压裂施工中暂堵剂用量计算方法研究[J].大庆石油地质与开发,2006,24(6):58-59.

[12] 张琪.采油工程原理与设计[M].东营:石油大学出版社,2006:272-275.

[13] 王鸿勋,张士诚.水力压裂设计数值计算方法[M].北京:石油工业出版社,1998:51-54.

[14] 王鸿勋.水力压裂原理[M].北京:石油工业出版社,1987:72-73.

[15] 丁云宏,胥云,翁定为,等.低渗透油气田压裂优化设计新方法[J].天然气工业,2009,29(9):78-80.

(编辑 孙薇)

欢迎网上在线投稿

<http://www.dkyqt.com>