

文章编号: 1000-0747(2009)04-0529-06

大庆探区深层火山岩气藏压裂施工控制

张国亮^{1,2}, 兰中孝^{2,3}, 刘鹏²

(1. 浙江大学地球科学系; 2. 大庆油田有限责任公司井下作业分公司; 3. 大庆石油学院石油工程学院)

基金项目: 中国石油勘探与生产分公司项目“火成岩等特殊储集层试油(含措施改造)配套技术研究”

摘要: 大庆探区深层火山岩储集层孔洞-裂缝发育, 施工中存在多条裂缝同时破裂延伸的特点, 导致施工易早期砂堵, 压裂成功率低、改造规模小、增产效果差。通过对深层火山岩地质特征的研究, 建立了火山岩压裂破裂和延伸模型, 引入了与时间相关的漏失因子、尖端因子和模量因子, 描述了特殊岩性地层主裂缝与微裂缝的开启与延伸过程, 在此基础上, 探讨了压裂过程中存在的“三高”现象(即停泵压力梯度高, 近井摩阻高和滤失系数高)的评价方法, 并通过现场实践, 形成了以胶塞处理近井高摩阻、粉砂封堵天然裂缝以及调整前置液比例、多段粉砂段塞注入为主的综合处理措施, 使火山岩气藏压裂成功率由以往的 36.0% 提高到目前的 90.0% 以上, 提高了火山岩气藏的压裂增产效果。图 6 表 3 参 17

关键词: 火山岩储集层; 多裂缝系统; 大型压裂; 控制方法

中图分类号: TE357.13

文献标识码: A

Fracturing control method for deep volcanic rock gas reservoirs in Daqing exploration area

Zhang Guoliang^{1,2}, Lan Zhongxiao^{2,3}, Liu Peng²

(1. Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 710025, China; 2. Downhole

Services, PetroChina Daqing Oilfield Company Ltd., Daqing 163112, China; 3. College of

Petroleum Engineering, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, China)

Abstract: Pores, cavities and fractures are well developed in deep volcanic reservoirs. The simultaneous break and extension of multi-fractures in treatment caused early stage sand block, low fracturing success ratios, small treatment scales and bad stimulation results. Based on the geologic characteristics of the deep volcanic rocks, this paper establishes a fracturing break and extension model of volcanic rocks, introducing with time relevant leaking factor, peak factor and modulus factor. The model is used to better describe the process of initiation and extension of major fractures and micro-fractures. On this basis, the evaluating method for the “three highs” of pump off pressure gradient, near well friction resistance and leakoff coefficient is studied, and through field practices, integrated processing measures are formed: use rubber plugging to deal with near-well high friction resistances, use silts to seal natural fractures, adjust prepad fluid ratios, and inject multi-section silt slugs. The success ratio of volcanic rock gas reservoir fracturing is raised to 90.0% from the past 36.0%.

Key words: volcanic rock reservoir; fractures; massive fracturing; control method

0 引言

火山岩储集层作为一种特殊的油气储集层类型越来越受到人们的关注^[1-3]。大庆油田徐深 1 井火山岩储集层压裂后获得无阻流量为 $106 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的高产工业气流, 标志着松辽盆地深层火山岩气藏具有广阔的开发前景^[1,4]。大庆探区深层火山岩储集层埋藏深 (2 800 ~ 4 600 m)、温度高 (120 ~ 180 °C)、岩石基质致密、岩性复杂、自然产能低, 必须通过大型压裂改造才能获得工业开采价值。由于火山岩储集层孔洞、裂缝发育, 压裂过程中存在多条裂缝同时延伸的现象, 表现为“三高”即停泵压力梯度高、近井摩擦阻力高、滤失系数高的特征, 导致施工压力高、成功率低, 压裂工艺成

为制约深层天然气勘探、开发的瓶颈问题。这也是当今世界范围内都在探索和研究的课题。如日本长冈气田的火山岩储集层压裂^[5], 由于多裂缝发育, 支撑剂早期脱砂, 无法完成预期的施工规模, 致使施工以仅加入 24 m^3 支撑剂而告终。中国的火山岩储集层压裂是近几年才兴起的, 在改造规模上还有待进一步加大, 相关配套技术还有待进一步完善^[6]。所以, 深层火山岩储集层压裂目前还没有成熟的技术可以借鉴。本文探讨了大庆探区深层火山岩气藏压裂过程中存在的“三高”现象及其产生的原因以及压裂施工过程中采取的控制方法。

1 储集层地质特征及对压裂施工的影响

大庆探区火山岩储集层岩性较复杂, 常见的有玄

武岩、安山岩、粗面岩、流纹岩,此外还有火山碎屑岩(包括集块岩、角砾岩、凝灰岩)^[7,8]。火山岩储集层主要具有以下特征:①埋藏深、温度高,储集层巨厚,埋藏深度在 2 800 ~ 4 600 m,储集层温度高,在 120 ~ 180 °C;②物性差,已产气的火山岩储集层最低渗透率为 $0.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、孔隙度为 4.0%、岩石密度为 2.53 g/cm^3 ;③储集层类型多样,有孔隙型、孔隙-裂缝型、基质溶孔-裂缝型、斑晶溶孔-裂缝型以及裂缝型储集层(见图 1 和图 2)。

据现场压裂施工压力对比也可以看出火山岩储集层的裂缝发育特征,表现在由于天然裂缝开启导致的压裂液过量滤失(压裂液的滤失系数高出储集层岩心测试值一个数量级以上)、“多裂缝效应”(多条裂缝同时破裂延伸引起的滤失量、压力等变化)产生的较高净压力以及早期砂堵导致的施工失败等。图 3 是 SHS7 井 205 号层 1999 年施工曲线,压降曲线分析表明:目的层发育天然裂缝,压裂液滤失严重,近井摩阻高,入口压降损失大,动态缝宽窄,应该在压裂前进行裂缝的降阻预处理和压裂液的降滤失处理,而限于当时的认识,实际施工时未采取任何处理措施,该井在加陶粒仅 10 m^3 时就产生砂堵,导致施工失败。



图 1 火山岩储集层岩心裂缝发育情况

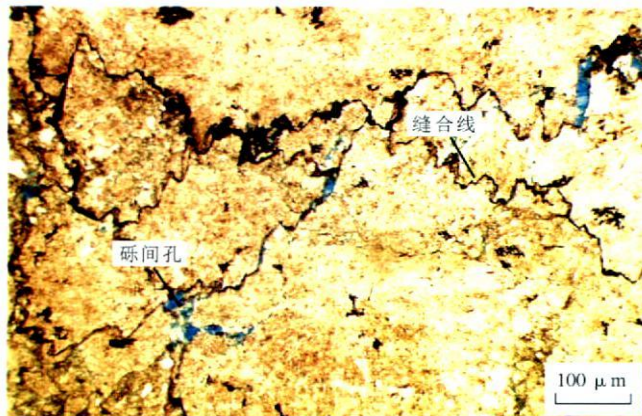


图 2 火山集块岩砾间孔及缝合线(岩心薄片镜下鉴定照片)

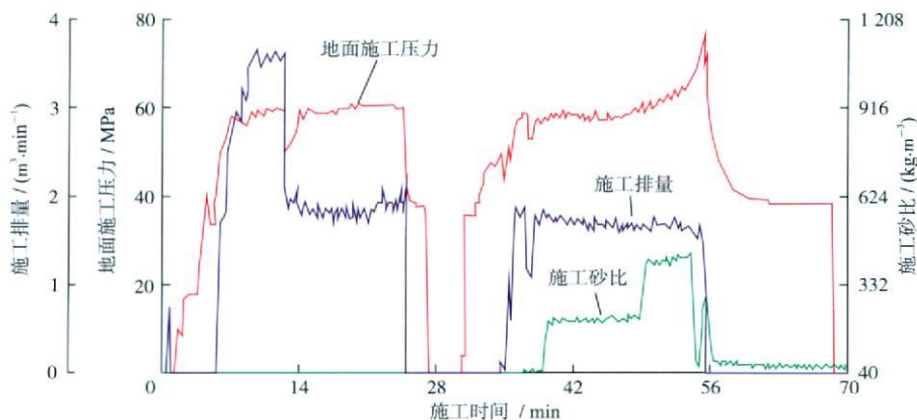


图 3 SHS7 井 205 号层测试压裂及主压裂施工曲线

综上所述,认为由于大庆探区火山岩储集层天然裂缝较为发育,天然裂缝对地层流体的渗流规律起主导作用。在进行水力压裂施工时,天然裂缝不仅影响裂缝的延伸轨迹,也影响压裂液的滤失,因此压裂设计及现场施工都必须充分考虑天然裂缝的影响。

2 压裂裂缝开启和延伸模型

以往针对均匀砂岩地层的水力压裂研究,其模型是假定裂缝在均匀介质中起裂、延伸,压裂过程中压裂液的滤失系数为一个定值,裂缝在垂直地层最小主应

力方向形成以井筒为中心对称的两翼^[9]。经过多年的发展与完善,在常规储集层地层评价、压力分析、裂缝起裂条件分析、裂缝延伸模型建立、压裂施工设计以及现场施工方法等方面都具备了较为成熟的技术^[10-13]。但这些技术无法适应火山岩储集层复杂的地质条件,不能客观地认识地下裂缝变化规律,主要表现在现场施工无法根据压力特征作出正确的判断和采取及时的控制措施。

由于深层火山岩储集层与常规储集层地质条件不同,压裂施工时,随着压力的升高地层中原有的微裂缝

将张开,同时也存在微裂缝被连通的可能。正是由于微裂缝的存在,使得深层特殊岩性地层的压裂与常规储集层的压裂施工存在很大的区别。根据国内外对裂缝性地层的研究成果^[14],结合大量的地质、测井研究资料和地震对构造的描述以及与这些地层在水力压裂中的表现等综合分析,将裂缝延伸特点归结为两种类型:一是“无规则裂缝”;二是“点源裂缝”,并建立了两类裂缝延展形态的物理模型(见图4)。

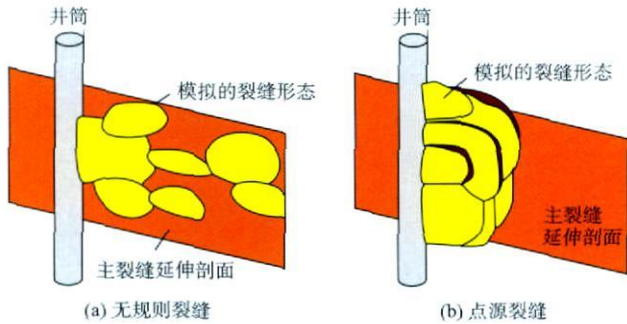


图4 火山岩裂缝型储集层多裂缝扩展模型示意图

“无规则裂缝”主要出现在井壁处天然裂缝不发育、而储集层内部发育大量微裂缝的地层中。压裂施工初期,先是一条主裂缝开启,在裂缝延伸过程中逐渐沟通储集层内的天然裂缝。“点源裂缝”主要出现在沿井壁多发高角度天然裂缝的地层中,在水力压裂初期一次产生多条裂缝,多条裂缝同时开启,同时延伸,且裂缝在缝宽上相互影响。无论哪种情况,天然裂缝对人工水力裂缝的延伸均会产生影响,不仅影响裂缝的延伸轨迹,也影响压裂液的滤失。为此,本文引入了与时间相关的3个因子,描述多裂缝在水力压裂下的延伸过程。

2.1 漏失因子(Ψ)

当天然裂缝或裂隙张开时,压裂液的滤失量增加,滤失速度与裂缝内外压差、地层参数、压裂液的物性参数有关。为此,引入漏失因子(Ψ),表示有天然裂缝时压裂液的漏失速度与该点没有天然裂缝或裂隙时滤失速度之比,那么在 dt 时间内点 x 处的滤失量方程为:

$$V_1 = \int_0^{L_{fracture}} 2(1 + \Psi) \frac{c(x, t)}{\sqrt{t - \tau_x}} h_f dx \quad (1)$$

式中 V_1 ——与压力有关的压裂液的滤失体积, m^3 ; L ——裂缝长度, m; t ——施工时间, min; $c(x, t)$ ——x 点处的综合滤失系数, $m/min^{1/2}$; τ_x ——压裂液到达 x 点的时间, min; h_f ——裂缝高度, m。

2.2 尖端因子(ζ)

由于压裂液的作用,缝端岩石膨胀,缝内压力不足以消除岩石的这种反应,因而裂缝不再光滑,缝端狭

小,使得压力损失增加,因此引入尖端因子(ζ)来表征缝宽减小的比例。尖端因子是指压裂液对岩石作用后,形成的裂缝宽度与理想裂缝宽度的比。由于尖端效应主要发生在缝端附近,因此可用单位长度的压力损失表示,其方程为:

$$\Delta p_{top} = \int_{L-1}^L \frac{16}{3\pi^2} 2^{n_s'+1} k_s' \left[\frac{2n_s'+1}{n_s'} \right]^{n_s'} \frac{[u(x, t)]^{n_s'}}{[\zeta w(x, t)]^{n_s'+1}} dx \quad (2)$$

式中 Δp_{top} ——缝端的压力损失, MPa; n_s' ——流态指数; k_s' ——压裂液稠度系数, $Pa \cdot s^{n_s'}$; $w(x, t)$ ——压裂液作用后 x 点处的裂缝宽度, m; ζ ——裂缝尖端因子; $u(x, t)$ ——x 点处的滤失速率, m/min。

2.3 有效弹性模量因子(K_E)

对缝宽与压力关系的研究很多,实验表明在同样的净压力下,多裂缝系统中各条裂缝宽度明显小于单一裂缝的宽度,而多裂缝系统各条裂缝宽度总和大于单一裂缝的宽度。为定义产生多裂缝时地层的有效弹性模量(E),引入 K_E 和 ζ 共同来表述多裂缝的延伸过程,其裂缝内一点的缝宽与该点压力之间关系式为:

$$w(x, t) = \frac{2(1 - \nu^2) h_f [p(x, t) - \sigma_H]}{E \left[K_E - \frac{K_E - 1}{m} \right]} \quad (3)$$

式中 ν ——地层泊松比; σ_H ——最小水平主应力, MPa; E ——有效弹性模量, MPa; K_E ——有效弹性模量因子, 无量纲; m ——裂缝数量, 条; $p(x, t)$ ——缝内一点 x 处的压力, MPa。

通过引入上述 3 个因子,改进后模型计算的压力特征与实际井底压力基本吻合。证明改进后的模型可较好地描述特殊岩性地层主裂缝与微裂缝的开启和延伸过程。

3 储集层压裂施工中“三高”的识别及控制方法

由上述裂缝张开和延伸机理分析可知,火山岩储集层压裂过程中会出现“三高”的现象,“三高”的共同影响会使施工难度增大,甚至会导致施工失败。

3.1 “三高”成因分析

导致出现“三高”的原因主要有 3 个方面:其一,储集层岩石的尖端效应弱。由于储集层岩性和孔隙结构的特殊性,裂缝延伸需要的压力相对较高,停泵后裂缝很快停止延伸,导致憋压,造成高停泵压力梯度。其二,储集层中天然裂缝极其发育。由于压裂时没有形成主裂缝,多条裂缝同时延伸,单缝内压裂液的流动摩擦阻很大,维持裂缝尖端效应所需提供的井底压力高,停

泵后所有裂缝很快停止延伸, 导致憋压, 造成高停泵压力梯度, 同时由于天然裂缝的存在, 表现出压裂液的高滤失特征。其三, 受局部构造应力的影响, 使最大水平主应力与最小水平主应力以及垂向应力之间的差值发生变化, 压裂形成复杂裂缝, 即: ①当缝内的净压力超过两个水平主应力的差值时会产生不规则的分支垂直缝(见图 5a); ②当缝内净压力超过垂直最大主应力与水平主应力的差值时, 会产生“T”型裂缝和水平缝(见图 5b), 这种现象会导致缝内压裂液流动摩擦增大, 地面施工压力增高, 严重时低砂比压裂液进入裂缝立即产生砂堵, 或注前置液期间地面压力就达到或超过限压而不能继续施工。

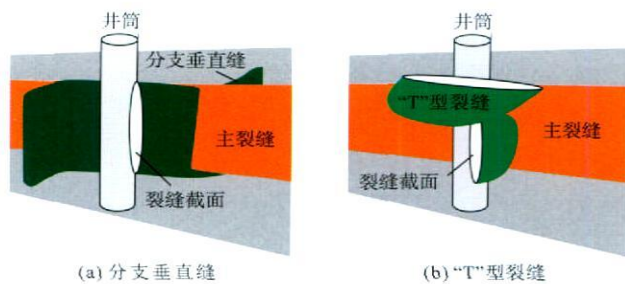


图5 复杂裂缝形态示意图

3.2 对“三高”的识别与压裂施工控制

理论分析及大量现场试验研究表明, 大庆深层火山岩压裂时存在的“三高”现象可以通过停泵压力梯度、近井摩阻及滤失系数等 3 个参数来识别, 这 3 个参数可通过测试压裂压力分析得到。

通过对以往施工井的施工压降曲线特征和压裂测试解释结果的综合分析, 总结出相应的压裂测试诊断参数评价标准, 并通过大量实践形成了相应的控制方法, 具体识别标准及控制方法见表 1。由表 1 可见, 大庆深层火山岩高停泵压力梯度界限值在 0.02 MPa/m。停泵压力梯度级别不同, 施工的难度不同。若储集层停泵压力梯度超过 0.02 MPa/m, 就应采取适当的处理措施。通常是根据停泵压力梯度级别的变化情况采用适当的处理方法, 以保证施工的顺利进行。

深层火山岩近井高摩阻的界限值为 6.0 MPa(见表 1), 如果超过该界限就必须进行处理, 采用的处理方法主要有以下两种: 一种是针对裂缝滑移情况, 采用低浓度粉砂对裂缝进行打磨冲刷处理; 另一种是针对裂缝旋转的情况, 采用高黏凝胶段塞进行处理, 利用其高黏度有选择性地压开最易张开的裂缝, 保证主裂缝的形成。

表 1 火山岩压裂测试诊断参数评价标准及处理

参数类型	诊断指标	诊断结果	措施
停泵压力梯度/ (MPa · m ⁻¹)	< 0.018	正常	常规方法施工
	[0.018, 0.020]	偏高	降低施工砂比
	(0.020, 0.022]	高	降低施工砂比并延长注入时间
	> 0.022	特高	采用低砂比泵注并控制砂比提高速度
近井摩阻/MPa	< 6	正常(裂缝正常延伸)	用少量粉砂冲刷
	6~8	偏大(裂缝多而窄或形态复杂)	打入高黏度胶塞、用粉砂冲刷
	> 8	特大(裂缝异常延伸)	打入高黏度胶塞、用大量粉砂冲刷
滤失系数/ (10 ⁻³ m · min ^{-1/2})	< 0.4	正常偏低(储集层基质低滤失)	压裂液中加入 3%~4% 柴油降滤失
	[0.4, 0.8]	正常	压裂液中加入 4%~5% 柴油降滤失
	(0.8, 1.2]	偏大	压裂液中加入 5% 柴油降滤失、加入粉砂
	> 1.2	特大(溶孔与裂缝非常发育所致)	用柴油降滤失、增加前置液比例、加入粉砂

滤失系数大于 $1.2 \times 10^{-3} \text{ m/min}^{1/2}$ 为高滤失特征(见表 1), 对此情况的处理方法为加入柴油降滤失、增加前置液用量、采用多段粉砂控制, 且施工中通过实时分析缝内净压力, 合理调整施工排量和加砂浓度。

在采取控制措施的同时, 针对不同情况优化前置液比例、不同支撑剂浓度压裂液的泵注程序和施工排量等施工参数, 以保证施工的顺利进行, 具体优化原则见表 2。

表 2 火山岩储集层措施改造施工参数优化设计原则

停泵压力梯度/ (MPa · m ⁻¹)	滤失系数/ (10 ⁻³ m · min ^{-1/2})	近井摩阻/ MPa	前置液比例/ %	不同支撑剂浓度压裂液泵注程序	处理措施
> 0.02	> 1.2	< 6.0	33.0~35.0	7%→14%→18%→22%→25%→28%	采用两段粉砂段塞注入
> 0.02	> 1.2	> 6.0	38.0~40.0	5%→10%→15%→20%→22%→25%	采用胶塞处理、多段粉砂段塞注入

4 现场应用效果

在上述研究的基础上, 从 2003 年到 2008 年, 通过

对现场压裂过程中井底压力的多段拟合, 对火山岩储集层的破裂与延伸特点有了更清楚的认识, 借鉴以往的施工经验及研究成果^[15-17], 结合现场实际逐渐形成

了对各种施工难题的参数评价标准与处理控制技术,使火山岩压裂施工成功率、有效率稳步提高。已先后在4口井92个层的压裂施工中应用上述参数评价标准与处理控制技术,使压裂成功率由原来的36.0%提

高到目前的91.3%,施工规模达到100 m³以上,成功实施了火山岩大规模压裂施工。部分施工井的实际施工规模与设计施工规模符合率对比见表3。

例如XS21井,目的层(3 656.4~3 732.4 m)为流

表3 应用处理控制技术前后部分压裂施工与设计规模符合率对比表

应用前				应用后					
井号	目的层编号	设计施工规模 ^① / m ³	实际完成规模 ^② / m ³	符合率/ %	井号	目的层编号	设计施工规模/ m ³	实际完成规模/ m ³	符合率/ %
SHS7	205	80	10	12.5	ZS11	114~116	70	54	77.1
SS1	152	100	30	30.0	XS1	149	100	100	100.0
SHS101	88	55	22	40.0	XS1	150	80	80	100.0
SHS101	91	50	6	12.0	FS10	226	90	90	100.0
DS1	188~187	40	34	85.0	XS21	223	110	110	100.0

注:①和②主要指压入裂缝的陶粒支撑剂数量。实际完成的单井(层)施工规模与设计施工规模之比为符合率,符合率达到80%以上为成功

纹岩储集层,厚度76.0 m,中、高角度裂缝及网状缝均较发育,层内纵向应力波动大,出现多处“尖点”。为提高储集层纵向动用程度,优选出3段应力偏低部位射孔,共射开10.0 m。测试诊断结果表明,压裂目的层呈现“三高”特点。因此,采用了胶塞和3段粉砂处理措施。主压裂施工(排量为6.0 m³/min)砂比增至318 kg/m³时,压力升至74.11 MPa,施工难度加大,经过分

析认为在高应力“尖点”处裂缝窄、出现“过液不过砂”桥堵,从而造成压力急剧上升。为缓解高压、保证继续施工,现场采用降排量措施,排量从6.0 m³/min逐步降低到3.0 m³/min(见图6),裂缝在应力“尖点”处闭合,保证裂缝在低应力部位向前延伸,从而确保了后续支撑剂按设计规模(110.0 m³)正常加入。该井压裂后经油嘴测试,日产气量达到41.4×10⁴ m³。

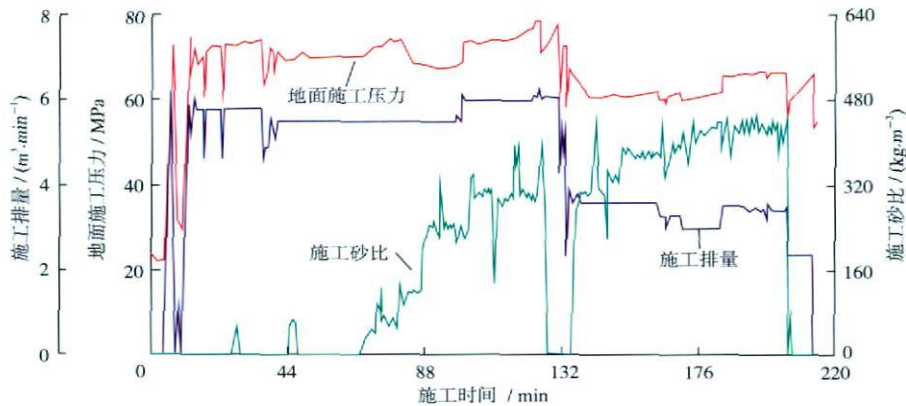


图6 XS21井223号层主压裂施工曲线

5 结论

通过对深层火山岩地质特征的研究,建立了火山岩压裂裂缝开启和延伸模型,能够较好地描述特殊性地层主裂缝与微裂缝的开启与延伸过程。在火山岩裂缝延伸机理研究的基础上,分析了火山岩压裂出现“三高”的原因及其表现特征,确定了“三高”的识别方法和判定原则。形成了以胶塞、粉砂段塞为主的解决“三高”问题的方法,结合施工参数优化及现场实时调整排量、砂比等综合控制措施,有效提高了深层火山岩压裂的成功率。上述技术的成功应用,使大庆油

田深层火山岩特殊性气藏的增产措施更加配套,也为同类气藏的压裂开发提供了借鉴。

参考文献:

- [1] 杨辉,张研,邹才能,等. 松辽盆地深层火山岩天然气勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(3): 274-281.
Yang Hui, Zhang Yan, Zou Caineng, et al. Exploration scheme of gas in deep-seated volcanic rocks in Songliao Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(3): 274-281.
- [2] 杨辉,宋吉杰,文百红,等. 火山岩岩性宏观预测方法——以松辽盆地北部徐家围子断陷为例[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(2):

- 150-155, 196.
- Yang Hui, Song Jijie, Wen Baihong, et al. Macroscopic prediction of volcanic rock lithology: A case from Xujiaweizi Faulted Depression, northern Songliao Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(2): 150-155, 196.
- [3] 匡立春, 薛新克, 邹才能, 等. 火山岩岩性地层油藏成藏条件与富集规律——以准噶尔盆地克一百断裂带上盘石炭系为例 [J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(3): 285-290.
- Kuang Lichun, Xue Xinke, Zou Caineng, et al. Oil accumulation and concentration regularity of volcanic lithostratigraphic oil reservoir: A case from upper-plate Carboniferous of KA-BAI fracture zone, Junggar Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(3): 285-290.
- [4] 王大锐. 中国在松辽盆地获日产 20.5 万 m³ 高产天然气流 [J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(4): 447.
- Wang Danui. High-yielding gas flow (20.5 × 10⁴ m³/d) was gained in Songliao Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(4): 447.
- [5] Weijers L, Griffin L G, Sugiyama H, et al. The first successful fracture treatment campaign conducted in Japan: Stimulation challenges in a deep, naturally fractured volcanic rock [A]. SPE 77678, 2002.
- [6] 孙守国. 辽河油田钻采工艺研究院技术汇编 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2005.
- Sun Shouguo. Symposium of research institute of drilling and production technology of PetroChina Liaohe Oilfield Company [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005.
- [7] 徐正顺, 王渝明, 庞彦明, 等. 大庆徐深气田火山岩气藏储集层识别与评价 [J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(5): 521-531.
- Xu Zhengshun, Wang Yuming, Pang Yanming, et al. Identification and evaluation of Xushen volcanic gas reservoirs in Daqing [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(5): 521-531.
- [8] 赵文智, 邹才能, 冯志强, 等. 松辽盆地深层火山岩气藏地质特征及评价技术 [J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(2): 129-142.
- Zhao Wenzhi, Zou Caineng, Feng Zhiqiang, et al. Geological features and evaluation techniques of deep-seated volcanic gas reservoirs, Songliao Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(2): 129-142.
- [9] 米卡尔 J 埃克诺米德斯, 肯尼斯 G 诺尔特. 油藏增产措施 (第三版) [M]. 张保平 (译). 北京: 石油工业出版社, 2002.
- Economides M J, Nolte K G. Reservoir stimulation (Third Edition) [M]. Zhang Baoping (Trans.). Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [10] 中国石油天然气股份有限公司油气藏改造重点实验室. 油气藏改造技术新进展 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- Key Laboratory for Oil & Gas Reservoir Stimulation of PetroChina. New progress on reservoir stimulation [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [11] 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.
- Wang Hongxun, Zhang Shicheng. Numerical calculation method of hydraulic fracture design [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
- [12] Meyer B R, Jacot R H. Implementation of fracture calibration equations for pressure dependent leakoff [A]. SPE 62545, 2000.
- [13] 隋微波, 张士诚. 低渗复杂断块整体压裂裂缝参数优化设计 [J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(1): 98-103.
- Sui Weibo, Zhang Shicheng. Optimization design of integral fracturing parameters for low-permeability highly faulted reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(1): 98-103.
- [14] Weijers L, Griffin L G, Sugiyama H, et al. Hydraulic fracture in a deep, naturally fractured volcanic rock in Japan: Design considerations and execution results [A]. SPE 77823, 2003.
- [15] Weijers L, Wright C A, Sugiyama H, et al. Simultaneous propagation of multiple hydraulic fractures-evidence, impact and modeling implications [A]. SPE 64772, 2000.
- [16] Smith J, Vitthal S, McGowen J M, et al. How minifrac alter leakoff and ways to counteract it [A]. SPE 58767, 2000.
- [17] 蒋廷学, 张以明, 冯兴凯, 等. 高温深井裂缝性泥灰岩压裂技术 [J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(3): 348-353, 358.
- Jiang Tingxue, Zhang Yiming, Feng Xing kai, et al. Hydraulic fracturing technology in clay-carbonate fractured reservoirs with high temperature and deep well depth [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(3): 348-353, 358.
- 第一作者简介: 张国亮 (1966-), 男, 河北孟村人, 硕士, 大庆油田有限责任公司井下作业分公司高级工程师, 从事油藏增产改造特种工艺研究与作业管理工作。地址: 黑龙江省大庆市登峰村, 井下作业分公司特种工艺作业大队, 邮政编码 163112。E-mail: jx_zhangguoliang@petrochina.com.cn
- 收稿日期: 2008-02-26 修回日期: 2009-04-28
- (编辑 唐金华 绘图 付改荣)