新场致密气藏地质特征及合理压裂规模

吴志均　何顺利
(石油大学·北京)

吴志均等. 新场致密气藏地质特征及合理压裂规模. 天然气工业,2004;24(9):9396

摘　要　对新场上沙溪庙组气藏加砂压裂增产效果统计分析发现:①大多数气井压裂获得较好的增产效果,有少部分井压裂增产效果不理想,也有少数井无法完成设计的加砂量;②加砂量对压裂增产效果没有明显的相关关系,这与常规气藏压裂增产效果存在明显的差异。文章对新场上沙溪庙组气藏地质特征进行分析后得出,储层是在岩石普遍致密化之中存在的不同级别和不同规模的储渗体,它们被致密泥岩、砂泥岩所分割,并且是决定气井产能大小的关键因素。储渗体的封隔层具有非渗透和强度高的特点,能够阻止压裂裂缝的延伸,这是引起致密气藏压裂特殊性的原因。为了更经济高效地开发该气藏,文章研究分析了储渗体规模、压裂效果好的气井的试井成果与压裂施工参数间的关系,从而确定了气井合理加砂压裂规模和裂缝长度。

主题词　低渗透油气藏　储集层　压裂　规模　增产效果　四川盆地　西

根据我国天然气勘探开发趋势的研究表明[1],致密天然气藏的开发将在我国天然气勘探开发中占有很重要的地位。随着常规天然气资源的日渐枯竭,开发和利用这种非常规天然气资源日趋迫切,而致密天然气藏的开发一般需经加砂压裂后才具有工业开采价值;因此,研究致密气藏加砂压裂增产工艺技术具有非常重要的意义。对新场上沙溪庙组气藏的加砂压裂井增产效果统计分析发现:①大多数气井压裂均获得较好的增产效果,但有少部分井压裂增产效果不理想,且少数井无法完成压裂设计的加砂量;②加砂量(压裂规模)对压裂增产效果没有明显的相关关系,部分加砂量大的气井压裂增产效果好,也有部分井压裂增产效果差;同样,部分加砂规模小的井也有压裂增产效果好,也有压裂增产效果差的。这与常规气藏加砂压裂增产效果有明显的差异。本文在分析该气藏地质特征的基础上,剖析储层地质特征与加砂压裂施工参数和效果之间的关系,最终确定气井合理的加砂压裂规模。

一、新场上沙溪庙组气藏地质特征

新场上沙溪庙组气藏所属的构造是孝泉—丰谷北东东向构造隆起带上的一个局部平缓鼻状构造,具西高东低、南陡北缓的趋势。气藏埋深 1500～2300 m,储层以三角洲平原分支河道叠加微相沉积为特征。根据储层大量岩心样品物性分析结果,其平均孔隙度为 10 %,平均渗透率为 $0.184\times10^{-3}\mu m^2$,这表明新场上沙溪庙组储层属于典型的致密砂岩储层。砂体纵向频繁叠置,厚度 15～30 m,平面呈毯状展布,层位稳定。储集岩类型以岩屑长石砂岩为主,其次有长石岩屑砂岩、长石石英砂岩、岩屑石英砂岩。碎屑颗粒中,长石一般 20 %～40 %,岩屑 20 %～35 %,石英 40 %～50 %。颗粒呈棱角状—次棱角状,分选中—好;胶结物含量 3 %～15 %,局部 20 %。储层岩石的结构成熟度和成分成熟度都较低,反映了强烈侵蚀快速堆积的特点。

上沙溪庙组气藏储层精细描述[2]认为,上沙溪庙组中深层岩石已普遍致密化,储层能否有效聚集油气并形成工业性产能,必须依赖其储集性能的改善。而改善储集性能最重要的两个因素一是裂缝,二是矿物的溶蚀作用。储层主要的储集空间类型是长石溶孔,裂缝的发育为溶蚀作用的发生提供了流体渗流的通道,因而,裂缝发育并叠加溶蚀孔发育带即是高产工业气流富集带,决定上沙溪庙组气藏高产的关键参数是储层的渗透率。通过以上分析,研

作者简介:吴志均,1964 年生,高级工程师;在石油大学(北京)博士后流动站工作,主要从事油气田开发方面研究。地址:(102249)北京市昌平区府学路石油大学(北京)石油天然气工程学院。电话:13911797311。E-mail:wuzhijun648@sina.com

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

究储层地质特征的关键是裂缝和矿物溶蚀的形成原因及其作用。

储层岩心描述、气藏成藏史和构造形变[3]研究认为,储层内裂缝大多数为层理缝,少数为构造缝。新场上沙溪庙组储层在致密化之前天然气已经聚集成藏,而且有上覆遂宁组大段泥岩形成的有效盖层,这样在烃源层和储集层内形成有效的封闭体系。随着机械压实、压溶和胶结作用使储层致密化,孔隙大幅度地减少,流体被压缩造成压力升高,此时封闭体系内的压力等于最大古埋深时由上覆地层载荷形成的压力与储层致密化的压力升高之和(由于储层致密化导致封闭体内孔隙空间减少,天然气被压缩,封闭体内压力升高),封闭体已是异常高压系统。在随后的隆升过程中上覆地层被剥蚀,封闭体上升,而其上开放系统地层仍为与埋深相对应的正常压力系统;但是封闭体内部由于封闭原因仍然保持原来的压力值,相对上升后它的埋深减少,因此压力梯度的异常程度更高;这样沿致密砂岩中的层理面(机械强度的薄弱面)很可能发生自然流体压裂作用,形成"层理裂缝系统"。这些层理逢在该气层中发育程度较高,为溶蚀作用的发生提供了流体渗流的通道。

上沙溪庙组储集岩中大量的长石矿物是发生溶蚀改造的物质基础。由于钙质斜长石形成于岩浆环境或高温变质环境,因而在成岩条件下不稳定,上沙溪庙组储层砂岩薄片中只偶见斜长石,而胶结物却以方解石为主要成分,常见前期形成的粒间粒内孔隙被细—粉晶方解石充填,这一特定的岩石学特征并非偶然。斜长石在有 CO_2 参与的水溶液作用下将发生化学溶蚀。钠长石和钾长石具有足够的稳定性,在成岩深度内作为自生矿物相出现,而在酸性水溶液作用下,将发生溶蚀。

可见,由于长石的溶解形成了高岭石和石英及含 K^+ 或 Na^+ 的溶液。长石等组分在酸性溶液作用下发生溶蚀后,对该储层的改造产生了三种明显的结果:①溶蚀物质随成岩流体发生迁移,在异地孔喉中发生化学沉淀,形成孔渗带边缘的致密带,这种作用使储集岩物性得以改善。溶蚀物质迁移越彻底,迁移距离越远,形成的储渗体质量越好,规模越大;②溶蚀物质就地沉淀,在次生孔隙形成的同时堵塞了原生孔喉,如果此时再接受来自异地的化学迁移物质,则形成的次生孔隙也将被堵塞,于是形成致密体或最差的储渗体;③在原生粒间孔喉的基础上,溶蚀作用不强烈,原生孔隙和长石溶孔并存,同时溶蚀物质沿着原始孔喉发生迁移,但迁移作用不彻底,一边迁移一边在喉道中沉淀,最终使喉道变细,这种作用对孔隙度影响不大,而渗透率却明显降低。

综合气藏地震、测井、动态特征等宏观、微观信息来研究储层特征,为了反映储层裂缝和溶蚀作用对孔喉连通程度和渗透率重要影响,利用"储渗体"来描述上沙溪庙组储层的非均质性。储渗体是由内部的渗透体和外围的封隔层组成的,它的内部是由微裂缝和次生溶孔作为主要孔隙连通通道的渗透体(层理缝加上溶蚀迁移),而特低渗透的砂泥岩或致密泥岩则在三度空间上形成它的封隔层(溶蚀物沉淀)。各储渗体在几何形态、大小、物性参数上不尽相同,特别是渗透率值差别更大。上沙溪庙组气藏实质上是由储集砂体内部不同级别的储渗体构成的。根据储渗体的渗透性和其工业产能的大小,将上沙溪庙组气藏划分为四类储渗体,即连通相对高渗体、低渗体、局限渗透体和致密体。

储渗体在勘探开发中表现为:①在投产时间较长的气井附近新钻井地层压力与原始地层压力接近一致;②新井投产对邻井产能基本没有影响;③相邻井之间的关井实测压力相差较大;④利用单井动态储量反推储渗体规模,推测储渗体半径在 176～528 m 范围内,大多数的分布在 300～400 m 之间(见表 1)。

表 1　经验法计算单井控制半径结果

井　　号		CX129	X802	CX136	CX167	CX159	L103	CX132
可采储量	($\times10^8m^3$)	1.34	0.55	0.67	0.36	0.244	0.95	1.47
单井控制地质储量	($\times10^8m^3$)	2.23	0.91	1.12	0.60	0.41	1.58	2.45
单井控制半径	(m)	504	322	356	213	176	346	528

二、增产效果分析和合理规模的确定

为满足新场上沙溪庙组气藏非常规致密储层压裂改造时所需的耐高温、耐剪切、高携砂能力、易返排和配伍性好的要求[4],专门设计了中深井中高温压裂液体系。其主要性能参数为:粘度 50 mPa·s;稠度参数 2.3761 mPa·s;流态指数 0.5322;滤失系数 2×10^{-4}m/ min1/ 2;水化粘度小于 10 mPa·s;伤害率小

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

于 25 %;破胶时间为 1～4 h。支撑剂选用成都陶粒,压裂设计采用的是一套二维垂直裂缝压裂优化设计软件和一套 FRACPRO 压裂设计软件,改造技术为“大排量、中砂量、中砂比、造长缝”。利用该项技术对上沙溪庙组气藏进行了几十口井的压裂改造,表2是典型井的压裂增产效果,由此可以看

表 2　新场气田上沙溪庙组气藏单井压裂施工参数与压裂效果表

井号	前置液量 (m^3)	携砂液量 (m^3)	排量 (m^3/min)	支撑剂量 (m^3)	平均砂比	产层厚度 (m)	$Q_{1\,AOF}$ (10^4m^3/d)	$Q_{2\,AOF}$ (10^4m^3/d)	增产倍比	$\frac{Q_{2\,AOF}}{\text{产层厚度}}$ (10^4m^3/d·m)	效果
811	180.0	224.9	5.35	50.0	24.5	17.2	0.02	21.00	1050	1.22	
816	198.0	194.0	5.34	60.0	30.9	16.0	1.14	25.87	22.69	1.62	砂量大
104	150.0	201.2	5.80	45.0	22.4	40.0	0.54	30.62	56.70	0.766	效果好
813	252.5	249.0	5.45	60.0	24.0	17.3	1.32	13.59	10.29	0.786	
801	174.5	255.4	4.90	40.0	15.7	17.5	0.62	0.43	0.69	0.025	
820	112.0	174.0	5.33	44.4	25.5	11.8		1.02		0.086	砂量大
823	167.9	138.7	3.35	51.7	37.3	11.0	0.03	0.33	11.00	0.030	效果差
133	81.1	75.3	3.30	37.0	49.1	30.0	1.08	1.64	1.52	0.054	
169	80.3	88.3	3.34	25.0	28.3	14.0	0.55	29.39	53.58	2.099	
168 - 1	76.1	154.5	3.85	33.0	24.4	12.0	0.90	23.02	25.58	1.92	砂量小
102	122.3	143.5	3.70	33.0	23.0	19.5		43.04		2.207	效果好
155 - A	100.5	84.3	4.30	18.0	21.4	15.0		19.06		1.271	
168	90.6	108.0	3.35	28.0	25.9	12.0	0.29	4.16	14.41	0.347	
370	81.4	117.6	3.60	27.0	19.4	12.0	0.00	0.86		0.072	砂量小
165	110.3	88.0	3.17	25.0	28.4	20.0	0.14	1.56	11.13	0.078	效果差
CX153 - 2	109.6	82.5	3.60	18.0	21.8	17.0		0.77		0.045	

注:$Q_{1\,AOF}$为压裂前无阻流量,$Q_{2\,AOF}$为压裂后无阻流量。

出:①大多数气井压裂均获得较好的增产效果,但有少部分井压裂增产效果不理想;②加砂量(压裂规模)对压裂增产效果没有明显的相关关系。部分加砂量大的气井压裂增产效果好,也有部分井压裂增产效果差;同样,部分加砂规模小的井也有压裂增产效果好,也有压裂增产效果差的,这与常规气藏加砂压裂增产效果存在明显的差异。有少部分井在加砂压裂过程中发生砂堵,泵压突然上升到一个相当高的压力,无法继续进行加砂压裂施工作业,导致加砂压裂不成功,因砂堵而无法完成加砂任务的施工参数表见表 3。

现分析造成气藏压裂增产效果与常规气藏差异

表 3　新场上沙溪庙组气藏因砂堵未完成加砂任务的单井压裂施工参数统计表

井号	井段 (m)	岩性	泵压 (MPa)	排量 (m^3/min)	破裂压力 (MPa)	设计砂量 (m^3)	入地砂量 (m^3)
801	2162～2179	砂岩夹泥岩	49.5～78.0	2.7～3.8	50.3	40.0	14.0
153 - 2	2290～2298 2353～2362	细、中粒砂岩	60.6	3.6	57.7	35.0	15.1
832	2402～2411	砂岩	59.8	3.0	66.0	40.0	10.8
824	2586～2597	砂岩	61.1	3.6	59.8	30.0	20.3
457	2439～2465	砂岩	45.0	5.5	62.5	35.0	10.5

较大及部分井形成砂堵的原因,主要是地质因素:该储层岩石是在普遍致密化之中存在的不同级别和不同规模的储渗体,它是决定气井产能大小的关键因素,它们之间被致密封隔层所分割。在加砂压裂过程中裂缝可以较容易地在储渗体内部的渗透体上延伸,从而增加气体渗流面积,提高气井产量。当裂缝延伸到储渗体的致密封隔层时,由于致密封隔层具有致密非渗透和强度高的特点,加砂压裂一般情况

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

下很难将它压裂成缝,这样裂缝的延伸受阻,施工压力急剧上升,造成加砂压裂无法继续进行;加砂量(压裂规模)与压裂增产效果没有明显的相关关系的原因就在于此。只有压裂规模与储渗体的规模相匹配时,才能得到较好的压裂增产效果。对加砂压裂增产效果好的气井进行了试井测试,试井解释结果表明,裂缝的有效长度都在 84 m 以内,且大多数在 40～70 m 范围内。由于大多数储渗体的规模半径约在 300～400 m 范围内,加砂压裂的规模只能控制在此范围内才不发生砂堵,而且只有当压裂后形成的裂缝长度能够尽可能的控制储渗体时,压裂的规模不仅合理,而且增产效果较好。利用裂缝三维延伸的数学模型对新场气田上沙溪庙组气藏的压裂井进行压裂设计计算,其结果列为表 4。由表 4 可知,当加砂量达到 30～40 m^3 时,裂缝长度可达到 150～200 m;随着加砂量和液量的增加,裂缝长度也增加。根据试井解释裂缝有效长度,并考虑到设计支撑剂充填长度与实际有效裂缝长度之间有较大的差异,当设计压裂裂缝长度为 150～200 m 时,完全可达到裂缝有效长度为 80 m 左右的要求。由于新场上沙溪庙组气藏是致密储层,它的渗流规律偏离达西定律[6],存在"启动压差"和"临界压力梯度"。综上所述,气藏内气井压裂的合理加砂量为 30～40 m^3,裂缝长度为 150～200 m,所形成的裂缝能够控制气井合理的含气面积,在井位部署合理的情况下压裂施工也不会发生砂堵。

表 4　新场气田上沙溪庙组气藏压裂设计方案表

序号	砂量 (m^3)	总液量 (m^3)	平均砂浓度 (kg/ m^2)	支撑缝长 (m)	裂缝高 (m)	最大缝宽 (cm)	效率
1	27.0	192.52	4.67	145.27	44.98	1.48	0.35
2	31.41	214.26	4.71	157.33	48.77	1.38	0.33
3	38.64	203.65	6.55	148.63	44.96	1.56	0.33
4	43.38	322.03	5.36	202.74	44.74	1.55	0.30
5	45.11	322.75	5.62	202.17	44.67	1.56	0.30
6	50.25	321.16	6.42	199.50	44.45	1.61	0.30
7	53.42	433.01	5.78	239.47	44.09	1.64	0.28
8	99.17	419.03	11.48	217.54	45.53	1.94	0.26

三、结　论

(1) 新场上沙溪庙组气藏储层是在岩石普遍致密化之中形成的不同级别和不同规模的储渗体,被致密泥岩或砂泥岩所分割,它们是决定气井产能大小的关键因素。

(2) 气藏内储渗体规模决定着压裂施工规模,气井压裂的合理加砂量在 30～40 m^3,合理的裂缝长度在 150～200 m。

参 考 文 献

1　马新华,钱凯等. 关于 21 世纪初叶中国天然气勘探方向的初步认识. 石油勘探与开发,2000;(3)

2　叶军,唐艳. 川西坳陷 J_2s 储集岩特征与孔隙形成、保存机制. 天然气工业,2001;(1)

3　吴志均,唐红君,安凤山. 川西新场致密砂岩气藏层理缝成因探讨. 石油勘探与开发;2003;(3)

4　曹学军,康杰. 川西气田压裂液及压裂工艺技术. 油气井测试,2002;(2)

5　张国东,林辉,李运辉,王顺云. *GM*(1,*N*)灰色模型在压裂井评井选层中的应用. 天然气工业,2002;(3)

6　贺伟,冯曦,钟孚勋. 低渗储层特殊渗流机理和低渗透气井动态特征探讨. 天然气工业,2002;(增刊)

(收稿日期　2004-05-19　编辑　韩晓渝)

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Feng Wenguang is a Professor and Instructor of doctoral candidates. Add: Shilidian, Chengdu, Sichuan (610059), China Cell: 13032810713 E-mail Jengwgl26@126.com

GEOLOGIC CHARACTERISTICS OF XINCHANGTIGHT GAS RESERVOIR AND REASONABLE SCALE OF FRACTURING STIMULATION[1)]

Wu Zhijun, He Shunlk Petroleum University, Beijing). NATUR. GAS IND. v. 24, no. 9, pp. 93-96, 9/25/2004. (ISSN 1000-0976; **In Chinese)**

ABSTRACT: According to statistical analysis of the stimulation effect of sand fracturing at Upper Shaximiao group in Xinchang gas reservoir, it is found that: ①The good results have been achieved for most of gas wells to frac ture, but the ideal results have not been achieved for a few wells, and the designed sand volume can't be completed for some wells; ② There is no obvious correlativity between sand volume and stimulation effect, which is different with the convenient fracturing. Analyzed the geologic characteris tics of Upper Shaximiao group in Xinchang gas reservoir, the article concludes that the reservoir consists of different level and size of permeable-reservoir bodies which exist in general rock tightenization. The permeable-reservoir bodies are iso lated by tight shale and sand. They are the key factor of pro ductivity of gas wells. The interlayers of the permeable-res ervoir bodies are characterized with no permeability and high strength. They can stop the fracture extension of fracturing, which is the reason why tight gas reservoir fracturing is spe cial. To develop the gas reservoir with low cost and high ef ficiency, studying the size of permeable-reservoir bodies and the relationship between fracturing results and operating pa rameters, the reasonable sand volume and fracture length is determined.

SUBJECT HEADINGS: Reservoir with low permeabili ty, Reservoir, Fracturing, Scale, Stimulating results, Si chuan basin, West

Wu Zhijun (seniorengineer) was born in 1964. Add: Petroleum University, Changping, Beijing (102249), China Cell: 13911797311 E-mail: wuzhijun648@sina.com

DISCUSSION ON CONTRIBUTION OF OILFIELD CHEMISTRY WORKING PRINCIPLE RESEARCH FOR SPECIAL TECHNOLOGY INNOVATION OF OILFIELD CHEMISTRY[1)]

Zhou XiaoquanCNatural Gas Research Institu te of Southwest Branch, PCD. NATUR. GAS IND. v. 24, no. 9, pp. 97-100, 9/25/2004. (ISSN 1000-0976; **In Chinese)**

ABSTRACT: The special technology of oilfield chemistry is mainly used to produce oilfield chemical additives with different functions, by which the several series of oilfield chemical working fluids are formulated. The oilfield chemical additives are the necessary chemical materials for explora tion, development, production and transmission of oil and gas. Their property and quality influence the drilling quality, the recovery factor, and the integral! ve development cost of oil and gas directly. Oilfield chemicals innovation depends on the innovation, breakthrough and development of oilfield chemistry working principles. Taking the innovation, break through and discovery of oilfield chemistry working princi ples on the formula technologies for the viscosity-changing acid fluid system with leaking control, the auto-breaking W/O emulsions acid fluid system with high viscosity, the auto-breaking W/O emulsions acid fluid system with low viscosi ty, the auto-breaking micellar acid fluid system, the self-changing direction acid fluid system without polymers, the hydrophobic co-polymer system for EOR, and the retarded release technology to apply for oilfield chemical work fluid system and amrphionic co-polymer drilling fluid system as ex ample, the contribution of oilfield chemistry working princi ples research for special technology innovation of oilfield chemistry is discussed.

SUBJECT HEADINGS: Oil field chemistry, Acid pro cessing fluid, Working, Mechanism, Technology, Research

Zhou Xiaoquang raduated from Southwest Petroleum In stitute in 1985. Add: Tongjiqiao St., Huayangtown, Chengdu, City Sichuan Province (610213), China Tel: (028) 85604523

EXPERIMENTAL STUDY OF NON-DARCY FLOW FOR PROPPANT-FILLING BEDS[1)]

Lin Qicai (Down-hole Service Com., SPA). NATUR. GAS IND. v. 24, no. 9, pp. 101-103, 9/25/2004. (ISSN 1000-0976; **In Chinese)**

ABSTRACT: It is very important for the fracturing de sign and productivity forecast to understand oil and gas flow in fractures mostly under non-Darncy conditions during pro ducing process. This

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net