

# 二氧化碳泡沫与甲醇压裂在Canyon

10——14,15 气层的成功应用  
 J. R. Craft 等 著 Craft, JR

TE 357.13  
 胡奥林 译

**摘要** 在得克萨斯州的Sterling县,采用二氧化碳与甲醇压裂处理,使Canyon这个处于经济边缘的含气砂岩储层重新获得生产能力。二氧化碳泡沫压裂具有施工液需用的水量较少、提供气助、帮助水的返排及降低界面张力等优点。该气田由于进行了二氧化碳泡沫压裂增产处理,即使储层压力下降了33.2%,Canyon含气砂岩的产量仍达到或超过了初始产率。

本文介绍Conger气田的几次二氧化碳泡沫压裂作业,讨论二氧化碳泡沫压裂工艺、作业设计和现场实例。

## 一、地质概况

Conger (Penn) 气田位于得克萨斯州Sterling县Eastern Shelf侧面的Midland盆地,共有两个产气层:Pennsylvanian Cisco砂岩和Pennsylvanian Canyon砂岩,这里主要讨论Pennsylvanian Canyon砂岩。

Canyon含气砂岩的矿物含量、孔隙度和渗透率由各井取出的全岩心样品作出。这些砂岩的沉积解释仅仅依据于测井曲线特征和区域地下构造图。砂岩属上三角不连续的透镜状砂岩。各砂岩体由海相页岩隔开,厚度1—50ft。各个砂岩似乎都呈薄层状分布,层间夹有页岩薄片。由裸眼伽马射线测井分析可知,较纯净砂岩中页岩含量约为7—10%。

根据Canyon气层的产层岩性图,孔隙度大于8%。在纯净的Canyon砂岩中,从页岩基线到最大偏角,伽马射线衰减50%。8%的孔隙度下限值表明,只要孔隙度小于8%,就不会有很高的产量。砂岩厚度大致南北排列,但连续的单体砂岩最多只有1.5英里。

井壁岩心分析表明,气层属砂岩,颗粒微到极微,微粉质,微页质,微灰质,粘土含量中等。新完钻井岩石的x射线衍射和电镜扫描分析显示,以石英结构为主,含铁矿物和方解

石胶结(见表1)。岩样粘土似乎主要是碎屑岩,由无数伊利石和绿泥石薄层及细条组成,同时还有少量自生伊利石。另外,井壁岩心分析得出孔隙度为12.1—21.7%,中子-密度和声波测井分析的平均孔隙度为12.13%,井壁岩心孔隙度较高是由于取心枪点火时岩样断裂所致。

## 二、储层特征

Conger气田的Canyon含气砂岩属致密气层,全岩心的实测渗透率为0.012—0.039md,整个气层均发现有伊利石、绿泥石、粘土、菱铁矿。由于储层有大量不稳定粘土,注入与之不配伍的水力压裂液可能造成储层损害,影响产量。这种损害将增大毛管压力,使施工后压裂液滞留于气层,导致水堵。

对于Canyon气层这样的低压致密气层,如果没有足够的压力降从孔隙空间驱替液体,常规的凝胶压裂液将被吸附在裂缝面上,势必影响生产能力。

## 三、试验目的

为了确定新施工工艺能否顺利实施并获得增产效果,对Conger气田Canyon砂岩气层储

层岩性特征相似的20口井进行了试验研究。这20口井分为新试验井和老试验井两种类型，它们的唯一区别在于井底压力和增产施工工艺（见表2、表3）。

#### 四、老试验井评述

老试验井是指在1974年1月至1982年12月完成的井，原始井底压力为2433—1660 psi，平均2095psi，详见表4。

如表2所示，常用的增产工艺包括稠化水压裂，液量30000—75000 gal，砂量30000—750000lbm，砂径20/40目，加砂浓度1/2—2 lbm/gal。表2示出的13口井中，有3口井用70%

表1 x射线衍射定量分析结果（18\*井）

深度(ft)	7255	7276	7330
粘土矿物	9.2	10.6	6.9
粘土相对分布(归一至100)			
伊利石	44.3	80.0 <sup>①</sup>	72.1
高岭土	2.1	5.2	8.0
绿泥石	9.1	12.4	19.9
蒙脱石	44.5	2.5	0.0
	100.0	100.0	100.0

①包括云母。

N<sub>2</sub>基液施工，泵注20/40—10/20目砂190000—510000 lbm。10\*井用150000gal 50%CO<sub>2</sub>和稠化水施工，泵注20/40目砂515000 lbm。

全部施工中，常规稠化水施工后的液体返排率为22%，70%N<sub>2</sub>施工井的液体返排率达90%。13口老井的液体平均排出率为41.6%。较致密砂岩中的3\*井，其施工后的返排率达90%，第一年的产量是该场区三口老井中最差的。

#### 五、新试验井的施工

1988—1989年，在13口老井所在同一场区的Canyon气层钻了7口井。如表4所示，新井的原始井底压力平均比老井低12%。新井的增产作业与老井不同，并着力于改善施工液的最终排出率。

增产施工选用70%的二氧化碳泡沫液，含25%体积的甲醇（预冲洗液和前置液）、铁控制剂、粘土稳定剂、防蜡剂等。其它不同的施工设计是，裂缝一翼长度为800—1100ft，考虑了摩阻压力，并采用了恒定内相设计方法。

1. 二氧化碳泡沫液：7口新井施工全部采用70—80%的二氧化碳泡沫液，含25%体积的

表2 Cnegor (Penn) 气田老试验井的特征及压裂施工参数

井号	射孔井段 (ft)	平均孔隙度 (%)	平均含水饱和度 (%)	净厚度 (ft)	原始井底压力 (psig)	施工液量 (gal)	支撑剂总量 20/40目 (lbm)	最大支撑剂浓度 (lbm/gal)	液体排出率 (%)
1	7309—7348	12.0	1.0	75	1900	稠化水, 750000	75000	0.5—2.0	42.0
2	7475—7586	12.5	43.8	46	1879	稠化水, 50000	50000	0.5—2.0	48.0
3	7390—7438	11.0	48.2	12	2181	70%N <sub>2</sub> , 90000	190000	—	90.0
4	7123—7207	12.5	43.8	26	2399	稠化水, 50000	50000	0.5—1.5	29.9
5	7342—7422	12.0	39.5	35	2274	稠化水, 50000	50000	0.5—1.5	21.8
6	7140—7355	13.0	45.6	49	1985	稠化水, 50000	50000	0.5—2.0	—
7	7256—7397	12.0	49.0	54	2035	稠化水, 60000	60000	0.5—2.0	—
8	7230—7406	13.0	45.3	43	2045	稠化水, 65000	65000	0.5—2.0	—
9	6800—7363	13.0	42.1	43	1660	50%CO <sub>2</sub> , 150000	515000	1.0—5.0	26.2
10	7296—7495	12.0	44.1	49	1884	70%N <sub>2</sub> , 180000	510000	1.0—6.0	61.2
11	7157—7276	14.0	41.5	36	2209	70%N <sub>2</sub> , 120000	467000 <sup>①</sup>	1.0—6.0	40.1
12	7217—7334	13.0	42.1	67	2433	稠化水, 30000	30000	0.5—1.5	22.0
13	7132—7265	12.0	41.6	24	2351	稠化水, 40000	50000	1.0—2.0	34.8
		平均12.4	平均44.4		平均2095				平均41.6

①使用20/40目和10/20目支撑剂。

③

表 3 Conger (Penn) 气田新试验井的特征及压裂施工参数

井号	射孔井段 (ft)	平均孔隙度 (ft)	平均水饱和度 (%)	净厚度 (ft)	原始井底压力 (psig)	施 工 液 量 (gal)	支撑剂总量 20/40 目 (lbm)	最大支撑剂浓度 (lbm/gal)	液体排出率 (%)
14	7481—7520	14.0	43.7	48	1113	70—80% CO <sub>2</sub> 与 25% 甲醇, 131000	270000	1—6	100.0
15	7075—7168	13.5	37.3	24	1782	80% CO <sub>2</sub> 与 25% 甲醇, 114732	175000	1—6	35.3
16	7110—7229	14.0	43.1	60	2381	80% CO <sub>2</sub> 与 25% 甲醇, 113504	180000	1—6	87.6
17	7190—7314	13.5	43.0	62	2364	80% CO <sub>2</sub> 与 25% 甲醇, 130000	204000	1—5	78.7
18	7253—7352	13.0	42.1	59	1691	80% CO <sub>2</sub> 与 25% 甲醇, 113504	150000	1—6	63.0
19	7138—7273	13.0	40.7	58	1579	80% CO <sub>2</sub> 与 25% 甲醇, 125000	255000	1—6	40.6 ①
20	7188—7298	13.0	38.0	65	1969	80% CO <sub>2</sub> 与 25% 甲醇, 197171	350000	1—6	67.0

① 施工中铁控制剂减少了50%。

表 4 Conger (Penn) 气田老试验井与新试验井的生产动态

井号	第一年产量 (10 <sup>6</sup> ft <sup>3</sup> )	原始井底压力 (Psig)	6 月的井底压力 (Psig)	完井时间
老 井				
1	146812	1900	—	1975.8.28
2	128163	1879	1730	1975.10.24
3	107337	2181	—	1982.12.12
4	103492	2399	1750	1974.8.30
5	42702	2274	1723	1975.4.23
6	410177	1985	1875	1974.12.19
7	238450	2035	1520	1975.5.10
8	27010	2045	—	1974.11.14
9	87013	1690	1327	1981.3.15
10	141322	1884	1300	1982.10.27
11	56835	2209	—	1981.7.17
12	449873	2433	2000	1974.1.24
13	23802	2351	1214	1974.3.1
平均	151144	2095	1604	
新 井				
14	122486	1113	583	1989.2.15
15	241081	1782	879	1989.3.23
16	304834	2381	722	1988.8.20
17	164390	2364	687	1988.10.11
18	228289	1681	528	1989.4.13
19	406234	1579	727	1988.9.1
20	132513	1969	603	1988.11.1
平均	228543	1838	675	

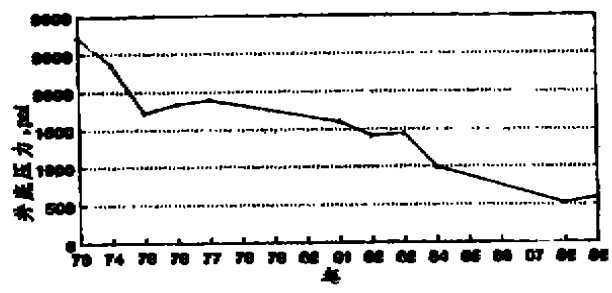


图 1 Conger 气田的平均井底压力

如图2所示, 在3000—5000psi压力下, 液态二氧化碳的密度和水相差无几。液态二氧化碳产生的泡沫不象氮气类的低密度气体生成的泡沫那样容易发生密度分离。

另外, 溶解在压裂液中的二氧化碳可降低液体粘度, 减小地层流体与压裂液的界面张力, 这就降低了毛管压力效应, 只需较小地层压力就能排出压裂液。因为水量少, 减轻了液体的损害作用, 并且由于二氧化碳与水反应生成碳酸, 压裂液的pH值也较低。可见, 对于富含铁粘土、绿泥石和菱铁矿的储层, 必须使用低pH值的压裂液, 以解决含铁粘土引起的问题。

泡沫压裂液施工井, 可在施工后立即开井排液, 迫使裂缝闭合, 不让支撑剂流动。强迫裂缝系统闭合, 可让支撑剂的分布更加均一, 比裂缝自然闭合的支撑剂分布效果好。

2. 甲醇及水助排添加剂, 有文献详细论述过压裂液排出率与井生产动态的关系, 由于得益匪浅, 需采取某些方法来提高压裂施工后的液体返排率。在预冲洗液和前置液中加入

甲醇。自1982年初以来, 有些地区开始大量应用含量60—80%的二氧化碳泡沫作压裂液, 在Conger气田, 泵砂的前几个阶段, 采用80%的二氧化碳泡沫液, 后期用70%的泡沫。采用80%的泡沫前置液, 使20%的外相凝胶能在施工结束时到达距井筒的最远处。

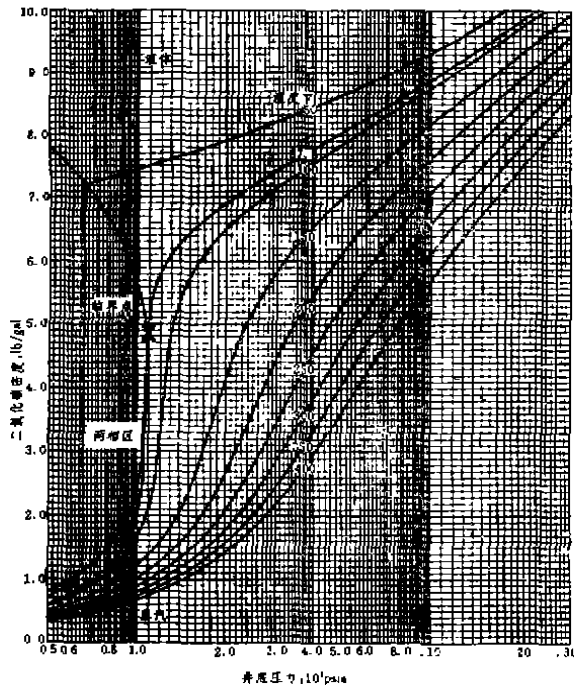


图 2 CO<sub>2</sub>密度与井底压力的关系

25%液量的甲醇，改变储层的残余水饱和度。甲醇改变残余水饱和度的作用如同一种脱水溶剂，帮助抵消压裂液进入气层造成的毛管压力增大（见图4）。

加入甲醇后，石英表面残余水饱和度的变化只是暂时性的，这时，施工泵入的水助排剂包裹住石英面，形成一种非润湿状态。这种非润湿环境将降低孔隙喉道的毛管压力，增大施工层对水的相对渗透率。随着水相对渗透率的提高，气体不穿过而是顶替非润湿性的压裂液。当石英面的润湿环境变化时，就可实现压裂液快速大量地返排。而且由于气层的水饱和度低，气体的相对渗透率便高于未加入水助排剂的气体相对渗透率。

3. 铁控制剂：对于含铁粘土储层，应采取措​​施确保铁沉淀不致影响产量。溶解铁可以有两种化合价状态，即二价铁（Fe<sup>++</sup>）或三价铁（Fe<sup>+++</sup>）。如果液体pH值超过2.5，三价铁便开始沉淀，当pH值达到3.5时，三价铁全部沉淀。而二价铁要在液体的pH值达到约7.5时才开始沉淀，因此，在低pH的二氧化碳泡沫

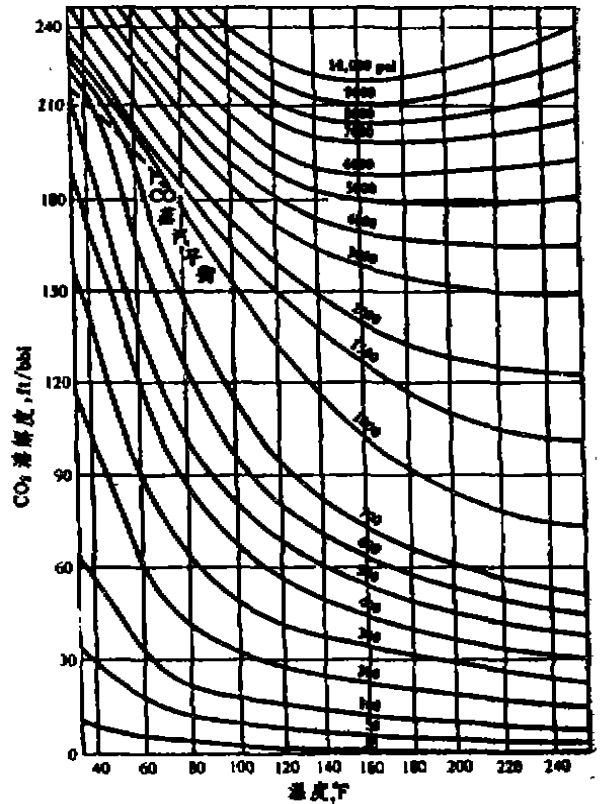


图 3 CO<sub>2</sub>在水中的溶解度

内，二价铁是不会沉淀的。还原剂可帮助三价铁还原成二价铁，除氧剂可消除处理液内的游离氧，阻止二价铁氧化成为三价铁。

4. 其它液体添加剂，由于气层富含粘土，液体中加入了稳定粘土的一种有机聚合物。它的主要作用是稳定膨胀粘土和迁移微粒，尽量减轻水溶液与这些矿物接触引起的损害。

另外，还考虑了防蜡措施。尽管7口新井在生产期间均未遇到结蜡问题，但液体中仍然设计使用了清蜡剂和防蜡剂。

5. 其余施工设计依据：由于Canyon气田的井底压力普遍都在下降，显然需要较大的裂缝长度才能经济有效地生产。但是，增大缝长必须考虑加大施工用液量。

同时，要达到7口新试验井压裂要求的排量，作业只有经套管注入。如果施工管线的截面积不够大，泡沫液就会产生过大的降阻压力。因此，套管设计必须综合考虑施工压力和施工

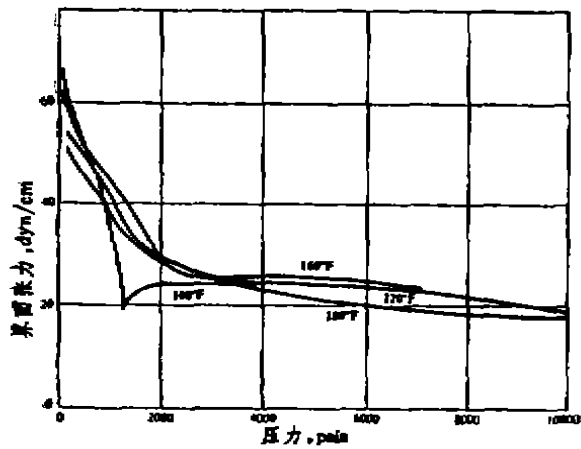


图 4 CO<sub>2</sub>与水的界面张力

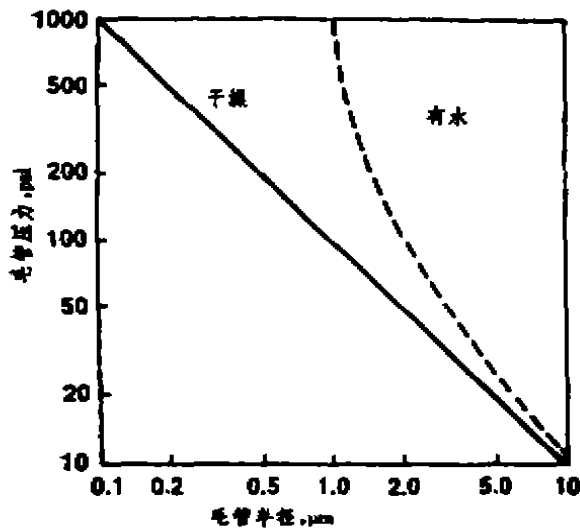


图 5 残余水对毛管压力的影响

时的收缩效应。

支撑剂用 20/40 目的 Ottawa 砂，总量为 150000—350000 lbm。根据含气砂岩层的净厚，砂子浓度在 1—6 lbm/gal。前两次施工曾准备采用 80% 的二氧化碳泡沫，但由于砂浓度达到 3—6 lbm/gal 时，80% 泡沫引起了过高的摩阻压力。因此，在砂浓度达到 3 lbm/gal 之前，泡沫质量必须降至 70%。在该阶段的泡沫质量降低后，地面施工压力趋于稳定，避免了以前发生的地面压力突然上升现象。

地面施工压力稳定的原因是因为，由于泡沫质量高、砂子密度过大或是上述两种因素造

成摩阻压力增大，降低较大比重砂注入阶段的泡沫质量，获得了一种均衡效应，使之能维持相对稳定的地面施工压力。

恒定内相设计是一种新的泡沫设计方法，以往的研究已证明了这种施工工艺的价值。用该方法预算的井口施工压力较准，施工用水马力较少，根本不会出现因压力极限引起施工过早结束的状况。这种方法由砂子取代了作为内相的气体，降低气体排量就可继续保持恒定的泡沫质量。

表 3 列出了 7 口试验井的实际施工参数。

### 六、比较与结果

施工后，老井的液体返排率平均为 41.6%。新井采用二氧化碳与甲醇的压裂施工后，即使井底压力比老井低 12%，液体返排仍有明显提高，平均为 62%（见表 2—4）。

液体返排率的变化范围较大，如 14\* 井为 100%，而 15\* 井仅 15%。7 口新井的压裂液平均返排率达 67.4%。如表 3 所示，在液体返排低于 45% 的两口井中，压裂基液中少加了 50% 的铁控制剂。

表 4 是老井和新井原始井底压力与 6 个月后井底压力的对比。老井 6 个月后的原始储层压力平均下降 491 psig，降低了 23%。新井 6 个月后的原始储层压力平均下降 1163 psig，降低 63%。

即便是在井底压力下降，储层压力枯竭速度加快及缝长增大的情况下，二氧化碳泡沫与甲醇压裂后的新井，第一年单井平均累计产量仍超过老井 51.2%。

### 七、结 论

1. 由于整个 Conger (Penn) 气田 Canyon 气层的井底压力都在下降，需要较大的裂缝长度才能经济有效地生产。

2. 因气层含有大量的伊利石、绿泥石、菱铁矿等，须使用低 pH 值的与气层配伍的压

④

# 在多级基质酸处理中氮气泡沫和水层转向剂应用效果的实例研究

15—20

TE 357.2

D. K. Kennedy等 著 *Kenny, DK*

张秀云 译

**摘要** 本文介绍5口含水井用多级土酸、氮气泡沫和水层转向剂处理的结果。处理后原油产量得到明显改善,平均增产700 bbl/d,而油井含水无明显增加。用放射性示踪剂、伽马能谱测井和地面压力记录数据分析了转向效果。结果表明,综合应用水层转向剂和氮气泡沫在消除地层损害、增加油井产量和控制油井含水方面是成功的。

对5口井进行了酸化处理,以减小或消除微粒运移或钻井液侵入造成的地层损害,降低生产压差,保护油井的砾石充填,增加产量,提高最终采收率。每一次酸处理的基本作业程序是注入以下与添加剂混合的流体(按泵入顺序): (1)二甲苯; (2)水层转向剂; (3)二甲苯; (4) HCl; (5)土酸(HCl/HF); (6)氯化铵; (7)氮气泡沫。处理级数为3—5,每次重复步骤(4) — (7)。每次作业注入流体的体积和浓度是不相同的。在多数处理中注入80—100 gal/ft HCl前置液, 50—200 gal/ft 土酸(HCl/HF), 150 gal/ft浓度3%的氯化铵顶替液。

合的HCl前置液是为了溶解铁颗粒和碳酸盐。各井均用一种由HCl/HF混合组成的弱土酸溶解硅酸盐。使用含有互溶剂和粘土稳定剂的浓度为3%的氯化铵作顶替液,清洗地层表面,稳定硅酸盐,并减少由废酸在井眼附近形成的二次沉淀。

## 一、泡沫

基质酸化设计的一个最重要的组成部分是保证油井的整个射孔层段受到均匀处理。交替多次注入酸和泡沫,可以使酸液进入受损害的射孔层段。在所处理的5口井中,使用了质量为65%的泡沫作转向剂。由于地层受到损害和砂岩具有多层分布的性质,转向作用对酸化作业能否取得成功,具有重要作用。

在泵水层转向剂前后泵入一段二甲苯,以便把转向剂与油管内的水隔开,并冲洗掉出油层段的外来水。在注土酸之前注入与添加剂混

裂液,防止气层损害。

3. 采用二氧化碳泡沫与甲醇压裂以来,Canyon气层的产量已达到或超过采用稠化水、氮气以及50%二氧化碳气助压裂的对比井的产量。

4. 尽管新井的原始井底压力比老井低12%,且新井6个月的井底压力比老井低58%,但7口新井的生产速度仍达到或超过老井的生产速度。

5. 虽然缝长增长了100%,但新井的压裂

液返排提高到67.4%,而老井则为41.6%。

6. 二氧化碳泡沫与甲醇压裂后的新井,第一年的平均累计产量超过老井第一年平均累计产量51.2%。

7. 二氧化碳泡沫与甲醇的压裂增产施工使Canyon这个经济边缘性的致密砂岩气层重新获得工业生产能力。

(译自《SPE Production Engineering》

1992, 5月号, 219—226)

本文责任编辑 蔡建华