

川东地区井喷显示特征及地质因素分析^{*}

王维斌 唐家琼 庞江平 罗拥军 周洪恩

(四川石油管理局地质勘探开发研究院)

王维斌等. 川东地区井喷显示特征及地质因素分析. 天然气工业, 2007, 27(11): 19-23.

摘 要 川东地区是目前四川盆地天然气勘探开发的主战场, 钻井工作量大, 钻井中气侵、井涌、溢流显示频繁, 特别是个别井喷事故的发生给企业带来了严重的经济损失和不良的社会影响。为此, 通过对川东天然气井喷特征及其地质因素的分析, 以期预防或减少井喷事故的发生。研究表明: ①川东碳酸盐岩地层发生井喷的频率较高, 但在 1990 年后井喷次数已明显减少; ②所发生的主要是钻进中井内为高压条件下的井喷, 喷出的天然气中硫化氢含量高, 危害性大; ③绝大多数的井喷在发生前都有明显征兆。地质因素分析结果认为: ①低缓、潜伏构造及部分高陡构造上异常高压裂缝系统, 特别是小型网状或单裂缝系统井喷频率高; ②在纵向压力剖面上, 嘉二²亚段以下异常高压带井喷的频率高, 地层层位上以嘉二¹亚段—嘉一段、飞仙关组、茅二段井喷为主; ③多个地层压力带或复杂压力系统共存于同一裸眼井段的条件下, 易喷、漏共存。

主题词 四川盆地 东 天然气 井喷 显示 特征 地质解释 分析 预防

川东地区从 20 世纪 30 年代在石油沟构造钻探的巴 1 井在嘉陵江组上部, 井深 1402.20 m 完钻, 获得工业气流以来, 在纵向上主要钻遇沙溪庙组—石炭系, 在 11 个组段发现 20 个产层, 成为四川盆地天然气勘探开发的主战场。由于川东构造、地层孔洞缝发育程度及流体分布、地层压力系统等客观地质情况复杂, 钻井中气侵、水浸、溢流、井涌的显示时有发生, 特别是个别井喷事故的发生, 严重危及人身、设备、环境及地下天然气资源的安全, 给企业带来了经济损失和不良的社会影响。因此, 分析川东井喷显示特征及地质因素, 有利于预防井喷, 减少损失, 提高效益。

一、井喷显示特征

1. 井喷显示频繁

井喷是指地层中的流体(油、气、水)无控制地涌入井筒, 与井筒中的流体喷出钻台转盘面 1 m 以上的现象(或叫地面井喷)。当流体从喷出地层进入其他低压地层时为地下井喷。一般情况, 在井喷发生前, 要发生与井喷有关的油、气、水显示, 如油(气)侵、水浸、溢流、井涌等显示征兆。川东地区主要是气侵、气涌、喷气显示频繁。据对 663 口井、1129 层

段气显示资料的统计, 共有 135 口井发生过规模、程度不同的 181 次井喷事件, 占统计井数的 20%, 占统计有气显示层段的 16%。在这些显示中, 气侵、井涌、井喷显示的比例为 31 : 11 : 8, 虽然井涌、井喷发生的频率比气侵发生的频率低得多, 但发生井喷的比例仍较高, 说明井喷也是钻井生产中重要的显示。

2. 不同钻井年代, 发生井喷的频率差别大

对发生井喷的时间进行分析可看出(表 1): ①1970~1989 年井喷次数较多, 占井喷总数的 83%; ②从井喷次数与钻井工作量的比例看, 1970~1979 年这段时间最高, 达 94%, 说明钻井中井喷最频繁, 基本上平均每口井发生 1 次井喷, 其次是 1960~1969 年期间, 达 69%; ③1980~1989 年, 井喷绝对

表 1 川东地区不同年代井喷显示情况表

项 目	1959 年前	1969	1979	1989	1999	2004 年 9 月
井喷次数	6	16	63	87	6	3
占井喷总数 (%)	3	9	35	48	3	2
井喷次数 /钻井数 (%)	23	69	94	29	4	6

* 本文作者还有四川石油管理局地质勘探开发研究院的龙辉。

作者简介: 王维斌, 硕士研究生, 高级工程师; 1985 年本科毕业于原西南石油学院石油地质专业; 现从事生产管理工作。
地址: (610051) 四川省成都市建设路一段 83 号。电话: (028) 86015141。E-mail: ww9229@163.com

次数增多,占井喷总数的比例最大,但与同期钻井工作量比较而言,井喷发生的几率减少;④1990年以后井喷事件少见。

3. 钻进中发生井喷的频率高

根据不同作业状态发生的井喷事件分析,有87%为钻进中发生井喷;有13%为其他作业状态下发生,如接单根及起、下钻完钻进发生后效井喷的占4%,起下钻中发生井喷占6%,另外电测井、井漏堵漏中观察或循环、空井作业时发生井喷占3%。接单根、起下钻后一般为钻进或循环作业,可视为钻进状态。因此,井喷主要发生在钻进中,所占比例高达91%。

4. 井喷层段的地层压力具(异常)高压特征,井内液柱压力具高负压特征

(1)井喷层段主要为高压裂缝系统。根据39层有地层压力数据的井喷层段统计分析,压力系数最低仅1.09,最高达2.35,大于1.20的有36层,即92%的井喷层段为(异常)高压层段。

(2)井喷层段主要为高负压钻井作业。根据22个井喷层段在井喷前、后的井内液柱压力分析,井喷前的井内液柱压力平均比井喷处理正常后的井内液柱压力低8.88 MPa(相差最大的双11井茅二段低26.158 MPa)。根据试油取得的22个井喷层段的地层压力数据分析,井喷前的井内液柱压力平均比地层压力低6.54 MPa(相差最大的草4井梁山组比地层压力低21.621 MPa)。

5. 井喷失控的比例高

发现井涌、井喷后,不能及时处理正常,被迫放喷或失控的比例较大,占井喷事件的25%;75%在发生井喷后,通过采取关井、控压循环、加重钻井液密度或重泥浆压井等井控措施,取得了效果,控制了井喷。

6. 井喷处理中井漏明显

溢流、井喷后关井、压井、加重钻井液密度过程中井漏。一是由于压井液密度高,导致井喷层段漏失压井液(喷漏同层),如卧77井茅二段密度 1.84 g/cm^3 钻井液钻进井喷,用密度 2.05 g/cm^3 钻井液压井发生井漏;二是由于同一裸眼井段中,高压、低压层间互共存,压井液漏入低压地层中,这种情况在井喷压井中所占比例较大;第三,关井中井内钻井液及高压地层中的流体进入低压层(即地下井喷),如渡1井用密度 1.69 g/cm^3 钻井液钻至茅二段井深5037 m时发生溢流,关井中立压由 $7.5 \downarrow 6.8 \text{ MPa}$,环压从 $4.2 \downarrow 1.0 \text{ MPa}$,上部飞仙关组气层发生漏失,使井内压力进一步失衡,发生井喷。

7. 绝大多数的井喷在发生前征兆明显,有显示的占81%

(1)川东地区以碳酸盐岩地层发生井喷为主,占97%。钻井中大多数层段岩屑中次生矿物发育,一般3%~5%,有的高达30%,除憋跳钻、钻时降低的显示特征外,9%的井段放空特征明显(如卧77井在茅二段放空1.35 m后发生井喷)。在放空的显示井中,基本上是放空后即发生井涌、井喷,也就是说,放空的井段井喷来得快。

(2)气侵显示。钻井液密度、黏度发生变化及气泡增多、气测值增加,在含硫化氢层段可能有硫化氢味或检测值增加等。在井喷前有气侵显示的占12%。

(3)井涌、溢流。具有井涌显示的占25%,有溢流显示占26%,溢流量大于 1.0 m^3 的24层,平均溢流 5.9 m^3 ,最大的溢流量达到 22.0 m^3 。

(4)井漏显示。如巴9井嘉四¹亚段—嘉三段用密度 $1.50 \sim 1.56 \text{ g/cm}^3$ 钻井液钻进发生井漏,清水强钻至井深1099.35 m放空0.1 m后起下钻,井喷着火;池35-1井用密度 1.75 g/cm^3 钻至井深4170.22 m井漏失返,堵漏中发生气侵、溢流,循环排气中关井,套压由 $2.0 \nearrow 23.0 \text{ MPa}$ 时放喷;天东5井在飞仙关组循环观察井漏后,起钻完灌满钻井液发现外溢,抢下钻具中井喷。

(5)没有征兆或征兆不明显(有的可能没发现)。井喷突然发生的占19%(35层次)。据统计,其中有24层次为清水钻进时发生井喷,这些井又以1980年以前钻井为主,分析当时勘探的指导思想主要是让油气充分地显示,多发现油气层,对于井喷、井控的认识与现在相差甚远。清水钻进时井喷层段的地层压力与井筒液柱压力相差较大,所以在揭开含流体地层时,没有井涌、溢流等征兆即发生井喷。如峡12井嘉二²亚段清水钻至井深963.90 m时突然发生井喷,该层地层压力系数为1.71,井内液柱压力低于 6.712 MPa ;草4井用密度 1.51 g/cm^3 钻井液钻至梁山组井深2709.11 m时突然发生井喷,地层压力为 62.527 MPa ,液柱压力仅为 40.906 MPa ,相差 21.621 MPa ,所以钻井中会突然发生井喷。

8. 硫化氢含量高,危害性大

川东地区纵向上嘉陵江—飞仙关组均具有高含硫化氢特征。渡1井井喷时硫化氢致多人受伤,罗家16H井高含硫化氢天然气导致人员伤亡。在梁5、七里20、云安8等井也曾发生人员中毒伤亡事故。而硫化氢使井下工具、地面设备受到损害的事件则更多。

二、发生井喷的主要构造及层位

(1) 对新钻构造纵向上的储层发育、流体分布、地层压力大小等情况不清楚,新钻构造(带)上的“一号井”或前几口探井、评价井发生井喷的机率高。如相 1、卧 1、张 1、罐 1、渡 1、峰 1、龙会 2、成 2、草 2 等井,有的井是二层段以上发生井喷,如潭 1 井分别在嘉二³ 亚段、飞仙关组、茅口组发生井喷。近年在开发井的钻井中也频有井喷发生,如天东 60 井、62 井,罗家 16H 井等。

(2) 发生井喷的主要为低缓、潜伏背斜构造。在川东主要存在三类构造:高陡背斜构造、低缓背斜构造、潜伏背斜构造。由于高陡背斜构造在地腹断裂发育,解体后形成多个构造单元。这些构造单元中由于储层发育程度、含流体性质、地层压力的差异,发生井喷的频率差异较大。井喷显示与构造类型综合分析表明:高陡背斜构造或其上盘主体构造单元的井发生井喷的仅占 18%;低缓、潜伏背斜构造发生井喷的比例占 82%,即大量的井喷发生在低缓、潜伏构造的钻井中。统计 30 个构造,其中卧龙河构造发生过 31 次井喷,最少的仅发生过 1 次井喷(见表 2)。

表 2 代表构造井喷情况统计表

井喷(次)	<5	5~10	10~20	20~30	≥30
构造(个)	16	10	2	1	1
代表构造	渡口河、新市、高峰场、双龙	黄草峡、沙罐坪、张家场、福成寨	石油沟、石龙峡	相国寺	卧龙河

(3) 发生井喷的主要层位为嘉二¹ 亚段—嘉一段、飞仙关组、茅二段。在 181 次井喷事件中,沙溪庙—雷口坡组、嘉五段—嘉三段、嘉二² 亚段—嘉一段、飞仙关组、上二叠统、下二叠统等各层发生井喷的频率差异较大(见表 3)。据单层井喷次数对比,嘉二² 亚段及以下层位发生的次数及频率急剧升高,占总数的 79%,嘉二² 亚段以上层段仅为 21%。分析看出,井喷的主要层位在嘉二² 亚段及以下层段,其

表 3 不同层位井喷显示统计表

层位	沙溪庙—雷口坡组	嘉五—嘉三段	嘉二—嘉一段	飞仙关组	上二叠统	下二叠统
井喷次数(次)	8	21	47	25	28	52
频率(%)	4	12	26	14	15	29

中又以嘉二¹ 亚段—嘉一段、飞仙关组、茅二段为多,占总数的 42%。

(4) 井深 1000~4000 m 井喷较频繁,占总数的 79%,1000 m 以浅、4000 m 以深则井喷明显减少(表 4)。如果把井喷的深度与年代对应分析发现,在 1978 年以前主要是 2000 m 以浅发生井喷,占 87%,1978 年以后主要是 2000 m 以深发生井喷,占 84%,主要是 1978 年川东发现石炭系产层后,主探目的层石炭系埋藏深度大,深井增多,钻遇高压储层段增多。

表 4 不同井段井喷情况统计表

井深(m)	<1000	1000~2000	2000~3000	3000~4000	4000~5000	>5000
井喷(次)	12	45	53	44	26	1
频率(%)	7	25	29	24	14	1
主要层位	① 雷一段	嘉五—嘉三段	嘉二—嘉一段、飞仙关组	飞仙关组—上二叠统	茅口组	茅口组
	② 嘉三—嘉二段	飞仙关组长兴组	茅口组	茅口组		

把井喷井段结合对应的地质层位分析表明,不同的构造类型因其层位埋深不一样,反映出 2 种情况(表 4):①以卧龙河构造为代表的低缓、潜伏背斜构造,在雷口坡组发生井喷;②以石龙峡、铁厂沟、黄草峡、相国寺构造为代表的高(陡)背斜构造,在嘉三段以下发生井喷。

三、井喷层段孔洞缝发育特征

川东地区主要在碳酸盐岩裂缝性储层段发生井喷,孔隙性储层段井喷相对较少。

1. 主要为碳酸盐岩储层井喷

资料表明,共有 6 层段在沙溪庙组、自流井组、须家河组砂岩中发生井喷(占 3%),其余均为碳酸盐岩层段发生井喷(占 97%),即使草 4 井在梁山组井喷,岩性仍为薄层灰岩。

2. 主要为裂缝性储层发生井喷

据钻井取心及岩屑、钻时录井资料,井喷层段中不仅有大型裂缝系统,也有小型的网状或单裂缝系统,有的显示段次生方解石、白云石、石膏晶粒等发育,如梁 1 井栖霞组井段 3619.00~3632.00 m 井喷,岩屑中方解石、石英含量最高达 30%;双 12 井嘉二² 亚段井段 2884.98~2892.50 m 井喷,方解石含

量30%,钻时明显降低,表明地层中存在裂缝。

3. 小型网状或单裂缝系统井喷几率大

统计102层已试油气的井喷层段,有44层不产气(也不产水)、微气或产气量小于 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,有的在放喷或生产中压降快,一些层段测井资料反映储层特征不明显,储集空间有限,为裂缝系统不发育层段。

4. 少部分井喷层段为较大型裂缝系统,钻进中放空明显

少部分井喷层段为较大型裂缝系统(表5),如卧龙河构造茅二段大型裂缝系统,卧77井茅二段放空1.35 m后井涌、溢流 5.7 m^3 ,井喷;渝浅2井长兴组放空1.1 m后溢流 2.4 m^3 ,井喷。

表5 部分井喷层段放空统计表

井号	巴3	铁3	卧77	相7	渝浅2	铜6	相21
层位	嘉三段	嘉四 ³ 亚段	茅二段	茅二段	长兴组	长兴组	飞仙关组
放空长度(m)	0.4	0.24	1.35	0.38	1.1	0.2	0.6
溢流量(m^3)	/	/	5.7	/	2.4	1.4	/

5. 少数几口井为溶蚀孔隙发育层段井喷

根据不同构造的井喷层段储层发育特征,卧龙河构造嘉五¹亚段、嘉四³亚段,新市构造飞三段,池35井嘉二²亚段,罗家16H井飞三一飞一段等,为孔隙储层段井喷。

四、井喷显示与地层压力特征

资料表明,川东地区由于构造部位、断裂的发育程度、储层性质及发育情况等差异,致使压力系统相对独立,纵向上存在多产层、多压力系统,而且地层压力高低间互,气水关系、压力系统复杂,在不同的地层压力剖面钻井过程中发生井喷的差异较大。

1. 纵向上不同压力带中的井喷

研究成果表明,川东地区纵向上地层压力剖面可分为4个压力带,其井喷特征各不相同。

(1)地表漏失带或近地表正常静水柱压力带:压力系数小于1.05,一般为1.00左右;层位一般为嘉五段以上地层,有的可达嘉三段。在该带,绝大多数构造特别是高陡构造由于受构造应力作用较强,隆起幅度大,地面海拔位置高,浅层裂缝发育,地层破碎,漏失带井深多在2000~2500 m,体现为低压特

征,一般承压能力较差,钻井中以井漏为主;仅在少数潜伏背斜构造存在气藏,钻井中存在气侵、井涌或少量井喷显示。当该带与高压层段暴露于同一裸眼井段时,常是高压流体的井下喷入地层或是井涌、溢流、井喷时关井、压井中井内流体进入的主要层段。

(2)压力异常过渡带:层位从嘉五段—嘉二³亚段,有的可达飞仙关组,压力系数一般为1.00~1.30。该带存在多套碳酸盐岩储产层、石膏盖隔层,由于埋深增加,石膏地层没有受到破坏,油气保存条件变好,由开放的压力系统过渡为封闭的压力系统;地层压力在纵向上变化较大,具有多个独立的压力系统存在,压力系统、气水关系较复杂。该带钻井中,以井漏、气侵为主,井喷频率相对较低(占总数的17%),主要在卧龙河、福成寨、沙罐坪等低潜背斜构造及铁厂沟、石龙峡等高背斜构造的少数高压层段易发生井喷,如卧22井嘉五²亚段清水钻进发生井喷,压力系数为1.89。

(3)异常高压带:层位主要为嘉二²亚段—下二叠统,压力系数一般为1.30以上,其中二叠系一般为1.60~1.90,有的可达2.00以上。该带为高压裂缝系统发育层段,发生井喷的频率高,占79%,尤以嘉二¹亚段—嘉一段、飞仙关组、茅二段所占比例大。主要在低缓、潜伏背斜构造及部分高陡背斜构造发生井喷。如峡12井嘉二²亚段井段962.00~963.90 m清水钻进井喷,压力系数1.71;草4井密度 1.51 g/cm^3 钻井液钻至梁山组井深2709.11 m突然发生井喷,压力系数达2.35。

(4)正常压力带:石炭系,压力系数一般1.20左右,统计井中主要为气侵、井漏,未见井喷显示。

2. 多个压力带或复杂压力系统共存于同一裸眼井段条件下的井喷

由于纵向上具多储产层、多压力系统特征,实际钻井中在同一裸眼井段内可能存在不同的压力带,如地表漏失带与过渡带或过渡带与异常高压带共存,具有多个不同的原始地层压力层段,压力系统复杂,如龙会2、渡1、温泉4井在井喷层段的上部存在低压漏失带或过渡带,井内高压流体进入低压层;有的可能井喷、井漏共存,不易处理平衡,出现压力敏感的复杂情况,如天东5井飞仙关组井喷后压井处理中,井内涌、喷、漏共存。

3. 横向上地层压力变化与井喷

由于储层性质、储层发育程度、构造部位等差异,致使压力系统相对独立性强,地层压力横向上可

比性差,施工中预测的地层压力与实际相差较大,施工中易发生井喷。

(1)同构造邻井(即使同井场)同一层段地层压力相差悬殊。如池 35-1 井茅一段用密度 1.75 g/cm^3 钻井液钻至井深 4170.22 m 井漏无返,堵漏后起钻中溢流、井喷,用密度 1.85 g/cm^3 钻井液压井,密度 1.73 g/cm^3 正常,固井封住茅四段(井深 3977.24 m)以上井段后密度 1.73 g/cm^3 钻井液钻至井深 4171.46 m 放空 3.54 m,井漏无返,密度 1.22 g/cm^3 正常;而同一井眼的池 35 井该层段密度 1.68 g/cm^3 钻井液钻进无显示。

(2)同一构造的不同部位同一层的地层压力相差较大。如五百梯构造中段轴部偏东翼之天东 60 井用密度 1.40 g/cm^3 钻井液钻至长兴组溢流、井喷,密度 1.55 g/cm^3 正常,而邻近之天东 59 井用清水钻过无显示。

(3)同一层位、不同类型的储产层可能具有不同的地层压力。裂缝性储产层一般具有异常高压,而孔隙或洞穴型储产层一般为正常压力,钻遇高压裂缝性储产层易发生井喷,如黄龙 1 井长兴组为生物礁溶孔云岩储层,压力系数 1.12;黄龙 2 井长兴组为裂缝性储层,压力系数 1.45,发生溢流、井喷。

五、认识与建议

(1)川东地区碳酸盐岩储产层发育,非均质性较强,纵向上地层压力系统复杂、横向上变化较大,因而钻井施工中的预计油气显示层段及预测的地层压力,有时与地层实际情况存在一定的或较大的差异。因此,钻井设计中的井身结构设计应具有一定的灵活性,要有备用方案;钻井施工中,应根据实际情况,

在确保安全钻井、完成钻探目的的前提下,调整井身结构,尽量避免在同一裸眼井段内暴露多个压力系统;当钻遇高压油气层发生溢流、井涌或井喷时,处理中井下不窜不漏,有时间和条件控制井喷。

(2)开展应用地震资料预测地层压力的研究,在钻井前预测储层的地层压力,为拟钻井提供较准确的压力剖面,为钻井地质设计提供参考依据;加强对正钻井所在构造部位、断裂发育情况及显示资料的跟踪分析,加强邻区、邻构造、邻井的储产层段的发育情况及压力资料的对比分析,对可能出现的异常高压层段进行分析预告,以加强井控,预防井喷事故的发生。

(3)川东地区绝大多数井喷在发生前征兆明显,要及时发现征兆,预防井喷,在加强井控技术管理,依靠技术人员的技术素质、工作责任心、责任感,认真履行岗位职责的同时,更重要的是要依靠先进的技术提供支撑,对钻井显示参数实时监测,对重点部位进行实时摄像监控,多方位、多手段开展井控工作^[1-3]。

参 考 文 献

- [1] 胡泽,赖欣,顾三春,等.基于 DSP 技术的钻井参数数据采集系统的设计[J].西南石油学院学报,2006,28(4):94-96.
- [2] 张辉,高德利.主成份投影法在油气钻井技术评价中的应用[J].西南石油学院学报,2005,27(3):23-25.
- [3] 郭鸣黎.西部地区巨厚砾石层钻井难点及对策[J].西南石油学院学报,2006,28(6):49-52.

(收稿日期 2007-09-27 编辑 居维清)