

合采井储气分层产能测试及动态监测 天然气烃指纹色谱方法 ——以松辽盆地北部徐家围子断陷徐深1井为例*

张居和 冯子辉 方伟

大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 大庆 163712

摘要 提出并确立了合采井储气分层产能贡献的天然气烃指纹色谱测试理论和测试及模拟计算方法, 并在松辽盆地北部徐家围子断陷的徐深1井进行了试验验证. 将由徐深1井获得的储气分层天然气样品, 利用天然气烃指纹色谱方法检测, 通过选择特征烃指纹参数来表征各储气分层及天然气; 将合采的3个储气分层天然气样品按一定模式混合配比, 得到特征烃指纹与不同贡献率之间的对应关系, 即建立烃指纹模型参数, 用非线性神经网络学习算法训练建立测试模板; 再经过测试模板的回归计算、实验室校验及现场测试结果对比的可靠性验证, 完成了徐深1井合采天然气3个储气分层产能贡献的定量测试. 与分层试气结果对比的绝对误差最大为6%, 验证了合采井天然气储气分层产能测试烃指纹色谱方法的有效性, 为解决制约天然气勘探及开发生产中储气分层产能评价测试及动态监测的技术瓶颈提供了有效途径.

关键词 合采井天然气 色谱烃指纹 储气分层产能 测试模板 数学模拟计算

随着在松辽盆地北部徐家围子断陷徐深1井营城组获得工业气流、无阻挡全井日产量 $1.18 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ 的天然气, 大庆油田深层天然气勘探取得历史性突破. 在徐家围子断陷部署的徐深6、徐深1—1井等多口深探井和评价井, 也均见到较厚的气层及良好效果, 尤其在徐深6井营城组 3561.0—3570.0 m 压裂试气获得 $522676 \text{ m}^3/\text{d}$ 高产工业气流, 深层天然气已“探明储量 $1000 \times 10^8 \text{ m}^3$ ”^[1], 为实现“探明储量 $(2000—5000) \times 10^8 \text{ m}^3$ 、可采储量 $(2000—4000) \times 10^8 \text{ m}^3$ ”的目标奠定了坚实的基础, 对大庆油田创建百年油田及中国能源安全具有战略意义. 由于天然气井的储气分层压力、厚度及储气量、孔隙度、渗透率等非均质性的影响, 在合采时各储气分层产气贡献量不同、产气时间长短会不同^[2,3], 而储气分层天然气的贡献大小, 在勘探上对搞清地区储气

分层分布及特征、产能评价、指导勘探部署等具有重要意义; 在开发上对气井实施分层管理、动态监测, 及时掌握合采天然气储气分层的产能贡献, 确保综合治理措施正确有效, 实现稳产高产具有重要意义.

合采气井储气分层产能测试及监测一般通过分层试气、生产测井等获得^[4-13], 对开发生产深气井来说, 存在井下作业、工艺复杂、操作难度大、安全性要求高、成本高、周期长等缺点. 随着大庆油田天然气勘探开发生产的加快及国内第五大气田的形成, 分层产能测试及动态监测已成为制约天然气开发生产中的技术瓶颈, 亟待开发一项经济、快速、有效的储气分层产能测试及动态监测新方法.

2006-02-13 收稿, 2006-05-08 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 40573030)

E-mail: zhangjuhe@petrochina.com.cn

1 测试理论与方法

1.1 测试理论

同一连通储气分层内天然气在横向上的均质性及稳定性、不同储气分层天然气纵向上的差异性和合采时的完全混合性是合采井储气分层产能贡献测试及动态监测的理论基础。在连通的储气分层中,来自不同烃源岩、不同成藏期次的天然气,由于天然气的易运移性、易混合性和储气分层条件的相似性,通过密度驱动、热对流、分子扩散等混合方式,使天然气组成特征具有一致性或相似性即均质性;在纵向上,由于烃源岩、天然气运移和(或)储气分层环境等存在差异,使各储气分层天然气具有差异性;合采过程中来自各储气分层的天然气沿着储气分层流入井底,在井筒中由井底向井口的流动过程中通过管流、分子扩散等形式发生混合,混合过程是各储气分层天然气烃指纹分子化合物组成变

化的动态过程,发生混合的程度受各储气分层天然气烃指纹分子化合物的物理化学性质、混合时间(储气分层天然气从井底到井口的流动时间)、井下条件(温度、压力)等共同影响,一般接近完全混合或完全混合。

天然气烃指纹色谱检测技术,从分子级水平上对天然气的烃类组成进行检测,能够检测出甲烷到正十二烷中160多种指纹化合物,反映了天然气中烃类化合物组成及含量,各储气分层天然气在烃指纹组成与含量上存在可检测的差异性和可配比性,而表征各储气分层天然气差异性的特征烃指纹参数是一个不随储气分层天然气数量(体积或重量)变化的量。在实验室用储气分层天然气不同模式的混合配比过程来模拟天然气的合采过程,通过建立合适的化学模型参数和数学模型,实现合采天然气储气分层产能贡献的数学模拟计算。

多个储气分层贡献理论数学计算模型(图1):

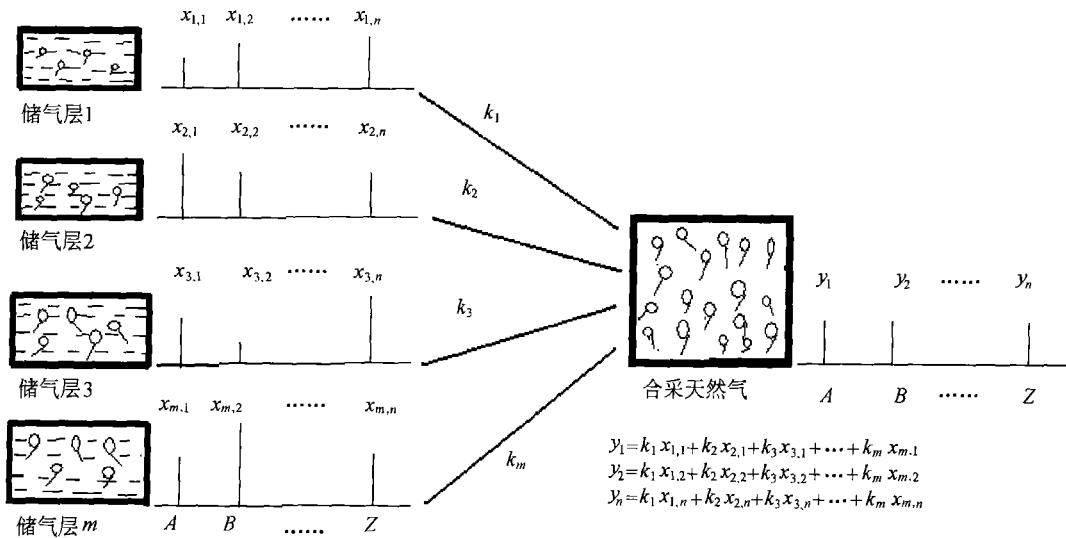


图1 储气分层产气贡献计算理论模型

每个储气分层天然气和合采天然气特征烃指纹参数值与其贡献率之间在理论上有下列关系:

$$y_1 = k_1 x_{1,1} + k_2 x_{2,1} + k_3 x_{3,1} + \dots + k_m x_{m,1}$$

$$y_2 = k_1 x_{1,2} + k_2 x_{2,2} + k_3 x_{3,2} + \dots + k_m x_{m,2}$$

.....

$$y_n = k_1 x_{1,n} + k_2 x_{2,n} + k_3 x_{3,n} + \dots + k_m x_{m,n}$$

式中: $x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,n}$ 分别为储气层1中的天然气特征指纹参数值; $x_{2,1}, x_{2,2}, \dots, x_{2,n}$ 分别为储气层2中的天然气特征指纹参数值; $x_{3,1}, x_{3,2}, \dots, x_{3,n}$ 分别为储气层3中的天然气特征指纹参数值; $x_{m,1}, x_{m,2}, \dots, x_{m,n}$ 分别为储气层m中的天然气特征指纹参数值; A, B, ..., Z 分别为合采天然气中相对应的特征指纹化合物; k_1, k_2, \dots, k_m

分别为该储气分层对合采天然气的贡献率； y_1, y_2, \dots, y_n 分别为合采天然气中 A, B...Z 特征指纹化合物参数值。

1.2 测试方法

1.2.1 天然气烃指纹色谱检测方法和各储层天然气的差异性表征

(1) 天然气烃指纹色谱检测方法

将一定量天然气注入富集管(富集温度-75~-65℃)中,使天然气中烃类在低温下得到富集,再加热解吸,通过六通阀切入气相色谱仪进行检测。天然气烃指纹气相色谱检测仪器及实验条件:程序升温气相色谱仪及数据处理机,50m弹性石英毛细色谱柱,氢火焰离子化检测器,载气为氦气,燃气为氢气,助燃气为空气,柱起始温度35℃,恒温5min,以2℃/min升到180℃,恒温至组分全部流出;采用标样、保留时间及文献定性。

(2) 储气分层天然气的差异性表征

储气分层天然气的差异性是指储气分层产能烃指纹色谱测试及动态监测的先决条件之一,一般采用天然气特征烃指纹参数的相对偏差来表征。由于天然气样品在采集检测过程中难免混入空气,且不同样品混入空气的量难以保持一致,故特征烃指纹参数采用2个相邻或相近烃指纹峰峰面积(或峰高)的比值来表示,特征烃指纹参数选择依据普遍性、稳定性、差异性、可配比性、分离效果好的原则,先选择烃指纹在各储气分层普遍存在、重复检测相

对偏差小于5%、分离效果好的指纹峰;再从中选择出各储气分层之间相对应指纹峰参数的相对偏差大于10%的指纹参数;最后从中选择相关性较好的指纹峰作为特征烃指纹参数,用来表征各储气分层及天然气。

1.2.2 储气分层天然气配比模式方法和化学模型参数

(1) 天然气配比模式及方法

对于不同产气层数的合采气井要采用不同的配比模式方法,即2层、3层、4层、5层等合采气井的配比模式方法不同。每种配比模式中的每组配比采用“比例配伍”原则,如产气层数为3层的某一组配比为10/10/80,10/80/10,80/10/10,而产气层数为4层的则为10/10/10/70,10/10/70/10,10/70/10/10,70/10/10/10。

(2) 化学模型参数

将混合配比得到的混合气中不同特征烃指纹参数值与其各个储气分层混合比例之间建立相对应关系即为化学模型参数。

1.2.3 模拟计算方法和测试模板的建立 采用非线性人工智能神经网络学习算法及数学模拟计算方法^[14]主要有两个原因(图2),一是采用的特征烃指纹比值参数不严格成线性迭加关系^[15];二是储气分层天然气与合采天然气的烃指纹参数之间是复杂的曲线性关系。

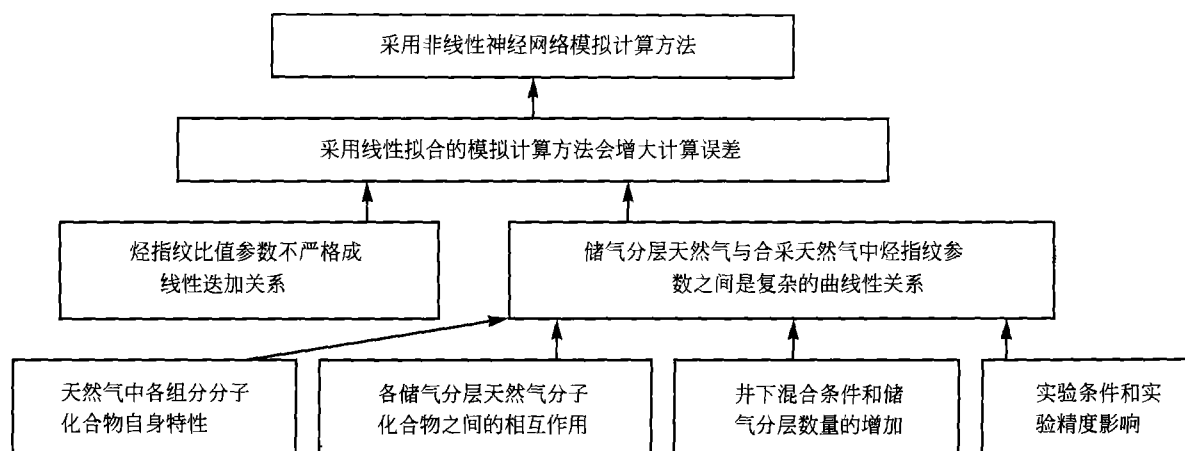


图2 非线性模拟计算方法原因关系

建立测试模板就是利用非线性人工智能神经网络学习算法(图3),寻找并确定在实验室配比条件下各储气分层天然气与配比混合气之间的规律,输入由实验所获得的化学模型参数即色谱分析的特征烃指纹参数 $X_K(K=1, 2, \dots, N)$, 经过一系列的 Sigmoid 函数及矩阵运算、加权、平均,输出到第二个隐层 $H_{2,K}(K=1, 2, \dots, Q)$, 经过同样原理的一系列运算,输出到第一个隐层 $H_{1,K}(K=1, 2, \dots, P)$, 再经过同样原理的一系列运算,输出到输出层 $Y_K(K=1, 2, \dots, M)$, 输出层即是合采天然气的分层产能贡献百分率与实际配比的各层百分率对比,把误差按原来路径逐层反馈回去,在反馈的过程中,按误差的大小,依次调整各个节点的权向量矩阵 W , 按照调整之后的权向量矩阵再次重复上面的步骤,如此循环往复,直到输出与实际配比之间的误差满足要求精度为止,这时,存储各层各个单元的权值矩阵及相关参数就建立了合采井天然气储气分层产能贡献的测试模板;再经过测试模板的回归计算和实验室自行配比混合气样品的效验;最后将合采气相应的特征烃指纹值输入测试模板,计算得到合采井储气分层产能贡献结果. 需要指出,测试模板建立后还必须经过现场测试结果的可靠性验证.

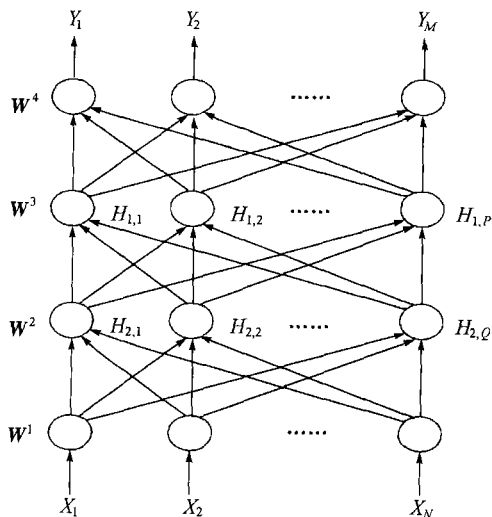


图3 多层神经网络学习算法示意图

2 徐深1井储气层分布和开采状况及实验样品

2.1 徐深1井储气层分布

徐深1井位于松辽盆地北部徐家围子断陷升平—

兴城构造的中段,是受升西逆冲断裂控制的背斜构造,是徐家围子断陷的一口深探井(完钻井深4500 m),钻遇的深部地层有登娄库组(k_1d)、营城组(k_1yc)、沙河子组(k_1sh)、火石岭组(Jhs),以不同级别的不整合面及相对的整合面为界,总体上构成4套碎屑岩夹3套火山岩的地层构架. 营城组及以下深部地层普遍含气,为煤成气和油型裂解气组成的有机成因混合天然气,处于高-过成熟气演化阶段. 天然气分布分为营城-登娄库组(正常压力系统)和火石岭组(超压含气系统)两个含气系统,储气层主要分布在营城组的火山岩和火石岭组的砾岩储气层,营城组火成岩孔洞、裂缝发育,火山岩岩性有流纹质集块岩、熔结角砾岩、凝灰岩和晶屑凝灰岩等;火石岭组储气分层岩石主要为安山质火山角砾岩和集块岩.

2.2 徐深1井开采状况及实验样品

徐深1井共射开及分层试气4层,采集分层天然气实验样品4块,分别是营城组的3364.0—3379.0 m(145号层),3460.0—3470.0 m(149号层),3592.0—3624.0 m(150号层)和火石岭组的4446.0—4466.0 m(234和235号层)储气层,射开厚度分别为11,10,12,20 m. 根据储气分层压力状况确定合采产气层为145号层、149号层、150号层(由于234和235号层为超压气层被封堵),控制产气量 $2 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$,采集井口合采天然气实验样品2块(2005年3月20日和2005年11月12日).

3 测试结果及讨论

3.1 重复性

同一天然气样品烃指参数纹多次分析结果的相对偏差一般小于5%,样品烃指纹检测重复性好. 如徐深1井3592.0—3624.0 m储气分层天然气烃指纹色谱检测重复测定,其特征烃指纹参数重复测定结果(表1)的最大相对偏差为4.72%,最小相对偏差为0.09%,相对偏差不大于5%.

同一合采天然气样品分层产能贡献重复测试结果的绝对偏差一般小于2%,烃指纹色谱分层产能贡献测试结果重复性好. 如徐深1井2005年03月20日样品重复测定的145号层、149号层、150号层贡献分别为13.70%、22.65%、63.64%和14.40%、23.11%、62.48%,绝对误差最大为1.16%.

表1 天然气指纹烃参数重复测定结果^{a)}

次数	色谱特征烃指纹参数										
	2#/3#	4#/5#	5#/6#	6#/7#	10#/8#	10#/9#	10#/11#	13#/15#	14#/15#	17#/15#	24#/23#
1	3.93	2.21	0.84	1.00	0.23	0.20	0.38	3.58	0.27	0.58	10.07
2	3.58	2.07	0.81	1.00	0.24	0.19	0.37	3.60	0.29	0.56	10.75
偏差/%	4.72	3.26	1.72	0.09	1.58	0.92	2.23	0.21	3.79	1.40	3.27

a) 2#—异戊烷,3#—正戊烷,4#—2,2-二甲基丁烷,5#—环戊烷,6#—2-甲基戊烷,7#—3-甲基戊烷,8#—正己烷,9#—2,2-二甲基戊烷,10#—甲基环戊烷,11#—2,4-二甲基戊烷,13#—环己烷,14#—2-甲基己烷,15#—2,3-二甲基戊烷,17#—2-甲基己烷,23#—正庚烷,24#—甲基环己烷

3.2 储气分层天然气特征烃指纹参数及表征

徐深1井天然气烃指纹色谱检测最多可检测出160个指纹峰(图4),从4个储气分层天然气特征烃指纹参数检测结果(表2、图5)看,选择的11对天然气特征烃指纹参数差异明显,说明各储气分层中的天然气存在差异,可以用这些特征烃指纹参数来表征4个储气分层及天然气.

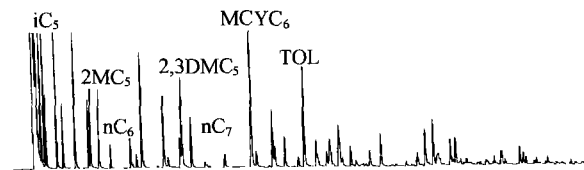


图4 徐深1井天然气指纹气相色谱图

表2 储气分层天然气色谱特征烃指纹参数

井深/m	2#/3#	4#/5#	5#/6#	6#/7#	10#/8#	10#/9#	10#/11#	13#/15#	14#/15#	17#/15#	24#/23#
3364.0—3379.0	1.85	2.63	0.66	0.46	0.70	0.39	0.19	1.14	0.95	1.22	0.72
3460.0—3470.0	3.76	2.14	0.83	1.00	0.24	0.19	0.37	3.59	0.28	0.57	10.41
3592.0—3624.0	2.86	1.52	0.89	1.11	1.30	1.59	2.92	0.43	0.41	0.73	14.86
4446.0—4466.0	0.37	1.19	0.07	1.72	0.13	12.39	2.52	0.14	2.30	2.73	0.61

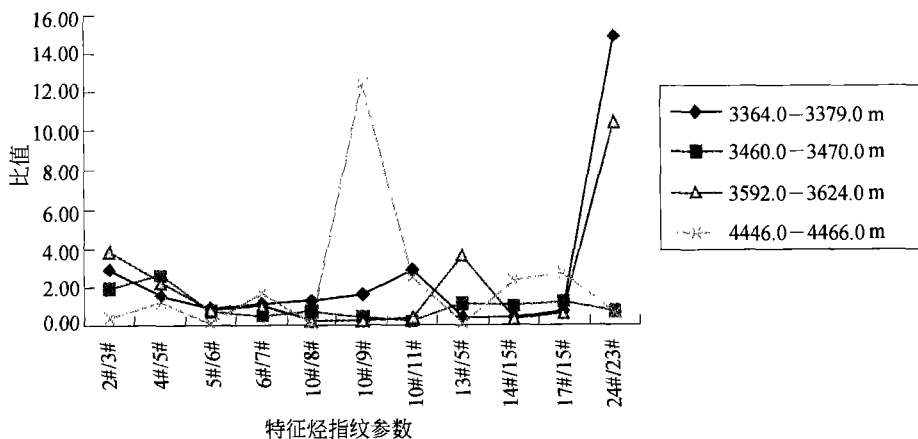


图5 储气分层天然气差异性图

3.3 储气分层天然气特征烃指纹参数的稳定性

储气分层天然气特征烃指纹参数的相对稳定性是合采天然气储气分层产能贡献动态监测的关键之一,若在动态监测期间特征烃指纹参数不能保持相对稳定,就不能保证监测结果的准确性.从2002年1月17日和2002年12月2日徐深1井采集的

3592.0—3624.0 m 储气分层天然气样品检测结果(表3)看,不同时间采集的2块天然气样品特征烃指纹参数最大相对偏差为5.13%,基本满足同一样品重复测定相对偏差不大于5%的要求,表明储气分层天然气特征烃指纹参数具有时间上的相对稳定性.

表3 天然气特征烃指纹参数的稳定性

采样日期	2#/3#	4#/5#	5#/6#	6#/7#	10#/8#	10#/9#	10#/11#	13#/15#	14#/15#	17#/15#	24#/23
2002-01-17	3.88	2.34	0.88	1.10	0.26	0.21	0.41	3.73	0.30	0.63	11.46
2002-12-02	3.76	2.14	0.83	1.00	0.24	0.19	0.37	3.59	0.28	0.57	10.41
相对偏差/%	1.57	4.46	2.92	4.76	4.00	5.00	5.13	1.91	3.45	5.00	4.80

3.4 储气分层天然气产能贡献测试结果及可靠性

从3个储气分层贡献测试模板回归计算结果(表4)看,回归计算结果最大绝对偏差为6.49%、最大相对偏差为9.95%;从储气分层贡献测试模板自行效验结果(表5)看,最大绝对偏差为3.03%、最大相对偏差为8.05%,表明测试模板能够准确计算在实验室条件下混合气中各储气分层的贡献率。

表4 测试模板回归计算结果

序号	储气分层号	配比模式/%	模板回归结果/%	绝对偏差/%	相对偏差/%
1	145	10.00	11.36	1.36	6.37
	149	10.00	9.09	0.91	4.77
	150	80.00	79.54	0.46	0.29
2	145	10.00	11.87	1.87	8.55
	149	80.00	79.93	0.07	0.04
	150	10.00	8.19	1.81	9.95
3	145	80.00	78.91	1.09	0.69
	149	10.00	11.73	1.73	7.96
	150	10.00	9.34	0.66	3.41
4	145	20.00	21.01	1.01	2.46
	149	20.00	18.76	1.24	3.20
	150	60.00	60.21	0.21	0.17
5	145	20.00	16.97	3.03	8.20
	149	60.00	64.53	4.53	3.64
	150	20.00	18.48	1.52	3.95
6	145	60.00	58.46	1.54	1.30
	149	20.00	18.04	1.96	5.15
	150	20.00	23.48	3.48	8.00
7	145	30.00	31.98	1.98	3.19
	149	30.00	29.77	0.23	0.38
	150	40.00	38.33	1.67	2.13
8	145	30.00	29.63	0.37	0.62
	149	40.00	39.88	0.12	0.15
	150	30.00	30.47	0.47	0.78
9	145	40.00	41.95	1.95	2.38
	149	30.00	28.49	1.51	2.58
	150	30.00	30.04	0.04	0.07

续表

序号	储气分层号	配比模式/%	模板回归结果/%	绝对偏差/%	相对偏差/%
10	145	40.00	38.38	1.62	2.07
	149	40.00	38.01	1.99	2.55
	150	20.00	23.60	3.60	8.26
11	145	40.00	44.75	4.75	5.60
	149	20.00	21.73	1.73	4.15
	150	40.00	33.51	6.49	8.83
12	145	20.00	19.64	0.36	0.91
	149	40.00	39.18	0.82	1.04
	150	40.00	41.16	1.16	1.43

表5 测试模板效验结果

序号	储气分层号	实际配比/%	模板效验结果/%	绝对偏差/%	相对偏差/%
1	145	70.00	71.92	1.92	1.35
	149	20.00	17.56	2.44	6.50
	150	10.00	8.51	1.49	8.05
2	145	20.00	23.03	3.03	7.04
	149	30.00	27.74	2.26	3.91
	150	50.00	49.22	0.78	0.79

将不同时间采集的徐深1井井口合采天然气特征烃指纹检测结果(表6)导入测试模板中,得到测试及监测结果(表7),从中看出,该井投产4个月(2005年3月20日采样),烃指纹色谱测试结果145号层,149号层,150号层分别贡献为13.70%、22.65%、63.64%,与其分层试气结果的8%、25%、67%对比的最大绝对误差为6%,最小绝对误差为2%,两种测试方法具有较好的一致性。该井投产11个月(2005年11月12日采样),烃指纹色谱分层测试结果145号层、149号层、150号层分别贡献为15.30%、25.31%、59.38%,150号主力产气层贡献下降4.26%,而145和149号层贡献分别上升1.60%、2.66%,这些变化值接近小于2%的色谱分层产能重复测试误差范围,投产近1年各储气分层产能贡献基本稳定。

表6 合采天然气色谱特征烃指纹参数

采样日期	2# / 3	4# / 5	5# / 6	6# / 7	10# / 8	10# / 9	10# / 11	13# / 15	14# / 15	17# / 15	24# / 23
2005-03-20	2.73	2.75	1.02	1.16	0.17	0.17	0.39	0.22	0.26	0.48	12.26
2005-11-12	3.48	2.72	0.99	1.14	0.15	0.17	0.40	0.21	0.28	0.50	11.52

表7 合采天然气储气分层贡献监测结果及对比

日期	储气分层贡献 / %			备注
	145号层	149号层	150号层	
2005-03-20	13.70	22.65	63.64	累计开采4个月
2005-11-12	15.30	25.31	59.38	累计开采11个月
2002-01-17—2003-05-17	8.00	25.00	67.00	分层试气

4 结论

(1) 首先确立了合采井储气分层产能天然气烃指纹色谱测试理论与模拟计算方法, 实验验证了储气分层天然气在开采时间上的相对稳定性, 实现了3个储气分层对合采天然气产能贡献的定量测试, 适用于2—6层合采井分层产能测试及动态监测。

(2) 徐深1井合采天然气储气分层贡献烃指纹色谱测试结果表明, 145号层(3364.0—3379.0 m), 149号层(3460.0—3470.0 m), 150号层(3592.0—3624.0 m)分别贡献为13.70%, 22.65%, 63.64%, 150号层为产气层, 与分层试气结果的绝对误差最大为6%, 两种测试方法具有较好的一致性, 色谱测试结果准确可靠。色谱动态监测结果表明, 徐深1井投产近1年各储气分层产能贡献基本稳定, 150号主力产气层贡献略有下降, 149和150号层略有上升。对于认识徐家围子断陷深层不同储层的含气性、指导该地区天然气勘探和及时掌握储气分层产气状况、指导储层改造增加产能、合理配产等开发都有重要意义。

(3) 将勘探试气阶段获得的储层天然气应用于生产气井储气分层产能测试及动态监测、实施分层管理, 做到了天然气勘探开发“一体化”, 节省了开发生产井烃指纹色谱测试分层取样费, 测试成本与生产测井相比每口井每次节约92%, 具有快速、准确、经济、有效、不影响生产、安全性高的特点, 可根据需要随时从井口采集气样实现动态监测, 具有显著的技术、经济和社会效益。随着大庆

油田深层及中浅层天然气勘探开发生产的加快和气井数量的激增, 将对天然气勘探开发和创建百年油田发挥重要作用, 同时对国内外其他气田勘探开发有借鉴作用, 应用前景广阔。

参 考 文 献

- 任延广, 朱德丰, 万传彪, 等. 松辽盆地徐家围子断陷天然气聚集规律与下部勘探方向. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(5): 26—29
- Shan P C, Spath J B. Transient Wellbore Pressure and Flow Rates in a Commingled System with Different Layer Pressures. SPE25423. 1993
- 苟三叔. 非均质性对气井产能试井的影响因素研究. 天然气工业, 2005, 25(3): 109—102
- 肖慈珣, 肖崇礼, 栗英姿, 等. 天然气储层产能的测井评价与预测. 石油与天然气地质, 1999, 20(4): 279—289
- 汪立君. 利用生产测井资料进行天然气储层产能的评价与预测. 地质科技情报, 2004, 23(3): 57—60
- 熊燕利, 冯 曦, 杨雅和, 等. 多层合采气井动态特征及开发效果分析. 天然气勘探开发, 2005, 28(1): 21—24
- 郑希科, 谢荣华, 谭延栋. 利用生产测井资料反求油井动态参数. 石油学报, 1999, 20(5): 62—65
- 段建婷, 常树发, 刘雄民, 等. 地层测试技术在分层试气中的应用及效果分析. 油气井测试, 2005, 14(3): 59—61
- 任光明, 叶晓斌. 浅层气藏产能测试与评价方法探讨. 天然气工业, 1997, 17(3): 56—59
- 李相方, 隋秀香, 谢井峰, 等. 论天然气藏测试生产压差确定原则. 石油钻探技术, 2002, 30(5): 1—3
- 白学东, 张麦云, 刘克云, 等. ISO瞬时开关阀在煤层气井测试中的应用. 油气井测试, 1999, 8(4): 36—39
- 唐 刚. 动态追踪对比分析试井解释技术. 天然气勘探开发, 2005, 28(1): 25—27
- 陈元千. 实用油气藏工程方法. 东营: 石油大学出版社, 1998, 21—65
- 张居和, 方 伟, 冯子辉, 等. 多层混采原油分层产能贡献监测色谱技术. 石油学报, 2004, 25(4): 75—79
- 邹宇峰, 蔡元明, 马 亭, 等. 如何消除应用于合采井原油产量贡献计算产量贡献计算的气相色谱指纹技术存在的缺陷. 石油实验地质, 2001, 23(2): 213—220