

碳酸盐岩气藏储层非均质性对水侵差异化的影响

赵 真 (中原油田分公司勘探开发研究院, 河南 濮阳 457001)

摘要: 强化对不同类型气藏水侵机理的研究和典型气藏案例类比分析是解决上述问题的有效途径, 尽管这方面也有较多研究成果, 主要包括水封气及水侵后残余气分析、束缚水与可动水评价、微观渗流过程可视化研究、气藏水侵仿真实验模拟、典型气藏水侵特征剖析等, 但由于问题的复杂性, 相关方法有必要进一步拓展, 一些认识尚需进一步深化, 尤其在非均质性较强的碳酸盐岩气藏开发方面更显著。

关键词: 碳酸盐岩气藏; 三重介质; 搭配关系; 非均质; 渗流; 水侵特征; 差异性

0 引言

碳酸盐岩气藏因储层孔隙、溶洞、裂缝的尺度和分布密度不同易产生多样化的非均质性, 使得气藏水侵规律的差异性较大。为了深入认识碳酸盐岩储层非均质性及其对气藏水侵的影响, 进而对气藏水侵动态进行预判, 基于全直径岩心数字化处理分析改进了定量描述孔、洞、缝搭配关系的方法, 根据逾渗理论分析图版建立了评价微裂缝对储层渗流能力贡献的新方法, 并通过开展气藏实际压力、温度条件下气水渗流及流固耦合应力敏感实验, 获得气水相对渗透率和岩石压缩系数数据, 据此分析不同类型裂缝、溶洞对气藏水侵的影响, 结合四川盆地典型碳酸盐岩气藏水侵特征建立了不同储渗类型储层水侵影响差异化特征的预判方法。研究结果表明: ①不同类型碳酸盐岩储层在广义上均属三重介质, 裂缝发育使气藏水侵影响显现快, 而溶洞均匀发育使水侵影响显现相对较慢; ②微裂缝发育是特低孔隙度储层具备视均质中高渗透能力的必要条件, 对应的水侵规律与沿大裂缝水窜或网状小裂缝发育带水侵明显不同; ③水区储层孔隙度应力敏感是地层水侵能量的主要来源, 异常高压气藏在开采初期这一特征更加突出。该研究成果已应用于四川盆地多个碳酸盐岩气藏的水体能量评估、水侵影响预测及治水措施有效性预判, 为复杂气藏水侵影响的治理提供了有效的技术导向, 同时也深化了对水侵差异化规律的认识。

1 简述

四川盆地内的碳酸盐岩气藏在开发过程中产地层水的比例较高。近 60 年来, 得益于持续开展气藏开发治理水侵影响的研究探索, 形成了较为完整的技术体系。然而, 近年却出现了以下新情况: ①深层海相碳酸盐岩气藏勘探开发获得突破, 大型裂缝—孔洞型气藏数量增加, 过去基于中小型裂缝型、裂缝—孔隙型气藏积累的治水技术和经验不适用的情况时有发生; ②勘探开发一体化工作模式普及, 开发前期评价和产能建设节奏加快, 早期预判水侵影响而制订针对性对策、降低潜在风险的需求增强; ③环境保护和气藏开发效益要求进一步提高, 一些仅考虑气藏技术采收率的强排水开发方式应用受限。本文主要介绍机理性研究方面的代表性成果。

掌握水侵规律、针对性制订优化开发的对策是改善

有水气藏开发效果的关键^[1]。气藏水侵活跃性及其对开发的影响程度与水体储量、气水接触关系、水侵通道分布、水区和气藏内部储层物性及非均质性、气藏原始地层压力等地质因素相关, 同时还与生产井位置及打开层段、井网部署、单井配产、气藏采气速度等开发因素相关。气藏描述和动态监测分析是准确认识上述关系、支撑气藏开发治水决策的主要技术手段。

经过长期的理论研究与实践探索, 形成了有水气藏开发治理水侵影响的系列技术, 在地质和气藏工程方面主要包括气水关系描述、水侵动态分析预测、治水对策优化等特色技术, 已经广泛应用并取得较好效果。然而, 仍有一些复杂问题长期困扰从事气藏开发治水研究的工作者, 主要表现在两个方面: ①不同类型气藏多样化的非均质性难以用统一的描述理论或模型来表征, 一些实际情况超出了传统分析方法的适用范围, 直接影响气藏水侵分析预测结果的可靠性; ②制订气藏开发治水对策时, 常常不具备或不完全具备精细气藏描述、专项动态分析所需的基础资料条件, 在开发早期预判水侵的影响极其困难。

2 碳酸盐岩储层三重介质特征定量描述

2.1 储层分类定性方法的优点和局限性

参照国家标准气藏储渗空间类型分为孔隙型、裂缝—孔隙型、裂缝—孔洞型、孔隙—裂缝型和裂缝型 5 种类型。这种分类方法把握了不同类型储层的本质特征, 被广泛应用, 对气藏开发研究工作帮助很大。定性分析方法的不足是储渗类型划分界限较为模糊, 同属一种类型则不再加以区分。因此难以更细致地甄别储层的特征差异。以近 10 年我国天然气开发热点领域之一——深层碳酸盐岩气藏为例, 储层储渗空间类型普遍属裂缝—孔洞型, 但不同气藏储渗特征差异较大, 无论是岩心静态特征还是试井曲线动态反映均可见显著差异。因此, 定性的分类评价方法已不能满足需求, 有必要深入研究可区分储渗特征差异的定量评价方法。

2.2 孔、洞、缝储集空间对总孔隙度的贡献定量描述

碳酸盐岩储层大都不同程度发育孔、洞和裂缝, 虽然因孔、洞、缝尺度和搭配关系不同产生千差万别的储渗特征, 但整体上仍可归类于广义的三重介质储层。一些情况下某类储集空间欠发育, 表现为双重介质甚至单

一介质特征,然而三重介质的统一描述方法仍然适用,只是相关特征参数不同。弹性储容比和窜流系数是描述多重介质储层储渗特征的重要参数,过去多用于试井分析研究。受多种因素影响,在很多情况下计算弹性储容比和窜流系数所需的特征数据在试井曲线上反映不充分,导致上述参数较难准确求取。因此依靠试井解释评价多重介质储渗特征差异的方法推广应用受到一定程度的限制。碳酸盐岩储层储渗特征不仅仅与总孔隙度中孔、洞、缝储集空间的占比相关,还与孔隙连通率及喉道大小、洞和裂缝的尺度及分布密度等因素相关,需要多方面影响因素分析相结合才能得到完整认识。

2.3 微小裂缝分布的统计规律定量描述

碳酸盐岩储层常见不同尺度的裂缝。分形理论是整体描述多尺度裂缝分布统计规律的一种有效方法。该方法需要统计不同尺度范围内的裂缝数量,受深层岩石取样尺寸较小的制约,更适合于描述长度为分米至微米级别的裂缝分布密度的统计特征。已有研究成果显示,储层中裂缝尺度越小其分布密度越大的情况较为常见,在分形描述双对数图上,表现为延伸长度大于观测盒子范围的裂缝数量与观测盒子大小负相关,大体包括全观测范围裂缝分形维数稳定和局部范围裂缝分形维数稳定的情况。当然,也有分形维数不稳定、裂缝分布规律随机性强的情况。

3 储层非均质性对气藏水侵动态的影响

3.1 沿宏观大裂缝水侵规律

在气藏开发实践中,人们早已发现边水或底水沿断层突进至生产井的活跃水侵现象,极端情况下延伸数十米甚至更远的大裂缝中地层水的流动类似于管道流,易导致气井投产后快速地大量产水甚至水淹停产。这种大裂缝水窜机理描述被广泛应用,并形成相应分析方法和针对性的治水对策。

3.2 沿小裂缝网络形成的裂缝发育带水侵规律

总的来看,网状小尺度裂缝发育带连通生产井和水区的情况比单一大裂缝水侵通道更普遍,气藏开发研究应充分关注这类水侵规律。考虑裂缝—孔隙型气藏边水沿裂缝发育带侵入,在网状小裂缝符合渗流力学连续介质场假设的条件下,建立并求解相关渗流模型,计算分析不同条件下地层压力、水侵量变化规律,获得定量化认识。当水侵通道储层基质物性差、窜流系数(λ)低至10⁻⁸或更小时,在一定时间段孔隙系统与裂缝系统之间压差较为显著:窜流系数越小,孔隙和裂缝介质之间的压差越大,并且较大压差的持续时间越长,相应容易导致地层水沿压力较低的网状小裂缝向生产井窜进的发生。

3.3 微裂缝对水侵规律的影响

深层碳酸盐岩气藏常见储层微裂缝发育的情况,超压气藏这一特征更显著,推测应与异常高压的成因,以及地应力和超压流体的长期耦合作用相关。微裂缝改善

储层局部渗透率,但不会直接改变储层宏观非均质性,这种情况下气藏的水侵规律与大裂缝水窜或网状小裂缝发育带水侵明显不同。微裂缝对水侵规律的影响情况视微裂缝分布、孔洞储集空间特征不同而有所差异。在受水侵影响之前,对于微裂缝发育而大尺度缝洞不发育的气藏而言,其开采动态往往与孔隙型气藏的特征类似;水侵影响显著后,微裂缝发育的储层水相相对渗透率升高的变化特征比孔隙型储层更显著。在缺乏钻井取心的情况下,针对试井曲线呈现视均质特征的低孔隙度储层,通过对比测井解释孔隙度和试井分析渗透率的关系,利用上述研究认识可以大致评估微裂缝对储层渗流能力的贡献,以及水侵后的影响程度。结合气水相对渗透率实验分析、试井计算、数值模拟,能够进一步预测水侵后气相渗透率下降对气井产量和压力的影响^[1]。

4 气藏水侵差异化特征早期预判

4.1 不同开发阶段地层水体能量释放强度差异

经过长期研究,已确认水区储集空间应力敏感是深层边、底水气藏强水侵能量的主要来源。近年高温高压流固耦合岩心实验分析技术取得进步,模拟地层水富集区上覆压力和流体高压条件,测定含水岩石有效压缩系数的准确性大幅度提高。实验结果预示在边、底水气藏开发初期水区的单位压降水侵强度最高,可能数倍于中后期水平,对于缝洞发育的储层以及开发过程中有效应力变化较大的超压气藏该特征更突出。结合实际气藏具体情况,可在开发早期预判地层水体能量释放高峰与水侵影响的对应关系,增强治水对策的针对性。

4.2 不同类型储层水侵影响程度差异

在水体储量、气水接触关系、水侵通道特征、气藏开采方式等影响因素相同的情况下,仅比较储渗空间类型对水侵动态的影响,发现以下规律:不同类型储层产生非均匀水侵的可能性由大到小及水侵影响速度由快到慢的排序均为裂缝型储层、裂缝—孔隙型储层、裂缝—孔洞型储层和孔隙型储层,而水淹后排水消耗水侵能量及逆转水侵影响的难度由易到难的排序也呈同样的规律。对不同类型储层水侵影响差异化特征的机理分析结果,可作为预判水侵影响程度的类比性参照。

4.3 实际情况与理想化状态的差异

根据已有认识划分气藏水侵类型,通过类比,归类分析不同气藏水侵特征的差异,是一种常见的研究模式。然而,仅仅依据对实际气藏地质特征和生产数据的统计分析,往往不足以形成对本质特征的精细认识;对比气藏开发实际情况与理论研究理想化状态之间的差距,有利于获得更准确的量化判断。

参考文献:

- [1] 冯曦,彭先,李隆新,杨学锋,王娟,李骞,张春,邓惠.碳酸盐岩气藏储层非均质性对水侵差异化的影响[J].天然气工业,2018,38(06):67-75.