

# 沉积盆地异常低压的成因

张立宽, 王震亮, 于在平

(西北大学 地质学系, 陕西 西安 710069)

**摘要:** 将异常低压的形成机制归纳为 4 大类: 1) 构造抬升和地层剥蚀、孔隙水化学作用引起的孔隙体积增大; 2) 封闭层压力的释放、物性差异引起的非均匀流、渗析作用和轻烃扩散作用等流体排出造成的压力降低; 3) 饱和天然气藏的深埋; 4) 承压面低于地表。分析了每一类成因机制对形成异常低压的贡献大小。其中, 构造抬升引起一定程度的孔隙回弹和温度降低, 从而导致地层压力下降, 是构造抬升强烈的沉积盆地中形成异常低压的主要原因。而在抬升幅度较小的地区, 低压的形成则常与轻烃扩散和饱和天然气藏的深埋有关。孔隙水的化学作用和渗析作用受自身因素的制约, 对异常低压贡献不大。除物性差异引起的非均匀流外, 其它的低压形成机制都需要以好的封闭条件为前提, 否则地层压力将衰减至常压。在中国西部盆地, 因地形起伏较大, 承压面低于地表, 使得地层压力偏低, 但并非真正意义上的低压, 只是由于表达方式(起算深度是否等于地表)的原因而造成。

**关键词:** 成因; 异常低压; 封闭; 沉积盆地

**中图分类号:** TE121. 3

**文献标识码:** A

地层压力是指作用于孔隙流体的压力。在正常情况下, 地层中的流体处于连通状态, 此时地层压力等于静水压力。凡是低于静水压力的地层压力都为异常低压。

前人对异常高压的形成原因研究较多<sup>[1,2]</sup>, 而对异常低压形成机理的研究仍处于探索阶段。迄今为止国内外已有不少关于低压气藏的报道, 如美国的 Keys 油田<sup>[3]</sup>、加拿大艾尔伯塔盆地埃姆斯区下白垩统气藏和美国俄亥俄州东部志留系克林顿组砂岩中的天然气藏, 以及美国的 Hugoton 大油田均属负压系统<sup>[4]</sup>。在国内也有关于负压气藏的报道, 松辽盆地北部扶余油层和东南缘的十屋断陷<sup>[5]</sup>、吐哈盆地红台 2 构造和红南及红西构造带<sup>[3]</sup>、鄂尔多斯下古生界气藏<sup>[4]</sup>、百色盆地东部凹陷<sup>[6]</sup>、东营凹陷边缘凸起带、盆倾断裂带及中央隆起带<sup>[7]</sup> 都发育不同程度的异常低压。

目前世界范围内大中型气田统计结果, 属于异常高压或超高压的盆地接近 55. 5%, 属于异常低压或超低压的盆地接近 15. 7%<sup>[8]</sup>。尽管从数量上看并不占优势, 但作为一种重要类型, 其形成、发展、演化在一定程度上控制了盆地内流体的流动样式, 并与油气成藏过程之间的关系异常复杂, 因此搞清它们的形成原因对于确定油气运移和成藏规律具有十

分重要的意义。下面着重从孔隙体积增加、流体排出、饱和天然气藏的深埋与承压面低于地表 4 个方面加以分析。

## 1 孔隙体积增加

目前, 一般认为引起孔隙体积增加的原因有:

### 1.1 构造抬升与地层剥蚀

构造抬升作用究竟形成高压还是低压历来是争论比较多的问题。构造抬升作用可形成高压的认识通常忽略了抬升过程中孔隙体积和温度的变化, 即假设孔隙体积和温度不发生变化, 而事实上, 这两种因素的变化是不容忽略的。抬升过程中地层被剥蚀导致负荷降低, 孔隙体积发生反弹, 孔隙中流体因温度的下降而收缩, 使得孔隙体积增大, 正是造成异常低压的根本原因。构造抬升倾向于形成低压而不是异常高压<sup>[9-12]</sup>。

随着构造抬升, 目的层因上覆地层遭受剥蚀, 负载降低, 导致其孔隙和地层流体卸载膨胀, 孔隙膨胀时必然会使地层压力降低; 当然孔隙中流体也发生了膨胀, 在一定程度上增加了地层压力, 那么地层压力究竟增大还是减少将取决于二者的相对大小。Russell(1972)<sup>[13]</sup> 测定砂岩储层弹性收缩压缩模量

是  $1 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ , 而水的压缩模量为  $3 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ 。假定在地层抬升过程中砂岩孔隙体积以相同速率膨胀, 然而地层水膨胀后体积仅为孔隙膨胀后体积的不到一半, 将会产生孔隙体积的增加, 通常人们称之为回弹作用下的孔隙增加。夏新宇(2002)<sup>[9, 10]</sup>考虑孔隙的反弹, 计算密度为  $2\ 300 \text{ kg/m}^3$  的岩石若抬升  $3\ 000 \text{ m}$ , 岩石孔隙将膨胀  $3.4\% \sim 10.2\%$ 。

同时, 温度因素也不可忽视<sup>[9~15]</sup>。伴随着地壳抬升运动的剥蚀作用必然导致地层温度的降低, 流体由于遇冷收缩, 体积变小。流体的热膨胀系数远大于岩石, Hodgman(1957)<sup>[16]</sup>测定岩石的膨胀系数为  $9 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , 地层卤水的膨胀系数是  $400 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , 因此, 温度每降低  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ , 卤水产生的变化是孔隙空间的 44 倍还多。事实上, 如果地层处于封闭状态, 体积的变化很小, 而压力的变化很大。因此, 温度降低对异常低压的影响十分显著。

实际上, 无论是构造抬升引起孔隙体积膨胀, 还是地层剥蚀导致温度降低, 其形成的低压若能保存至今, 都需要良好的封闭性作为保障。有 2 种情况, 一是在抬升前就存在封闭地层而抬升以后不被破坏, 使得低压得以保存; 二是在遭受抬升剥蚀后, 盆地发生快速的沉降, 上覆沉积封闭层, 使得被其封闭的流体不与外界发生物质和能量的交换, 异常压力得以保留。

## 1.2 孔隙水化学作用

异常低压可由地层水中封闭孔隙水的化学活动引起<sup>[15]</sup>。成岩作用研究表明, 岩石中无论酸性还是碱性地层水都可与岩石基质发生化学作用<sup>[17]</sup>, 生成易溶于水的物质。岩石基质的溶解形成次生孔隙, 使孔隙空间变大, 若孔隙系统封闭且温度恒定, 势必造成地层压力的下降。

实际上, 上述机制本身受到一定程度的相对制约, 即大量的低矿化度、浅层水来源与孔隙系统封闭之间的矛盾。在封闭系统内, 地层水因发生溶蚀作用其矿化度越来越高, 其溶解能力也越来越低。较强的溶解作用需要源源不断的低矿化度水补给才能实现, 以满足体系内、外物质和能量交换的需要。因此, 孔隙水的化学作用形成明显异常低压的可能性极小。

## 2 流体排出

### 2.1 压力释放

地质历史时期中, 压力系统不会一成不变。受

构造作用的影响, 如果超压封闭层泄露, 只有在压力生成速率大于损失速率的情况下才能维持超压状态。当压力损失速率超过其增加速率时, 超压便会逐渐减至正常, 甚至出现异常低压<sup>[5, 18~20]</sup>。这种压力的释放通常以地下流体运移或散失等释放途径表现出来。当流体运移或散失时也就相应导致压力降低。断裂和不整合面作为油气运输的通道, 可以导致油气散失和再分配。沿着这些输导层的流体运移往往是突发而迅速的。对于超压的原生油气藏而言, 这些通道连接着超压和静水压力环境, 巨大的压力差促使油气快速逸散, 在没有增压补给的情况下, 油气藏内压力便会降至正常甚至出现瞬间的低压, 同时也意味着原生油气藏的破坏。但这种低压只有在压力释放后, 逸散通道又迅速闭合才能使其保存下来, 否则, 应以形成常压为主。

### 2.2 物性差异引起非均匀流

当承压含水层被低渗透带与补给区隔离时, 由于排出量大于补给量, 地层压力降低, 造成低压<sup>[12, 21]</sup>。Hubber(1953)<sup>[22]</sup>提出了流体势的概念, 流体势包括位能和压能之和, 用方程可表示为:

$$\Phi = gZ + \frac{P}{\rho} \quad (1)$$

式中:  $\Phi$  为流体势;  $P$  为地层压力;  $\rho$  为流体密度;  $g$  为重力加速度;  $Z$  为该点在基准面以上或以下的相对高程。流体总是由高势区流向低势区。实际上, 异常低的流体压力的形成原因可以借助流体势的观点进行分析。

假设某地区为常压, 测势面实际上就是该区的承压面, 如果该区发育异常低压, 由方程(1)可知, 必然使得测势面低于承压面。通过以上假定可以建立低压与流体势之间的内在关系。因此, 如果含水层在盆地周围出露, 盆地内产生低压的问题可以通过以下的模型来考虑。假设某自流盆地的补给区海拔为  $5\ 000 \text{ m}$ , 含水层泄水区海拔为  $1\ 000 \text{ m}$ , 此含水层中介质均一, 那么流体在流动过程中势的损失必定均匀分布(图 1)。然而, 如果传导性不均一, 那么势的分布也将不均匀, 在地层致密处, 等势线变得密集(图 2)。因为泄水和补给区之间的流体势差值为固定值, 但受非均质性的影响, 它们之间的等值线的位置就将发生不对称的移动, 在低传导区势的损失比在高传导区大得多, 导致等势线向补给区移动。对比图 1 和图 2, 发现由于受到传导性的影响, 测势面低于承压面, 即在该区呈现异常低的流体压力, 因此可以认为, 低压发生在与泄水区之间沟通良好, 而与补给区间因连通性较差得不到及

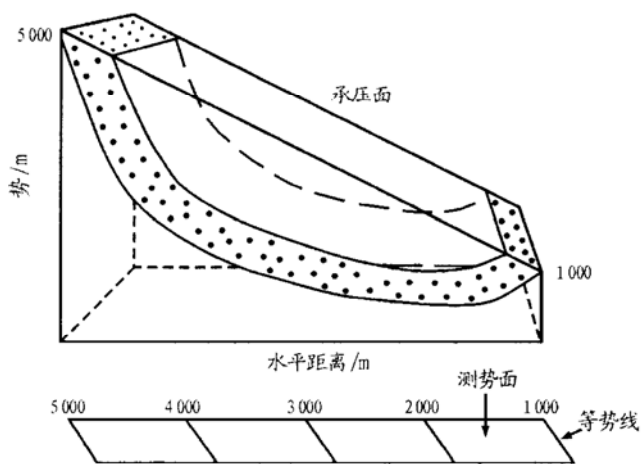


图1 均质体中流体势分布

Fig. 1 Distribution of fluid potential in homogeneous body

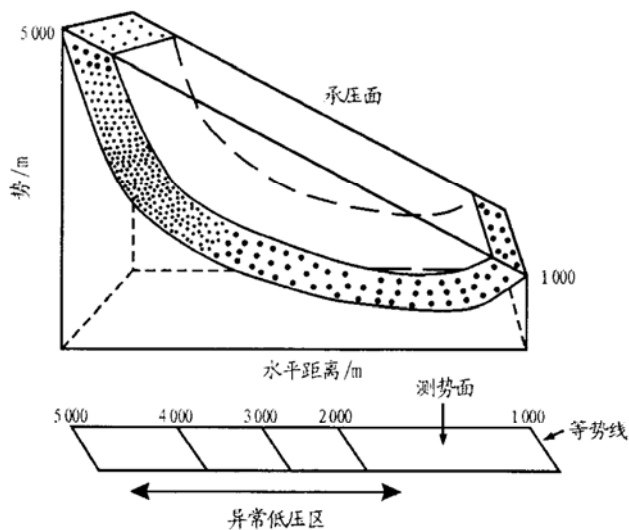


图2 非均质体中的流体势分布

Fig. 2 Distribution of fluid potential in unhumogeneous body

时补给的地区。

### 2.3 渗析作用

水通过半渗透膜从低盐度一侧向高盐度一侧发生运移的作用被称为渗析作用<sup>[23]</sup>。渗压是渗析作用的驱动力,也是回压的平衡力,这里所谓的回压就是用于停止渗流的一种压力。Bradley<sup>[15]</sup>指出,封闭的阻挡层可以作为渗析作用的半透膜,如果封闭的孔隙水盐度比周围的水盐量低,水将通过半渗透膜向外渗流,导致地层压力不断减小,在封闭系统中形成低压。

理论上各种盐类的渗透压可能是几十 MPa。然而 Young 和 Low<sup>[24]</sup>研究发现这种渗透压在岩心渗透膜仅有  $(13.8 \sim 27.6) \times 10^{-3}$  MPa,可见,关于渗析压的大小认识还不统一。因而,渗析作用是否为形成异常低压的主要因素尚需探讨。

### 2.4 轻烃扩散作用

轻烃分子扩散是一种很普遍的自然现象,它是因为多孔介质中存在浓度差而造成的质量传递,只要有浓度差存在,轻烃扩散作用无时无刻不在发生,人们通常认为它是天然气初次运移的一种动力。然而,气藏中的轻烃通过盖层发生扩散时,由于气藏内物质和能量发生了损失,导致油气藏压力降低。

轻烃扩散受诸多因素的影响,通常需要一定的地质条件<sup>[3]</sup>: 1) 盖层成岩演化阶段早,胶结作用不强,岩石致密程度差,易使轻烃组分散失; 2) 较高的地温梯度易使轻烃分子运动剧烈,扩散系数变大; 3) 浅层地层水矿化度远比深部的低,低矿化度地层水轻烃扩散系数大; 4) 浅层油气由深部运移而来,较深部油气更富集低碳烃类,从而容易发生轻烃扩散。此种低压形成本身一直保持良好的封闭条件,因此,扩散作用通常被认为是构造稳定区异常低压形成的主要原因。

## 3 饱和和天然气藏深埋

迄今为止,大多数负压气藏具有一定的相似性。如天然气产自饱含气体的厚层段,气藏分布于构造上隆区,产水量极少或根本不产水,而气藏上覆含水层压力呈静水压力,与气藏属完全不同的压力系统<sup>[4]</sup>。

Barker(1987)<sup>[25]</sup>指出,当地层中岩石被气相饱和和时,其压力分布与充满液体的地层有很大差异。充满液体的地层,随着埋深的增加和温度的升高,受到烃类生成、水热增压等作用,常常形成异常高压,而在充满气体的地层中,流体压力理论上满足理想气体方程。假定地表温度为 13 °C,地温梯度是  $2.5 \times 10^{-2}$  °C / m,地层由 2 000 m 深埋至 3 000 m,深埋前压力系数为 1.0。即随着埋深增加,在封隔情况下,因气体体积不变,温度增加与压力增加之比为常数。所以深埋前与深埋后压力之比近似为:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (2)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{13 + 2.5 \times 20 + 273}{13 + 2.5 \times 30 + 273} = 0.93 \quad (3)$$

$$P_2 = 1.07P_1 \quad (4)$$

式中:  $P_1$  和  $P_2$  代表深埋前后的地层压力;  $T_1$  和  $T_2$  代表深埋前后的地层绝对温度。而静水压力在深埋前后之比为:

$$\frac{P_{1\text{静水}}}{P_{2\text{静水}}} = \frac{\rho_w g h_1}{\rho_w g h_2} = \frac{2}{3} \quad (5)$$

式中:  $P_{1\text{静水}}$  和  $P_{2\text{静水}}$  分别代表深埋前后的静水压

力。压力系数的计算公式为:

$$P_i = \frac{P_f}{P_{\text{静水}}} \quad (6)$$

式中:  $P_i$  为压力系数,  $P_f$  为地层压力。

由已知条件深埋前压力系数为:

$$P_{i1} = \frac{P_{f1}}{P_{1\text{静水}}} = 1 \quad (7)$$

即  $P_{f1} = P_{1\text{静水}}$ , 再将式(4)和(5)代入(6)可得:

$$P_{i2} = \frac{P_{f2}}{P_{2\text{静水}}} = 1.07P_1 \times \frac{2}{3P_{1\text{静水}}} = 0.72 \quad (8)$$

可见, 深埋后的压力系数降为 0.72。因此, 封闭体系内单位深度的压力增量常常低于正常静水压力梯度下的压力增量, 以至于形成低压。此即气藏深埋作用下形成的异常低压。在低压的形成过程中, 封隔体始终保持着良好的封闭性, 特别是在抬升幅度不大的地区, 更易出现这种成因的低压。

然而, 此种低压的存在是有条件的, 即压力体处于刚性封隔体包围之中才可形成, 而实际地质情况可能要复杂得多, 这种低压能否形成取决于封隔体的封隔程度。

## 4 承压面低于地表

通常人们用地层压力与静水压力的比值, 即压力系数来标定地层压力的异常情况, 而静水压力计算都是基于水柱到达地表这一假设: 某一目的层地下水承压面从地表算起, 应该说, 这种假设在大多数地表起伏不太强烈的地区或盆地, 特别是我国东部地形平坦区, 可以近似使用。而当受构造运动等影响, 承压面与地表起伏不相协调时, 如我国中西部盆地, 由于承压面以上的地层不承压, 会导致计算的静水压力大于实际的静水压力, 自然导致计算出的压力系数、压力梯度等指标偏低, 显示出明显的“负压异常”, 而实际上这种低压可能是人们的一种习惯做法——压力的起算点均从地表开始——带来的。

## 5 结论和认识

1) 抬升过程中由于负荷降低孔隙体积发生反弹、孔隙中流体因温度下降而收缩, 使得孔隙体积增大, 从而导致地层压力下降, 是构造抬升强烈的沉积盆地中异常低压形成的主要原因。

2) 在抬升幅度较小的地区, 轻烃扩散和饱和天然气藏的深埋两种机制, 在低压形成的前、后一直保

持良好的封闭条件, 因此通常被认为是构造稳定区异常低压形成的主要原因。

3) 孔隙水的化学作用和渗析作用自身受一定程度的相对制约, 对异常低压贡献不大。

4) 压力释放机制似乎可形成低压, 但低压形成后的保存方式尚有疑问。

5) 除物性差异引起的非均匀流外, 其它的低压形成机制都需要以好的封闭条件为前提, 否则将被平衡至常压。

6) 承压面低于地表形成低压, 并非真正意义上的低压, 只是由于人们在表达压力相对大小时进行了错误假定而造成的。

### 参考文献:

- 1 曲江秀, 查明. 准噶尔盆地异常压力类型及成因探讨[J]. 石油实验地质, 2003, 25(4): 333~ 336
- 2 黄志龙, 姜亮. 东海盆地丽水凹陷异常压力系统特征[J]. 石油实验地质, 2002, 24(1): 52~ 57
- 3 李延钧, 陈义才, 黄键全等. 吐哈盆地红南—红西地区油气负压系统的成因[J]. 西南石油学院学报, 1999, 21(1): 6~ 9
- 4 华保钦, 林锡祥, 杨小梅等. 鄂尔多斯盆地古生界负压气藏及运移[J]. 沉积学报, 1994, 11(2): 105~ 113
- 5 楼章华, 高瑞祺, 蔡希源等. 流体动力场演化与地层流体低压成因[J]. 石油学报, 1999, 20(6): 27~ 31
- 6 曾治平, 蔡勋育, 邹华耀. 负压地层形成机制及其对油气藏的影响[J]. 地球学报, 2002, 23(3): 255~ 258
- 7 刘晓峰, 谢习农. 东营凹陷低压系统的特征及成因机制[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(1): 66~ 70
- 8 杜栩, 郑洪印. 异常压力与油气分布[J]. 地学前缘, 1995, 4(2): 137~ 147
- 9 夏新宇, 曾凡刚, 宋岩. 构造抬升是异常高压的成因吗? [J]. 石油实验地质, 2002, 24(6): 496~ 501
- 10 夏新宇, 宋岩. 沉降及抬升过程中温度对流体压力的影响[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(3): 8~ 11
- 11 夏新宇, 宋岩. 构造抬升对地层压力的影响及克拉 2 气田异常压力原因[J]. 天然气工业, 2001, 21(1): 30~ 34
- 12 Warbrick R E, Osborne M J. Mechanisms that generate abnormal pressure: an overview[A]. In: Law B E, Ulmishek G F, Slavin V I, eds. Abnormal Pressure in Hydrocarbon Environments: AAPG Memoir[C]. Tulsa: AAPG, 1998. 13~ 43
- 13 Russell W L. Pressure-depth relation in Appalachian Region[J]. AAPG Bulletin, 1972, 56(3): 528~ 536
- 14 Prake A D, Wayne C. Oil and gas in reservoirs with subnormal pressure[J]. AAPG Bulletin, 1977, 61(12): 2 134~ 2 142
- 15 Bradley J S. Abnormal formation pressure[J]. AAPG Bulletin, 1975, 59(6): 957~ 973
- 16 Hodgman C D. Handbook of chemistry and physics[M]. Cleveland, Ohio: Chemical Rubber Pub Co, 1957. 3 213
- 17 邱隆伟, 姜在兴, 操应长等. 泌阳凹陷碱性成岩作用及其对储层的影响[J]. 中国科学, 2001, 31(9): 752~ 759
- 18 王宏语, 康西栋, 李军等. 松辽盆地徐家围子地区深层异常压

- 力分布及其成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2002, 32(1): 39~ 43
- 19 Zhou G J. Origin of subpressure and hydrocarbon exploration in Shiwu fault depression, Songliao Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(8): 1 336
- 20 刘文龙, 李思田, 孙德君等. 松辽盆地深层孔隙流体压力预测[J]. 地球科学, 2000, 25(2): 137~ 142
- 21 Kenneth B, John D. Hydrodynamics of Denver basin: explanation of subnormal fluid pressure[J]. AAPG Bulletin, 1988, 72(11): 1 334~ 1 359
- 22 Hubbert M K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic condition[J]. AAPG Bulletin, 1953, 37(8): 1 954~ 2 026
- 23 李明诚. 石油与天然气运移[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994. 59~ 60
- 24 Young A, Low P F. Osmosis in argillaceous rocks[J]. AAPG Bulletin, 1965, 49(7): 1 004~ 1 007
- 25 Barker C. Generation of anomalous internal pressures in source rocks[A]. In: IFP, ed. Migration of Hydrocarbon in Sedimentary Basin[C]. 2nd IFP Explor Res Conf, Carcans, Paris, 1987. Paris: IFP, 1987. 79~ 112

## CAUSES OF SUBNORMAL PRESSURE IN THE SEDIMENTARY BASINS

ZHANG Li-kuan, WANG Zhen-liang, YU Zai-ping

(Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

**Abstract:** The forming mechanisms of subnormal pressure can be divided into 4 types: 1) increase in pore volume caused by tectonic uplift and formation erosion, or chemical effects of pore water; 2) fluid flowing out due to the release of overpressure in seal formation, unhomogeneous flow, osmosis across semipermeable shale membranes and diffusion of light hydrocarbon; 3) deep burial of saturated gas reservoir; 4) piezometric surface lower than ground surface. In some sedimentary basins in which large-scale tectonic uplift has taken place, the main cause of low pressure may be the removal of overburden, which results in dilation of pore volume with the consequent reduction in stress and temperature. Subnormal pressure in the small-scale uplift area is mostly related to the diffusion of light hydrocarbon and the burial of saturated gas reservoir. The release of overpressure seems to be a probable mechanism; however, it is a question how low pressure can be preserved. The chemical effect and osmosis effect of pore water are self-limited, which may not be the major factors in subnormal pressure system. Aside from unhomogeneous flow, other mechanisms require good seal, otherwise pressure will be equalized to normal hydrostatic. The low pressure is not a true meaning subnormal pressure, because that the piezometric surface is lower than the ground surface, but people give a wrong assumption in the course of showing the relative size of pressure.

**Key words:** causes of generation; subnormal pressure; seal; sedimentary basin