库车前陆盆地构造挤压作用下的 天然气运聚效应探讨

张凤奇^{1,2)},王震亮²⁾,宋岩³⁾,赵孟军³⁾,范昌育²⁾,赵雪娇²⁾

1) 西安石油大学油气资源学院,西安,710065;

2) 西北大学地质学系,西安,710069;3) 中国石油勘探开发研究院,北京,100083

内容提要:以克拉2气田为例,探讨了喜马拉雅晚期强烈构造挤压作用下天然气的运聚效应。构造挤压引起流体压力的快速增加,打破前期相对稳定的流体势场;断裂带为相对低应力区,不增压或与周围岩层相比增压相对小,成为相对低势区,岩层中的天然气向断裂处汇聚,使断裂带势能增大;构造挤压使地层发生破裂和已有断裂开启,同时垂向上气势梯度也大幅度增大,深部天然气沿断裂的垂向运移动力得以增强,断裂带处汇聚天然气沿开启断裂向上部地层快速运移,并侧向充注区域性盖层下的砂体,最终在构造挤压作用下的相对低气势区聚集。喜马拉雅晚期以来库车前陆逆冲带盐下断背斜、背斜构造挤压作用下为相对低气势区,油源断裂发育,构造强烈活动使断裂开启,垂向上气势梯度大幅度增大,保存条件较好,为喜马拉雅晚期以来天然气有利聚集区。中西部前陆盆地构造挤压强烈,对天然气成藏具有重要影响。因此,开展前陆盆地构造挤压对天然气成藏的影响研究,对指导前陆盆地油气勘探具有重要的理论意义和应用。

关键词:构造挤压;流体动力;前陆盆地;天然气运聚;构造应力场

库车前陆盆地自喜马拉雅晚期以来,受到强烈 的构造挤压,该时期是主要的构造变形期(刘志宏 等,2000;汪新等,2002,2010;汤良杰等,2008;李曰 俊等,2008;余一欣等,2008;唐鹏程等,2010)。自北 向南依次发生构造变形并形成反转隆起,隆起带上 形成一系列大型逆冲断层和与之相伴生的褶皱构 造,为库车前陆盆地油气成藏提供构造圈闭条件和 断裂输导条件(宋岩等,2006)。库车前陆盆地具有 早油、晚气两期成藏特点,即中新世早期(23~ 12Ma)为主要聚油期和上新世以来(5~0Ma)特别 是库车期(2.5Ma)以来为主要聚气期(梁狄刚等, 2002;赵孟军和卢双舫,2003)。构造变形最强烈的 喜马拉雅晚期是库车前陆盆地天然气的主要成藏 期,构造挤压对油气运聚起着重要影响作用(曾联 波等,2002,2004a,2005;赵孟军和卢双舫,2003;石 万忠等,2005;张乐等,2007;王震亮,2007)。为了系 统总结构造挤压对天然气运聚的影响,本文进行了 理论推导,分析了构造挤压引起流体增压、变形后流 体运动方向可能发生的改变。通过数值模拟库车前 陆逆冲带典型演化剖面最大主压应力的分布,计算 构造挤压引起的流体增压,结合沉积型流体压力演 化的数值模拟(王震亮,2007)结果,计算典型剖面 不同时期不同位置流体压力,恢复典型剖面不同时 期的气势分布,分析构造挤压作用下天然气的运聚 效应并总结其规律,以期能够指导中西部前陆盆地 地质条件类似地区的油气勘探工作。

1 构造挤压下油气的运移方向

构造应力对孔隙型储层中流体的作用是通过固体骨架的变形及骨架和流体的相互作用来实现的(李志明,1999)。即岩层在构造应力作用下发生岩石变形的同时,岩石中的孔隙体积必然产生变化。 孔隙体积的变化又会使岩层内孔隙流体压力产生变化,导致岩层中孔隙流体产生压力梯度或势差。从 而推动流体在岩层内流动,使流体由高势区向低势 区运移(王毅等,2005)。

在不考虑毛细管压力的情况下,地下流体势 (Hubbert,1953)可表示为

$$\Phi_{\rm f} = {\rm g} \cdot H + \int_0^P \frac{{\rm d}P}{\rho_{\rm f}} \tag{1}$$

注:本文为国家科技重大专项(编号2008ZX05003)的成果。

收稿日期:2010-12-16;改回日期:2011-10-25;责任编辑:章雨旭。

作者简介:张凤奇,男,1981年生。博士,讲师。矿产普查与勘探专业。主要从事油气成藏动力学和油气形成机制与分布规律研究。 Email:zhangfengqi68@126.com。

式中, Φ_f 为单位质量流体的势,g为重力加速度,H为计算点相对于某一基准面的高程,P为流体压力, ρ_f 为流体密度。

在构造稳定时期,计算流体势时可用(1)式来 计算;在构造强烈活动时期,最大主应力由原来构造 稳定时期的垂向迅速变为了水平方向,对于封闭性 较好的流体体系,构造挤压可引起流体增压(皮学 军等,2002;赵靖舟,2003;曾联波等,2004b,2005;王 震亮等,2005;宋岩等,2006,2008;孙明亮和柳广弟, 2007;石万忠等,2007;王毅等,2005;罗晓容,2004)。 假设构造挤压引起流体增压为△P,此时流体势可 表示为:

$$\mathcal{P}_{\rm f} = {\rm g} \cdot H + \int_0^{\rho_+ \Delta \rho} \frac{{\rm d}P}{\rho_{\rm f}}$$
(2)

构造挤压作用对超压形成的影响可用"构造压 实作用"机制(Berry,1973;罗晓容,2004;王震亮等, 2005)来描述,即从先前的上覆负荷对目的层的压 实作用转变为侧向挤压对目的层的压实,前、后两个 时期间经历了最大主应力方向的转变(陈荷立和罗 晓容,1988;王震亮等,2005)。王震亮等(2005)论 证了侧向挤压前后上覆负荷和侧向挤压在岩石骨架 和流体之间的分配作用,对一般的沉积压实作用来 说,垂向上的上覆负荷(*S*)可分解为由岩石骨架承 担的有效应力δ和由流体承担的流体压力*p*:

$$S = \delta + P \tag{3}$$

构造应力引起岩石的侧向压实,其应力的分配 关系可近似表示为:

 $\sigma_1 = \delta + P \tag{4}$

式中,σ₁为此时侧向上的最大主应力,δ和 P 是分配 到岩石骨架和流体上的力。在完全封闭体系内,侧 向挤压后无论新增的最大主应力有多大,均无法加 载于岩石骨架上,故侧向挤压前、后两个时期的有效 应力相等,最大主应力相对于原上覆负荷的新增部 分将全部施加给流体压力,流体压力的增量为:

$$\Delta P = P_2 - P_1$$

= $(\sigma_1 - \delta_2) - (S - \delta_1)$
= $\sigma_1 - S$ (5)

式中, ΔP 为构造挤压引起的流体增压; P_1 、 P_2 为增 压前后两个时期的流体压力; δ_1 、 δ_2 为增压前后两个 时期的有效应力,这里 δ_1 与 δ_2 相等; σ_1 为最大水平 主压应力,S 为增压前的载荷(王震亮等,2005)。在 完全开放流体体系内,侧向挤压后的补充压实引起 沉积物的充分压实,而流体压力仍保持为静水压力, 此时,构造挤压作用将很难引起流体压力的增加。 在不完全封闭体系内,侧向挤压作用后,侧向上的最 大主应力将有一部分被分解到岩石骨架上,一部分 由流体来承担,前、后两个时期引起的流体压力增量 低于完全封闭体系,具体幅度的大小则视流体体系 的封闭程度而定(王震亮等,2005)。

在封闭性较好的流体体系内,构造挤压可引起 流体压力的"迅速"增加,此时前期相对稳定的流体 势场会被这种构造挤压增压等作用所打破。由于构 造挤压作用下,岩层的挤压应力会不断积聚,当积聚 到使岩层发生破裂时挤压应力会释放变小,同时流 体也发生流动。为此在岩层即将发生变形前构造挤 压积聚的挤压应力较大,相应的流体增压作用也较 大,挤压应力增大到岩层变形发生破裂后,流体会沿 着构造挤压增压作用后的流体势分布格局由高势区 向低势区发生流动。为此计算出构造挤压作用到岩 层变形前的流体势场的分布格局,可较好地分析构 造挤压作用下的流体流动趋势。

在完全封闭流体体系内下,由(2)式可得构造 挤压增压后任意两点 m、n 的流体势差为:

$$\Delta \Phi_{\rm f} = \Delta \Phi_{\rm fm} - \Delta \Phi_{\rm fn}$$

= g · (Z_m - Z_n) + $\frac{P_{\rm m} - P_{\rm n}}{\rho_{\rm f}} + \frac{\Delta P_{\rm m} - \Delta P_{\rm n}}{\rho_{\rm f}}$ (6)

式中, $\Delta \Phi_{f}$ 为 m_{n} 两点的流体势差, Φ_{fn} 、 Φ_{fn} 分别为 m_{n} 两点的流体势, Z_{m} 、 Z_{n} 分别为 m_{n} 两点相对基 准面的高程, P_{m} 、 P_{n} 分别为 m_{n} 两点的流体压力, ΔP_{m} 、 ΔP_{n} 分别为 m_{n} 两点构造挤压引起的流体增 压。

如 *m*、*n* 为同一压力系统相同深度的两点(图 1a),此时 *m*、*n* 两点的高程和流体压力均相等,由 (5)、(6)式可得增压后 *m*、*n* 两点流体势差:

$$\Delta \Phi_{\rm f} = \frac{\Delta P_{\rm m} - \Delta P_{\rm n}}{\rho_{\rm f}} = \frac{\sigma_{\rm 1m} - \sigma_{\rm 1n}}{\rho_{\rm f}} \tag{7}$$

式中, σ_{1n} 、 σ_{1n} 分别为m、n两点的最大主压应力。

在此假设下,m、n两点的流体势差与两点最大 主压应力之差成正比。而构造挤压增压前m、n两 点的流体势差为0,所以同一压力系统相同深度的 两点,构造挤压增压后流体由最大主应力大的向最 大主应力小的方向流动。

如 *m*、*n* 为同一压力系统内距离为 *X* 且深度不同的两点, *m*、*n* 两点连线与水平面夹角为 θ(图 1b),此时满足以下关系式

 Z_n

$$P_m = P_n + \rho_w \cdot \mathbf{g} \cdot X \cdot \sin\theta \tag{8}$$

$$-Z_m = X \cdot \sin\theta \tag{9}$$

将(5)、(8)、(9)式带入(6)式可得增压后 m、n





两点的流体势差

$$\Delta \Phi_{\rm f} = -g \cdot X \cdot \sin\theta + \frac{\rho_{\rm w} \cdot g \cdot X \cdot \sin\theta}{\rho_{\rm f}} + \frac{\Delta P_{\rm m} - \Delta P_{\rm n}}{\rho_{\rm f}} + \frac{(\rho_{\rm w} - \rho_{\rm f}) \cdot g \cdot X \cdot \sin\theta}{\rho_{\rm f}} + \frac{\sigma_{\rm 1m} - \sigma_{\rm 1n}}{\rho_{\rm f}} \quad (10)$$

由(1)、(8)、(9)式可得构造挤压增压前 m、n 两点的流体势差

$$\Delta \Phi_{\rm f} = -g \cdot X \cdot \sin\theta + \frac{\rho_{\rm w} \cdot g \cdot X \cdot \sin\theta}{\rho_{\rm f}}$$
$$= \frac{(\rho_{\rm w} - \rho_{\rm f}) \cdot g \cdot X \cdot \sin\theta}{\rho_{\rm f}} \tag{11}$$

对于位于同一压力系统内距离为 X 且深度不同的 m、n 两点(图 1b)油气来说,一般情况下由于油气的密度小于水的密度,所以构造挤压增压前由(11)式可得 m、n 两点的流体势差大于 0,即构造挤压增压前油气由 m 向 n 运移的趋势。构造挤压作用下如果最大主压应力 m 点大于 n 点,增压后 m、n 两点流体势差增大,此时油气由 m 向 n"加速"流动;构造挤压作用下如果最大主压应力 m 点小于 n 点,增压后 m、n 两点流体势差减小到小于 0,此时油气由 m 向 n"减速"流动或改变油气流动方向从 n 流向 m,视两者 m、n 两 点最大主压应力差值大小而定。

上述分析的同一压力系统内,构造挤压引起流 体增压后流体并非完全由最大主压应力大的位置向 最大主压应力小的位置流动,视构造挤压后最大主 压应力的减小方向和减小幅度而定;如最大主压应 力减小方向与增压前流体势减小方向一致时,流体 由最大主压应力大的位置向最大主压应力小的位置 加速流动,如最大主压应力减小方向与增压前流体 势减小方向不一致时,最大主压应力减小幅度大到 改变流体势的变化方向方可改变流体的流体方向, 否则流体会由最大主压应力小的位置向最大主压应 力大的位置流动。

实际分析时比上述理想状态下复杂得多,由于 构造挤压产生增压使流体势分布格局发生变化,而 流体流动最终受控流体势。所以,在强烈构造挤压 环境下,只有确定构造挤压后的流体势分布才能很 好的判断流体的流动方向。

2 气势的恢复

库车前陆盆地异常高压的形成受多种因素的影 响,除了受喜马拉雅晚期构造挤压的影响外,还受到 欠压实作用及天然气充注作用的影响(宋岩等, 2006;王震亮等,2005;王震亮,2007)。将流体压力 的求取分两部分:沉积、成岩过程中因欠压实、生烃 作用等所形成的过剩压力和构造挤压引起的流体增 压,将二者加以叠合,即可获得了地层压力演化历 史,并可进一步恢复出气势的演化历史(王震亮, 2007)。库车前陆逆冲带在喜马拉雅晚期特别是西 域期以来是构造变形最为强烈时期(李曰俊等, 2008;余一欣等,2008),西域期沉积前构造挤压不断 积聚使得地层挤压应力不断增大,到西域期挤压应 力增大到使地层发生快速变形以释放挤压应力,地 层变形使已存断裂开启同时产生新断裂,天然气沿 开启断裂可发生垂向运移,可认为西域期沉积前地 层未发生快速变形前断裂处于静止期封闭状态(付 晓飞等,2004a);又由于库车前陆逆冲带膏盐岩区域 性盖层及盐下地层存在欠压实作用(王震亮等, 2005),且欠压实作用在最大埋深时期(库车沉积末 期)达到最大(万桂梅等,2006,2007),且一直持续 至今,说明盐下储层流体体系封闭性好。所以在断 裂处于封闭状态时,盐下流体体系基本为完全封闭 状态,此时构造挤压增压作用可用式(5)来计算。 剖面中两个时期在沉积、成岩过程中因欠压实、生烃 作用等所形成的过剩压力可利用实测压力、包裹体 形成压力和最大埋深时期的古压力等直接证据作为 约束条件,根据已建立的流体压力演化数学模型进 行数值模拟(王震亮,2007)来获取。

2.1 最大主压应力分布

选取克拉苏地区近南北向过 KL2 井和 KS2 井 的典型演化剖面,对该剖面西域组沉积前和现今两 个时期剖面应力场进行模拟,模拟出剖面上水平最 大主压应力的分布。选用 ANSYS 10.0 软件,利用 各个时期的构造演化剖面建立地质模型。

剖面中断层当作断裂带处理,各个岩层段和断 裂带被定义为10种不同的材料类型,分别赋予不同 的岩石力学参数(表1)。区内岩石力学实验表明, 岩石总体特征表现为脆性,破裂后具有明显的应力 降,故将地质体按线弹性处理。根据研究区高温高 压三轴岩石力学参数的实验结果(张明利等, 2004a),选取了地质体单元内的实际岩石力学参数 (表1)。在同一单元内,岩石作均质体处理,而各单 元之间则为非均质体。建模时把断裂带定义为三角 形六节点单元类型,其他部分定义为四边形八节点 单元类型(表1)。

表1 库车坳陷岩石力学参数表 (据张明利等,2004a,有修改)

 Table 1 Mechanical properties of rocks in Kuqa depression

 (Modified from Zhang Mingli et al., 2004a)

岩性时代	单元类刑	杨氏模量	泊松
	中元人主	E(GPa)	比μ
西域组(Qp ¹ x)	四边形八节点	12	0.28
库车组(N ₂ k)	四边形八节点	15	0.26
康村组(N ₁₋₂ k)	四边形八节点	20	0.25
吉迪克组(N ₁ j)	四边形八节点	5	0.42
苏维依组(E ₂₋₃ s)	四边形八节点	10	0.30
库姆格列木组(E ₁₋₂ k)	四边形八节点	6	0.35
白垩系(K)	四边形八节点	35	0.23
侏罗系(J)	四边形八节点	37	0.25
前侏罗系(Pre-J)	四边形八节点	39	0.25
断裂带	三角形六节点	8	0.32

沉积盆地内构造应力基本作用在水平方向上, 岩石中的应力场可被看作是重力场所引起的地下应 力场与构造应力场之和。取重力派生的应力场中一



图 2 库车前陆逆冲带近南北向剖面西域组沉积前(b)和现今(a)最大主压应力分布 (演化剖面据塔里木油田分公司, 2009 年资料)

Fig. 2 The distribution of maximum principal compressive stress of the Xiyu Formation in nearly north—south section, Kuqa foreland thrust belt, before deposited (b) and nowadays (a) (The evolution section from the data of Tarim Oilfield Company, Petrochina, 2009)

 $Qp^{1}x$ —西域组; $N_{2}k$ —库车组; $N_{1-2}k$ —康村组; $N_{1}j$ —吉迪克组; $E_{2-3}s$ —苏维依组; $E_{1-2}k$ —库姆格列木组;K—白垩系;J—侏罗系; T—三叠系;Pre-T—前三叠系; $FI \sim F8$ —断裂代号

 Qp^1x —Xiyu Fm. ; N_2k —Kuqa(Kuche) Fm. ; $N_{1-2}k$ —Kangcun Fm. ; N_1j —Jidike Fm. ; $E_{2-3}s$ —Suweiyi Fm. ; $E_{1-2}k$ — Kumugeliemu Fm. ;K—Cretaceous ;J—Jurassic ; T—Triassic ; Pre-T—Pre-Triassic ; F1 ~ F8—fault code 个水平主应力轴方向与构造应力平行(罗晓容, 2004),则有

$$\boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{H}} = \boldsymbol{\nu} \cdot \boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{V}} + \boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{T}} \tag{12}$$

式中, σ_{H} 为水平最大主应力, σ_{v} 为垂直应力, σ_{T} 为构 造应力, ν 为应力比系数,可用 $\nu = \mu/(1 - \mu)$ 求得, 其中 μ 为泊松比。

本次采用二维有限元模拟,剖面所施加应力视 为重力派生的应力场中一个水平主应力与构造应力 之和,故边界应力为随埋深变化的合应力

 $\sigma_{\rm H} = \nu \cdot \rho_{\rm r} \cdot g \cdot h + \sigma_{\rm T}(\rho_{\rm r})$

为岩石的平均密度)。按照上述取值

 $\sigma_{\rm H} = \nu \cdot \rho_{\rm r} \cdot g \cdot h + \sigma_{\rm T} = 0.01 \cdot h + \sigma_{\rm T},$ 其中 h 不能无限增大,h 增大到一定程度 $\sigma_{\rm H}$ 就不再 变化。

库车坳陷在进入新近纪后,最大主应力方向从 垂向变成水平,应力场发生了转变,之后最大主应力 保持水平,但方向可能稍有变化。南天山和盆山边 界处的构造变形以近 N—S 向伸展构造变形为主 (张仲培等,2006)。据此,边界条件被确定为南北 向的挤压应力。本次将南北向设定为 X 方向,垂直 向设定为 Y 方向,将模型底部 Y 约束,左上角 X 约 束,顶面自由,在南北边界加合应力 $\sigma_{\rm H}$ = 0.01 · h + $\sigma_{\rm T}$,现今剖面模拟时改变构造应力 $\sigma_{\rm T}$ 直至模型中 KL2 井点不同深度的模拟值与位于同一构造带距离 较近同一深度的 KL201、KL202 井实测量(李军等, 2004)相吻合为止;西域组沉积前由于较现今构造 挤压更为强烈,剖面模拟时,构造应力 $\sigma_{\rm T}$ 较现今稍 大,结合前人对该时期古构造应力的测定(曾联波 等,2004a;张明利等,2004b),最终模拟时构造应力 $\sigma_{\rm T}$ 较现今大 10MPa。

模拟结果表明,两个时期古近系库姆格列木组 膏盐岩层及其以上岩层相对白垩系及以下地层最大 主压应力普遍较小,断裂带相对其围岩地层最大主 压应力相对较小,同一地区埋深较大的三叠系、侏罗



系源岩层最大主压应力较上覆储集层白垩系普遍要 大(图2)。西域组沉积前古近系库姆格列木组盐下 三叠系、侏罗系、白垩系,最大主压应力普遍在110 ~200MPa之间,最大主压应力在F1、F2断层夹持 断块与F2、F3断层夹持断块白垩系左上角出现了 明显相对低值区,在90~110MPa之间;在F1、F2断 层夹持断块与F2、F3断层夹持断块白垩系右上角、 F5断层左侧均出现相对高值区,可达180MPa以上 (图2b)。

现今构造挤压变形后,挤压应力较西域组沉积 前变化大,古近系库姆格列木组盐下三叠系、侏罗 系、白垩系,最大主压应力普遍在 90~200MPa 之 间。其中 F1 断层北部右上角、F1、F2 断层夹持断块 左上角、F2、F3 断层夹持的白垩系和侏罗系上部及 KS2 井处白垩系顶部最大主压应力均为相对低值 区,古近系库姆格列木组盐下最大主压应力的相对 低值区 KL2 井附近白垩系、F2 断层上部白垩系、北 部单斜带右上角普遍在 80~110MPa 之间;白垩系 最大主压应力在 F1 断层左侧、F4 断层左侧、F6 断 层左侧均出现高值区,可达 200MPa 左右(图 2a)。

从图2可知,西域期以来北部单斜带与克拉苏 背斜带之间 F1 断层附近、克拉苏深部区带南部均为 最大主压应力较大区域,明显大于了上覆载荷,相对 同等深度最大主压应力较小的克拉苏背斜带、克拉 苏深部区带北部引起的流体增压会更大些。断裂带 附近最大主压应力变化较大且断裂带内与周围岩层 相比最大主压应力相对较小,一般小于上覆载荷应 力,所以断裂带内这样大小的挤压应力不足于引起 流体增压或引起流体增压较周围岩层小;而在断裂 带的端部最大主压应力出现明显的集中现象,尤其 在断裂带底端这种集中较为明显,达到 200MPa 以 上。断裂带往往成为低应力区,通常在其端部形成 应力集中,这与前人对断裂带的数值模拟得到结论 较为一致(王红才等,2002;梁利喜,2008)。在构造 挤压作用下,断裂尚未开启之前,由于断裂带周围岩 层较断裂带增压较大,流体会向断裂处汇聚,增大断 裂带处的流体压力,由于同一条断裂带的不同深度 流体压力不等,一般深部流体压力大于浅部,当断裂 开启后,断裂带不同深度的流体压力会发生传递,深 部流体压力变小,浅部流体压力增大,传递平衡后断 裂带不同深度的流体压力按静水压力梯度变化 (Luo Xiaorong et al., 2007)。随后断裂的封闭、开启 会重复这个讨程。

2.2 气势分布特征

由地层平均密度结合最大主压应力模拟结果, 根据(5)式可计算出构造挤压引起的流体增压,利 用实测压力、包裹体形成压力和最大埋深时期的古 压力等直接证据作为约束条件对该剖面进行数值模 拟(王震亮,2007)可得到沉积型流体压力,根据(2) 式恢复该演化剖面西域组沉积前、现今气势分布如 图 3。

古近系库姆格列木组膏盐层下部同一地区气势 分布自下而上逐渐变小,三叠系、侏罗系烃源岩层与 其上覆白垩系储集层相比气势等值线较为平缓,白 垩系储集层气势等值线弯曲较为明显。古近系库姆 格列木组膏盐层下部在北部单斜带北部、克拉苏背 斜带断块或断背斜南部及克拉苏深部区带北部自西 域期以来均为相对低气势区,克拉苏背斜带断块或 断背斜北部、克拉苏深部区带南部或拜城凹陷均为 相对高气势区(图3)。究其原因为构造挤压作用 下,最大主压应力大小分布存在较大差异,完全封闭 条件下构造挤压产生流体增压作用不同,使得同等 深度条件下,构造挤压增压大的地方气势较大,产生 局部高气势区,构造挤压增压相对小或构造挤压没 有引起增压的地方气势相对较小,产生局部低气势 区。

单位距离的气势差一气势梯度是天然气运移动 力大小的直接反映。剖面上,自深而浅西域组沉积 前气势变化较现今小,即整体上西域组沉积前气势 梯度较现今小。通过计算比较同一位置两个时期的 气势梯度的变化,现今时期较西域组沉积前克拉苏 深部区带南部气势梯度小幅度增大,克拉苏背斜带 北部气势梯度有1倍左右的增大,克拉苏背斜带南 部、克拉苏深部区带北部气势梯度有1~2倍左右的 增大(图3)。

3 构造挤压下天然气的运聚效应

完全封闭条件下,构造挤压使流体增压,改变流体动力的大小和方向,产生明显的高、低气势区的分布格局,断裂带为相对低应力区,不增压或与周围岩层相比增压相对小,使得断裂带成为暂时的相对低气势区,所以天然气沿渗透性地层向断裂带处汇聚,这种汇聚会使断裂带处气势变大。构造挤压使地层发生破裂和已有断裂重新开启,提供天然气自下而上运移的通道,并增大了垂向气势梯度,来自深部烃源岩层的天然气沿断裂垂向运移的动力得以增强,同时封闭体系被打破,断裂带处汇聚的流体沿开启

断裂快速向上部地层运移,在区域性盖层的封盖下, 运移来的天然气从侧向进入砂体,对于区域性盖层 下的深部砂体由于处于高势区,沿断裂运移上来的 天然气会继续向相对低势区发生侧向运移,最终会 在构造挤压背景下的相对低势区形成聚集;对于区 域性盖层下的浅部砂体由于本身处于相对低势区, 天然气无需发生长距离运移便会就近发生聚集。另 外,在构造应力的作用下,岩石会发生扩容产生大量 的裂隙,使低渗透砂体储集性能得到较好的改善作 用,并使断层的开启性变好,为天然气的运移和聚集 起到了重要作用(Zeng Lianbo et al.,2010)。

克拉苏背斜带、克拉苏深部区带北部断背斜、背 斜构造挤压变形后气势梯度大幅度增大,增大1倍 以上, 且为相对低气势区, 同时发育沟通油源断裂, 下部烃源岩层和深部储层为相对高气势区,挤压强 烈变形后断裂开启,天然气在强动力的作用下沿开 启断裂向上部运移,充注侧向砂体,最后在该处相对 低势区的断背斜、背斜聚集,加之该处保存条件较好 (付晓飞等,2004a,2004b;汤良杰等,2003),为此该 区成为了天然气的有利聚集区,现今已发现 KL2、 KS2 等天然气藏均位于该有利聚集区。克拉苏深部 区带南部为天然气运移的指向区,该区保存较好的 断背斜、背斜仍为较为有利的聚集区。北部单斜带 为天然气运移的指向区,但由于保存条件差,不利于 天然气的聚集,在该处地表发现早期油苗(赵孟军 等,2003)说明了该处对后期天然气的保存十分不 利。

4 结论

(1)强烈构造挤压后流体并非完全由最大主压 应力大的位置向最大主压应力小的位置流动,视构 造挤压后最大主压应力的减小方向和减小幅度而 定;如最大主压应力减小方向与增压前流体势减小 方向一致时,流体由最大主压应力大的位置向最大 主压应力小的位置加速流动,如最大主压应力减小 方向与增压前流体势减小方向不一致时,最大主压 应力减小幅度大到改变流体势的变化方向方可改变 流体的流体方向,否则流体会由最大主压应力小的 位置向最大主压应力大的位置流动。

(2)在相对封闭流体体系内,构造挤压下断裂 带为相对低应力区,不增压或与周围岩层相比增压 相对小,使得断裂带成为暂时相对低气势区,在地层 内流体向断裂带处汇聚,汇聚后断裂带气势增大,断 裂开启后深部流体沿断裂快速向上流动。 (3)构造挤压作用下,气势等值线发生明显弯 曲形成诸多局部高、低势区,库车前陆逆冲带盐下断 背斜、背斜上新世以来始终为相对低气势区,是喜马 拉雅晚期天然气运移的指向区,该处油源断裂发育, 构造强烈活动使得断裂开启,垂向上气势梯度大幅 度增大,增强了深部烃源岩层生成天然气沿开启断 裂垂向运移的动力。所以,库车前陆逆冲带盐下保 存较好的断背斜、背斜为喜马拉雅晚期天然气有利 聚集区。

致谢:在研究过程中得到中国石油勘探开发研 究院柳少波博士、方世虎博士、卓勤功博士、孟庆洋 博士、姜林博士、鲁雪松博士等和中国石油塔里木油 田公司勘探开发研究院的大力支持,审稿人及本刊 编辑均提出了宝贵修改意见,在此一并表示感谢!

参考文献 / References

- 陈荷立,罗晓容. 1988. 砂泥岩中异常高流体压力的定量计算及其 地质应用. 地质论评,34(1):54~63.
- 付晓飞,吕延防,孙永河. 2004a. 克拉2气田天然气成藏主控因素分析. 天然气工业,24(7):9~11.
- 付晓飞, 吕延防, 孙永河. 2004b. 库车坳陷北带天然气聚集成藏的 关键因素. 石油勘探与开发, 31(3):22~24.
- 李军,张超谟,王贵文,肖承文,欧阳健. 2004. 前陆盆地山前构造带 地应力响应特征及其对储层的影响. 石油学报,25(3):23~27.
- 李曰俊,吴根耀,雷刚林,张敬洲,王月然,刘亚雷. 2008. 新疆库车 新生代前陆褶皱冲断带的变形特征、时代和机制. 地质科学,43 (3):488~506.
- 李志明. 1997. 地应力与油气勘探开发. 北京:石油工业出版社.
- 梁狄刚,张水昌,赵孟军,王飞宇. 2002. 库车坳陷的油气成藏期. 科 学通报,47(增刊):56~63.
- 梁利喜. 2008. 深部应力场系统评价与油气井井壁稳定性分析研 究——以塔河油田为例. 四川:成都理工大学.
- 刘志宏,卢华复,贾承造,雷刚林,陈楚铭,王国强,范湘涛. 2000. 库 车再生前陆逆冲带造山运动时间、断层滑移速率的厘定及其意 义. 石油勘探与开发,27(1):12~15.
- 罗晓容. 2004. 构造应力超压机制的定量分析. 地球物理学报,47 (6):1086~1093.
- 皮学军,谢会文,张存,田作基,邹华耀.2002. 库车前陆逆冲带异常 高压成因机制及其对油气藏形成的作用.科学通报,47(增刊): 84~90.
- 石万忠,陈红汉,何生. 2007. 库车坳陷构造挤压增压的定量评价及 超压成因分析. 石油学报, 28(6):59~64.
- 石万忠,陈红汉,张希明,陈惠超. 2005. 阳霞凹陷超压成因及与油 气成藏关系. 地球科学,30(2):221~226.
- 孙明亮,柳广弟. 2007. 库车坳陷克拉2其藏异常压力成因分析. 中国石油大学学报(自然科学版),31(3):18~21.
- 宋岩,洪峰,夏新宇,高岗,傅国友. 2006. 异常压力与油气藏的同生 关系——以库车坳陷为例. 石油勘探与开发,33(3):303~308.
- 宋岩,柳少波,赵孟军,洪峰,方世虎. 2008. 中国中西部前陆盆地油 气分布规律及主控因素. 北京:石油工业出版社,7~74.
- 汤良杰,贾承造,金之钧,皮学军,陈书平,谢会文. 2003. 塔里木盆 地库车前陆褶皱带中段盐相关构造特征与油气聚集. 地质论 评,49(5):501~505.

- 汤良杰,万桂梅,王清华,金文正,杨文静. 2008. 库车秋里塔格构造 带中、新生代构造演化. 西南石油大学学报(自然科学版),30 (2):167~171.
- 唐鹏程,汪新,谢会文,雷刚林,黄少英. 2010. 库车坳陷却勒地区新 生代盐构造特征、演化及变形控制因素. 地质学报,84(12): 1735~1744.
- 万桂梅,汤良杰,金文正.2006. 库车坳陷西秋里塔格构造带新生代 沉降史分析. 吉林大学学报(地球科学版),36(增刊):19~23.
- 万桂梅,汤良杰,金文正,杨文静,余一欣,王清华,彭更新,雷刚林. 2007. 库车坳陷西部构造圈闭形成期与烃源岩生烃期匹配关系 探讨. 地质学报,81(2):187~194.
- 王红才,王薇,王连捷,孙宝珊,夏柏如. 2002. 油田三维构造应力场 数值模拟与油气运移. 地球学报,23(2):175~178
- 汪新,贾承造,杨树锋. 2002. 南天山库车褶皱冲断带构造几何学和 运动学. 地质科学,37(3):372~384.
- 汪新,王招明,谢会文,李世琴,唐鹏程,尹宏伟,李勇,黄少荣. 2010. 塔里木库车坳陷新生代盐构造解析及其变形模拟. 中国科学 (D辑),40(12):1655~1668.
- 王毅,宋岩,单家增. 2005. 构造应力在油气运聚成藏过程中的作用. 石油与天然气地质,26(5):563~570.
- 王震亮. 2007. 库车坳陷古流体动力与天然气成藏特征分析. 石油 与天然气地质, 28(6):809~815.
- 王震亮,张立宽,施立志,孙明亮. 2005. 塔里木盆地克拉2 气田异常 高压的成因分析及其定量评价. 地质论评,51(1):55~62.
- 余一欣,汤良杰,殷进垠,董立,王鹏万,万桂梅.2008.应用平衡剖 面技术分析库车坳陷盐构造运动学特征.石油学报,29(3):378 ~381.
- 曾联波,刘本明.2005. 塔里木盆地库车前陆逆冲带异常高压成因 及其对油气成藏的影响. 自然科学进展,12;1485~1491.
- 曾联波,谭成轩,张明利. 2004a. 塔里木盆地库车坳陷中新生带构造 应力场及其油气运聚效应. 中国科学(D辑),34(增刊1):98~

106.

- 曾联波,周天伟,吕修祥. 2002. 喜马拉雅运动对库车坳陷油气成藏 的影响. 地球科学,27(6);741~743.
- 曾联波,周天伟,吕修祥. 2004b. 构造挤压对库车坳陷异常地层压 力的影响. 地质论评,50(5):471~475.
- 张乐,蒋有录,姜在兴. 2007. 构造应力在克拉2气田成藏过程中的 作用. 天然气勘探与开发,30(1):1~4.
- 张明利,谭成轩,汤良杰,孙炜锋. 2004a. 库车坳陷克拉2气藏异常 高地层压力成因力学分析. 地球科学,29(1):93~102.
- 张明利,谭成轩,汤良杰,江万,杨美伶,曾联波. 2004b. 塔里木盆地 库车坳陷中新生代构造应力场分析. 地球学报,25(6):615~ 619.
- 赵靖舟. 2003. 前陆盆地天然气成藏理论与应用. 北京:石油工业出版社,128~258.
- 赵孟军, 卢双舫. 2003. 库车坳陷两期成藏及其对油气分布的影响. 石油学报, 24(5):16~20.
- 张仲培,王清晨,王毅,李铁军. 2006. 库车坳陷脆性构造序列及其 对构造古应力的指示. 地球科学,31(3):309~315.
- Berry F A F. 1973. High fluid potentials in California Coast Ranges and their tectonic significance. AAPG Bulltin, 57(7): 1219 ~ 1249.
- Hubbert M K. 1953. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions. AAPG Bulletin, 37(8): 1954 ~ 2026.
- Luo Xiaorong, Wang Zhaoming, Zhang Liqiang, Yang Wan, Liu Loujun. 2007. Overpressure generation and evolution in a compressional tectonic setting, the southern margin of Junggar Basin, northwestern China. AAPG Bulletin, 91(8): 1123 ~1139.
- Zeng Lianbo, Wang Hongjun, Gong Lei, Liu Benming. 2010. Impacts of the tectonic stress field on natural gas migration and accumulation: A case study of the Kuqa Depression in the Tarim Basin, China. Marine and Petroleum Geology, 27: 1616 ~ 1627.

Study on Impact of Tectonic Compression on Natural Gas Migration and Accumulation in Kuqa Foreland Basin

ZHANG Fengqi^{1,2)}, WANG Zhenliang²⁾, SONG Yan³⁾, ZHAO Mengjun³⁾, FAN Changyu²⁾, ZHAO Xuejiao²⁾

1) School of Petroleum Resources, Xi' an Shiyou University, Xi' an, 710065;

3) Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing, 100083

Abstract: The paper analyzes the impacts of intensive tectonic compression on natural gas migration and accumulation in the later Himalayan period, taking the Kela 2 gas field in the Kuqa foreland basin as an example. Tectonic compression makes the fluid pressure rapidly increase and changes the previous relatively stable fluid potential field. The fault zone is a lower stress zone and becomes a lower potential area because of not producing the fluid pressurization less than that of the surrounding rock, becomes the collecting zone of natural gas migration, which makes potential of the fault zone higher. Tectonic compression lets to the strata producing fractures and faults opening, makes the vertical gas potential gratient be greatly bigger at the same time and enhances the vertical migration force of natural gas from the lower source rock along the opening faults. The accumulation gas near the fault zones rapidly migrates towards upper strata along the opening faults and charges laterally the sand bodys located under the regional cap rock, accumulates in the lower gas potential area. The faulted anticline and the anticline located under the gypsum—salt strata in Kuqa foreland thrust belt is the lower gas potential area in the later Himalayan period, is also the place that has the opening oil source fault and

²⁾ Department of Geology, Northwest University, Xi' an, 710069;

地质论评

where the vertical gas potential gratient has be greatly bigger and has good preservation conditions, becomes the favorable gas accumulation area. The strong tectonic compression in the foreland basin of the central and western China has significant impact on the natural gas accumulation. So the study for impact of tectonic compression on natural gas accumulation has important theory and application for guiding oil and gas exploration in foreland basin.

Key words:tectonic compression; hydrodynamic force; foreland basin; natural gas migration and accumulation; tectonic stress field

中国与地质学有关主要学术期刊 2010 年度总被引频次

刊名	1	刊名	1	刊名	1	刊名	
岩石力学与工程学报	6968	中国海洋大学学报自然科	1424	南京大学学报自然科学版	809	矿产与地质	508
科学通报	5938	学版	1424	岩石矿物学杂志	803	科技导报	507
环境科学	5197	金属矿山	1397	中国土地科学	796	西北地震学报	506
地理学报	4899	中国地质	1364	物探与化探	790	中国地震	503
岩石学报	4558	地质科学	1345	大地构造与成矿学	786	物探化探计算技术	483
岩土力学	4404	干旱区研究	1344	系统工程学报	782	油气田地面工程	483
岩土工程学报	4221	石油实验地质	1300	西北大学学报自然科学版	780	西北地质	482
地球物理学报	4001	地质与勘探	1295	灾害学	777	工程勘察	481
中国科学 D	3998	西南石油大学学报自然科	1201	矿物岩石	760	海洋湖沼通报	470
石油学报	3183	学版	1201	海洋通报	753	浙江大学学报理学版	465
地质学报	3046	现代地质	1275	稀土	749	黄金	462
中国沙漠	3013	石油地球物理勘探	1269	西安石油大学学报自然科	740	地震地磁观测与研究	446
中国有色金属学报	2905	吉林大学学报地球科学版	1264	学版	740	沉积与特提斯地质	421
地理研究	2843	油气地质与采收率	1233	新疆地质	735	地震研究	418
石油勘探与开发	2809	新疆石油地质	1204	古地理学报	734	福州大学学报自然科学版	417
自然资源学报	2764	地震学报	1194	煤田地质与勘探	717	热带地理	415
地学前缘	2747	山地学报	1173	大庆石油学院学报	713	矿业研究与开发	407
天然气工业	2670	地震地质	1154	油田化学	701	湿地科学	391
煤炭学报	2603	中山大学学报自然科学版	1151	特种油气藏	682	桂林工学院学报	381
地理科学	2538	稀有金属	1094	矿物学报	673	昆明理工大学学报理工版	379
地球科学进展	2434	天然气地球科学	1082	国土资源遥感	657	古脊椎动物学报	342
第四纪研究	2326	中国稀土学报	1050	矿冶工程	638	微体古生物学报	308
沉积学报	2283	大地测量与地球动力学	1031	地层学杂志	624	矿产综合利用	301
地质通报	2177	北京大学学报自然科学版	1027	水资源保护	618	矿冶	300
冰川冻土	2087	长安大学学报自然科学版	1024	地球与环境	608	铀矿地质	297
硅酸盐学报	2078	石油物探	1011	钻井液与完井液	596	贵金属	296
地球物理学进展	2076	成都理工大学学报自然科	1010	有色金属	595	中国科学院研究生院学报	296
海洋与湖沼	2064	学版	1010	非金属矿	594	矿产保护与利用	277
石油与天然气地质	2047	水文地质工程地质	997	泥沙研究	593	中国非金属矿工业导刊	272
地质论评	1989	地质科技情报	970	中国海上油气	584	地质与资源	262
地球科学	1899	海洋地质与第四纪地质	955	古生物学报	583	地质找矿论丛	257
矿床地质	1818	高校地质学报	954	北京师范大学学报自然科	581	中国能源	255
大庆石油地质与开发	1762	煤炭科学技术	952	学版	501	岩土工程技术	244
石油化工	1742	遥感技术与应用	918	云南大学学报自然科学版	578	东华理工大学学报自然科	243
中国矿业大学学报	1651	地下空间与工程学报	917	地质力学学报	576	学版	210
地震工程与工程震动	1623	兰州大学学报自然科学版	911	中国岩溶	575	中国锰业	203
海洋学报	1594	岩矿测试	904	地震	571	华南地震	202
地球化学	1570	合肥工业大学学报自然科	898	中国科学技术大学学报		油气田环境保护	199
遥感学报	1539	学版	070	地球信息科学学报	570	粉煤灰综合利用	198
中国石油大学学报自然科 学版 1510	1510	中国矿业	840	油气储运	568	贵州大学学报自然科学版	178
	1510	石油钻采工艺	836	地球科学与环境学报	560	内陆地震	164
干旱区地理	1503	石油钻探技术	830	世界地质	535	铀矿冶	146
地球学报	1432	工程地质学报	818	矿物岩石地球化学通报	520	震灾防御技术	108

注: ① 2010 年度总被引频次。② 未包含港澳台地区。