

文章编号: 1000-0550(2003)01-0090-06

构造侧向挤压与砂岩成岩压实作用

——以塔里木盆地为例

寿建峰 朱国华 张惠良

(中国石油公司 杭州石油地质研究所 杭州 310023)

摘要 从塔里木盆地库车坳陷下侏罗统和西南坳陷白垩系的构造样式、古构造应力值与砂岩成岩压实作用之间相互关系的研究,明确提出了构造侧向挤压对砂岩成岩压实有重要的影响,它造成的压实减孔量可以是砂岩总压实减孔量的 2.5%~23.6%。库车坳陷克孜勒努尔-乌恰沟地区为断层转折褶皱,其南翼为高构造应力带,变形强烈,它引起的构造挤压减孔量为 5.6%~6.6%,占总压实减孔量的 17.6%~23.6%;而吐格尔明地区为断层传播褶皱,其南翼的构造变形较弱,构造挤压减孔量仅 1.9%~2.1%。西南坳陷七美干地区位于逆冲推覆构造带的中带,构造挤压减孔量为 4.9%,占总压实减孔量的 17.6%;而位于前锋带的同由路克地区受构造侧向挤压作用的影响很小。

关键词 砂岩压实 构造挤压 塔里木盆地

第一作者简介 寿建峰 男 1958 年出生 教授 油气储层地质学

中图分类号 p588.2 **文献标识码** A

通过对塔里木盆地库车坳陷下侏罗统和西南坳陷白垩系砂岩成岩作用的研究认为,一定成岩物质的砂岩成岩作用的影响因素有垂向上的埋藏成岩作用和侧向上的构造变形作用两方面。垂向上的埋藏成岩作用与盆地演化过程中的盆地热流、构造升降、流体性质及其与岩石的相互作用有关,是控制砂岩成岩作用速率和演化途径的主要因素。侧向上的构造变形作用指盆内和/或盆外传递于盆内的构造侧向应力改变或影响砂岩成岩压实进程和储集空间类型的作用,它主要以物理作用方式改变砂岩的形态和体积,并使砂岩的成岩压实演化具有突变性。目前,在我国对这一地质认识尚未见实例报道。罗元华等^[1]从有限元数学模拟的角度曾指出水平构造外力作用可使岩石的渗透率发生变化;寿建峰等^[2]在研究库车坳陷下侏罗统砂岩成岩作用时提出过构造侧向挤压对砂岩成岩压实有影响的初步认识。为了进一步明确这种认识,在南天山山前的吐格尔明、克孜勒努尔和乌恰沟露头剖面下侏罗统阿合组以及昆仑山山前的同由路克、塔木河、七美干和克里阳露头剖面白垩系克孜勒苏群砂岩浅钻取样约 2000 块,定向取样 49 块(图 1),从孔隙度、渗透率、铸体薄片以及由中国地质科学院地质力学开放研究实验室制作的 AE 法声发射和离子减薄透射电镜等古应力值测试资料研究了构造侧向挤压使岩石体积发生变化的作用。

1 构造侧向挤压作用问题的提出

库车坳陷下侏罗统阿合组砂岩的储集性质从东往西变化很大,即使在相同或相似的砂岩分选、泥质含量、胶结物含量、溶孔量和砂岩粒径的条件下,砂岩储集性质的变化也很大(图 2,详见寿建峰等,2001)^[2]。吐格尔明剖面(背斜南翼)砂岩孔隙度 15%~25%,渗透率 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \sim 1000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,以原生孔隙为主;克孜勒努尔和乌恰沟剖面砂岩孔隙度 2%~8%,渗透率一般小于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,以次生孔隙和裂缝-次生孔隙为主,但显微镜下次生孔隙的面孔率一般小于 2.5%。

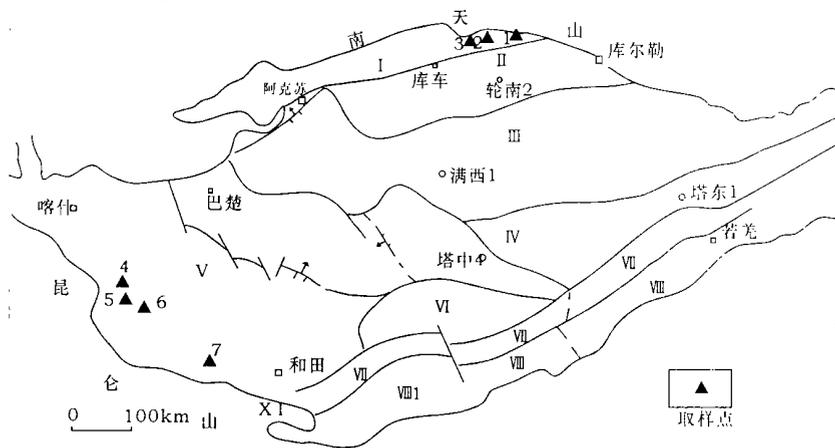
储集性质的这种变化是由压实、胶结和溶蚀作用引起的,其中,压实作用是主要的影响因素(表 1、图 3)。吐格尔明剖面砂岩的总减孔量为 25.8%,克孜勒努尔和乌恰沟剖面分别达 34.7% 和 34.9%。在砂岩总减孔量中,胶结减孔量为 2.58%~4.7%,占总减孔量的 7.4%~18.2%。吐格尔明剖面的胶结减孔量比克孜勒努尔和乌恰沟剖面高 2.1%;在消除胶结和溶蚀作用因素后,该区阿合组细中-粗中砂岩的压实减孔量为 21.1%~32.3%,占总减孔量的 81.8%~92.6%。但克孜勒努尔和乌恰沟剖面比吐格尔明剖面要高达 11.0%~11.2%。其它岩性的压实减孔量的变化特征见图 4。由此可知,相同条件下的克孜勒努尔和

表 1 库车坳陷下侏罗统阿合组细中-粗中砂岩减孔量一览表

Table 1 Porosity variations of medium to coarse sandstones of Ahe Formation of Lower Jurassic in Kuqa depression

地区	类型					
	原始孔隙度 (H_0) /%	今孔隙度 (H_p) /%	胶结物含量 (H_{cem}) /%	溶蚀量 (H_{dis}) /%	总减孔量 (H_b) /%	总压实减孔量 (H_{cop}) /%
吐格尔明	40	16.8	4.7	2.55	25.8	21.1
克孜勒努尔	40	7.9	2.58	2.58	34.7	32.1
乌恰沟	40	7.1	2.6	2.0	34.9	32.3

注: $H_0 = 20.9 + 22.90/S_0$ (S_0 为砂岩分选系数, Beard Weyl, 1973), H_p —岩芯柱实测孔隙度, H_{cem} , H_{dis} —铸体片点计法面孔率, $H_b = H_0 - H_p + H_{dis}$, $H_{cop} = H_0 - H_{p1} - H_{cem} + H_{dis}$



I. 库车坳陷; II. 塔北隆起; III. 北部坳陷; V. 西南坳陷; VI. 塘古孜巴斯坳陷; VII. 塔南隆起; VIII. 东南坳陷
 取样位置: 1. 吐格尔明, 2. 克孜勒努尔, 3. 乌恰沟, 4. 同由路克, 5. 塔里木河, 6. 七美干, 7. 克里阳

图 1 塔里木盆地构造区域及取样位置图

Fig. 1 Location of drilling samples in the study area

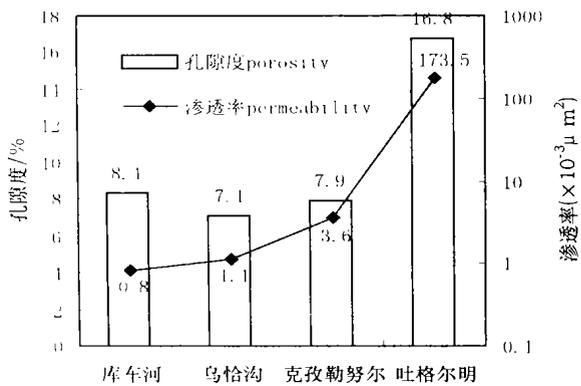


图 2 库车坳陷下侏罗统阿合组细中-粗砂岩孔渗对比图

Fig. 2 Comparison diagram of sandstone porosity and permeability of Lower Jurassic in Kuqa depression

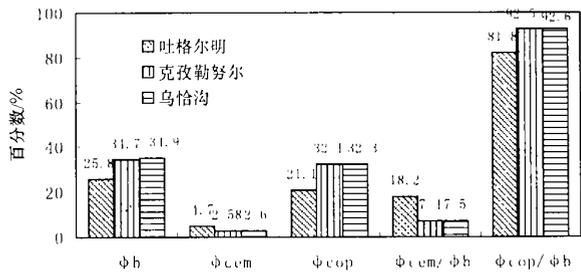
乌恰沟剖面的砂岩压实作用也要显著强于吐格尔明剖面

砂岩压实减孔量的一部分是由垂向上的埋藏成岩压实作用引起的。为了计算垂向压实减孔量, 首先求得吐格尔明剖面阿合组的古埋藏深度为 3 800 m, 克孜勒努尔、乌恰沟剖面为 4 800 m^[2]; 同时, 选取构造变形

弱。砂岩岩石成分和结构较相似的塔里木盆地轮南地区下侏罗统 3 500~4 500 m 深度区间细中-中粗岩屑砂岩的压实率 (0.5% /100 m), 以及用 Lundgard^[3] 的砂岩压实减孔量计算公式:

$$COPI = P_i - \{ (100 - P_i) / (100 - P_{mc}) \} \times P_{mc}$$

上式中, P_i —原始孔隙度 %, P_{mc} —负胶结物孔隙



H_b 总减孔量 (%), H_{cem} 胶结减孔量 (%), H_{cop} 压实减孔量 (%),
 H_{cem}/H_b 胶结减孔量占总减孔量百分比 (%),
 H_{cop}/H_b 压实减孔量占总减孔量百分比 (%)

图 3 库车坳陷下侏罗统阿合组砂岩压实和胶结量对比图

Fig. 3 Comparison of sandstone porosity of loss to compaction and to cement in Kuqa depression

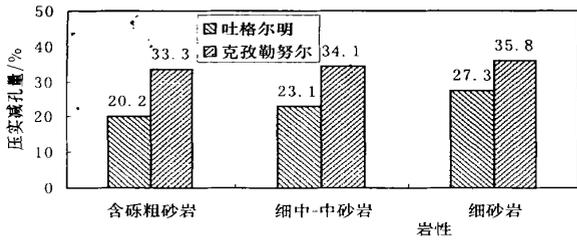


图 4 库车坳陷下侏罗统阿合组不同岩性的砂岩压实减孔量变化特征

2 构造样式与砂岩成岩压实的关系

塔里木盆地库车坳陷为南天山山前的中、新生代前陆盆地,喜马拉雅期是前陆盆地变形的主要时期。侏罗纪以来的主要构造变形期有白垩纪末、晚第三纪中新世和上新世等 3 期^[4,5]。西南坳陷为西昆仑山山前的前陆盆地,晚第三纪至第四纪的构造变形作用也十分强烈^[4]。

地表上构造变形强度与砂岩成岩压实和储集性质之间有良好的对应关系。库车坳陷吐格尔蒙地区为断层传播褶皱^[6],背斜南翼的构造变形较弱,地层倾角约 30°,未发育构造裂缝,对应较低的砂岩压实减孔量和较高的砂岩孔隙度;而背斜北翼的构造变形明显加强,地层倾角约 40°~ 60°,砂岩压实减孔量比南翼高 9.0% (图 5);克孜勒努尔和乌恰沟地区为断层转折褶皱^[6],是区域构造应力的集中区,构造变形十分强烈,地层倾角从 60°至倒转,地表构造剪切裂缝发育,显微镜下也可观察到剪切裂缝,它对应很高的砂岩压实减孔量和极低的砂岩孔隙度。从地层的变形程度分析,南翼的构造变形强度要相对强于北翼 (见图 5)。

度 % ,来计算垂向压实减孔量。结果是吐格尔蒙剖面为 19.0% ,与表 1 中的实际压实减孔量仅差 2.1% ;而克孜勒努尔-乌恰沟剖面为 24.0% ,小于实际压实减孔量达 8.1% ~ 8.3% 。此外,吐格尔蒙剖面与克孜勒努尔-乌恰沟剖面之间 5.0% 的垂向压实减孔量之差也解释不了 11.0% ~ 11.2% 的实际压实减孔量之差。显然,仍有 6.0% ~ 6.2% 的压实减孔量差值是由其它因素造成的。

这种现象在西南坳陷 (昆仑山山前) 也存在。该区白垩系克孜勒苏群发育分选较好,泥质含量小于 3.0% 的细粒岩屑砂岩,其压实作用和储集性质在平面上变化较大。同由路克剖面细砂岩的视压实率为 16% ~ 36% ,孔隙度 16.7% ;塔木河剖面细砂岩的视压实率约 68% ,孔隙度 8.8% ;七美干剖面细砂岩的压实作用极强,碎屑颗粒以线和嵌合接触为主,石英颗粒表面的破裂纹发育,视压实率大于 87% ,砂岩孔隙度仅 3.9% 。据构造变形相对弱的同由路克、塔木河和克里阳等地区的砂岩孔隙度与深度的变化关系,求得该区砂岩孔隙度随深度的降低率为 0.35% /100 m。则在消除胶结和溶蚀作用因素以及相同粒度条件下,同由路克剖面细砂岩的垂向压实减孔量为 19.3% ,七美干剖面为 22.9% 。即同由路克剖面的砂岩总压实量是由垂向上的压实作用引起的,而七美干剖面仍有 4.9% 的砂岩压实量是由其它因素产生的 (表 2)。

表 2 西南坳陷白垩系克孜勒苏群砂岩成岩演化参数

Table 2 Diagenetic evolution parameters of the sandstones of Kezilesuer system in Xinan depression

剖面	原始孔隙度 %	胶结量 %	溶孔量 %	今孔隙度 %	总压实量 %	垂向压实量 %
同由路克	40	6.8	3.3	16.7	19.8	19.3
七美干	40	9.1	0.8	3.9	27.8	22.9

注:总压实量 = 原始孔隙度 - 胶结量 - 今孔隙度 + 溶孔量;同由路克剖面垂向压实量 = 5 500 m × 0.35% /100 m,七美干剖面垂向压实量 = 6 550 m × 0.35% /100 m

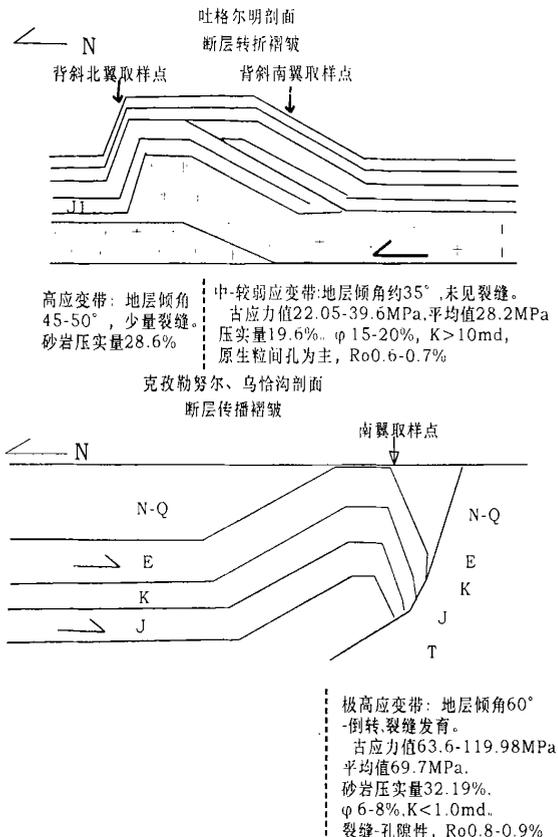


图 5 库车坳陷下侏罗统构造样式与砂岩储层特征

Fig. 5 Structure styles and its relation to sandstone reservoir features of Lower Jurassic in Kuqa depression

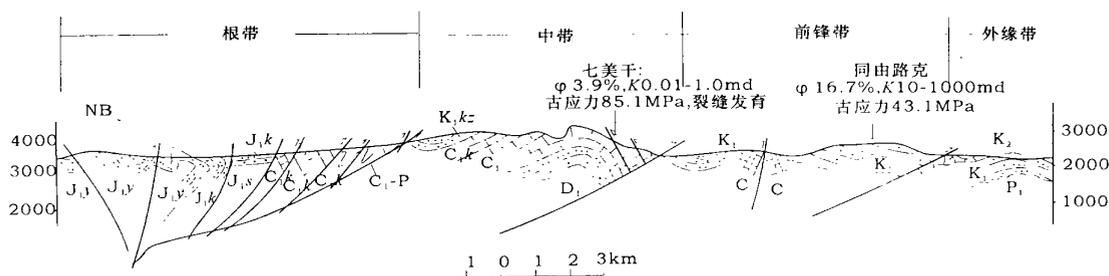


图 6 西南坳陷(过七美干剖面)构造分带与砂岩孔渗关系

Fig. 6 Structure styles and its relation to sandstone qualities in Xinan depression

西南坳陷同由路克剖面位于昆仑山前逆冲推覆构造带的前锋带(图 6),地层倾角较小,未发育构造裂缝,显示较弱的构造变形作用,因而砂岩的成岩压实作用也就较弱,孔隙度高达 15%~25%;七美干剖面位于逆冲推覆构造带的中带,地层倾角大,地表上构造剪切裂缝发育,石英颗粒的显微破裂纹常见,反映较强的构造变形作用,从而砂岩的成岩压实作用强,孔隙度仅 4%~8%。

3 古构造应力值与砂岩储集性质的定量关系

库车坳陷下侏罗统细中-中粗砂岩的 AE 法声发射古应力值测试结果表明该区侏罗纪以来经历了 4 次古构造运动,各期的最大古应力值表现为由早到晚逐渐增大,在平面上则为由东往西变大的特点(表 3)。它们与砂岩的成岩压实和储集性质有良好的对应关系(表 4),吐格尔明剖面平均古构造应力为 19.8 MPa,对应 16.8% 的砂岩孔隙度;克孜勒努尔剖面平均古构造应力为 62.6 MPa,对应 7.9% 的砂岩孔隙度。如消除该区下侏罗统阿合组的埋藏深度比吐格尔明剖面大 1 000 m 左右所引起的垂向压实量^[2],则它所对应的孔隙度为 12.9%;乌恰沟剖面平均古构造应力为 112.3 MPa,对应 7.1% 的砂岩孔隙度。如消除埋藏史影响,则它所对应的孔隙度也仅 12.1%。因此,在消除埋藏史或垂向压实作用因素的情况下,克孜勒努尔和乌恰沟剖面的砂岩孔隙度仍比吐格尔明剖面低 3.9%~4.7%。

利用 McCormick (1977)在实验的基础上总结的石英晶体的位错密度与差应力值之间的关系式计算古应力值的大小,其公式为:

$$\Delta \epsilon = 1.64 \times 10^{-4} d_0^{0.66}$$

其中, d 为变形石英晶体的位错密度, $\Delta \epsilon$ 为导致石英晶体变形的差应力值。

具体做法是用 Smith-Guthman 法(即厚度-线条法)来统计位错密度(d),即把许多条随机定向的总长为 L 的直线标绘在显微照片范围内(面积为 A , 体积为 R , 厚度 t 为 0.00005 cm),这些直线与位错的交点数为 N , 则: $R_0 = \pi NA/2L$, 可简化为 $d = 2N/Lt$ ^[7,8]。

利用这一方法来计算由离子减薄透射电镜测定的岩石古构造应力值,并与砂岩的储集性质建立定量关系,结果如图 7-图 9 所示。对库车坳陷下侏罗统阿合组砂岩,它们之间有以下关系式:

$$H = -0.1792 \times P + 21.716, K = 1147.79P^{-1.3995}$$

式中, H —砂岩孔隙度 $\%$, K —砂岩渗透率 ($\times 10^{-3} \mu m^2$), P —古构造应力值 (MPa)。用此关系式可求得吐格尔明剖面在平均古构造应力为 28.3 MPa 时的砂岩孔隙度为 16.7%,与实测值(16.8%)十分接近;克孜勒努尔在平均古构造应力为 74.5 MPa 时的孔隙度为 8.4%,则吐格尔明剖面与克孜勒努尔剖面之间在古构造应力差值约为 46.2 MPa 的侧向应力作用下的孔隙度差值为 8.4%。该差值应包含两地区之间由埋藏史不同引起的孔隙度差异。如消除埋藏史的影响因素,则其差值为 3.4%,与前述的 AE 法声发射估计值相似,而低于前述的地质分析估算值。此外,寿

表 3 库车坳陷下侏罗统地表岩石 AE 法声发射古应力值测试结果一览表

Table 3 Test results of sandstone paleostructure stress by AE method in Kuqa depression

测点编号	样品位置	岩性	时代	各期幕古应力最大主应力有效值 /MPa	记忆的主要构造运动期(幕)次
T AII - Y-1	吐格尔明	砂岩	J ₁	16.0 23.5	2
K VIII - 6	克孜勒努尔	砂岩	J ₁	36.5 54.3 74.4 85.9	4
K A - 1		石英砂岩	J ₁	35.3 55.4 74.7 84.3	4
W KG - 1	乌恰沟	石英砂岩	J ₁	52.5 106.7 133.9 156.2	4

注: T AII - Y-1 样品有裂纹,只测得 2 期构造运动期次

表 4 库车坳陷下侏罗统 AE法声发射古应力值与砂岩储集性质关系

Table 4 sandstone qualities and its relation to paleostructure stress by AE method in Kuqa depression

地区	吐格尔明沟	克孜勒努尔沟	乌恰沟
平均古构造应力值 /MPa	19.8	62.6	112.3
平均砂岩孔隙度 /%	16.8	7.9	7.1
消除埋藏史影响的孔隙度 /%	16.8	12.9	12.1
平均砂岩渗透率 $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	173.5	3.6	1.1

建峰等^[9]提出了砂岩热成熟度 (TTI)与孔隙度的定量关系,可用于预测受垂向上成岩压实作用控制的砂岩孔隙度,在砂岩胶结量和溶蚀量较小或平面上变化很小的情况下可用于对比不同地区垂向压实量的变化。结果表明,吐格尔明剖面下侏罗统砂岩孔隙度约 19.0%,与实测值较接近,而高于实测值的部分(约 1.9%)反映了构造侧向挤压作用的压实减孔量;克孜勒努尔剖面为 12.0%~13.0%,高于实测值约 5.6%~6.6%,它代表该区构造侧向挤压作用产生的砂岩压实减孔量。

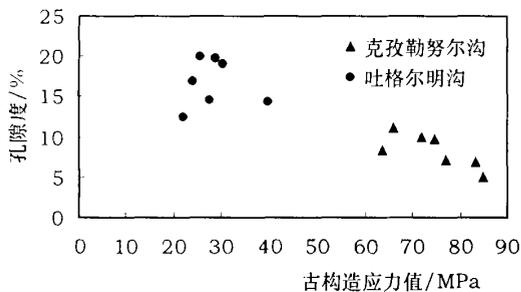


图 7 库车坳陷下侏罗统透射电镜测定的古构造应力值与砂岩孔隙度关系图

Fig. 7 Sandstone porosity and its relation to paleostructure stress by emission electronic microscope

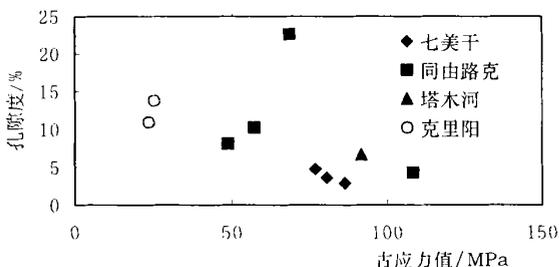


图 9 西南坳陷白垩系透射电镜古构造应力值与细砂岩孔隙度关系

Fig. 9 Fine sandstone porosity and its relation to paleostructure stress by emission electronic microscope

七美干剖面的平均古构造应力值为 85.1MPa,同由路克剖面为 43.1MPa

从图 9 可获得两剖面之间在此古构造应力差作用下的砂岩孔隙度差值为 6.3% (回归公式: $H = -0.1489 \times P + 17.175$, 式中, H 为孔隙度 (%), P 为古构造应力值 (MPa))。消除两剖面之间埋藏史、胶结量和溶蚀量的影响 (见表 1), 即可知七美干剖面受较强的构造侧向挤压作用比同由路克剖面多损失了 2.8% 的砂岩孔隙度 ($= 6.3 - \text{胶结量差值} - \text{垂向压实量差值} + \text{溶蚀量差值}$), 它略低于上述的地质分析估算值。

从上述讨论可知,塔里木盆地库车坳陷和西南坳陷中,上新世以来强烈的构造挤压对砂岩的成岩压实产生了明显的影响。构造侧向挤压较弱区的吐格尔明和同由路克等地区的构造侧向挤压减孔量为 0.5%~2.1%, 占总减孔量的 2.5%~7.8%; 而构造侧向挤压强烈区的克孜勒努尔、乌恰沟和七美干等地区的构造侧向挤压减孔量为 4.9%~8.2%, 占总减孔量的 17.6%~23.6%。构造挤压减孔量明显的受控于构造样式和局部构造应力的大小。如为断层传播褶皱分布区,其影响较小,而为断层转折褶皱时,则其影响明显。

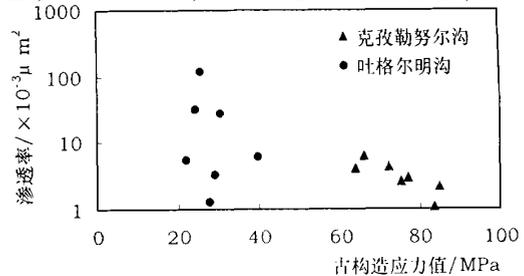


图 8 库车坳陷下侏罗统透射电镜测定的古构造应力值与砂岩渗透率关系图

Fig. 8 Sandstone permeability and its relation to paleostructure stress by emission electronic microscope

变大;逆冲推覆构造带的根带和中带受构造侧向挤压作用的影响较大,至前锋带已变得很弱;此外,同一构造褶皱中,陡翼受到的构造侧向挤压作用要明显强于缓翼。

参考文献 (References)

- 1 罗元华,孙雄.不同应力状态下地层渗透系数的变化及其对流体迁移影响的数值模拟研究[J].地球学报,1998,19(2):144~149 [Lou Y, Sun X. Variation of permeability coefficient of strata under different stresses and their numerical models for their influence on fluid migration[J]. Acta Geoscientia Sinica, 1998, 19(2): 144~149]
- 2 寿建峰,斯春松,朱国华等.塔里木盆地库车坳陷下侏罗统砂岩储集层性质的控制因素[J].地质论评,2001,47(3):273~277 [Shou J,

- Si C, Zhu G, *et al.* The Control Factors of properties of lower Jurassic Sandstone Reservoirs in Kuqa Depression Tarim Basin[J]. *Geologic Review*, 2001, 47(3): 272~ 277]
- 3 Amthor J E, Okkerman J. Influence of early diagenesis on reservoir quality in Rotliegendes sandstones, Northern Netherlands [J]. *AAPG Bulletin*, 1998, 82(2): 2246~ 2265
- 4 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997. 348~ 364 [Jia C. Structure and oil-gas in Tarim basin, China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997. 348~ 364]
- 5 刘本培. 西南天山构造格局与演化 [M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1997. 231~ 215 [Liu B. Tectonic pattern and evolution of the southwestem Tianshan [M]. Beijing: Geological Press, 1997. 231~ 215]
- 6 刘志宏, 卢华复, 李西建等. 库车前陆盆地的构造演化 [J]. *地质科学*, 2000, 35(4): 482~ 492 [Liu Z, Lu H, Li X, *et al.* Tectonic evolution of Kuqa rejuvenated foreland basin [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 2000, 35(4): 482~ 492]
- 7 姜光熹, 刘兆霞. X射线岩组学 [M]. 北京: 地质出版社, 1997. 131~ 143 [Jiang G, Liu Z. X-ray petrofabrics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997. 131~ 143]
- 8 胡玲. 显微构造地质学概论 [M]. 北京: 地质出版社, 1998. 137~ 141 [Hu L. A panorama of microstructure geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998. 137~ 141]
- 9 寿建峰, 朱国华. 砂岩储层孔隙保存的定量预测研究 [J]. *地质科学*, 1998, 32(2): 244~ 249 [Shou J, Zhu G. Study on quantitative prediction of porosity preservation in sandstone reservoirs [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1998, 32(2): 244~ 249]
- 6 刘志宏, 卢华复, 李西建等. 库车前陆盆地的构造演化 [J]. *地质科*

Lateral Structure Compression and Its Influence on Sandstone Diagenesis— A Case Study from the Tarim Basin

SHOU Jian-feng ZHU Guo-hua ZHANG Hui-liang

(Hangzhou Geology Institute, CNPC, Hangzhou 310023)

Abstract The article presents the viewpoint that lateral structure compression had an important effect on sandstone diagenetic compaction through the study on the relationship among the structure deformation, paleostructure stress and sandstone diagenetic compaction of lower Jurassic of Kuqa depression and Cretaceous of Xinan depression in Tarim Basin. The porosity loss caused by lateral structure compression was 2.9%~ 23.6% percentage of bulk porosity loss of sandstones. The porosity loss to structure compression of Kezilesuer and Wuqiaguo areas were 5.6%~ 6.6% and 17.6%~ 23.6% percentage of bulk porosity loss of sandstones because of heavy structure deformation, and one of Tugeeming area was 1.9%~ 2.1% owing to weak structure deformation in Kuqa depression. Qimeigan area in Xinan depression, located in the middle belt of thrust nappe, had porosity loss to structure compression of 4.9% and 17.6% percentage of bulk porosity loss of sandstones, and Tongyouluke area, located in the front belt of thrust nappe, was very small porosity loss to structure compression.

Key words sandstone compaction, structural compression, Tarim basin