

The Assessment Criterion and Application of Structural Fractures in Tight Sandstone in the Eastern Kuche Basin

Haijun Yang¹, Guiting Hou^{2*}, Zhongyao Xiao¹, Shaoying Huang¹, Kangxu Ren¹, Wei Ju², Peng Zhang², Wentao Zhao², Yan Zhan²

¹Institute of Exploration and Development, Tarim Oil Field, Kurler

²School of Earth and Space Sciences, Center of Oil and Gas Research, Peking University, Beijing

Email: *gthou@pku.edu.cn

Received: May 11th, 2012; revised: May 23rd, 2012; accepted: Jun. 2nd, 2012

Abstract: The tight gas and tight oil are recently paid more attention in the unconventional petroleum exploration, in which the assessment of structural fractures is key problem. The assessment criterion of structural fractures in tight sandstones is proposed based on the logging analysis and measurement of cores in 12 wells, and the criterion is applied in the assessment of tight sandstones. The structural fractures in tight sandstone are more developed in the Ahe Formation than the Yangxia and Kezilenuer Formations. The structural fractures in tight sandstone in Yinan area are more developed than the other area. The fracture density is highest in Yinan 2 well, and not filled, but the fracture density is lower in Yinan 5 well, and most of them are filled.

Keywords: Tight Sandstone; Structural Fractures; Kuche Basin; Fracture Density; Assessment

致密砂岩构造裂缝的评价标准及应用

——以库车坳陷东部致密砂岩为例

杨海军¹, 侯贵廷^{2*}, 肖中尧¹, 黄少英¹, 任康绪¹, 鞠玮², 张鹏², 赵文韬², 詹彦²

¹塔里木油田勘探开发研究院, 库尔勒

²北京大学地球空间学院, 北京大学石油天然气研究中心, 北京

Email: *gthou@pku.edu.cn

收稿日期: 2012年5月11日; 修回日期: 2012年5月23日; 录用日期: 2012年6月2日

摘要: 近些年来, 致密砂岩气和致密砂岩油成为国内外非常规油气勘探的热点, 其中致密砂岩的裂缝发育程度评价是关键问题。本文从塔里木盆地北部的库车坳陷东部中下侏罗统致密砂岩岩心的构造裂缝测量入手, 结合12口井的测井资料统计分析, 通过致密砂岩岩心的构造裂缝面密度统计分析, 提出了针对致密砂岩的构造裂缝评价标准, 并利用这个评价标准对研究区致密砂岩构造裂缝发育程度进行了系统评价。认为阿合组的致密砂岩构造裂缝比阳霞组和克孜勒努尔组的更发育, 依南地区致密砂岩的构造裂缝相对比其他地区更发育, 尤其依南2井区的构造裂缝面密度较高, 且绝大多数未充填, 而依南5井区的构造裂缝面密度很低, 且大多数被充填成为无效裂缝。

关键词: 致密砂岩; 构造裂缝; 库车坳陷; 面密度; 评价

1. 引言

致密砂岩是指低孔隙度低渗透率的砂岩, 通常指孔隙度小于10%且渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^{2[1-3]}$ 。致密砂岩气是指富集在致密砂岩内的天然气, 通常无自

*通讯作者。

然产能,需要通过人工压裂技术才能产出具有经济价值的天然气。一些致密砂岩气分布在盆地深部,故亦称“深盆气”,会发育岩性圈闭气藏和水封型圈闭气藏等^[4]。

库车坳陷内广泛分布着致密砂岩气藏,如:大北气田、迪那气田,占已发现气藏的80%以上,相继发现了一些致密常规气藏和致密深盆气藏^[5]。

库车坳陷东部的中下侏罗统致密砂岩储层非均质性非常强,孔隙度和渗透率较低且变化较大,构造裂缝在致密砂岩储集性方面占重要地位^[6-10]。目前,库车坳陷东部的中下侏罗统致密砂岩的构造裂缝分布规律尚不清楚,根据已有的12口井(钻及中下侏罗统致密砂岩)的岩心进行构造裂缝测量统计分析,进行库车坳陷东部中下侏罗统致密砂岩构造裂缝的综合评价十分必要。

在构造裂缝评价的时候,不同地区有不同的评价标准,因此要针对研究区的具体问题,提出一个适合本研究区的构造裂缝评价标准。

本文以库车坳陷东部的12口井岩心裂缝实测数据位基础,针对反映裂缝发育程度的主要参数——裂缝面密度开展综合分析,提出基于裂缝面密度的裂缝发育程度的评价标准,并对研究区的裂缝面密度、倾角和充填程度进行综合评价,从而指导研究区的致密砂岩油气勘探开发。

2. 岩心构造裂缝评价的标准

岩心构造裂缝评价时要考虑的裂缝要素包括:裂缝性质、产状、开度、充填性、裂缝孔隙度和裂缝密度等等,其中裂缝密度是表征构造裂缝发育程度的最重要的参数。岩心构造裂缝的观察与测量统计是岩心构造裂缝综合评价的基础。岩心构造裂缝的观察与测量包括裂缝的性质、倾角、长度、开度、充填程度和充填物。构造裂缝的评价标准对于不同地区有所不同,不能用统一的评价标准去评价不同地区的裂缝发育程度,因为不同地区裂缝发育程度差异很大,而且勘探开发时对裂缝发育程度的要求也不一样,例如:在某地区认为未达到标准的裂缝发育程度,在另一个地区可能就是较高的裂缝发育程度,因此,建立裂缝发育程度的评价标准关键是要具体地区具体分析,目的是要建立一个评价标准能把研究区的裂缝发育程度划分出等级来。

2.1. 裂缝的性质

构造裂缝按照力学性质可分为张裂缝、剪裂缝、张剪裂缝和压裂缝等,其中张裂缝和张剪裂缝能够提高致密砂岩的储集性能。张裂缝面不平整、形态不规则、不切穿颗粒、延伸不远。剪裂缝常常呈共轭节理形式出现、裂缝面平直光滑、形态较规则、常具有切穿颗粒现象、延伸长度大且常穿层发育、裂缝面上可见擦痕和阶步。张剪缝是张应力和剪应力综合作用下形成的一种复合裂缝,兼具张性缝和剪性缝的特征,自然界比较常见。

2.2. 裂缝的产状

裂缝的产状包括倾向和倾角,在裂缝面不易测量的情况下,通常用裂缝的走向,可以编制某剖面或测量面的裂缝走向玫瑰图,反映该剖面或测量面上构造裂缝的优势方位。

高角度裂缝(裂缝面与底层层面夹角大于 75°)一般能起到贯穿储层孔隙喉道,提高储层渗透率及改善储层渗流能力的作用。

2.3. 裂缝开度

裂缝开度指裂缝的张开度或宽度,由裂缝壁之间的距离来表示,单位通常用毫米(mm),多数介于 $0\text{ mm} \sim 5\text{ mm}$ 。开度大于 0.1 mm 为宏观裂缝,开度小于 0.1 mm 为微裂缝。

2.4. 裂缝的强度

裂缝强度($Fint$)反映裂缝发育程度与层厚之间关系的一种参数,指裂缝频率(FF)与岩层厚度频率(THF)的比值,为无量纲,这里的裂缝频率即裂缝密度,厚度频率是裂缝的穿某厚度层的数目与层厚的比值,因此,构造裂缝的面密度越大,穿层的厚度越大,构造裂缝的强度就越大。裂缝强度公式如下(高尔夫-拉特,1989):

$$Fint = FF/THF$$

法国著名的裂缝油气藏研究专家范高尔夫-拉特根据裂缝强度提出了一个裂缝评价方案(表1)^[11]。

2.5. 裂缝的充填性

构造裂缝的充填性包括充填程度和充填物类型

Table 1. Critical standard of fracture strength
表 1. 裂缝强度评价标准^[11]

裂缝强度分级	裂缝强度大小
高强	>50
强	10~50
中强	5~10
中	0.1~5
弱	0.05~0.1

两个方面。充填程度包括：完全充填、半充填和未充填三种类型，其充填程度由强到弱，有效性由差到好。完全充填的裂缝就是无效裂缝，而只要未全部充填就仍然是有效裂缝，包括半充填和未充填的裂缝。充填物类型主要指裂缝充填物的成分，如：硅质、钙质、泥质和铁质充填等。一般硅质充填物较紧密，渗透率低；泥质充填物较疏松，渗透率相对较高；铁质和钙质充填物疏松程度和渗透率介于二者之间。

2.6. 裂缝长度

裂缝长度指裂缝在平面延伸和纵向切割地层厚度两个方面的延伸长度，它在裂缝孔隙度中约占 2/3 的比重，十分重要。地下微小裂缝纵向切割地层厚度可在岩心观测中获得。裂缝长度与裂缝类型有关，区域剪裂缝延伸很长，可切割各种局部构造；与断层和褶皱相关的裂缝延伸长度与该构造的规模大小有关。

2.7. 裂缝的孔隙度

裂缝的孔隙度指裂缝体积与岩块总体积的比值，其计算公式为(高尔夫-拉特，1989)：

$$\phi_f = \frac{V_f}{V_r} \times 100\%$$

式中 ϕ_f 为裂缝孔隙度，单位为%； V_f 为岩块上裂缝体积，单位为 cm^3 ； V_r 为岩块总体积，单位为 cm^3 。

裂缝孔隙度可以通过测井资料的处理获得。我们根据库车坳陷东部中下侏罗统测井资料处理获得的裂缝孔隙度值域范围，提出一个裂缝孔隙度评价方案(表 2)。

2.8. 裂缝密度

在岩心的构造裂缝发育程度表征参数方面虽然包括裂缝密度、开度、强度和充填程度等等，但其中最重要的参数也是最实用的参数就是裂缝密度。在岩心从地下采集上来以后，通常开度等参数不真实了，

Table 2. Critical standard of core fracture porosity
表 2. 岩心构造裂缝孔隙度评价标准

砂岩裂缝孔隙度级别	孔隙度大小(%)
极高(I)	>1
较高(II)	0.5~1
中等(III)	0.1~0.5
较低(IV)	0.05~0.1
低(V)	<0.05

但裂缝密度相对比较稳定，而且在评价裂缝发育程度方面裂缝密度是最直观的表征参数。本文重点开展研究区的裂缝密度评价工作。

裂缝密度是指裂缝出现的频率，能够直接表征裂缝发育程度，包括线密度、面密度和体密度三种，单位均为 1/m。

线密度(f_l)是与某测量线段相交的裂缝的数目(N)和此线段长度(L)的比值，用 f_l 表示(高尔夫-拉特，1989)。

$$f_l = N/L$$

面密度(f_s)是某测量截面上所有裂缝的长度之和 $\sum l_n$ 与测量截面面积 S 的比值，用 f_s 表示(高尔夫-拉特，1989)。

$$f_s = \sum l_n / S$$

体密度(f_v)是某测量体积内所有裂缝表面积之和 $\sum S_n$ 与测量体体积 V 的比值，用 f_v 表示(高尔夫-拉特，1989)。

$$f_v = \sum S_n / V$$

其中，体密度最能够真实地反映裂缝的密度，即反映裂缝的发育程度，但体密度很难测量；线密度最容易测量，但不能完整地反映裂缝的发育程度，本文我们采用面密度来表征裂缝密度，相对而言，面密度既容易测量，又能较完整地反映裂缝的发育程度^[12]。本文根据库车坳陷东部中下侏罗统致密砂岩构造裂缝面密度的值域范围，提出一个基于裂缝面密度的致密砂岩构造裂缝评价标准(表 3)。

3. 库车坳陷东部中下侏罗统构造裂缝分布规律

库车坳陷是位于天山南麓、塔里木盆地北部的一个陆内挠曲盆地，北接天山造山带，南邻塔北隆起带。库车坳陷东部以压性构造为主，主要包括逆断层和褶皱(图 1)。库车坳陷东部发育中下侏罗统致密砂岩，为

Table 3. Critical standard of core fracture density in Kuche subbasin

表 3. 库车坳陷岩心裂缝面密度评价标准

裂缝面密度级别	裂缝面密度(1/m)
极高(I级)	>
较高(II级)	1~5
中等(III级)	0.5~1
较低(IV级)	0.1~0.5
低(V级)	<0.1

湖湘坳陷沉积, 为致密砂岩, 主要包括三组地层: 中侏罗统的克孜勒努尔组(J_{2k})、下侏罗统的阳霞组(J_{1y})和阿合组(J_{1a}), 其中, 阿合组相对最发育构造裂缝 [13,14]。

根据以上所述的构造裂缝各项特征参数的测量, 本文得到 12 口岩心中下侏罗统取心段的裂缝面密度, 并进一步计算得到各井的克孜勒努尔组、阳霞组和阿

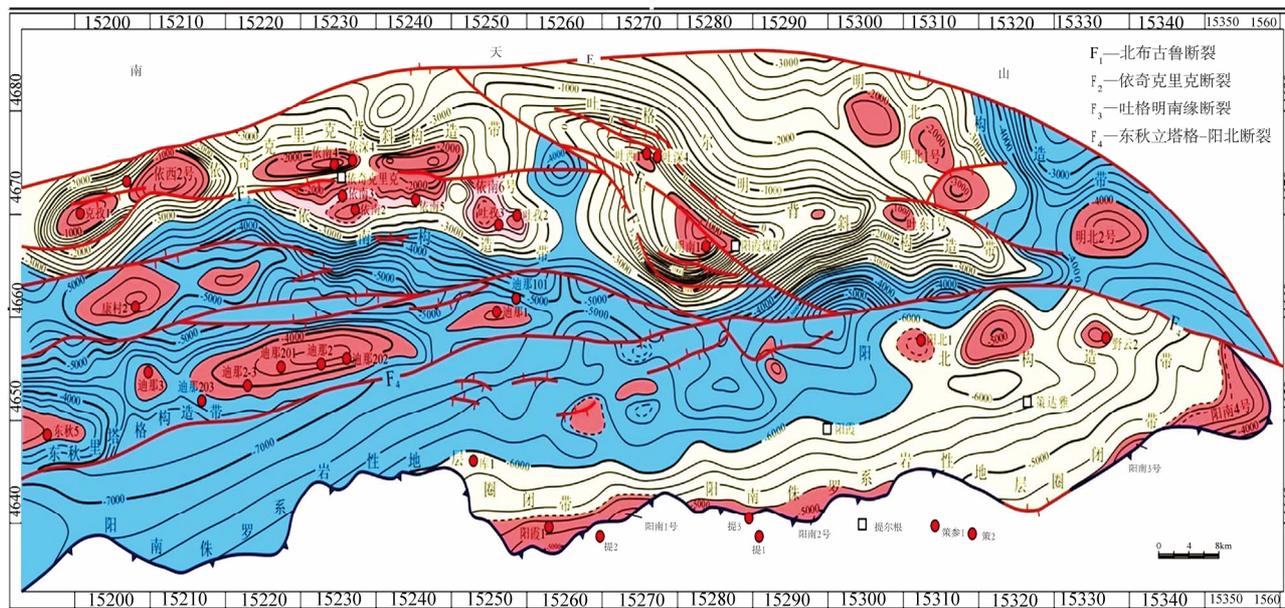


Figure 1. The structural geology of the Eastern Kuche Basin (unit: meter)
图 1. 库车坳陷东部地质构造图等值线为侏罗系顶部的埋深等值线(单位: 米)

合组的加权裂缝面密度(单位: 1/m)。

通过对库车坳陷东部 12 口取心井中下侏罗统岩心段构造裂缝的加权面密度进行统计, 发现构造裂缝加权面密度最大的的为依南 2 井阿合组(加权裂缝面密度为 7.03), 其它取心井构造裂缝面密度较大的层系还包括克孜 1 井的克孜勒努尔组(裂缝密度 3.22)、阳霞组(裂缝密度 2.12)和阿合组(裂缝密度 3.25)、依南 2C 井的阿合组(裂缝密度 2.19)、依西 1 井的阿合组(裂缝密度 2.44)和吐西 1 井的阿合组(裂缝密度 2.17)(表 4)。岩心构造裂缝加权面密度较小的层系为明南 1 井的阿合组(裂缝密度 0.28)、吐孜 2 井的克孜勒努尔组(裂缝密度 0.14)和阿合组(裂缝密度 0.25)、库北 1 井的阳霞组(裂缝密度 0.17)。

根据前面提出的本区岩心构造裂缝发育程度评级方案, 库车坳陷东部中下侏罗统构造裂缝发育程度可以划分出五级。克孜勒努尔组的构造裂缝发育程度

较高(II 级以上)的井包括: 克孜 1 井和依南 2 井; 阳霞组的构造裂缝发育程度较高(II 级以上)的井包括: 克孜 1 井、依南 4 井、依深 4 井和吐西 1 井; 阿合组的构造裂缝发育程度较高(II 级以上)的井包括: 克孜 1 井、依西 1 井、依南 4 井、依深 4 井、依南 2、依南 2C 和吐西 1 井, 尤其依南 2 井阿合组构造裂缝发育程度达到 I 级, 为本区最高级, 裂缝十分发育, 并获工业气流。然而依南 2 井以东的依南 5 井的阿合组 and 阳霞组构造裂缝均为三级, 相对不发育, 未获工业气流。可见, 库车坳陷东部依南地区的致密砂岩储层因素中, 构造裂缝十分重要。

库车坳陷东部 12 口井的克孜勒努尔组构造裂缝测量统计结果表明: 克孜 1-依西 1 地区的构造裂缝面密度最高, 多为中等倾角的裂缝, 但半数被充填, 有效性较差; 依南北部的依南 4-依深 4 井区的裂缝面密度较低, 多为中低倾角裂缝且未充填, 有效性较好,

Table 4. Statistics of Mid-lower Jurassic core fractures in Kuche subbasin
表 4. 库车坳陷东部中下侏罗统岩心构造裂缝统计表

井号	地层	实测的加权裂缝面密度 m^{-1}	岩心长度 m	裂缝发育级别
库北 1 井	克孜勒努尔组	0.46	6.80	IV
	阳霞组	0.17	5.06	IV
	阿合组	-	-	-
克孜 1 井	克孜勒努尔组	3.22	18.10	II
	阳霞组	2.12	17.25	II
	阿合组	3.25	12.68	II
依西 1 井	克孜勒努尔组	0.39	34.43	IV
	阳霞组	0.93	41.98	III
	阿合组	2.44	4.50	II
依南 4 井	克孜勒努尔组	0.85	7.70	III
	阳霞组	1.58	40.25	II
	阿合组	1.16	125.50	II
依深 4 井	克孜勒努尔组	0.90	17.35	III
	阳霞组	1.38	73.25	II
	阿合组	1.12	44.64	II
依南 2 井	克孜勒努尔组	1.53	27.96	II
	阳霞组	0.67	49.59	III
	阿合组	7.03	17.02	I
依南 2C 井	克孜勒努尔组	-	-	-
	阳霞组	0.71	8.02	III
	阿合组	2.19	29.42	II
依南 5 井	克孜勒努尔组	-	-	-
	阳霞组	0.60	16.27	III
	阿合组	0.71	52.48	III
吐孜 2 井	克孜勒努尔组	0.14	35.13	IV
	阳霞组	0.52	9.94	III
	阿合组	0.25	10.25	IV
吐西 1 井	克孜勒努尔组	-	-	-
	阳霞组	1.86	12.59	II
	阿合组	2.17	3.26	II
明南 1 井	克孜勒努尔组	-	-	-
	阳霞组	-	-	-
	阿合组	0.28	37.98	IV
野云 2 井	亚格列木组	0.20	9.42	IV

但裂缝密度较低;吐孜 2 井区的构造裂缝面密度最低,多为中低倾角的裂缝,且多数被充填,有效性很差;在库车坳陷东部相对而言,依南 2 井区的克孜勒努尔组构造裂缝面密度较高,多为低倾角,且多数未充填,有效性较好(图 2)。可见,克孜勒努尔组在依南 2 井区发育有效的构造裂缝,这与依南 2 井区位于局部背斜构造和靠近断裂密切相关(图 1)。

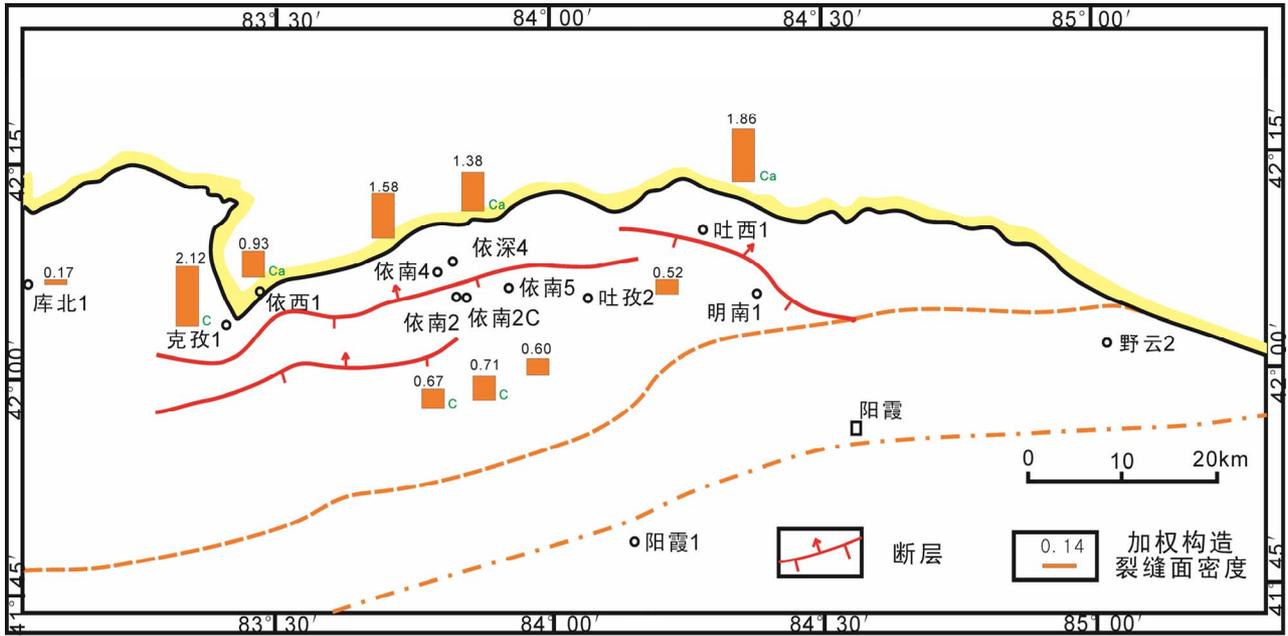
库车坳陷东部 12 口井的阳霞组构造裂缝测量统计结果表明:克孜 1-依西 1 地区的构造裂缝面密度较高,多为中等倾角的裂缝,但半数被充填,有效性较差;依南北部的依南 4-依深 4 井区的裂缝面密度较高,多为中高倾角裂缝且未充填,有效性较好;吐孜 2 井区的构造裂缝面密度最低,多为中低倾角的裂缝,且多数未充填,有效性好;依南 2 井区的阳霞组构造裂缝面密度也较低,多为中低倾角裂缝,多数未充填,有效性较好;依南 5 井区的构造裂缝最低,多为中高倾角裂缝,

多数未充填,有效性也很好(图 3)。可见,克孜勒努尔组在依南 2-依南 5-吐孜 1 井区虽然裂缝多数未充填,但裂缝密度并不高,而克孜-依西地区裂缝密度虽然较高,但半数被充填,有效性差,相对而言,依南 4-依深 4 井区的裂缝密度较高且有效。因此,库车坳陷东部依南 4-依深 4 井区的阳霞组更发育有效构造裂缝,这与依南 4-依深 4 井区为依奇克里克背斜密切相关,通常背斜的核部和顶部裂缝相对比较发育(图 1)。

库车坳陷东部 12 口井的阿合组构造裂缝测量统计结果表明:克孜 1-依西 1 地区的构造裂缝面密度较高,多为中高倾角的裂缝,但多数被充填,有效性较差;依南北部的依南 4-依深 4 井区的裂缝面密度较高,多为中等倾角裂缝且未充填,有效性较好;吐孜 2-明南 1 井区的构造裂缝面密度最低,低-高倾角的裂缝,多数未充填,有效性好,但裂缝密度太低;依南 5 井区构造裂缝面密度很低,多为中低倾角,且多数被充

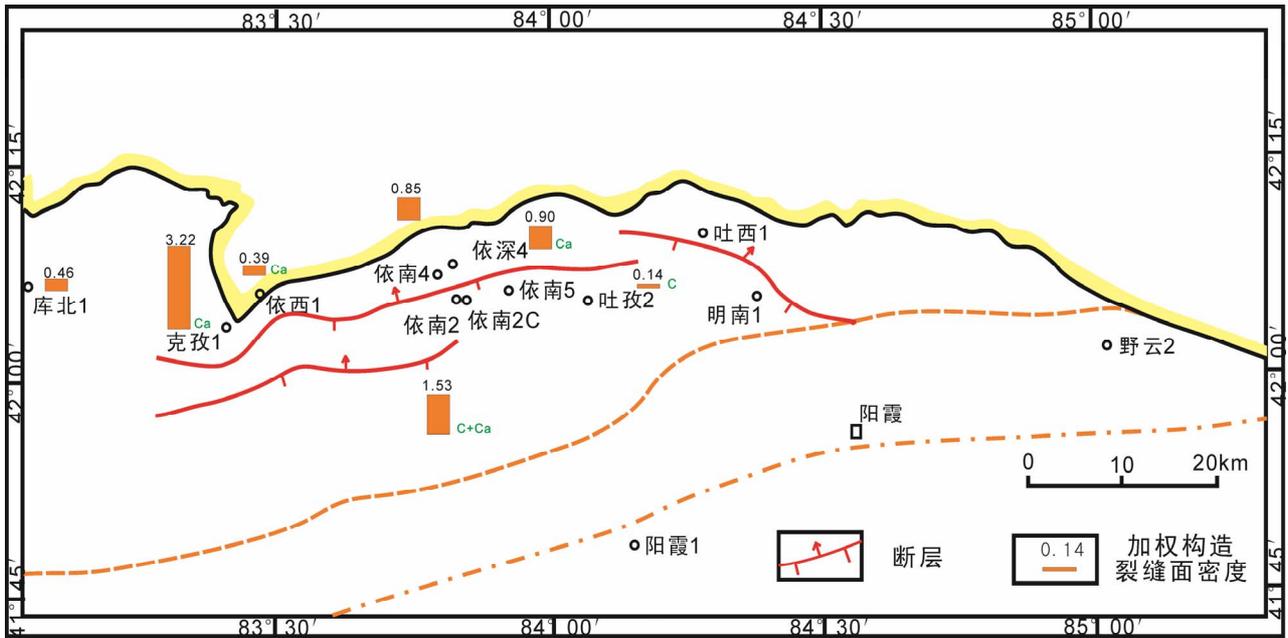
填；在库车坳陷东部相对而言，依南2、依南2C和吐西1三口井的阿合组构造裂缝面密度相对较高，多为中-高倾角裂缝，且大多数未充填，有效性较好(图4)。其中，依南2井的阿合组构造裂缝最发育，裂缝

面密度高达7.03。可见，库车坳陷东部的阿合组在依南2-依南4-依深4-吐西1一带有有效构造裂缝相对更发育(图4)，这与依南2-依南4-依深4-吐西1一带为褶皱发育区，局部有背斜构造密切相关(图1)。



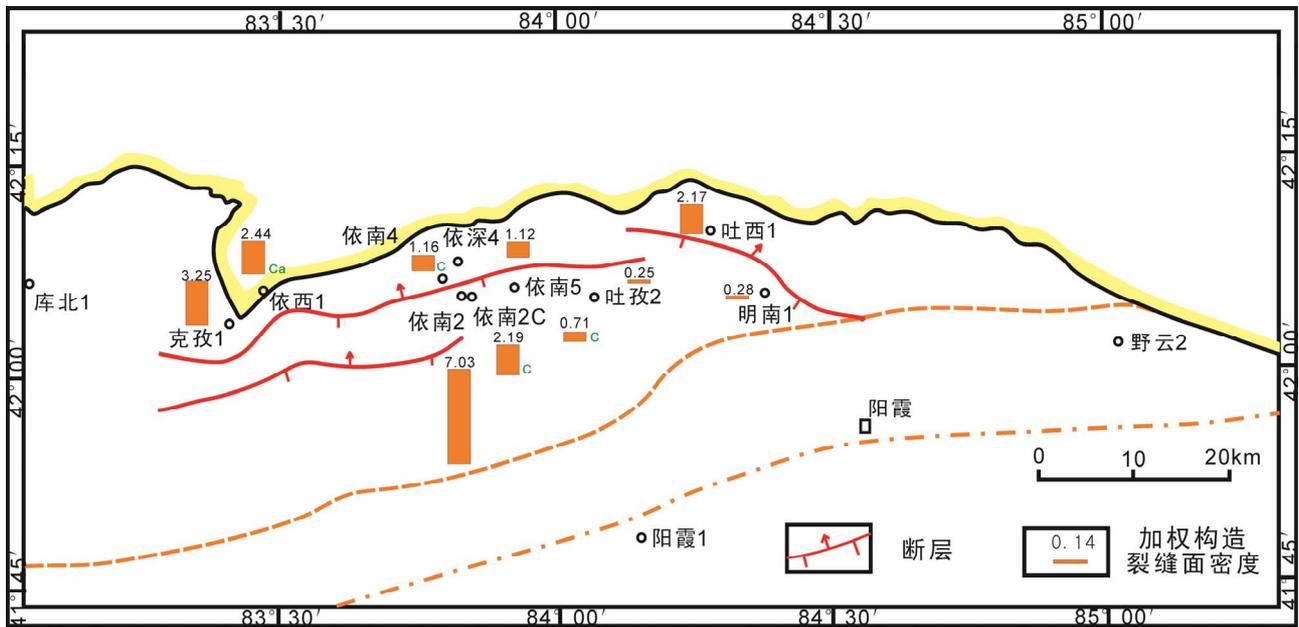
图中的绿色字母代表充填成分：Ca代表钙质充填；C代表碳质充填。

Figure 2. The distribution of structural fracture densities for Kezilenur Formation cores in the Kuche subbasin
图2. 库车坳陷东部克孜勒努尔组岩心构造裂缝面密度分布图



图中的绿色字母代表充填成分：Ca代表钙质充填；C代表碳质充填。

Figure 3. The distribution of structural fracture densities for Yangxia Formation cores in the Kuche subbasin
图3. 库车坳陷东部阳霞组岩心构造裂缝面密度分布图



图中的绿色字母代表充填成分：Ca 代表钙质充填；C 代表碳质充填。

Figure 4. The distribution of structural fracture densities for Ahe Formation cores in the Kuiche subbasin
图 4. 库车坳陷东部阿合组岩心构造裂缝面密度分布图

4. 结论

不同地区构造裂缝发育程度不同，研究目的不同，会有不同的评价标准。近些年来，构造裂缝的测量与评价方法在塔里木油田的裂缝地质建模和裂缝评价中得到广泛的应用，并取得一定的应用效果^[15-18]。本文针对库车坳陷东部的致密砂岩构造裂缝的评价要求提出了针对该地区的裂缝评价方案。研究区构造裂缝发育程度共划分了五级。根据库车坳陷东部 12 口井岩心构造裂缝测量统计获得的中下侏罗统克孜勒努尔组、阳霞组和阿合组构造裂缝加权面密度分析，阿合组的构造裂缝普遍比阳霞组和克孜勒努尔组要发育。库车坳陷东部的依南 2-依南 4-依深 4-吐西 1 井一带的阿合组构造裂缝相对更发育，且多数未充填，有效性好，有利于裂缝型致密砂岩气的勘探开发。

本文提出的构造裂缝发育程度的评价标准主要基于裂缝面密度，虽然体密度能够最真实地反映裂缝发育的真密度，但体密度很难测量，因此面密度相对来说可测量并接近裂缝发育的真实密度。由于井下裂缝的测量主要基于岩心的裂缝测量，其他参数如开度通常是不真实，因此本文主要依据裂缝面密度进行裂缝发育程度的等级划分。本文提出的评价标准主要用于新疆塔里木盆地北部的库车坳陷侏罗系致密砂

岩的裂缝发育程度评价，在运用本标准评价其他地区时需要做一些调整，但基本方法是适用的。

5. 致谢

该文获得国家重大专项课题和塔里木油田科技攻关课题的资助。参加研究工作的还有北京大学地球与空间科学学院的李乐、张庆莲和孟庆峰等，在此一并感谢。

参考文献 (References)

- [1] J. A. Masters. Deep basin gas trap, western Canada. AAPG Bulletin, 1979, 63(2): 152-181.
- [2] C. W. Spencer. Geologic aspects of tight gas reservoirs in the Rocky Mountain region. Journal of Petroleum Geology, 1985, 37(7): 1308-1314.
- [3] A. H. Stephen. Tight gas sands. Journal of Petroleum Technology, 2006, 58(6): 88-94.
- [4] 邹才能著. 非常规油气地质[M]. 北京: 地质出版社, 2011: 310.
- [5] 刘云天, 陈子焯, 施泽进等. 库车坳陷下侏罗统阿合组高分辨率层序地层特征[J]. 成都理工大学学报, 2004, 31(1): 40-45.
- [6] 陈子焯, 寿建峰, 张惠良等. 库车坳陷吐格勒明下侏罗统阿合组储层沉积非均质性[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(1): 60-63.
- [7] 寿建峰, 斯春松, 张达. 库车坳陷下侏罗统岩石古应力场与砂岩储层性质[J]. 地球学报, 2004, 25(6): 447-452.
- [8] 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层性质的控制因素[J]. 地质论评, 2001, 17(3): 272-

- 277.
- [9] 管英柱, 李军, 张超谟等. 致密砂岩裂缝测井评价方法及其在迪那气田的应用[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(2): 70-74.
- [10] 李军, 张超谟, 肖承文等. 库车地区砂岩裂缝测井定量评价方法及应用[J]. 天然气工业, 2008, 28(10): 25-27.
- [11] 范·高尔夫 - 拉特. 裂缝油藏工程基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989: 439.
- [12] 侯贵廷. 构造裂缝的分形分析方法[J]. 应用基础与工程科学, 1994, 2(4): 299-305.
- [13] 王根海, 寿建峰. 库车坳陷东部下侏罗统砂体特征与储集层性质的关系[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(4): 33-37.
- [14] 曾联波, 周天伟. 塔里木盆地库车坳陷储层裂缝分布规律[J]. 天然气工业, 2004, 24(9): 23-25.
- [15] 李乐, 侯贵廷, 潘文庆等. 逆断层对致密岩石构造裂缝发育的约束控制[J]. 地球物理学报, 2011, 54(2): 466-473.
- [16] 张庆莲, 侯贵廷, 潘文庆, 韩剑发, 琚岩, 李乐, 肖芳锋. 新疆巴楚地区走滑断裂对碳酸盐岩构造裂缝发育的控制[J]. 地质通报, 2010, 29(8): 1160-1167.
- [17] 鞠玮, 侯贵廷, 潘文庆, 韩剑发, 琚岩. 塔中 I 号断裂带北段构造裂缝面密度与分形统计[J]. 地学前缘, 2011, 18(3): 317-323.
- [18] 张鹏, 侯贵廷, 潘文庆, 琚岩, 张庆莲, 李乐, 舒武林. 新疆柯坪地区碳酸盐岩对构造裂缝发育的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(6): 1-6.