文章编号：1006-6616（2010）03-0260-11

太古宇潜山不同岩石类型裂缝发育潜力分析

——以辽河西部凹陷为例

蔡国刚[1,2]，童亨茂[3]

（1. 中国矿业大学煤炭资源与安全学院，北京 100083；
2. 中国石油辽河油田公司勘探开发研究院，辽宁 盘锦 124010；
3. 中国石油大学（北京）油气资源与探测国家重点实验室，北京 102249）

摘 要：太古宇结晶变质岩是潜山的重要储集层岩石类型，然而对太古宇不同类型变质岩裂缝发育潜力的相对大小迄今还没有明确的标志。通过大量的岩石力学实验、岩心裂缝观测、成像测井资料分析和油田生产实践等相结合的方法，探索分析太古宇不同岩石类型裂缝发育的相对潜力，并提出了脆性系数（f_b）的概念。岩石力学试验结果表明，太古宇不同岩性的岩石力学性质存在差异，脆性系数总体有随暗色矿物增加而减小的趋势；定向构造发育的片麻岩类岩石的力学参数与变形方向密切相关，其中片麻理与加载方向夹角大于 45°时的脆性系数 f_b 明显小于夹角小于 45°时的脆性系数。大量生产实践资料表明，定向构造发育的片麻岩类容易发育剪裂缝，而定向构造不发育的粒岩类则容易发育张性裂缝。综合分析揭示，不同岩性剪裂缝发育潜力从大到小的次序为：片麻岩类→混合花岗岩类→角闪岩；不同岩性张性裂缝发育潜力从大到小的次序为：混合花岗岩类、浅粒岩→片麻岩类→角闪岩。

关键词：裂缝；太古宇潜山；裂缝发育潜力；岩石力学实验；脆性系数
中图分类号：TU452　　**文献标识码**：A

0 引言

2005 年 11 月，辽河西部凹陷兴马潜山带完钻的兴古 7 井在揭露潜山太古宇岩层（1640m）以后获得工业油气流[1]；仅在辽河西部凹陷就发现了包括杜家台潜山、欢喜岭潜山、小洼潜山、牛心坨潜山、曙光潜山、兴隆台潜山、马圈子潜山、双台子潜山等多个太古宇潜山油藏；辽东湾发现锦州 25-1S 大型太古宇潜山油气藏[2]等，展示了太古宇潜山良好的勘探前景。

太古宇潜山的储集层是各种类型的结晶变质岩。物性分析[3-5]表明，结晶变质岩储集层

收稿日期：2009-11-19
基金项目：国家自然科学基金项目（40772086）；CNPC 油气勘探超前共性科技项目（07-01C-01-04）。
作者简介：蔡国刚（1965-），男，河北省承德市人，高级工程师，海洋应用地球物理专业，主要从事石油地质综合研究工作。E-mail：caiguogang@sina.com

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

基质孔隙度很低，一般小于 5%，渗透率大多低于 $1\times10^{-3}\mu m^2$，因此这些基质孔隙对油气储渗作用非常有限，构造裂缝是变质岩储集层的主要储集空间和运移通道，已发现的太古宇潜山油藏类型均为裂缝性油藏[6-8]。这样，如何寻找裂缝发育带成为滚动勘探和开发的核心问题。

裂缝的发育由外因（构造变形）和内因两方面决定[6,9-12]，其中岩性是控制裂缝发育的内因，也决定着裂缝发育的潜力（成为储集层的潜力）。已有的勘探实践表明，太古宇结晶变质岩中，不同岩性裂缝的发育程度存在很大差异，有的可以成为储集层，有的则成为隔层（非储集层）[7,8]。由于自然界不存在两个变形条件完全一致的地区，只依赖实际地质资料分析难以确定不同岩石类型裂缝发育的潜力。综合已有的勘探实践和研究成果，至少存在以下 3 个方面的科学问题还没有得到很好的解决：①对太古宇不同岩石类型裂缝发育潜力的相对先后次序没有明确的认识；②太古宇结晶变质岩裂缝发育潜力的具体控制影响因素有哪些；③构造变形方式与裂缝发育潜力是否存在关系。本文以辽河西部凹陷（特别是兴马潜山带）为例，综合运用岩石力学实验、岩心裂缝观测、成像测井资料分析和构造解析等相结合的方法探索上述问题，为太古宇潜山的滚动勘探提供理论指导。

1　区域地质概况和太古宇岩石类型

1.1　区域地质概况

辽河西部凹陷位于渤海湾盆地的东北角（见图 1），大地构造上位于华北克拉通的东北部，基底具有华北克拉通型的地质演化和结构特征。兴马潜山构造带是兴隆台—马圈子潜山构造带的简称，是辽河西部凹陷中央构造带的重要组成部分，主体由太古宇的结晶变质岩组成（还包含部分中生界的碎屑岩和侵入岩）。太古宇结晶变质岩形成以来，经历了中生代的印支运动和燕山运动，以及新生代的喜马拉雅运动，形成了复杂的断层和裂缝系统，使得太古宇的结晶变质岩基底都有可能成为“新生古储”的油气储集层。而最终能否成为储集层，除了构造演化造成的构造变形因素（裂缝形成的外因）外，与岩性及其结构（片麻理的发育情况）也密切相关。

1.2　太古宇岩性特征和类型

野外、岩心等方面的观察表明，太古宇的岩性十分复杂。通过系统的岩性分析，辽河西部凹陷钻井揭示的太古宇的结晶变质岩系由一套区域变质岩和极少量受构造作用改造成的碎裂（动力）变质岩组成（见表 1）。粒岩类和片麻岩类的差异主要表现为是否存在定向构造（片麻理），而矿物组分及其含量具有很大的相似性，所对应岩石类型的矿物成分（主要由石英、长石、黑云母和角闪石等矿物组成）及其含量是大体一致的，如浅粒岩与二长片麻岩的成分十分相似。从浅粒岩（二长片麻岩）到角闪岩（角闪斜长片麻岩），浅色矿物（以石英为代表）的含量不断减少，暗色矿物的含量不断增加。

混合花岗岩是结晶变质岩中暗色矿物含量最少的岩石类型，主要包括斜长混合花岗岩和二长混合花岗岩。二长混合花岗岩主要矿物为斜长石、钾长石、石英、黑云母，斜长石含量 30% ~50%，钾长石含量 35% ~40%，花岗变晶结构，块状构造、片麻状构造；斜长混合花岗岩主要矿物为斜长石、石英、黑云母（角闪石），斜长石含量 60% ~70%，花岗变晶结构，片麻状构造。

本文主要研究上述不同类型区域变质岩的裂缝发育潜力及其变化规律。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

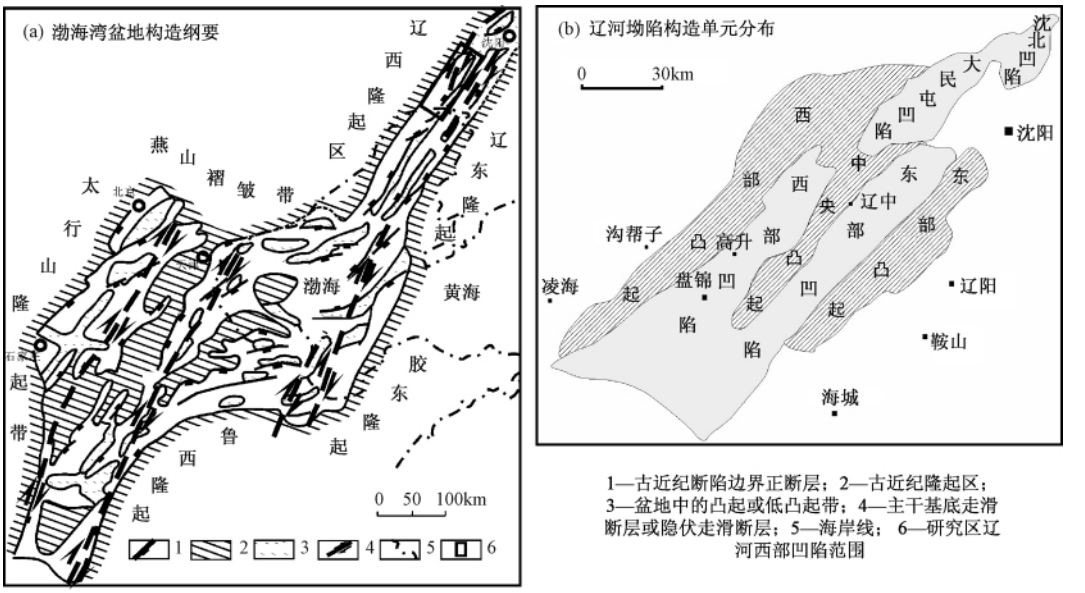

图 1 辽河西部凹陷区域构造位置图

Fig. 1 A map showing the regional tectonic location of Liaohe Western Sag

表 1 太古宇结晶变质岩储集层岩石类型

Table 1 Reservoir rock types of Archean crystalline metamorphic

成因类型	岩类	主要岩石类型
区域变质岩	不具定向构造的岩石（粒岩类）	浅粒岩，变粒岩，角闪岩
	具定向构造的岩石（片麻岩类）	二长片麻岩，黑云母斜长片麻岩，角闪斜长片麻岩
	混合花岗岩类	斜长混合花岗岩，二长混合花岗岩
碎裂（动力）变质岩	压碎岩类	碎裂岩
	糜棱岩类	糜棱岩

2 岩石力学性质分析

首先通过岩石力学实验，在测定太古宇不同岩石类型力学参数的基础上，分析不同岩石的破裂潜力。

岩石力学实验是在中国地质科学院地质力学研究所 TAW-2000 微机控制电液伺服试验机上完成的，样品为圆柱形，直径 2.5cm，长 5.0cm（见图 2a），测定的参数包括密度、弹性模量、抗剪强度和泊松比等。每个样品都加载到屈服为止（见图 2b）。为了使结果具有统计意义，进行了大量的实验，共进行了 62 块样品的实验测试，基本包含了太古宇的各种岩石类型。

已有的研究表明，裂缝发育的潜力（在相同的构造条件下裂缝的相对发育程度）主要决定于岩石的脆性[10]。岩石的脆性是与韧性相对应的概念，可以用岩石破裂前产生的应变量来描述，应变量越小，脆性就越大；反之脆性就越小（韧性越大）。在剪切破坏的条件下，岩石加载破坏前应变量的大小主要取决于杨氏模量 E 和抗剪强度 C，与 E 成反比，与 C

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

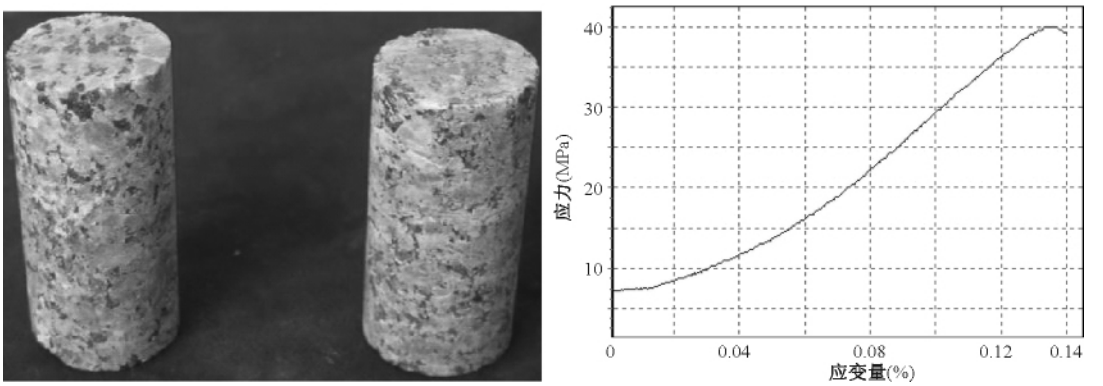

图 2　岩石力学试验的应力—应变曲线及岩样特征（哈 21 井，混合花岗岩）

Fig. 2　Stress-strain curves of rock mechanical test and characteristics of rock samples

成正比。这样 E 和 C 比值（E/C）可以定量反映岩石的脆性特征，为此，把 E/C 定义为脆性系数 f_b，即 $f_b = E/C$。另外泊松比 μ 也可以定性地反映岩石的脆性，泊松比越小，脆性就越大。

由于试验的样品都来自钻井取得的岩心，要获得理想完整的岩样比较困难，本次试验的很多样品都存在一定的缺陷，加上岩石力学试验本身存在的误差，造成同一岩石类型测得的实验结果存在较大的差异（见表 2）。但大量的试验可以弥补这方面的问题，统计结果应该能较好地反映岩石相对的力学性质。

表 2　西部凹陷太古宇不同岩石类型岩石力学试验参数分布

Table 2　A list of parameters used in rock mechanical test for different types of Archean rock in West Depression

井号	岩样号	岩性	弹性模量（E）/GPa	泊松比（μ）	内聚力（C）/MPa	脆性系数（f_b）/10^3
海 2	H2-1	混合花岗岩	25.29	0.111	44.67	0.57
	H2-2	混合花岗岩	24.29	0.143	38.35	0.63
	H2-3	混合片麻岩	19.51	0.094	34.50	0.57
海 26	H2-4	混合片麻岩	28.43	0.094	33.41	0.85
	H2-5	碎斑岩	29.97	0.139	36.06	0.83
	H2-6	碎斑岩	20.28	0.105	48.51	0.42
海 28	H2-7	碎斑岩	23.83	0.084	8.39	2.84
海南 17	H3	混合片麻岩	9.43	0.055	14.53	0.65
赵古 1	Z2	混合片麻岩	44.09	0.146	34.50	1.28
赵 6	Z1	混合花岗岩	64.15	0.234	28.34	2.26
洼 85	W1-2	混合花岗岩	38.94	0.167	36.38	1.07
洼 56	W1-1	混合花岗岩	38.81	0.297	29.05	1.34
台 601	T1-1	混合花岗岩	44.26	0.351	15.88	2.79
	T1-2	混合花岗岩	32.54	0.249	15.50	2.10
冷 127	L1-3	混合片麻岩	14.97	0.077	6.19	2.42
	L1-4	混合片麻岩	14.87	0.148	60.31	0.25

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

续表 2

井号	岩样号	岩性	弹性模量（E）/GPa	泊松比（μ）	内聚力（C）/MPa	脆性系数（f_b）/10^3
兴古 8	X1-1	混合片麻岩	34.81	0.322	15.07	2.31
	X1-2	角闪岩	55.90	0.143	32.52	1.72
	X1-3	角闪岩	63.83	0.158	34.15	1.87
兴古 9	X1-4	碎斑岩	49.39	0.215	18.82	2.62
马古 3	M1-1	黑云母斜长片麻岩	43.49	0.123	16.06	2.71
	M1-2	黑云母斜长片麻岩	50.62	0.210	16.06	3.15
	M1-3	黑云母斜长片麻岩	55.01	0.176	30.65	1.79
齐古 8	Q1-8	变粒岩	67.26	0.253	19.89	3.38
齐古 9	Q1-9	混合花岗岩	33.17	0.296	31.11	1.07
齐古 15	Q1-1	混合花岗岩	35.38	0.158	6.22	5.69
	Q1-2	混合花岗岩	39.60	0.185	45.27	0.87
	Q1-3	角闪岩	68.33	0.238	40.05	1.71
齐古 16	Q1-4	混合花岗岩	9.93	0.301	6.22	1.60
	Q1-5	混合花岗岩	14.49	0.305	6.22	2.33
	Q1-6	混合花岗岩	50.82	0.285	28.46	1.79
	Q1-7	混合花岗岩	90.77	0.279	7.79	11.65
董 6	D1	混合花岗岩	20.34	0.059	44.52	0.46
铁 25	T2-1	斜长角闪片麻岩	27.28		28.94	0.94
安 150	A1-1	碎斑岩	24.25	0.193	42.33	0.57
	A1-2	碎斑岩	18.75	0.086	35.27	0.53
	A1-3	混合花岗岩	27.19	0.207	14.53	1.87
	A1-4	混合花岗岩	14.87	0.148	15.23	0.98
	A1-5	混合花岗岩	6.88	0.079	15.23	0.45
	A1-6	混合花岗岩	22.55	0.139	36.99	0.61
曹 18	C1-1	黑云母斜长片麻岩	18.93	0.130	48.64	0.39
曹 605	C1-2	混合花岗岩	20.32	0.052	22.56	0.90
法 31	F1	黑云母斜长片麻岩	13.88	0.134	29.17	0.48
哈 20	H1-1	黑云母斜长片麻岩	10.92	0.096	14.57	0.75
	H1-2	黑云母斜长片麻岩	19.78	0.070	36.34	0.54
	H1-3	斜长角闪片麻岩	9.82	0.047	29.62	0.33
哈 21	H1-4	斜长角闪片麻岩	17.26	0.035	38.97	0.44
	H1-5	混合花岗岩	10.08	0.118	12.88	0.78
哈 30	H1-6	混合花岗岩	24.81	0.143	15.63	1.59
哈 31	H1-7	黑云母斜长片麻岩	16.28	0.176	42.72	0.38
	H1-8	黑云母斜长片麻岩	55.14	0.155	17.03	3.24
哈 31-14-18	H1-10	混合片麻岩	18.76	0.114	22.16	0.85
	H1-11	混合片麻岩	9.62	0.133	8.00	1.20

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

续表 2

井号	岩样号	岩性	弹性模量（E）/GPa	泊松比（μ）	内聚力（C）/MPa	脆性系数（f_b）/10^3
哈 31-14-20	H1-9	混合片麻岩	28.53	0.119	32.14	0.89
沈 236	S1-1	斜长角闪片麻岩	15.67	0.351	21.50	0.73
	S1-4	斜长角闪片麻岩	19.73	0.131	42.74	0.45
沈 252	S1-5	角闪岩	68.03	0.331	37.07	1.84
沈 276	S1-6	混合花岗岩	54.98	0.213	62.84	0.87
沈 289	S1-10	黑云母斜长片麻岩	25.37	0.114	11.55	2.20
沈 630	S1-14	黑云母斜长片麻岩	19.45	0.160	1.94	10.03
胜 12	S2-1	变粒岩	15.45	0.161	10.38	1.49
胜 14	S2-2	黑云母斜长片麻岩	32.74	0.271	33.18	0.99

注：脆性系数 $f_b = E/C$

为了能相对准确地确定试验岩样的岩性，对每个岩样对应的岩石都进行了切片分析。

岩石力学试验结果表明，同种岩性测得的岩石力学参数（E，C 等）存在较大的差异（见表 2），造成这种差异的原因主要是岩样的内部结构，如先存破裂等，其次是岩性本身的变化。

试验结果统计表明，暗色矿物含量丰富的角闪岩 E 和 C 值均较大，E 值一般为 50 ~ 70GPa，C 值一般为 35 ~ 45MPa，平均脆性系数 f_b 中等（见表 2、图 3、图 4）。

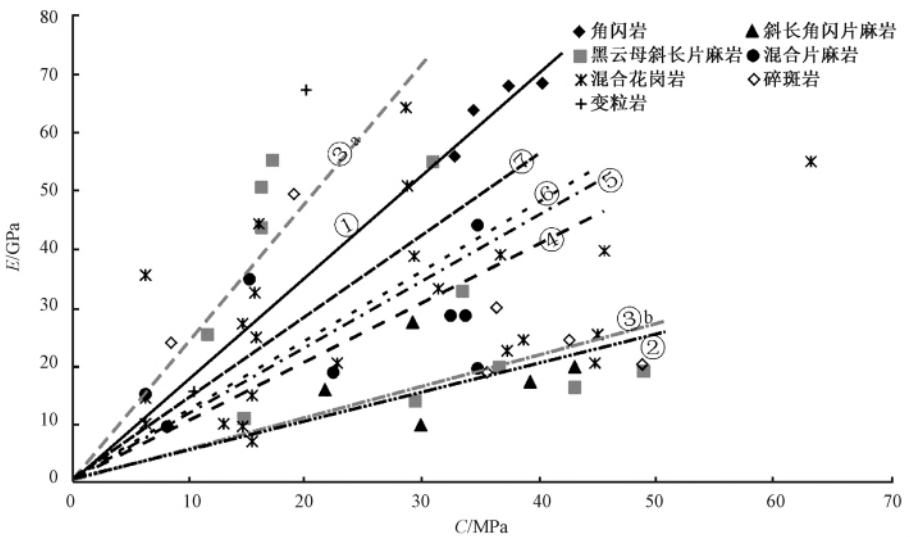

图 3　太古宇不同类型岩石弹性模量 E 与内聚力 C 关系分布图

Fig. 3　The relationship between elastic modulus E and the cohesion C in different types of Archean rocks

①—角闪岩；②—斜长角闪片麻岩；③a—黑云母斜长片麻岩（加载方向与片麻理夹角小于 45°）；③b—黑云母斜长片麻岩（加载方向与片麻理夹角大于 45°）；④—混合片麻岩；⑤—混合花岗岩；⑥—碎斑岩；⑦—变粒岩

片麻岩类 E 和 C 值变化很大，E 值为 10 ~ 60GPa，C 值为 10 ~ 50MPa。片麻理十分发育的黑云母斜长片麻岩的脆性系数 f_b 值随着加载方向的变化而发生显著变化，片麻理与加载方向夹角大于 45°时脆性系数 f_b 值小于 1×10^3，而片麻理与加载方向夹角小于 45°时脆性系

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

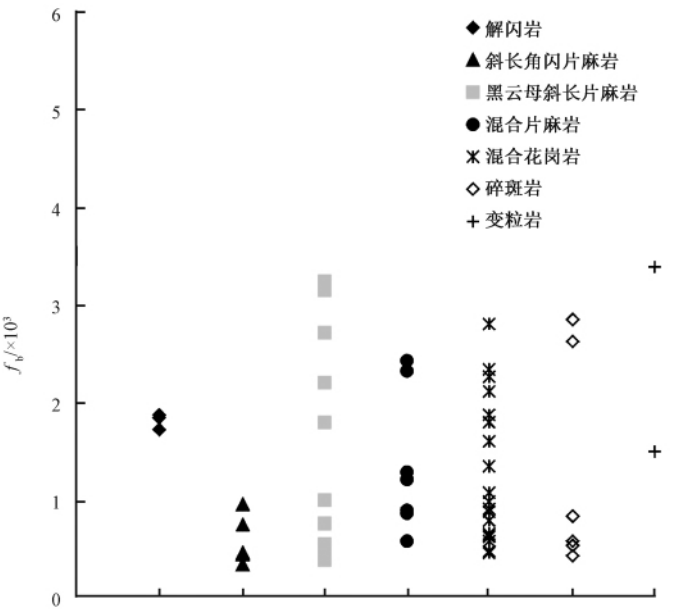

图 4 太古宇不同类型岩石脆性系数分布图

Fig. 4 Brittle coefficient of different types of Archean rocks

数 f_b 值为 $1.8\times10^3\sim3.5\times10^3$，片麻理与加载方向夹角大于 45°时的脆性系数 f_b 明显小于夹角小于 45°时的脆性系数。暗色矿物含量相对较高的斜长角闪片麻岩 E 值偏小，为 10～28GPa，而 C 值则中等偏大，为 22～44MPa，平均脆性系数 f_b 相对最小，为 $0.3\times10^3\sim1\times10^3$（见表 2、图 3、图 4）。

混合岩类 E 和 C 值变化也很大，变化的范围与片麻岩类大体一致，平均脆性系数 f_b 比片麻岩类略小。其中 C 值的大小与定向构造（片麻理）的发育密切相关，随着片麻理的发育，C 值明显减小，而 E 值则没有显著的变化，从而导致 f_b 明显增大（见表 2、图 3、图 4）。

综合试验结果，得到以下认识：

①杨氏模量 E 和抗剪强度 C 随着暗色矿物的增加而增加。

②片麻理的发育对 C 值的影响明显大于对 E 值的影响，随着片麻理的发育，C 值明显减小，而 E 值变化不大。

③对定向构造发育的片麻岩，加载方向对 C 值的影响很大，而对 E 值的影响相对较小，从而对脆性系数造成较大的影响。片麻理与加载方向夹角大于 45°时的脆性系数 f_b 明显小于夹角小于 45°时的脆性系数。依据岩石力学性质，片麻岩裂缝的发育与主应力的方向有密切的关系。

④片麻岩类中，暗色矿物含量较高的斜长角闪片麻岩脆性系数最小，黑云母斜长片麻岩的脆性系数变化最大，混合片麻岩的脆性系数也有显著的变化。因此，从岩石力学性质看，斜长角闪片麻岩裂缝不发育，黑云母斜长片麻岩裂缝和混合花岗岩裂缝发育的变化很大，与主应力与片麻理方向的配置关系比较紧密。

⑤结晶变质岩中，影响岩石力学性质的因素主要是暗色矿物的含量和片麻理的发育情况，总体随着暗色矿物的减少和片麻理发育程度的增加，裂缝发育的潜力不断增加。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3　油田生产、测井资料和岩心分析

3.1　油田生产实践分析

油田生产实践表明，太古宇变质岩中，浅粒岩、混合岩等岩石结构均匀并均为中细晶或中细粒结构且暗色矿物含量较少的岩性，以及有一定暗色矿物含量并具有定向构造的片麻岩均可以成为储集层。杜家台潜山、欢喜岭潜山、小洼潜山、牛心坨潜山北部小部分地区以及曙光古潜山的极少部分，其储集层主要是浅粒岩和混合岩类；兴隆台潜山、马圈子潜山、双台子潜山的储集层主要是片麻岩。而暗色矿物很多的角闪岩和斜长角闪岩，则是非储集层(隔层)。裂缝的成因研究表明，浅粒岩和混合花岗岩储集层发育的潜山地区以发育张性裂缝为主；而以片麻岩为储集层的潜山地区则主要发育剪裂缝。变质岩储集体岩性总体上呈横向条带状展布，纵向上呈层状，且分布广泛，几乎在整个辽河西部凹陷均有发育。

3.2　测井资料分析

经过长期的生产实践，在辽河油田区已建立了比较准确的太古宇结晶变质岩的测井解释标准，可以通过测井资料解释建立比较准确的单井岩性剖面①。成像测井资料可以很准确地识别变质岩的裂缝[13-15]；另外，以成像测井资料为基础，再应用 GIS 信息挖掘技术，也可以比较准确地确定变质岩区单井不同层段裂缝的发育情况①。这样，每一口井不同岩性裂缝的发育情况可以直接进行对比分析。

虽然不同井段的构造变形因素（形成裂缝的外因）可能存在差异（如有断层通过等），但考虑到潜山不同层段均属于同一构造层，除断层的影响外，潜山不同层段变形的差异一般较小；另外，大量钻井的统计结果也可以不同程度地消除构造变形因素的影响。为此，本文利用 24 口井的测井解释成果①（该解释成果得到试油等生产实践的检验），来分析岩性与裂缝发育的关系。分析结果（见图 5）表明，片麻岩类裂缝发育的比例最大，裂缝发育段及比较发育段的比例平均为 35.3%；其次为混合岩，裂缝发育段及比较发育段的比例平均为 23.4%；而角闪岩和斜长角闪岩测井解释均没有裂缝发育。

3.3　岩心裂缝分析

由于取心的不连续性，岩心裂缝不能准确地表达裂缝的发育程度，但也有一定的统计意义。通过对辽河西部凹陷兴马潜山带陈古 1 井、马古 2 井、兴古 8 井等 20 口井岩心裂缝的统计分析，太古宇不同岩石类型或多或少都有裂缝发育（见图 6），唯角闪岩裂缝发育程度相对最低，片麻岩、角砾岩和混合片麻岩的裂缝相对较为发育，混合花岗岩的裂缝发育程度居中。

4　综合分析

油田生产实践表明，暗色矿物含量较少的混合花岗岩、浅粒岩，以及一定暗色矿物含量的片麻岩均可能成为储集层，而暗色矿物含量高的角闪岩（包括斜长角闪岩）则一般是非储集层；测井资料和岩心观测统计结果表明，片麻岩和混合片麻岩裂缝相对最为发育，其次是混合花岗岩，角闪岩裂缝最不发育；裂缝的发育、裂缝的发育程度与暗色矿物的含量和片

① 童亨茂，等. 西部凹陷冷东—兴马地区基底构造特征及成因机制. 中石油辽河油田公司研究报告，2009.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

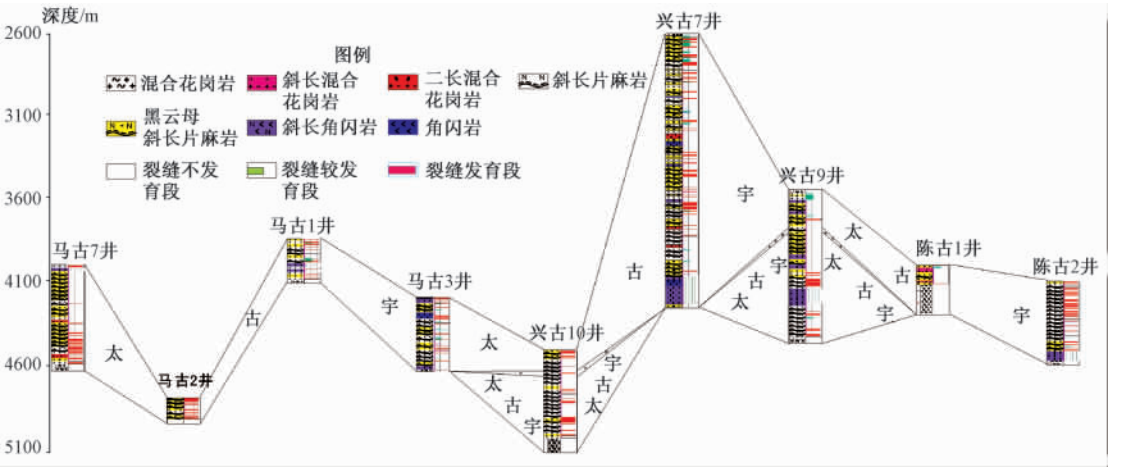

图 5 辽河西部凹陷兴马潜山带马古 7 井—陈古 2 井测井解释裂缝—岩性对比剖面图

Fig. 5 Fracture-lithology comparison between Well Magu 7 and Well Chengu 2 from well logging interpretation in Western Liaohe sag

麻理的发育相关，随着片麻理的发育及暗色矿物含量的减少，裂缝的发育程度增加。

岩石力学试验结果表明，太古宇的不同岩性的岩石力学性质存在差异，另外定向构造发育的片麻岩类岩石的力学性质与变形方向密切相关。暗色矿物含量高、结构比较均匀的角闪岩 E 值和 C 值均较大，不同样品之间的变化也较小，但试验测得的脆性系数 f_b 中等，单从试验的结果推断，角闪岩的裂缝也应比较发育。但岩心、测井和油田生产实践等均表明，角闪岩裂缝不发育，是非储集层。造成这种差异的原因可能与暗色矿物随着温度、压力的增加脆性减小有关（试验是在常温和 10 ~ 20MPa 的低围压下进行的）。定向构造发育的片麻岩类中，暗色矿物含量高的角闪斜长片麻岩，杨氏模量（E）较小，而抗剪强度（C）较大，脆性系数（f_b）相对最小，暗色矿物含量较少的片麻岩类的脆性系数（f_b）明显增大。片麻理十分发育的黑云斜长片麻岩的脆性系数（f_b）随着加载方向的变化而发生显著变化，片麻理与加载方向夹角大于 45°时的脆性系数（f_b）明显小于夹角小于 45°时的脆性系数。大量的生产实践资料表明，定向构造发育的片麻岩类容易发育剪裂缝，而定向构造不发育的粒岩类则发育张性裂缝比较容易。

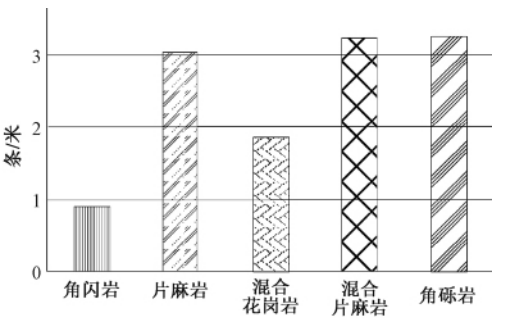

图 6 辽河西部凹陷兴马潜山带 Ar 不同岩性岩心裂缝线密度分布图

Fig. 6 Linear density of core fracture of different types of Archean rocks in Xingma buried hills, western Liaohe sag

5 结论与讨论

太古宇结晶变质岩的岩性比较复杂，包括不具定向构造的岩石的粒岩类、具定向构造的

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

岩石的片麻岩类和混合岩化形成的混合花岗岩类，另外还包括动力变质作用形成的碎裂岩和糜棱岩。不同岩性的岩石力学性质和成为储层的可能性存在很大的差异。

暗色矿物含量很高的角闪岩和角闪斜长片麻岩裂缝不发育，是非储集层；一定暗色矿物含量的片麻岩和暗色矿物含量很少的混合花岗岩和浅粒岩，均可能发育裂缝，均是潜在的储集层。不同岩性裂缝发育的潜力主要与暗色矿物含量、片麻理的发育、以及裂缝发育的类型有关。太古宇不同岩性剪裂缝发育潜力从大到小的次序为：片麻岩类→混合花岗岩类→角闪岩；不同岩性张性裂缝发育潜力从大到小的次序为：混合花岗岩类、浅粒岩→片麻岩类→角闪岩。

不同岩性裂缝发育的潜力需要综合分析。岩石力学实验反映的是实验室条件下的力学性质，与地下实际变形环境存在差异，但可以控制相同的加载条件；岩心、测井资料解释和油田生产实践能反映地下实际裂缝的发育情况，但变形情况存在差异。岩石力学实验和大量的实际裂缝资料结合起来，不同岩性裂缝发育的潜力就可以得到较好地揭示。

参 考 文 献

[1] 吴智勇，郭建华，吴东胜. 大民屯凹陷静安堡西侧低潜山变质岩储层裂缝发育特征 [J]. 石油与天然气地质，2001，22 (4)：322～325.
WU Zhi-yong，GUO Jian-hua，WU Dong-sheng. Fractured characteristics of metamorphic reservoirs in low buried-hill in west of Jing'anpu，Damintun depression [J]. Oil and Gas Geology，2001，22 (4)：322～325.

[2] 邓运华，彭文绪. 渤海锦州 25-1S 混合花岗岩潜山大油气田的发现 [J]. 中国海上油气，2009，21 (3)：145～151.
DENG Yun-hua，PENG Wen-xu. Discovering large buried-hill oil and gas fields of migmatitic granite on Jinzhou 25-1S in Bohai Sea [J]. China Offshore Oil and Gas，2009，21 (3)：145～151.

[3] 李云松. 辽河坳陷兴隆台变质岩潜山储层识别及评价 [J]. 中国石油勘探，2008，13 (5)：49～54.
LI Yun-song. Reservoir identification and evaluation in Xinlongtai metamorphic rock buried hill of Liaohe depression [J]. China Petroleum Exploration，2008，13 (5)：49～54.

[4] 郝琦，刘震，查明，等. 辽河茨榆坨潜山太古宇裂缝型储层特征及其控制因素 [J]. 吉林大学学报（地球科学版），2006，36 (3)：384～390.
HAO Qi，LIU Zhen，ZHA Ming，et al. Characters and controlling factors on the Archean fracture-type reservoirs of the Ciyutuo buried hill in the Liaohe Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition)，2006，36 (3)：384～390.

[5] 付崇清. 辽河油田变质岩潜山测井综合评价 [J]. 大庆石油地质与开发，2007，26 (5)：138～142.
FU Chong-qing. Comprehensive logging evaluation to metamorphic buried hill in Liaohe Oilfield [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing，2007，26 (5)：138～142.

[6] 范高尔夫-拉特. 裂缝油藏工程基础 [M]. 陈钟祥，金玲年，秦同洛，译. 北京：石油工业出版社，1989. 1～439.
Van Golf-LVL. The basis of fractured reservoir engineering [M]. CHEN Zhong-xiang，JIN Ling-nian，QIN Tong-luo，Translated. Beijing：Petroleum Industry Press，1989. 1～439.

[7] 童亨茂. 裂缝网络模型的建立及其在任丘潜山油藏中的应用 [J]. 西安石油大学学报，2006，21 (3)：17～22.
TONG Heng-mao. Fractures network model of analogue outcrop and its application in Renqiu buried hill reservoir [J]. Journal of Xi'an Petroleum University，2006，21 (3)：17～22.

[8] 柏松章，唐飞. 裂缝性潜山基岩油藏开发模式 [M]. 北京：石油工业出版社，1997. 1～340.
BAI Song-zhang，TANG Fei. Development model of fractured buried hills reservoirs [M]. Beijing：Petroleum Industry Press，1997. 1～340.

[9] 童亨茂. 储层裂缝描述与预测研究进展 [J]. 新疆石油学院学报，2004，25 (5)：9～14.
TONG Heng-mao. The progress of fracture description and prediction [J]. Journal of Xinjiang Petroleum Institute，2004，25 (5)：9～14.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[10] Nelson R A. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs [M]. Houston: Gulf Publishing Company, 1985. 1 ~ 320.

[11] Pollard D D, Aydin A. Progress in understanding jointing over the past century [J]. GSA Bulletin, 1988, 100: 1181 ~ 1204.

[12] Antonellini M, Mollema P N. A natural analog for a fractured and faulted reservoir in dolomite: Triassic Sella Group, Nouthern Italy [J]. AAPG Bulletin, 2000, 84 (3): 314 ~ 344.

[13] 童亨茂. 成像测井资料在构造裂缝预测和评价中的应用 [J]. 天然气工业, 2006, 26 (9): 58 ~ 61.
TONG Heng-mao. Implication of imaging well logging in tectonic fractures prediction and evaluation [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26 (9): 58 ~ 61.

[14] 童亨茂. 储层裂缝综合预测方法在 GBEIBE 油田地应用 [J]. 中国石油勘探, 2007, 12 (3): 77 ~ 80.
TONG Heng-mao. Reservoir fractures synthetic prediction method and its application: Take GBEIBE oilfield as an example [J]. China Oil Exploration, 2007, 12 (3): 77 ~ 80.

[15] 周新桂, 邓宏文, 操成杰. 储层构造裂缝定量预测研究及评价方法 [J]. 地球学报, 2003, 24 (2): 175 ~ 180.
ZHOU Xin-gui, DENG Hong-wen, CAO Cheng-jie. The methods for quantitative prediction and evaluation of structural fissures in reservoirs [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2003, 24 (2): 175 ~ 180.

ANALYSIS ON FRACTURE POTENTIAL FOR DIFFERENT TYPES OF ROCKS IN ARCHEAN BURIED HILL: A CASE STUDY OF LIAOHE WESTERN SAG

CAI Guo-gang [1,2], TONG Heng-mao [3]

(1. *College of Resources and Safety, China University of Mining Technology, Beijing* 100083, *China*;
2. *Exploration and Development Institute, PetroChina Liaohe Oilfield Company, Panjin*124010, *China*;
3. *State Key Laboratory of Petroleum and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing* 102249, *China*)

Abstract: The Archean crystallization metamorphic rocks are important reservoir rock types in buried hill, and fracture developmental potential for different types of Archean metamorphic rocks have not been yet clearly recognized. Based on a large number of rock mechanics experiments, core fracture observation, imaging logging data, and oil field production practices, the fracture developmental potential for different types of Archean metamorphic rocks has been analyzed. Rock mechanics test results show that the mechanical properties are changable in different Archean lithology, e. g., the brittleness coefficient generally decreases with increase of dark minerals. In addition, rock mechanics parameters are closely related to the loading direction in gneiss which bear well-developed oriented structure. The brittleness coefficient f_b gets greater when the angle between gneissosity and the loading direction changes from less than 45° into greater than 45°. A large number of oil production practice data show that shear fracture is more often seen in the gneiss with oriented structure, while tension fracture in the granulite without oriented structure. According to the comprehensive analysis, the development potential of shear fracture in different rocks can be arranged as: gneiss class > mixed granite class > amphibolite; while that of tension fracture as: mixed granite class, light granulite > gneiss class > amphibolite.

Key words: fracture; Archean buried hill; fracture development potential; rock mechanics test; brittleness coefficient

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net